Комитет экономического развития, промышленной политики и торговли
Правительства Санкт-Петербурга
ОАО "Центральный научно-исследовательский институт материалов"
ФГУП Центральный Научно-Исследовательский Институт
Конструкционных Материалов "ПРОМЕТЕЙ"
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Ассоциация "Электрод"
Региональный Северо-Западный межотраслевой аттестационный центр НАКС
Национальное Агентство предприятий-производителей сварной продукции
Национальное Агентство предприятий-производителей сварочных материалов
Альянс сварщиков Санкт-Петербурга и Северо-Западного региона
Санкт-Петербургское Общество Научно-технических знаний

ПЕТРАНЬЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ

"СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ - 2012"

(К 100-ЛЕТИЮ "ЦНИИМ")

Доклады Санкт-Петербургской
Международной научно-технической конференции
16 - 18 октября 2012 года

Санкт-Петербург
2012

УДК: 621 791

Организационный комитет:

Баскина Т.В.
Баранов А.В.
Болкисев С.А.
Брусницын Ю.Д.
Вихман В.Б.
Ганусов К.А.
Кондрон А.В.
Кархин В.А.
Левченко А.М.
Лившиц И.М.
Мажирин А.П.
Рубцова Н.Н.
Сидлин З.А.
Тихонова Л.Б.
Фролов С.Н.
Шарапов М.Г.

Петраньевские чтения. "Сварочные материалы - 2012":
доклады Санкт-Петербургской международной
научно-технической конференции, 16–18 октября 2012 года.
СПб.: Изд -во Политехн. ун -та, 2012. -XXX с.

ISBN XX-X-XXXX-XXXX-X

© Вихман В.Б., Тихонова Л.Б., составление, 2012
© Дизайн, комп.верстка: Мартьянов С.И., Тупеко А.А.
© Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, 2012

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МАТЕРИАЛОВ»

ОБРАЩЕНИЕ ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА ОАО «ЦНИИМ» К УЧАСТНИКАМ КОНФЕРЕНЦИИ «СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ - 2012»

Уважаемые участники конференции !

От имени коллектива сотрудников ордена Ленина Центрального научно-исследовательского института материалов выражаю глубокое удовлетворение в связи с проведением ставшей традиционной конференции по сварочным материалам в стенах нашего старейшего в России материаловедческого института, 100-летие со дня основания которого отмечается в 2012 году.

На протяжении 100 лет Центральный научно-исследовательскитй институт материалов является передовым научным центром в области создания металлических, в т.ч. сварочных, керамических и полимерных материалов, а также технологий их обработки и нанесения защитных и антифрикционных покрытий для различных отраслей промышленности нашей страны. Особое внимание в нашем институте уделяется исследованию свариваемости, разработке технологий сварки сталей, сплавов на основе титана, алюминия, тугоплавких и др. металлов, а также наплавки и газотермического напыления покрытий со специальными свойствами.

Более 80 лет в институте выполняются исследования и разработки в области сварки. Ещё в 1932 г. нашими сотрудниками были разработаны сварочные электроды марки ЛИМ-1 (аббревиатура ЛИМ означала название нашего института «Ленинградский институт металлов»), Позднее в 1939 г. в лаборатории сварки под руководством выдающегося ученого К.В. Петраня были созданы электродные покрытия марки УОНИ-13, на основе которых была разработана гамма электродов различного назначения, сыгравших важнейшую роль в применении сварки при создании и производстве артиллерийской и бронетанковой техники, а также в военном кораблестроении. После Великой Отечественной войны и по настоящее время благодаря высокому качеству и надежности они широко применяются практически во всех отраслях промышленности и строительстве.

Для проведения работ институт располагает лицензиями соответствующих ведомств. В институте имеются аттестованный Федеральным агентством по техническому регулированию испытательный центр, в котором проводятся работы по исследованию химического состава, физико-механических свойств и микроструктуры металлических и неметаллических материалов, по коррозионной стойкости металлических материалов, а также выполняются работы по дефектоскопии. В ОАО «ЦНИИМ» внедрена «Система менеджмента качества» по ГОСТ Р ИСО 9001-2001, которая аттестована соответствующим органом по сертификации.

В ОАО «ЦНИИМ» работает более 400 высококвалифицированных сотрудников, в т. ч. 7 докторов и 40 кандидатов наук, деятельность которых направлена на сотрудничество со всеми предприятиями, заинтересованными в использовании наших разработок и в проведении исследований по профилю института.

Желаю всем участникам конференции «Сварочные материалы - 2012» плодотворного сотрудничества и творческих успехов.

Генеральный директор ОАО «ЦНИИМ ***С.А. Болкисев***

СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ УОНИ-13 - ВЫДАЮЩЕЕСЯ СОБЫТИЕ В ИСТОРИИ РАЗРАБОТКИ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

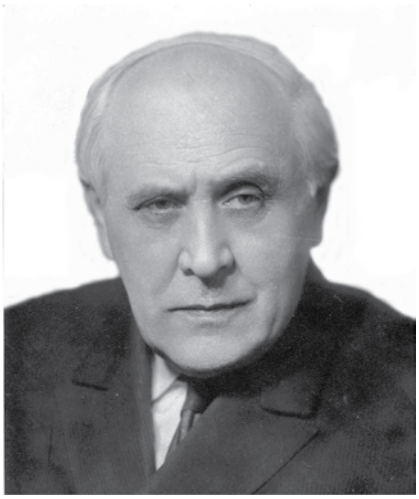
В.Б. Вихман
к.т.н.
ОАО «ЦНИИМ»
г. Санкт-Петербург
info@cniim.com

17.05.2012 г. исполнилось 120 лет со дня рождения выдающегося ученого в области сварки Константина Вацлавовича Петраня. Научная и педагогическая деятельность К.В. Петраня освещена в работе [1].

В первой части настоящего доклада более подробно изложены вопросы, связанные с историей создания коллективом сотрудников лаборатории сварки научно-исследовательского института №13 (НИИ-13, с 06.03. 1966 г. Центрального научно-исследовательского института материалов - ЦНИИМ) Наркомата вооружений (НКВ) под руководством К.В. Петраня уникальных электродов с фтористо-кальциевым покрытием (основного типа). Во второй части изложены результаты внедрения электродов УОНИ-13 в промышленность за 7 лет с 1939 по 1946 г. и показана их выдающаяся роль в производстве военной техники в годы Великой Отечественной войны. Третья часть посвящена разработке рецептуры покрытий электродов уони-13 для массового производства на мощных прессах. В четвертой части подробно изложены вопросы разработки электродов марок УП-1 и УП-2 НИИ МВ (Министерства вооружений) с фтористо-кальциевым покрытием (аналогов УОНИ-13) для сварки на переменном токе. В заключительной пятой части представлены специальные электроды с покрытием УОНИ-13 для сварки и наплавки, разработанные в К.В. Петранем и его учениками.

К сожалению, при жизни К.В. Петраня в связи с определенными обстоятельствами его разработки в области сварочных электродов были мало опубликованы. Известна одна статья [2], вышедшая в журнале «Сварочное производство» в 1947 г., и авторское свидетельство № 65424 (1940 г.). Поэтому автор данного доклада, работавший под руководством Константина Вацлавовича с 1964 г. по 1974 г. в одной лаборатории с его сотрудниками, участвовавшими в создании электродов УОНИ-13, счел своим долгом перед памятью этих людей на основании сохранившихся научно-исследовательских отчетов насколько возможно подробно изложить историю и значение их выдающейся разработки. Это также необходимо было сделать, потому что многие представители новых поколений сварщиков плохо осведомлены об авторах и истории создания электродов УОНИ-13, которые широко используются на протяжении более чем 70 лет при сварке конструкций ответственного назначения, работающих в различных, в том числе и экстремальных условиях. Надеюсь также, что методический подход К.В. Петраня к решению сложнейших научно-технических проблем будет полезен молодым исследователям, работающим в области сварки.

Как в СССР так и за рубежом было много попыток копирования или модернизации обмазки УОНИ-13 применительно к вновь разрабатываемым электродам, что свидетельствует о мировом признании ее качества. Была даже неудавшаяся попытка присвоить марку УОНИ-13 одним из производителей электродов в лихие 90-е годы, поэтому нелишне было напомнить о приоритете России в данном вопросе и о заслугах авторов уникального изобретения Константине Вацлавовиче Петране и его сотрудниках Науме Моисеевиче Кизине и Александре Петровиче Бибикове.



К.В. Петрань

Н.М. Кизин

Рисунок 1 *Фото разработчиков электродов УОНИ-13*

Часть I. Разработка электродов УОНИ-13

(По материалам технического отчета по теме Г-13-78, составленного в 1940 г.)

В феврале 1937 г. по приказу заместителя наркома танковой промышленности К.В. Петрань был направлен в НИИ-13 и приступил к созданию новых сварочных электродов, предназначенных для обеспечения высокого качества сварки и в первую очередь – для резкого увеличения пластичности и ударной вязкости металла шва. С 1938 г. работа проводилась по теме Г-13-78 «Разработка рецептур и технологического процесса изготовления высококачественных электродов для дуговой сварки» [3].

1.1 Состояние электродного производства в СССР и анализ мировых достижений в области разработки и изготовления сварочных электродов.

К моменту постановки темы состояние электродного производства на заводах НКВ было чрезвычайно тяжелым: только некоторые заводы имели простейшие электродные мастерские, на которых в лучшем случае в незначительных количествах изготавливались электроды типа «ТК». Основной объем производства составляли электроды с меловым покрытием. По данным Кировского завода (Ленинград), считавшегося лучшим производителем этих электродов, металл, наплавленный ими, имел $\sigma_в$=471…510 МПа, δ_5=16…24%, KCU = 392…785 КДж/м^2. В то же время

металл, наплавленный электродами с тонким меловым покрытием, обладал очень низкой пластичностью и ударной вязкостью ($\sigma_в$=343…392 МПа, δ_5=2…4%, KCU = 98…294 КДж/м^2). Относительно удовлетворительные свойства металла, наплавленного электродами ТК позволяли несколько расширить применение сварки, но низкие технологические свойства (затруднения при сварке в положениях, отличных от нижнего), гигроскопичность и связанные с этим трудности при транспортировке и хранении делали применение электродов ТК на заводах НКВ практически ничтожным.

Такое положение дела сильно ограничивало применение сварных соединений на заводах НКВ, широко применявших легированные стали. Данные иностранных предприятий говорили о значительном применении сварки. Советские конструкторы почувствовали преимущества сварных соединений и стали все чаще применять их в своих разработках, но этому препятствовало отсутствие технической базы и в первую очередь – отсутствие качественных электродов и их централизованное промышленное производство, обеспечивающее необходимый объем выпуска электродов и стабильность высоких механических свойств наплавленного металла.

Таким образом, перед коллективом, возглавляемым К.В. Петранем, при выполнении темы Г-13-78 ставились задачи не только разработать высококачественные электроды, которые по технологическим свойствам и механическим показателям наплавленного металла могли бы конкурировать с лучшими марками заграничных электродов, но и организовать их производство и реальное применение на заводах НКВ.

Ввиду чрезвычайной актуальности и крайней необходимости обеспечения заводов НКВ высококачественными электродами предполагалось:

- организовать их массовое производство в условиях оборудованного по последним техническим достижениям цеха на одном из заводов НКВ, чтобы обеспечить централизованное снабжение электродами предприятий НКВ;
- не ожидая пуска электродного цеха, который мог быть осуществлен в первой половине 1941 г., организовать производство электродов во временных полукустарных электродных мастерских.

В задачу создания массового производства по теме входило:

- выбор места строительства и организации электродного цеха;
- разработка технологии массового производства электродов и составление заявок на сырье;
- выбор новейшего технологического оборудования;
- решение вопросов, связанных с заказом выбранного оборудования, как отечественного, так и импортного.

При организации временных электродных мастерских предусматривались:

- разработка инструкции для изготовления высококачественных электродов и ее рассылка на заводы;
- изготовление небольших партий электродов для отправки на заводы в качестве образцов и для ознакомления с их технологическими свойствами;
- изготовление сухой обмазки (шихты) в количестве до 150 кг для каждого завода с тем, чтобы до приобретения необходимых компонентов могло быть начато производство электродов;
- оказание технической помощи заводам по организации электродных мастерских и по внедрению электродов в производство.

Для осуществления поставленных задач рассмотрению и исследованию подвергались электроды, выпущенные наиболее квалифицированными иностранными фирмами в 1938 г, т.е. исследовались только новейшие типы электродов. В отчете по теме Г-13-78 отмечается «исключительно культурный внешний вид электродов, прекрасная упаковка, обеспечивающая хорошую их сохранность при перевозках и хранении на складах. Часть электродов, преимущественно американских фирм, изготовлена путем опрессовки обмазочной массы в специальных прессах – экструдингах, другая часть – путем окунания, но с последующим механическим устранением эксцентричности обмазки относительно стержня путем шлифовки». Констатируется, что по культуре и технике производства отечественная промышленность на много отстала от передовых производителей электродов.

Исследованию были подвергнуты 13 марок электродов семи европейских и американских фирм, в том числе:

- германских фирм «Schoch» (3 марки: «E 37/42», «Ea-150» и «Primus»), «Gutchoffnungshütte» (марка «GHH»);
- голландской фирмы «Philips» (марка «250»);
- американских фирм «Lincoln» (4 марки: «Flichtweld «9», «Flichtweld «8», «Schield – Arc «85» и «Stainweld») и «Murray» (марка «Campion «Recd Dewil»);
- английской фирмы «Metro Wikkers» (марка «Rc»);
- французской фирмы «Sarazin» (2 марки: «Marine 55» и «Marine 60»).

Методика проведения комплексных исследований импортных электродов включала: органолептический анализ (визуально и на ощупь), измерение диаметра стержней, разнотолщинности покрытий, длины электродов и их зачищенной части под электрододержатель, величины прогиба, осмотр с помощью бинокуляра при увеличении $40^{\times}$ поверхности покрытий, определение количества слоев в покрытии, наносимом методом окунания, химический анализ металла стержня и наплавленного металла, в некоторых случаях – химический анализ состава покрытия (на

содержание оксидов), определение потери веса при прокалке (взвешиванием), разрушаемость обмазки при кипячении, гигроскопичность, возможность восстановления качества путем прокалки после обливания водой, определение механических свойств наплавленного металла, определение сварочно-технологических свойств (особенности горения дуги на постоянном и переменном токе, включая искрообразование, разбрызгивание, наличие защитных газов, состояние и степень открытости ванны (прозрачности шлака) для наблюдения, возможность сварки в различных пространственных положениях, отделяемость шлаковой корки, внешний вид шва и шлаковой корки с наружной и внутренней стороны, наличие открытых пор и трещин в кратере шва.

Сравнительные данные по механическим свойствам и результатам обмера ряда марок электродов представлены в таблице 1 [3]. Характерной особенностью импортных электродов являлась регулярность их действия (стабильность качества сварки и характеристик наплавленного металла по длине электрода и при переходе от одного электрода к другому, а также от одной партии к другой), чем отнюдь не отличались отечественные электроды. Было установлено, что «это достигается общей высокой культурой изготовления в значительно большей степени нежели стабильностью рецептур и применяемого сырья. Ряд марок электродов различных фирм с различными обмазками, приготовленными в различных условиях и на разном сырье, обладают одинаковой регулярностью действия и дают примерно одинаковые механические свойства наплавленного металла. На регулярность действия обмазки оказывает также значительное влияние ее сохранность в строго определенном состоянии. Это достигается тщательностью упаковки и доработанностью рецептур обмазки».

Все импортные электроды были более стабильны по размерам и имели меньшую эллиптичность и разнотолщинность по длине, а также более гладкую поверхность покрытия по сравнению с отечественными. Их концы были тщательно зачищены от обмазки (на 22 - 50 мм в зависимости от марки - под электрододержатель и на 0,2…0,3 мм – с противоположной стороны).

Все стержни, за исключением 2-х марок электродов изготавливались из нелегированной малоуглеродистой проволоки, слабо легированной кремнием и марганцем. Только стержни электродов марки «Ghh» германской фирмы «Gutchoffnungshütte» содержали 0,35% углерода и были легированы хромом (0,70%) и молибденом (0,26%) в дополнение к кремнию (0,28%) и марганцу (0,67%), а электроды марки «Stainweld» (фирмы «Lincoln», США) были изготовлены из аустенитной стали типа 18-8. Содержание вредных примесей серы и фосфора в прутках составляло соответственно менее 0,03 и 0,02% (только в прутках электродов марок «Marine 55» и «Marine 60» содержалось 0,032% S и 0,036% P).

Большинство из исследованных импортных электродов в составе покрытий имело ферросплавы, а в отдельных случаях - частицы минералов. Наименьшей гигроскопичностью отличались покрытия американских электродов «Schield – Arc «85» фирмы «Lincoln» (даже после кипячения в воде в течение 2 часов ими можно было производить сварку). Покрытия других марок при кипячении в воде в течение от 10

Таблица 1 *Сравнительные данные по механическим свойствам и результатам обмера ряда марок электродов [2]*

Механические свойства											
Показатели	Марки электродов										
	С меловой обмазкой	«ТК»	Е 37/42	Primus	Ea-150	Philips «250»	Schield – Arc «85»	Murray	M-Wikkers «Rc»	Marine 55	Marine 60
$\sigma_в$, МПа	343 - 392	471 - 510	412 - 441	510 - 549	638 - 687	618	549	520	451	490	598
σ_{02}, МПа	-	343 -392	-	-	-	-	-	-	343	-	-
$\sigma_{0,01}$, МПа	-	-	-	-	-	342	373	393	-	373	422
δ_5, %	2 - 4	18 - 24	27 - 31	25 - 30	18 - 20	19	21	23	26	21	17
Ψ, %	15 - 25	38 - 50	-	-	-	60	46	45	-	48	43
KCU, КДж/м^2	98 - 294	392 -785	-	883 - 1079	883 - 1079	814	991	922	1128	1481	1550
Твердость, $Н_в$											
Результаты обмеров											
Диаметр стержня	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,25	3,25	3,25	3,25	3,0	3,0
Длина стержня	400	400	400	400	400	460	450	355	460	450	450
Отклонение по длине электрода, мм	±5	±5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,7	±0,2	±0,3	±0,5	±0,5	±0,5
Стрела прогиба, мм	10	7	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Эллиптичность по обмазке, мм	-	0,45	0,15	0,15	0,15	0,25	0,01	0,01	0,3	0,25	0,25
Разнотолщинность обмазки по длине электрода, мм	-	0,65	0,2	0,2	0,2	0,2	0,03	0,01	0,25	0,1	0,1
Метод нанесения обмазки	Окунанием	Окунанием	Окунанием	Окунанием	Окунанием	Окунанием	Опрессовкой	Опрессовкой	Опрессовкой при низком давлении	Окунанием	Окунанием
Количество слоев	1	1	3	3	3	4	-	-	-	3	3

до 60 минут разрушались. При обливании водой было установлено, что гигроскопичностью обладали электроды, содержавшие в своем составе органику (целлюлозу или нитки).

Большинство из исследованных импортных электродов обладало удовлетворительными сварочно-технологическими свойствами, хотя сварка в положениях, отличных от нижнего, в некоторых случаях была затруднена или вообще невозможна. Сварочная ванна (за исключением сварки электродами марок «GHH», «Schield – Arc «85» и «Flichtweld»), вела себя спокойно и даже имела зеркальную поверхность. Различной была область возможного наблюдения за ней вследствие прозрачности расплавленного шлака. В большинстве случаев, за исключением французских электродов «Marine 55» и «Marine 60», сварка шла с сильным искрообразованием и даже разбрызгиванием. Дымообразование имело место при наличии органики в составе обмазки. Глубина провара была большой только при сварке электродами «Schield – Arc «85» и «Flichtweld», в остальных случаях она не превышала 1 мм.

Шлак в большинстве случаев имел гладкую наружную и пористую внутреннюю поверхности и покрывал весь шов, но в случае применения электродов американской фирмы «Murray» он покрывал только половину шва. Отделяемость шлаковой корки была различной, во многих случаях он плохо отделялся у края шва даже при применении зубила и металлической щетки.

Пористость и трещины в кратере шва появлялись при применении электродов марок «GHH» и «Schield – Arc «85». При медленном обрыве дуги поры появлялись также при сварке электродами марок «Marine 55» и «Marine 60».

Лучшим комплексом сварочно-технологических свойств обладали электроды голландской фирмы «Philips» и французской фирмы «Sarazin». В обмазке последних содержалось около 40% CaO, т.е. по современной классификации их можно отнести к электродам с основным типом покрытия, но они не содержали фтористый кальций.

В СССР качеству производства электродов уделялось мало внимания. Поэтому при примерно одинаковом составе покрытия электродов марки «ТК» и американских электродов марки «Schield – Arc «85» первые в отличие от вторых в работе крайне не регулярны как по технологическим свойствам, так и по механическим свойствам наплавленного металла.

1.2 Формулирование требований к создаваемым электродам.

На основании тщательного изучения электродов, изготавливаемых лучшими заграничными производителями, наблюдения за протеканием процесса дуговой сварки в производственных условиях и с учетом данных науки о дуговом разряде и процессе плавления электродного стержня были сформулированы требования, актуальные и в настоящее время, которым должны удовлетворять создаваемые электроды по технологическим характеристикам, внешнему виду и механическим свойствам наплавленного металла. Разработанные требования были разбиты на 3 группы: к электродным стержням, к обмазке, к наплавленному металлу.

1. Требования к электродным стержням:

- химический состав проволоки и пределы отклонения стержней по длине должны соответствовать ОСТ 20032;
- максимальный прогиб стержней не должен превышать 0,2 мм (проверка производится щупом на разметочной плите);
- стержни должны быть очищены от ржавчины и жиров.

2. Требования к обмазке

2.1. Общие требования:

- отклонения диаметра обмазки по всей длине электрода не должны отличаться от номинала на ± 0,15 мм для электродов диаметром до 4 мм и на 0,20 мм для электродов диаметром свыше 4 мм;
- концы электродов должны быть зачищены от обмазки (верхний – на длину 20 ± 5 мм, нижний – на конус для возможности сварки угловых швов до обнажения электродного стержня по всей плоскости торца);
- обмазка не должна откалываться от стержня при падении плашмя с высоты 1,5 м на бетонный пол;
- обмазка не должна быть гигроскопичной;
- обмазка не должна терять технологических свойств при длительном хранении в хорошей упаковке;
- обмазка не должна терять технологических свойств после кратковременного (в течение 5 – 6 часов) пребывания в воде и последующей просушки.

2.2. Технологические требования:

- автоматическое поддержание длины дуги во время сварки; (1)
- возможность сварки в любых пространственных положениях (нижнем, вертикальном, потолочном); (2)
- отсутствие при сварке сильного искровыделения; (3)
- легкая и совершенная очистка шва от шлака, особенно по его кромкам; (4)
- регулярность (по длине электрода) действия обмазки; (5)
- простота технологии (ведения) сварки; (6)
- универсальность в отношении возможности сварки различных сортов конструкционных марок стали; (7)

- прозрачность пленки жидкого шлака, покрывающего сварочную ванну или возможность наблюдения за ней; (8)
- возможность сварки при малых углах разделки кромок свариваемых металлов; (9)
- отсутствие подрезов. (10)

2.3. Специальные требования:

- отсутствие руд в виде кислородных соединений металлов (железа и марганца) в обмазке;
- максимальная защита проходящего дугу электродного материала от соприкосновения с воздухом;
- создание возможно большей площади, с которой происходит одновременно расплавление и поступление в дугу материала обмазки;
- получение максимально жидких, максимально активных и быстро кристаллизующихся шлаков;
- производственная надежность изготовления электродов в различных заводских условиях.

3. Требования к наплавленному металлу

3.1. Внешний вид шва:

- шов должен иметь хороший вид, с мелкими чешуйками, без пор, газовых раковин и т.п.;
- кратер валика не должен иметь трещин и пор.

3.2. Металл шва:

- должен быть плотным по всему сечению валика, удельный вес должен быть не ниже 7,80 г/см^3;
- предел прочности должен быть в диапазоне 441 – 638 МПа;
- относительное сужение не должно быть ниже 45%;
- ударная вязкость не должна быть ниже 785 КДж/м^2.

Большинство требований (кроме технологического требования по автоматическому поддержанию длины дуги во время сварки и специального требования об отсутствии руд и кислородных соединений металла в обмазке) не нуждались в дополнительных разъяснениях. Очевидно, что при ручной сварке получить стабильную длину дуги не удается даже самым опытным сварщикам. Всякое изменение длины дуги связано с изменением баланса тепла в дуговом промежутке, а это приводит к неравномерности протекания физико-химических процессов и к нарушению однородности и качества металла шва. Ни в мировой практике, ни в технической литературе не встречались указания на возможность реализации требования об автоматическом поддержании длины дуги при ручной сварке. Несмотря на очевидную трудность выполнения этого требования, в силу чрезвычайной актуальности оно было поставлено на первое место в ряду технологических требований.

Первое среди специальных требований об отсутствии в обмазке руд, особенно содержащих закись железа, связано с тем, что металлургические процессы при сварке в отличие от процессов взаимодействия между шлаком и расплавленным металлом в металлургических печах протекают за очень короткий промежуток времени и далеки от равновесия. Вследствие этого невозможно реализовать связывание оксидов металлов (образующихся при диссоциации руд в высокотемпературном дуговом промежутке) в соединения, полностью успевающие перейти в шлак. Загрязнение металла шва неметаллическими включениями в виде оксидов железа усугубляется также возможностью попадания в него отколовшихся и нерасплавленных кусочков обмазки. Вследствие нестабильности длины дуги и других факторов, изменяющих ее тепловой баланс (например, из-за неравномерности объемов капель жидкого металла или шлака, проходящих через дугу), нельзя гарантировать стабильность условий протекания металлургических процессов в системе шлак - металл, при которых железо будет полностью восстановлено из оксидов, либо оксиды будут связаны в комплексные соединения и перейдут в шлак.

1.3 Разработка рецептуры обмазки.

К.В. Петрань при разработке рецептуры обмазки исходил из условия, что управление системой шлак – металл в процессе ручной сварки невозможно. Необходимо задать такой состав компонентов, чтобы получить заданные состав шлака и его характеристики (температуру плавления, вязкость, силу поверхностного натяжения, прозрачность в расплавленном состоянии, малую плотность, хрупкость в твердом состоянии, структуру, теплопроводность, электропроводность, коэффициент линейного растяжения и важнейшую химическую характеристику кислотность или основность). При этом указанные характеристики в разных фазах процесса электродуговой сварки (в момент его образования, в факеле электрической дуги, в момент сильного перегрева в кратере за катодным пятном или в твердом состоянии) должны быть различны. Совокупность многообразия факторов, действующих при сварке, и затруднительность экспериментальной проверки различных гипотез практически исключало возможность надежного применения диаграмм равновесия трехкомпонентных систем, делая их данные весьма ориентировочными.

В силу этого за шлаковую основу рецептуры обмазки была принята система двух компонентов с резко противоположными свойствами: плавикового шпата и извести. Известь была взята не в чистом виде, а в виде углекислого кальция, чтобы CaO получать только при температуре 1000° С. Для этой цели был выбран мрамор, как наиболее чистый минерал. Применение мрамора выгодно еще и тем, что разлагаясь он дает обильное выделение углекислого газа, защищающего зону сварки от воздействия окружающего воздуха. Плавиковый шпат, являвшийся самым мощным из известных плавней (флюсов) был применен для придания шлакам необходимой жидкотекучести и способности к кристаллизации в узком интервале температур [2, 3]. Выбранная система выгодна еще и тем, что, меняя соотношение основных компонентов, можно было регулировать плавкость и прочие свойства шлака. В свою очередь наличие фтористого кальция обеспечивает в факеле дуги присутствие свободного фтора, активного элемента, способствующего удалению водорода.

К этой двухкомпонентной системе были добавлены:

- ферромарганец, как активный раскислитель;
- ферротитан, как сильный раскислитель и поглотитель азота, а также способствующий сильному измельчению зерна в литой стали как за счет действия титана, так и за счет находящегося в ферротитане алюминия;
- кварц в чистом виде для связывания FeO.

Раскисляющие и денитрирующие элементы (Al и Ti), вводимые в состав покрытий, приводят к образованию спокойной сварочной ванны, отсутствию разбрызгивания и искрообразования [2].

В первой рецептуре было взято простое соотношение: 50% CaF_2 и 50% Ca_2CO_3, прочие компоненты были введены в количестве по 10% от суммарной массы первых двух компонентов. Затем содержание всех компонентов пересчитывалось, принимая их общую массу за 100%. В качестве стержней использовалась малоуглеродистая проволока.

Этот исходный рецепт был опробован путем наплавки валиков на пластину из стали 25Н3 в нижнем положении. Электроды для пробы в количестве 15 шт. были изготовлены методом окунания при тщательном выполнении всех технологических и контрольных операций. В качестве связующего использовалось жидкое натриевое стекло. Допуск по толщине покрытия составлял ± 0,1 мм, температура прокалки - 250° С. При проведении испытаний оценивались:

- стабильность дуги при возможно малой ее длине;
- степень ее искрообразования;
- поведение и вид шлака;
- легкость удаления шлака, особенно по краям шва;
- внешний вид валика.

По результатам испытаний в рецептуру вносились изменения, направленные на устранение недостатков и улучшение сварочно-технологических свойств электродов.

Для определения влияния отдельного компонента на выбранную шлаковую систему его количество либо резко увеличивалось, либо уменьшалось по сравнению с первоначальным вариантом. При этом новый рецепт всегда пересчитывался, исходя из 100% суммарной массы сухой смеси. Для сопоставимости результатов сварка проб выполнялась постоянно одним и тем же квалифицированным сварщиком.

Совершенно случайно было найдено решение по выполнению наиболее сложного требования – по автоматическому поддержанию длины дуги. В процессе опробования различных вариантов рецептуры было замечено явление образования «чулка», связанное с отставанием плавления обмазки от расплавления стержня. Обычно это явление считалось признаком низкого качества электродов. Но в данной работе благодаря точности соблюдения толщины обмазки по длине и окружности электрода (отсутствию эксцентричности), а также хорошему смешению мелко измельченных компонентов величина «чулка» (следовательно и длина дуги) остается постоянной по всей длине шва, если конец «чулка» опирается о поверхность свариваемого изделия. Использование этого явления было признано необходимым для обеспечения высококачественной сварки, несмотря на то, что для его использования необходимо было ломать привычные навыки квалифицированных сварщиков. Техника, связанная с опиранием конца электрода на свариваемые поверхности, облегчала работу сварщика и в дальнейшем сыграла выдающуюся роль во время Великой Отечественной войны, когда для резкого увеличения выполнения сварочных работ потребовалось привлечь большое количество необученных рабочих.

Изолируя факел дуги от контакта с воздухом, «чулок» способствует предохранению плавящегося стержня от насыщения расплавленных капель кислородом и азотом. Реагирующая поверхность обмазки благодаря «чулку» значительно увеличивается, вследствие чего уменьшается вредное влияние на процесс сварки неравномерности распределения ее компонентов. «Чулок» существенно облегчает ведение сварки при малых углах и большой глубине разделки, а также на вертикальной плоскости и в потолочном положении.

Первые технологически удовлетворительные результаты были получены при испытании 23-го по счету варианта обмазки. Однако этот вариант при исследовании механических свойств наплавленного металла не был признан удовлетворительным из-за наличия в нем небольшого количества пор. Исследование причин их появления показало, что пористость вызвана не совсем удовлетворительными свойствами шлака, теплопроводность которого оказалась слишком высокой. По этой причине в обмазку был введен 6-й компонент (ферросилиций), обеспечивший в шлаке дополнительную экзотермическую реакцию. Его содержание в составе сухой шихты изменялось от 1 до 10% (через 1%). При этом к 5-ти видам испытаний были добавлены испытания на плотность и отсутствие пористости в металле шва.

Вполне удовлетворительные результаты были получены при испытании 57-го по счету варианта обмазки (испытание на длительное хранение электродов не производилось). Далее по рецептуре 57-го варианта была изготовлена партия электродов в количестве 11 кг для проведения заключительных испытаний. Испытания начались с проверки технологических свойств обмазки согласно требованиям 1,2,5,7,9 и 10 подраздела 2.2 (на с. 11), т.к. остальные требования были удовлетворены при разработке рецептуры.

Исследования проводились на постоянном токе с использованием сварочной машины «СУГ-2б». При этом было установлено, что процесс сварки лучше протекает на обратной полярности вне зависимости от марки свариваемой стали.

Испытания охватывали стали марок 10, 15, 25, 40, 50Г, 40Л, 37ХНМЛ, 25Н, 30Н4, 25Н3, 30ХН3, ОХМФ, ОХН3М, ЭЯГГ, ЭЖ-2, 25ХСМА, 20ГЦ. По всем требованиям испытания показали удовлетворительные результаты.

Сварка на переменном токе не обеспечивала стабильное горение дуги. Введение в покрытие сильных ионизаторов не дало результатов, т.к. это приводило к одновременному плавлению покрытия и сердечника, что противоречило установке на автоматическое поддержание длины дуги (исчезал чулок). Устранить этот недостаток удалось путем наложения на дугу переменного тока тока высокой частоты путем подключения осциллятора. При этом сварка на переменном токе происходила также легко, как и на постоянном токе.

Много внимания было уделено выполнению требования, согласно которому обмазка не должна терять технологических свойств при длительном хранении, перевозках и т.п. Задача существенно облегчалась благодаря тому, что все компоненты обмазки были совершенно негигроскопичны, но необходимость длительных испытаний могла значительно отодвинуть завершение работ по теме. Поэтому с целью ускорения испытания проводились в исключительно жестких условиях: электроды подвергались кипячению в воде, либо выдерживались в воде при комнатной температуре. Было замечено, что при опускании в кипяток в покрытии появлялись кольцевые трещины, которые при сварке после просушки электродов иногда приводили к откалыванию маленьких кусочков обмазки. В результате экспериментов по выбору режимов прокалки было установлено, что начиная с температур 300 – 350º С в обмазке протекают процессы спекания вследствие превращений в растворимом стекле. Высокая температура прокалки является возможной из-за отсутствия в составе покрытия органических составляющих. После такой обработки в течение получаса вода совершенно не действует на покрытие., т.е. оно является негигроскопичным. При кипячении не появляются трещины, и разрушение обмазки начинает происходить только после 1 – 2 часов кипячения в тех местах, которые находятся на границе поверхности кипящей воды. Если же электроды были полностью погружены в кипящую воду, то даже после двух часов кипячения и последующей просушки электроды не теряли своих технологических свойств. После вылеживания в воде при температуре 15 – 20º С в течение месяца и последующей просушки эти свойства также не ухудшались. Последующее применение электродов УОНИ-13 показало, что они без порчи могут храниться в складских помещениях более пяти лет [2].

Предварительные испытания механических свойств металла, наплавленного разработанными электродами, также дали высокие результаты. Таким образом, поставленные задачи по созданию высококачественных электродов были успешно решены, что позволило авторам перейти к разработке технологии их массового производства и к разработке на базе покрытия, которому присвоили аббревиатуру УОНИ-13, гаммы электродов различного назначения. На разработанное покрытие в 1940 г. было получено авторское свидетельство № 65424. Для массового промышленного применения была выпущена «Инструкция по изготовлению и сварке электродами УОНИ-13», в которую были внесены положения по обязательной прокалке электродов при температуре 300 – 350º С в течение 30 минут и контроля их качества кипячением.

1.4 Разработка электродов УОНИ-13.

В процессе исследования механических свойств путем незначительного изменения вариантов рецептуры обмазки были разработаны 4 марки электродов для сварки конструкционных сталей, получивших название УОНИ-13/45, УОНИ-13/55, УОНИ-13/65, УОНИ-13/85, а также рецептура обмазки для сварки нержавеющих и жаропрочных сталей УОНИ-13/Н.Ж. В качестве металлических стержней использовалась проволока из малоуглеродистой стали (для первых четырех марок) и марки 18-8 (0,10%C-18,2%Cr-8,1%Ni-0,4%Mn-0,65%Si). В работе [2] указывается, что в качестве стержней для электродов УОНИ-13/Н.Ж. применялась проволока марок IX, X, XI, XII по ГОСТ 2246-43. Аббревиатура УОНИ-13 расшифровывается как универсальная обмазка НИИ-13, цифры после дроби в первых четырех марках означают значение предела прочности наплавленного металла.

Для исследования механических свойств наплавленного металла производилась многослойная наплавка на пластины из стали 25Н3 электродами диаметром 5 мм. Химический состав наплавленного металла приведен в таблице 2. Высота и ширина наплавки составляли 25 ± 5 мм, длина – 100 ± 10 мм. Образцы для механических испытаний вырезались из наплавленных заготовок как непосредственно после сварки, так и после различных видов термической обработки.

По механическим свойствам металл, наплавленный разработанными электродами, превзошел показатели всех известных импортных электродов, известных на момент постановки темы, т.е. до 1938 г. (таблица 3). Прочность наплавленного металла первых трех марок повышается главным образом за счет марганца, который переходит в сварочную ванну из покрытия почти полностью (его выгорание ничтожно).

Стабильность высоких показателей пластичности наплавленного металла оценивалась при увеличении содержания углерода в сварочной проволоке, используемой для изготовления электродов УОНИ-13/55. Даже увеличение содержания углерода в проволоке до 0,18%, т.е в 1,5 раза выше допустимого значения, практически не привело к снижении этих показателей (δ_5 = 27,1 – 31,1%, ψ = 74,0 – 75,0%).

Таблица 2 *Химический состав наплавленного металла*

Марка электрода	Содержание элементов, % масс.							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P
							не более	
УОНИ-13/45	0,06-0,12	06-0,9	0,18-0,30	-	-	-	0,03	0,03
УОНИ-13/55	0,08-0,13	0,8-1,2	0,30-0,45	-	-	-	0,03	0,03
УОНИ-13/65	≤ 0,17	1,0-1,5	0,35-0,55				0,03	0,03
УОНИ-13/85	0,10	1,50	1,08	-	-	1,20	0,016	-
УОНИ-13/НЖ	0,10	0,40	0,65	18,2	8,1	-	-	-

Таблица 3 *Механические свойства наплавленного металла*

Марка электрода	$\sigma_р$, МПа	σ_{02}, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %	KCU, кДж/м^2
УОНИ-13/45	302-310 305	322-344 329	426-442 433	27,4-32,8 29,9	59,5-77,3 70,7	2580-2845 2688
УОНИ-13/55	336-364 347	371-405 392	475-497 491	26,7-31,4 29,6	59,5-80,9 73,1	2590-2943 2698
УОНИ-13/65	370-375 372	444-455 449	599-610 604	24,3-25,4 24,8	66,7-68,5 67,6	1481-1727 1599
УОНИ-13/85	452-564 510	-	779-976 887	16,0-24,8 19,0	56,5-66,4 58,1	981-1050 1020
УОНИ-13/НЖ	-	-	638-687 657	35,0-40,0 37,5	-	-

Для выяснения чувствительности металла, наплавленного электродами УОНИ-13/65, к различным видам термообработки и старению образцы с надрезом Менаже, вырезанные из заготовок, подвергались перед испытаниями на ударную вязкость:

- выдержке при температуре 120º С в течение 184 часов;
- 30 – кратному нагреву при температуре 620 – 650º С с последующей выдержкой при комнатной температуре в течение 120 часов;
- закалке от температуры 950º С в воду;
- высокому отпуску при температуре 600º С в течение 10 часов.

Этими испытаниями было показано, что ни при каких видах термообработки, кроме закалки от 950º С в воду, не происходит падение ударной вязкости. Закалка приводит к 4 – 5 – кратному снижению этого показателя.

Электроды УОНИ-13/65 показали высокие механические свойства наплавленного металла при повышенной температуре испытания 550º С:

$\sigma_р$ = 218 – 263 МПа, σ_{02} = 260 – 300 МПа, $\sigma_в$ = 336 – 343 МПа, δ_5 = 27,1 – 31,1%, ψ = 74,0 – 75,0%.

Исследования завершились оценкой механических свойств и структуры сварных соединений, выполненных с применением электродов марки УОНИ-13/55. Стержни диаметром 3,0, 3,5 и 5,0 мм, отличались различным содержанием углерода (соответственно 0,18, 0,22 и 0,14%). Пластины основного металла из стали 25 (0,28% С) толщиной 15 мм собирались с зазором 2 мм. Общий угол односторонней V-образной разделки составлял 90°, притупление – 2 мм. Сварка выполнялась в 3 прохода. Гагаринские образцы диаметром 5 мм для испытания на растяжение вырезались из сварного шва вдоль его оси, образцы для определения ударной вязкости с надрезом Менаже – поперек шва. Результаты механических испытаний (таблица 4) подтвердили высокое качество сварки.

Таблица 4 *Механические свойства металла шва, выполненного электродами УОНИ-13/55.*

Диаметр электрода, мм	$\sigma_р$, МПа	σ_{02}, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %	KCU, кДж/м^2
3,0	328-382 361	360-397 375	545-574 560	17,9-20,6 18,8	58,4-63,7 61,3	1462-1697 1579
3,5	315-370 336	370-404 390	541-559 551	19,5-20,4 20,0	61,1-61,4 61,3	1648-1668 1658
5,0	341-363 355	362-424 397	536-556 551	18,9-22,4 20,1	60,9-72,7 63,4	1697-1903 1785

Оценка ударной вязкости и микроструктуры после различных видов термообработки, аналогичных приведенным выше для электродов УОНИ-13/65, показала нечувствительность металла шва, выполненного электродами УОНИ-13/55 к старению. Было отмечено, что участок перегрева в нижней части ЗТВ, претерпевает нормализацию. Это впоследствии использовалось для исправления перегретой структуры путем применения отжигающих валиков. Структура металла шва, также как и наплавленного металла при применении электродов УОНИ-13/55 и УОНИ-13/65 представляет собой смесь феррита и перлита. При закалке от 950° С в воду металл шва имеет ферритно-мартенситную структуру

Важнейшим качеством электродов УОНИ-13 всех марок является низкое содержание в наплавленном металле вредных примесей. Например, в металле, наплавленном электродами УОНИ-13/65 диаметрами 3,0, 3,5 и 5 мм, максимальное количество кислорода по данным трех измерений не превысило соответственно 0,0205, 0,0265 и 0,0237%, а азота – 0,0104, 0,0100 и 0,0100%.

Плотность металла, наплавленного электродами УОНИ-13/45, УОНИ-13/55 и УОНИ-13/65, составляет соответственно 7,82, 7,84 и 7,85 г/см^3.

Технико-экономические показатели были определены экспериментально с применением электродов УОНИ-13/65 диаметром 4 мм:

- производительность наплавки -1375 г/час,
- коэффициент наплавки – 9,81 г/А×час,
- коэффициент расплавления – 9,36 г/А×час,
- потери на угар и разбрызгивание – минус 4,8%.

Явление отрицательного угара и разбрызгивания объясняется почти полным отсутствием у электродов УОНИ-13 искрообразования, а также переходом части ферросплавов из обмазки в металл шва.

1.5 Организация производства электродов УОНИ-13

Для организации производства электродов во временных полукустарных электродных мастерских методом окунания прежде всего была разработана «Инструкция по изготовлению и сварке электродами УОНИ-13». Инструкция имела закрытое приложение с рецептурами покрытий, которое, к большому сожалению, не сохранилось в архивах института. По данным [2] в таблице 5. приведена рецептура, использовавшаяся в 1946 г.

Таблица 5 *Рецептура шихты для покрытий электродов УОНИ-13, % масс.*

Компоненты сухой шихты	УОНИ-13/45	УОНИ-13/55	УОНИ-13/65	УОНИ-13/85	УОНИ-13/н.ж.
Мрамор ($CaCO_3$)	53,0	54,0	51,0	54	57,5
Плавиковый шпат (CaF_2)	18,0	15,0	15,5	15,0	33,5
Кварцевый песок (SiO_2)	9,0	9,0	8,0	-	-
Ферротитан	15,0	12,0	15,5	9,0	2,5
Ферросилиций	3,0	5,0	3,0	10,0	4,0
Ферромарганец	2,0	5,0	7,0	7,0	2,5
Ферромолибден	-	-	-	5,0	-

Примечание: сухая шихта замешивается на жидком натровом стекле
(28% от массы сухой шихты, плотность 1,47 г/см3, модуль 2,7-2,9)

Большое внимание в инструкции было уделено качеству минерального сырья и прежде всего его чистоте от вредных примесей S и P. Были определены поставщики минерального сырья. В частности, мрамор должен быть белого или серого цвета (стального цвета мрамор содержит вредные сернистые колчеданы) и содержать не менее 92% Ca_2CO_3. Поставлялся мрамор гарнильными заводами Москвы и Ленинграда в виде крошки и небольших кусков.

Плавиковый шпат должен содержать не менее 88,5% CaF_2, сера и фосфор могут присутствовать только в виде следов. Чем прозрачнее плавиковый шпат, поставляемый в виде кусков, тем он чище, опасной примесью являются сернистые колчеданы.

Ферромарганец должен содержать не менее 85% марганца. Опасной примесью является фосфид кремния (SiP).

Ферросилиций должен содержать не менее 75% кремния.

Ферротитан должен содержать от 18 до 24% титана, до 6,0% Al, менее 0,07% P и 0,1% S. Заказывать ферротитан предлагалось в НИИ-13, т.к. от других производителей этот продукт плохо поддается дроблению.

Ферромолибден должен содержать не менее 60% молибдена.

Кварц (Карельский, первый сорт) должен содержать не менее 96% SiO_2 при минимальном количестве серы и фосфора (следы). Поставщик – трест Карелгранит.

Жидкое стекло (содонатровое) с модулем 2,7 – 2,9 и плотностью 1,43 г/см^3 не должно содержать более 0,1% серы. Поставщик глыбы жидкого стекла – химический завод в поселке Саблино Ленинградской области.

Размол компонентов должен производиться в шаровых мельницах. Мельницы должны быть тщательно очищены от остатков компонента предыдущего помола. Все компоненты должны быть просеяны через сито в 100 меш (100 отверстий на длине сетки, равной 1 дюйму).

В инструкции подробно описываются операции:

- приготовления сухой смеси с акцентом на очередность засыпки и тщательное ручное перемешивание компонентов партиями до 5 кг;
- подготовки жидкой обмазки для первого окунания, предусматривавшие предварительное растирание в ступе сухой смеси с добавлением густого жидкого стекла и разбавлением смеси холодной водой до плотности 1,75 г/см^3;
- обмазки электродов путем первого окунания (вручную по 10 – 15 штук);
- подготовки жидкой обмазки плотностью 1,98 – 2,0 г/см^3 для второго окунания в количестве не более 2 кг во избежание ее газирования с выделением ацетилена;
- подготовки электродных стержней, которая предусматривала их правку (прогиб не более 0,2 мм при длине 400 мм) и очистку от следов масла и других загрязнений, вставления в специальные зажимы для последующей обмазки и сушки;
- нанесения первого слоя покрытия толщиной до 0,2 мм окунанием стержня вертикально в жидкую обмазку на заданную глубину (не доходя до зажима на 5 – 10 мм) с последующей сушкой на воздухе в течение 1,5 – 2 часов в подвешенном состоянии;
- нанесения второго слоя покрытия вторичным окунанием (ниже уровня первого слоя на 2 – 3 мм) с выдержкой в жидкой обмазке в течение 1 - 2 с и равномерным подъемом электрода строго в вертикальном положении с последующей сушкой при температуре 15 – 20º С в течение суток;
- контроля толщины покрытия с учетом установленных размеров по диаметру:

2 мм	3,2 ± 0,15 мм
3 мм	4,6 ± 0,15 мм
4 мм	6,1 ± 0,15 мм
5 мм	7,5 ± 0,15 мм;

- зачистки нижнего конца электрода абразивом средней зернистости до обнажения металлического стержня;
- прокалки в электрической или муфельной печи в вертикальном положении (электроды помещаются в специальные рамки с сеткой в верхней части, размер ячеек – 10 мм) при температуре 350 – 400º С в течение 30 минут с последующим охлаждением рядом с печью;
- визуального контроля для выявления трещин и испытания прочности обмазки бросанием в горизонтальном положении на бетонный пол с высоты 1,5 м (частичные откалывания обмазки не являются браковочным признаком);
- контроля кипячением в воде в течение одного часа с последующей сушкой на воздухе в течение суток и сжигания 10 электродов (не должно быть ухудшения технологических свойств);
- упаковки по 10 – 15 кг в железные ящики с крышками, на дне которых должна быть наклеена этикетка или выбита марка электродов.

Для нанесения покрытия методом опрессовки не требуется введения в шихту или связующее смазывающих веществ (известь, каолин, сода). Для качественной опрессовки необходимо обеспечить давление на массу в цилиндре пресса не менее 600 кг/см^2.

Последний раздел инструкции посвящен технологии (технике выполнения) и режимам сварки. Отмечается, что сварку ведут опиранием конца электрода о свариваемые кромки. Электрод должен иметь наклон в сторону движения на угол 65 – 80º. При сварке в глубокую разделку швы должны иметь вогнутую форму, что достигается поперечными колебаниями конца электрода с задержками в крайних положениях и быстрым прохождением середины шва. Шлак сверху, снизу и в изломе должен иметь блестки, напоминающие «изморозь», от рассеяния света на плоскостях кристаллов. Сварка легко осуществима в любом пространственном положении и при небольших углах глубокой разделки.

Для удовлетворения потребностей всего Наркомата Вооружений (НВ) в качественных электродах была выполнена большая организационная работа. Обследование ряда заводов показало, что наиболее подходящим заводом для создания электродного цеха являлся завод №7 (ныне «Арсенал» в г. Санкт-Петербурге), где имелось подходящее здание. Строительство цеха было одобрено НВ.

Дальнейшая работа была направлена на выбор оборудования. «Машимпорту» было поручено получить предложения от европейских и американских фирм, изготавливающих комплектное оборудование для производства электродов. Параллельно было проведено обследование постановки дела на ряде союзных заводов – крупных производителей электродов, в т.ч. на Кировском заводе в Ленинграде и электродном заводе «Оргаметалла» в Москве.

На Кировском заводе имелась большая электродная мастерская, но работа велась почти при полном отсутствии механизации и не отвечала поставленным требова-

ниям. На Московском заводе «Оргаметалла» производство было частично механизировано, но прессы - «экструдинги», спроектированные на базе американского образца, выпускавшегося в 1928 -1929 г.г. на заре электродного производства, имели низкую производительность (30 – 40 электродов в минуту). Из-за низких точности и качества опрессовки, а также капризности прессов в работе выпуск электродов с их применением не превышал 10% объема производства завода. Поэтому на такое оборудование ориентироваться было нельзя.

Прессы, спроектированные в Институте Электросварки АН Украины, еще не были изготовлены, и невозможно было судить об их работоспособности и качестве продукции. Таким образом, отсутствие в СССР необходимого электродообмазочного оборудования потребовало приобретения его за рубежом.

Из предложного оборудования лучшая производительность была у американских машин (240 электродов в минуту у европейских – не более 110). Кроме того американские фирмы в отличие от европейских поставляли оборудование комплектно. Поэтому оборудование было заказано американской фирме «Aufhauser Brothers».

Параллельно с заказом оборудования совместно с представителями завода №7 были составлены заявки на минеральное и прочее сырье, а также на электродную проволоку в размерах, достаточных для годовой работы создаваемого электродного цеха, пуск которого мог быть осуществлен в 1941 г. Однако создание нового производства на заводе №7 прервала Великая Отечественная Война.

Часть II. Итоги промышленного применения электродов с покрытием УОНИ-13 в предвоенные годы и во время Великой Отечественной войны.

(по материалам отчета №700, подготовленного в декабре 1946 г. и представленного на соискание Сталинской премии)

Электроды УОНИ-13 за прошедшие 7 лет после их разработки были признаны, как наиболее совершенный и универсальный расходный материал для сварки различных конструкций во всех отраслях союзного машиностроения. «В суровых условиях войны всесторонне выявилось оборонное и народохозяйственное значение электродов УОНИ -13, которое благодаря стабильности высоких свойств металла сварных швов, позволило без всяких ограничений применять сварку в оборонном и общем машиностроении.

Технический отдел Министерства Вооружения (МВ) сразу оценил значение новых электродов и возглавил их внедрение на заводах МВ» [3]. На других заводов внедрение шло в децентрализованном порядке, поэтому все ценные замечания, технологические характеристики, заводская документация и экономические расчеты, приведенные в актах внедрения, были разбросаны в материалах различных ведомств и в отчете [3] не приведены. Поэтому в указанном отчете рассматриваются только материалы, представленные наиболее крупными и наиболее требовательными предприятиями, каковыми с точки зрения широты применения и исследования сварки являлись:

- основная группа ленинградских судостроительных заводов;
- ведущих артиллерийских заводов;
- судостроительной промышленности (МСП);
- группа крупнейших отраслевых научно-исследовательских институтов бывших наркоматов танковой, тяжелой и судостроительной промышленности.

2.1 Итоги внедрения электродов УОНИ-13 на заводах МВ.

Качество электродов УОНИ-13 с честью выдержало очень жесткую проверку на предприятиях МВ, т.к. их продукция отличается широким применением высокопрочных трудно сваривающихся сталей, малым запасом прочности, динамичностью нагрузок и высокими требованиями по надежности в эксплуатации выпускаемых изделий. Эти условия выполнимы только в случае равнопрочности сварных соединений основному металлу, высокой пластичности и ударной вязкости металла шва, стабильности его качества, т.е. при использовании весьма совершенных электродов.

Внедренческая работа на заводах МВ началась с организации производства электродов. Эта трудоемкая работа имела особое значение, т.к. ни один из заводов МВ, за исключением завода «Большевик» (ныне «Обуховский») не имел своего электродного производства. При энергичном содействии Технического отдела МВ эта работа была закончена в короткий срок.

Первое применение электродов УОНИ-13 началось с исправления литых и кованых деталей артиллерийского и стрелкового вооружения, забракованных контролем Главного артиллерийского управления (ГАУ). Качество заваренных и механически обработанных после сварки деталей оказалось настолько безупречным, что в дальнейшем сварка была допущена к исправлению дефектов деталей вооружения практически без ограничений.

Экономическая эффективность, полученная в результате заварки дефектов только на одном заводе № 172 (ныне Мотовилихинские заводы г. Пермь) и подсчитанная по стоимости неотправленного в брак металла, составила свыше 2,3 млн. рублей в год, а с учетом затрат на почти законченную обработку деталей и предотвращение срыва сроков поставки фактическая эффективность была существенно большей. Всего за один год согласно письму и.о директора этого завода в адрес НИИ-13 исправление дефектов сваркой с применением электродов УОНИ-13 позволило в трех цехах отремонтировать 535 верхних и 173 нижних станков гаубицы-пушки МЛ-20 калибра 152 мм, а также 113 верхних, 207 нижних станков и 400 шарнирных частей гаубицы М-10 того же калибра. Этот этап применения электродов прошел на всех заводах МВ с одинаковым успехом.

Следующий этап внедрения электродов – использование сварки в качестве основного технологического процесса при изготовлении деталей и узлов артиллерийских систем проходил в условиях отсутствия опыта конструирования сварных изделий

на предприятиях МВ. Несмотря на высокую степень ответственности, неудачные опыты по применению сварки на артиллерийских заводах в период до появления электродов УОНИ-13 и на то, что в начальный период изделия переводились с использования цельных отливок и поковок, а также клепаных конструкций на сварку без серьезной конструктивной переработки, сварные артиллерийские изделия при эксплуатации вели себя безупречно.

Значение электродов УОНИ-13 при использовании сварки в качестве основного технологического процесса при производстве артиллерийской техники было высоко оценено уже в первый год Великой Отечественной войны при изготовлении на Мотовилихинских заводах (г. Пермь) штампосварных конструкций верхнего станка системы МЛ-20, захватов ствола системы 52-С-544А и моноблока системы 52-С-353 взамен сложных отливок.

После сравнительных прочностных испытаний литых и сварных конструкций верхнего станка системы МЛ-20, подтвердивших более высокую работоспособность и надежность сварных изделий по сравнению с литыми, было принято решение о переходе в серийном производстве на штампосварную конструкцию этого изделия. При этом себестоимость изготовления верхнего станка была снижена с 4296 руб. (литой вариант) до 2092 руб. (штампосварной вариант). После войны по программе мирного времени только на одном заводе, указанном выше, экономия составляла более 3 млн. руб. в год.

Перевод захватов системы 52-С-544А и моноблока системы 52-С-353 характерен тем, что сварка впервые была применена для деталей ствольной группы, изготавливавшихся из высокопрочной трудно свариваемой марки стали типа ОХН3М. Эта работа началась только вследствие большого доверия конструкторов и технологов к качеству соединений, выполняемых с применением электродов марки УОНИ-13. Тщательные испытания этих сварных конструкций подтвердили их полную надежность и высокую рентабельность в производстве. Экономия металла на одно орудие составила 1200 кг, а общая годовая экономия затрат составила более 5 млн. руб.

Техотдел МВ только по результатам внедрения электродов УОНИ-13 на 8 заводах (из 60) оценил годовой экономический эффект (без учета приведенной экономии от сварки захватов и моноблоков) в сумме свыше 7,8 млн. руб. Эта сумма образовалась в основном за счет следующих факторов:

- экономии электродов УОНИ-13 по сравнению с электродами других марок (отечественных и импортных) вследствие уменьшения размеров швов из-за более высокой прочности наплавленного металла и уменьшения его потерь на разбрызгивание и угар;

- повышения производительности труда сварщиков вследствие повышенного коэффициента наплавки, легкости ведения процесса сварки в любых пространственных положениях.

Электроды УОНИ-13 обеспечили возможность неограниченного применения сварки, в результате чего заводы МВ освоили и стали широко применять новый прогрессивный способ конструирования и производства современного вооруже-

ния, увеличивающий производственные мощности заводов без существенных капитальных вложений.

В 1944 г. была издана нормаль наркомата вооружений "Электроды для дуговой сварки" (Н029), куда вошли УОНИ-13 электроды затем она неоднократно переиздавалась, в том числе под номером Н0518-67 - в 1967 г., а в 1975 г. нормаль заменили на ОСТЗ-3080-75, который был переработан в 1992 г. Рецептуру покрытий и нормативно-техническую документацию на электроды приходилось периодически корректировать в связи с изменениями ТУ на рудные компоненты, добываемые на различных месторождениях, и ферросплавы для покрытий.

2.2 Итоги внедрения электродов УОНИ-13 на заводах бывшего Наркомата Танковой промышленности.

Значение качества электродов является решающим при сварке броневой стали. Стойкость броневых корпусов против действия снарядов зависит целиком от стойкости сварных швов и околошовных зон, в которых может происходить потеря вязкости вследствие закалки. При недостаточной ударной вязкости в случае удара снаряда о броню в сварных швах образуются трещины. Условию обеспечения высокой ударной вязкости и минимального теплового воздействия на броневую сталь до появления электродов УОНИ-13 удовлетворяли только повсеместно применявшиеся электроды со стержнями из высоколегированной хромоникелевой стали. Американская фирма «Линкольн», английская «Мурекс» и германские заводы Крупа использовали для электродных стержней проволоку, содержащую 24 – 27% хрома и 19 – 22% никеля.

В СССР до войны, когда производство танков было ограниченным, расход дефицитного никеля вызывал большие опасения. В связи с этим в отраслевых НИИ проводились исследования, направленные на изыскание для сварки брони электродов, не содержащих никель. Возросшее во время Великой Отечественной войны производство танков и трудности в получении нужного количества проволоки с высоким содержанием дефицитного никеля, угрожали срывом работы корпусных танковых заводов.

Исследованиями, проведенными НИИ-48 НКТП совместно с крупнейшими танковыми заводами («Ижорским», «Уралмашем» и др.) было установлено, что единственным заменителем аустенитных электродов являются электроды УОНИ-13. Последующим широким применением электродов УОНИ-13 на корпусных танковых заводах была обеспечена бесперебойная их работа независимо от состояния поставок хромоникелевой аустенитной проволоки.

В 1942 – 1943 г.г. только один «Уралмашзавод» потреблял ежегодное количество электродов, для изготовления которых требовалось 1440 тонн проволоки. Поэтому применение электродов УОНИ-13 позволило на этом заводе только за два года войны сэкономить примерно 350 тонн никеля и 750 тонн хрома.

В среднем ежегодное потребление электродов УОНИ-13 на заводах НКТП примерно в 5 раз превышало их потребление на заводах МВ, т.е годовая экономия от применения электродов УОНИ-13 на танковых заводах даже без учета экономии

никеля и хрома составляла свыше 40 млн. рублей.

Использование электродов УОНИ-13 не требовало от сварщиков высокой квалификации. Поэтому обучение рабочих шло быстрыми темпами, и это обстоятельство позволяло постоянно наращивать выпуск сварных конструкций.

2.3 Итоги внедрения электродов УОНИ-13 на заводах бывшего Наркомата Судостроительной промышленности.

До появления электродов УОНИ-13 Судостроительные заводы использовали в большом количестве преимущественно импортные электроды различных марок американского и германского производства. Острая нужда в универсальных электродах вызвала большой интерес к предложенным для внедрения электродам УОНИ-13, что способствовало их быстрому освоению в производстве и при применении.

Тщательное промышленное опробование перед войной на группе ленинградских судостроительных заводов (им. Марти, им. Жданова, Балтийском и др.) подтвердило высокое качество электродов УОНИ-13 и их превосходство над импортными электродами.

Замена импортных электродов на отечественные позволило успешно и в короткие сроки изготовить суда специального назначения на заводе им. Марти. Этот первый опыт успешного применения электродов УОНИ-13 в судостроении привел к тому, что ряд крупнейших судостроительных заводов перепроектировал отдельные оборонные объекты, переведя их целиком на сварку. Использование электродов УОНИ-13 было внесено в технологическую документацию сначала на ведущих заводах судостроения, а затем НКСП выпустил технические условия ТУ-204-42-НКСП, предписывающие их применение на всех заводах отрасли.

Проблема дефицита аустенитных электродов для сварки брони стояла и перед НКСП. Без решения этой проблемы затруднялось своевременное изготовление бронекатеров, бронированных укрытий и т.п. С помощью НИИ №45 НКСП заводы успешно перешли на сварку броневых конструкций с применением электродов УОНИ-13. При этом также была получена большая экономия никеля и хрома.

Объем потребления электродов УОНИ-13 на заводах НКСП примерно в 2 раза выше, чем на заводах МВ. Поэтому минимальная ежегодная экономия от их потребления в судостроении (без учета стоимости сэкономленных никеля и хрома) во время войны составляла не менее 15 млн. рублей в год.

Часть III. РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОДОВ УОНИ-13 ДЛЯ МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА НА МОЩНЫХ ПРЕССАХ.

(по материалам отчета №1606, подготовленного в январе 1951 г. и представленного на соискание Сталинской премии)

Высокое качество сварных швов, возможность сварки углеродистых и легированных сталей, прекрасный комплекс технологических свойств зарекомендовали электроды УОНИ-13 в годы Великой Отечественной войны, как наиболее качественный материал для ручной дуговой сварки различных конструкций наиболее ответственного назначения. Эти электроды вызвали за рубежом многочисленное подражание как во время войны, так и после нее: электроды «Гарант», «Зенит», «Универсаль-350» и др. (Германия), «Супер-Марин» (Англия), многочисленные марки ферритных электродов (США) и т.д. Это показывает, что научных разработок в области металлургических проблем сварки, подобных выполненным в НИИ-13 под руководством К.В. Петраня еще до войны, за рубежом не было.

Производство сварных конструкций из углеродистых сталей повышенной прочности, легированных и специальных сталей резко возросло в послевоенные годы. Эти стали могли свариваться только электродами УОНИ-13. Увеличение потребления электродов УОНИ-13 вызвало необходимость их изготовления на мощных электродных прессах с высокой производительностью (180 – 400 штук в минуту).

Для изготовления методом опрессовки электродов с толстым покрытием в 1946 г. была спроектирована и изготовлена автоматическая линия, которая включала устройства для подачи стержней в головку пресса, нанесения на стержень массы покрытия и очистки концов стержней от напрессованной массы (рисунок 2).

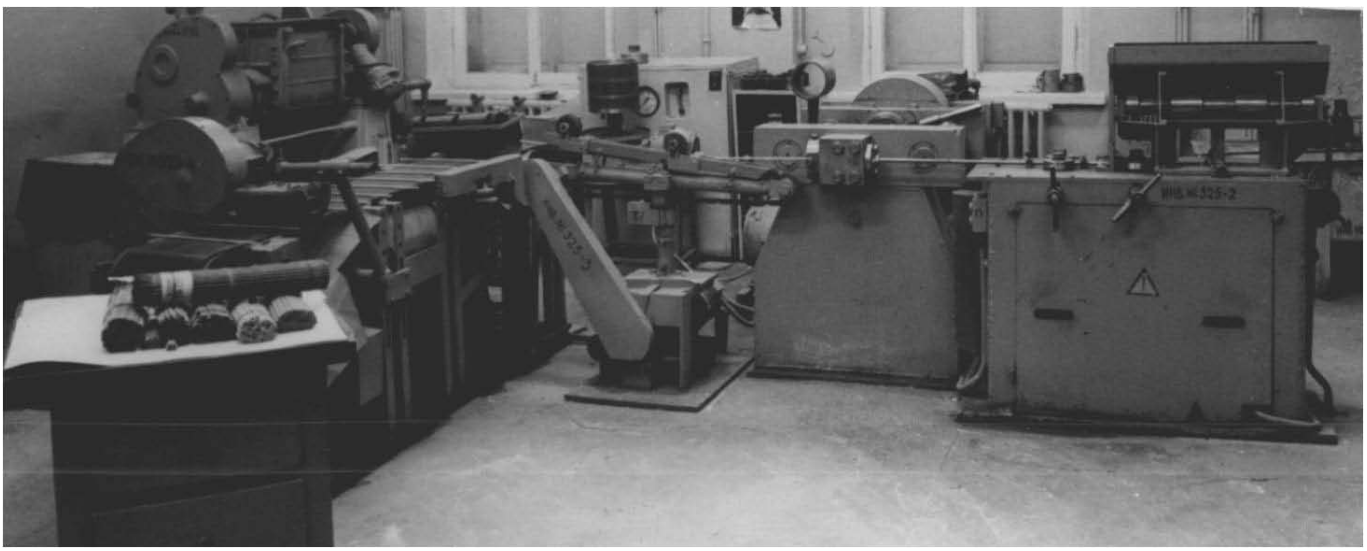


Рисунок 2 *Автоматическая линия для изготовления электродов с толстым покрытием методом опрессовки, спроектированная и изготовленная в 1946 г..*

Производительность линии составляла 150 электродов в минуту при давлении в прессе на обмазочную массу 65 МПа. Это оборудование без переделок использова-

лось в отделе сварки института для исследовательских целей и при производстве небольших партий специальных электродов (для наплавки и сварки нержавеющих сталей и чугуна) по заказам предприятий вплоть до 2004 г.

До 1950 г. изготовление электродов УОНИ-13 на мощных прессах встречало значительные затруднения. Поэтому производители электродов, такие как Московский электродный завод, Московский опытный электродный завод МПС, Днепропетровский метизный завод, и завод № 457 Минестерства судостроительной промышленности (МСП, ныне «Адмиралтейские верфи») отказывались изготавливать электроды УОНИ-13 на мощных прессах. В силу необходимости осуществлять их поставки заводы использовали устаревшую технологию по методу окунания (завод № 457), или использовали пресса малой мощности, работавшие при небольшой массе обмазки, загружаемой в цилиндр пресса.

Причина возникших трудностей связана с тем, что обмазочная масса, загруженная в цилиндр пресса, быстро твердела и теряла необходимую пластичность. При этом происходил ее нагрев до 60 – 80° С. Понижение консистенции электродной массы путем увеличения содержания жидкого стекла позволило производить опрессовку с использованием только части обмазки, загруженной в цилиндр пресса (не более половины). Но даже и в этом случае истечение массы из сопла происходило неравномерно и сопровождалось образованием эксцентричности покрытия.

Перед коллективом лаборатории сварки НИИ-13, возглавляемой К.В. Петранем, была поставлена труднейшая задача откорректировать рецептуру электродов УОНИ-13 для решения важнейшей проблемы – обеспечения их массового производства с применением высокопроизводительных электродообмазочных прессов. Поставленная задача была успешно решена при проведении подробных исследований и внедрении их результатов на заводах – производителях электродов в 1949-1950 г.г. [3].

Введение в состав обмазки 5% порошка силикат-глыбы и 0,5% соды улучшило ее свойства, но процесс опрессовки оставался весьма затруднительным. Применение различных пластификаторов (талька, каолина, отмученного мела, бентонита, двуокиси титана и т.д.) не улучшало свойств покрытия. Добавки 8% каолина и 4% двуокиси титана позволило осуществить опрессовку на мощных прессах, но такое количество добавок ухудшило технологические свойства электродов и понизило механические свойства наплавленного металла. Кроме того добавки бентонита и каолина исключают возможность полного удаления влаги из покрытия даже при максимально допустимой температуре прокалки 450° С, т.е. электроды теряют свое главное достоинство – уже не могут считаться безводородными.

Этими экспериментами было показано, что для улучшения пластичности и устранения затвердевания обмазочной массы допустимо лишь незначительное изменение ее рецептуры.

Дополнительными опытами с обмазочной массой, не содержащей ферросплавы, было показано, что даже при длительной (до 1,5 часов) выдержке под высоким давлением (более 110 МПа) ее затвердевание и нагрев не происходили. Только введение ферросплавов, главным образом ферросилиция и ферромарганца, приводило к разогреву и твердению обмазочной массы. По предположению К.В. Петраня возмож-

ными причинами этого явления могли быть:

- реагирование ферросплавов со щелочью жидкого стекла;
- участие мелкодисперсного железа и его оксидов в реакции гидратации в качестве катализатора (явление, известное по процессам гидратирования цементов);
- образование газообразной фазы (выделение водорода и углеводородов), образующейся при реагировании ферросплавов с жидким стеклом.

На основании приведенных экспериментальных данных был намечен следующий путь торможения затвердевания обмазочной массы при опрессовке электродов:

- максимально ограничить контакт жидкого стекла с частицами ферросплавов;
- уменьшить скорость диффузии молекул щелочи в жидком стекле.

Уменьшение контакта жидкого стекла с ферросплавами возможно путем уменьшения поверхности частиц ферросплавов. Расчетами было показано, что суммарная площадь поверхности частиц в одном кубическом сантиметре в зависимости от их размеров 30 мкм, 100 мкм, 250 мкм и 400 мкм составляет соответственно 1999, 600, 240 и 150 $см^2$. Принималось, что частицы имеют форму куба. Реально из-за более сложной формы частиц указанные площади еще больше. Увеличение размера частиц ферросплавов не рационально, т.к. это могло бы вызвать повышенный износ формующего сопла головки пресса.

Уменьшение скорости диффузии возможно за счет повышения вязкости (плотности) жидкого стекла. Экспериментально было установлено, что равномерное распределение компонентов обмазки в замесе возможно только при плотности жидкого стекла не более 1,72 $г/см^3$. Но при такой плотности для получения даже полусухой электродной массы количество жидкого стекла требуется увеличить почти в 2 раза (до 44,5% от веса сухой шихты). При этом обмазка не успевает затвердеть в процессе изготовления электродов, но ее прохождение через формующее сопло не происходит равномерно, что свидетельствует о неоднородности электродной массы и вызывает эксцентричность обмазки. Корректировка шихты в этом случае за счет изъятия кварцевого песка не достаточна для обеспечения необходимых свойств шлака, он становится стекловидным и плохо удаляется с поверхности наплавленного валика, особенно по его краям.

Исследование тонкого слоя электродной массы под микроскопом показало, что в отдельных местах сохранились участки, целиком состоящие из жидкого стекла. Это свидетельствовало о недостаточно полном перемешивании обмазки на существовавших в конце 40-х годов 20-го века смесительных машинах.

Предварительное пропускание электродной массы через формующее сопло пресса без подачи электродных стержней и последующее изготовление электродов с применением этой массы показало улучшение ее пластичности и уменьшение эксцентричности покрытия. При этом под микроскопом было замечено, что размеры и количество участков жидкого стекла существенно уменьшились. Однако такой прием практически в 2 раза уменьшал производительность пресса, а затраты энер-

гии при этом соответственно увеличивались.

Несмотря на правильность идеи торможения процесса диффузии и уменьшения удельной поверхности частиц ферросплавов опыты показали трудность замешивания шихты на растворах жидкого стекла большой плотности. Исходя из этого, возникла новая задача – найти пути равномерного распределения в шихте жидкого стекла высокой плотности.

Экспериментально с помощью специально разработанного прибора «ИК» (по качественному определению консистенции и истечению массы из сопла) было установлено, что высокая равномерность смешения шихты с раствором жидкого стекла возможна только при его плотности не более 1,56 г/см^3. Но и при такой плотности обмазочная масса затвердевала при опрессовке и сохранялась частичная эксцентричность покрытия.

На основе этих экспериментов у разработчиков возникла новая идея, связанная с обезвоживанием жидкого стекла меньшей плотности после замешивания шихты за счет введения специальной добавки, активно связывающей воду. Это вещество в очень дисперсном состоянии должно быть равномерно распределено в сухой шихте и не должно изменять технологических свойств покрытия и механических свойств наплавленного металла. Таким веществом может быть негашеная известь (CaO) или кальцинированная сода (Na_2CO_3).

Введение гашеной извести не может нарушить рецептуру покрытия, однако она обладает значительной теплотой гидротации (15,9 ккал/г×моль), а температура дегидротации – 510º С (при давлении паров воды 760 мм рт. ст.). При максимально допустимой температуре прокалки 450º С упругость пара составляет 320 мм рт. ст. При такой температуре на обезвоживание покрытия потребовалось бы 47 – 48 минут. Кальцинированная сода в количестве до 3,5% не нарушает свойств электродов. Образование кристаллогидрата соды ($Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$) сопровождается выделением 22 ккал/г×моль, но если при образовании $Ca(OH)_2$ на одну молекулу CaO затрачивается одна молекула H_2O, то при образовании $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$ одна молекула Na_2CO_3 присоединяет к себе 10 молекул H_2O, т.е. для изъятия одинакового количества воды из раствора жидкого стекла необходимо вводить в обмазку соды в 10 раз меньше, чем негашеной извести. При этом количество выделившегося тепла уменьшается в 7,2 раза. Поэтому в качестве добавки в шихту, предназначенной для повышения плотности жидкого стекла, была выбрана сода.

Проведенные эксперименты с введением в покрытие электродов УОНИ-13/55 негашеной извести и кальцинированной соды подтвердили теоретические представления и показали преимущество соды, выражающееся в более эффективном ее действии. Сода также более устойчива при длительном хранении.

Экспериментально было установлено, что при использовании жидкого стекла с плотностью 1,52 ± 0,01 г/см^3 и с модулем 2,7 – 2,9 достаточно ввести в состав сухой шихты 1,6% кальцинированной соды, которая может впоследствии связать 1/3 воды из раствора жидкого стекла. При этом плотность жидкого стекла может быть доведена до 1,7 г/см^3. При атмосферном давлении действие соды протекает очень медленно (в течение 5 – 6 часов). При высоком давлении (65 – 70 МПа), развиваемом

в цилиндре пресса, сода действует очень быстро за счет более плотного контакта с жидким стеклом. Испытание с помощью прибора «ИК» электродной массы, содержавшей 1,6% соды, показало высокую пластичность обмазки. Такой же вывод был сделан при изготовлении опытной партии электродов на мощном прессе с загрузкой в цилиндр 15 кг электродной массы. При этом было отмечено отсутствие эксцентричности покрытия.

На заключительном этапе по разработанной рецептуре (таблица 6) в лабораторных условиях на мощном прессе было изготовлено около 5 тонн электродов диаметром 3, 4 и 5 мм (по проволоке). При этом отрегулированное в начале смены положение формующего сопла сохранялось без корректировок в течение 8 часов. Разнотолщинность покрытия выдерживалась в пределах 0,05 мм.

Таблица 6 *Рецептура покрытий УОНИ-13/45 и УОНИ-13/55, % масс.*

Компоненты сухой шихты	Состав для опрессовки		Стандартный состав (для окунания)		Соотношение масс жидкого стекла и сухой шихты
	УОНИ-13/45	УОНИ-13/55	УОНИ-13/45	УОНИ-13/55	
Мрамор ($CaCO_3$)	48,0	48,0	53,0	54,0	Для опрессовки 28% (плотность 1,52-1,53 г/см3, модуль 2,7-2,9)
Мел (CaCO3)	6,0	6,0	-	-	
Плавиковый шпат (CaF_2)	16,4	14,9	18,0	15,0	
Кварцевый песок (SiO_2)	7,0	7,5	9,0	9,0	
Ферротитан	15,0	12,0	15,0	12,0	
Ферросилиций	3,0	5,0	3,0	5,0	
Ферромарганец	3,0	5,0	2,0	5,0	Для стандартного состава 28% (плотность 1,47 г/см3, модуль 2,7-2,9)
Сода (Na_2CO_3)	1,6	1,6			

Далее опыты были перенесены в электродный цех завода № 457 МСП, где до этого в течение двух лет безуспешно пытались наладить производство электродов УОНИ-13/45 и УОНИ-13/55 на мощных прессах Кьельберга. На этом заводе с 15 ноября 1950 г. по 1 января 1951 г. было изготовлено на прессах Кьельберга и Садовского 78 тонн электродов УОНИ-13/45 и УОНИ-13/55. После этого выпуск электродов с покрытием УОНИ-13 на заводе № 457 МСП методом окунания был прекращен.

Из таблицы 6 следует, что изменение шихты при введении в ее состав соды было незначительным.

В 1950 г. новые рецептуры покрытий были успешно внедрены при производстве электродов марок УОНИ-13/45 и УОНИ-13/55 на трех ленинградских заводах: «Большевик» МВ, «Балтийский» и № 457 МСП. При этом химический состав и механические свойства наплавленного металла полностью соответствовали ранее установленным требованиям.

Использование электродов, изготовленных по новой рецептуре, на машиностроительных заводах и при строительстве газопроводов подтвердили их высокие технологические качества, в том числе отсутствие дефектов, малое разбрызгивание,

возможность сварки в потолочном положении и легкую отделяемость шлака. Так была решена проблема массового производства высококачественных электродов УОНИ-13 на мощных высокопроизводительных прессах.

Часть IV. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОДОВ С ФТОРИСТО-КАЛЬЦИЕВЫМ ПОКРЫТИЕМ ДЛЯ СВАРКИ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ.

(по материалам научно-технического отчета №1606, подготовленного в январе 1951 г. представленного на соискание Сталинской премии)

Электроды УОНИ-13, завоевавшие всеобщее признание благодаря высоким механическим свойствам наплавленного металла, технологичности и универсальности, имели существенный недостаток – они не могли использоваться при работе на переменном токе. В первый год их применения (в 1939 г.) парк сварочных машин постоянного тока был достаточным для выполнения сварочных работ, но уже в 1942 г. ввиду резкого увеличения их объема стал ощущаться недостаток сварочных мотор-генераторов (умформеров). Сварочные умформеры требовали квалифицированного обслуживания, ввиду тяжелых условий работы и наличия вращающихся деталей они требовали также частого профилактического ремонта. КПД умформера равен произведению КПД мотора на КПД генератора, поэтому он существенно меньше КПД сварочного трансформатора.

Сварочные трансформаторы в 4 – 5 раз дешевле, а расход электроэнергии на килограмм расплавленных электродов на 2,5 – 4 кВт•час меньше по сравнению с умформерами. Производство умформеров было возможно только на специализированном предприятии, тогда как изготовление сварочных трансформаторов могло быть организовано на любом предприятии.

Эти преимущества вызвали острую необходимость в разработке новых электродов для сварки на переменном токе, сохраняющих все достоинства электродов УОНИ-13, аналогов которым не было ни в СССР, ни за рубежом.

Ряд отечественных и иностранных марок электродов, например новые электроды ЦМ-7 позволяли вести сварку на переменном токе, но только в том случае, если содержание углерода в стали не превышало 0,25%. Ряд электродов иностранных марок отличался ограниченностью применения также по положению шва в пространстве.

4.1 Теоретические положения.

Скорость образования металла шва из расплавляемых электрода и основного материала настолько значительна, что нельзя предполагать возможности получения металла шва однородного по химическому составу и физическим свойствам. К.В. Петрань подтвердил это положение, сделав химический анализ (по 9 основным элемента) металла шва на различных расстояниях от границы сплавления. В эксперименте пластины из стали с 3% никеля сваривались в V-образную разделку за 2 прохода электродами

УОНИ-13/65. При этом было установлено, что вблизи границы сплавления шов ближе по составу к основному материалу, а ближе к центру – к металлу, наплавленному электродами.

Процесс перехода электродного металла через дуговой промежуток также сопровождается изменением его химического состава. Физические свойства металла при одинаковом химическом составе зависят от его структуры и фазового состава. Поэтому физические свойства сварного соединения зависят от многих факторов, действующих как в момент получения соединения, так и в процессе его остывания после сварки.

Сложность металлургического процесса сварки заключается прежде всего в том, что скорость его протекания велика, а время протекания физико-химических реакций незначительно. Поэтому влиять на их ход так, как это происходит при выплавке стали в металлургических печах (изменить температуру, скачать нежелательный или навести новый шлак, провести корректировку состава металлической ванны после экспресс-анализа и т.д.) совершенно не возможно. Необходимо заранее определить весь ход процесса, учесть возможные его фазы, зависящие от ряда факторов, связанных со сваркой.

В процессе сварки шлакообразование имеет решающее значение, и управлять им не возможно. При этом роль шлака несравненно шире, чем в металлургии стали. В процессе сварки шлак является не только регулятором хода химических реакций, как это имеет место в печах, но и фактором формирования и термической обработки соединения, фактором технологическим, определяющим возможность сварки в различных пространственных положениях шва, возможность использования определенного рода электрического тока, возможность наблюдения формирования металла шва.

Физические свойства шлака после разливки стали не интересуют металлургов, тогда как для сварщиков свойства шлака и после наложения шва в интервале температур от кристаллизации до полного остывания имеют большое значение: шлак в процессе его остывания должен равномерно распределяться по поверхности наплавленного металла, долгое время оставаться газопроницаемым, быстро кристаллизоваться без растрескивания, легко отделяться от металла шва.

Температура является основным фактором, определяющим ход металлургических процессов. С этой стороны металлургия сварки также значительно сложнее, т.к. диапазон температур процесса сварки (1000 – 6000º С) гораздо шире чем при выплавке стали, а реакции протекают в условиях непрерывно падающих температур при сварке на постоянном токе и пульсирующее снижающихся при сварке на переменном токе. Кроме температуры на ход процесса сварки влияют электрические поля, кинетическая и потенциальная энергия частиц, могущих значительно изменить активность молекул.

Таким образом, ход металлургических процессов при сварке зависит от большéго количества факторов, чем при производстве стали в печах и управление ими в ходе сварки невозможно. Следовательно для получения качественного сварного соединения необходимо до выполнения сварки создать условия нужного направления и

хода физико-химических реакций с целью получения металла шва, обладающего заданными свойствами и заданным составом. Металлургия процесса сварки может обосновываться только на тщательных предварительных исследованиях всех фаз процесса, на полностью отработанной технологии. Ход процесса определяется металлом электродного стержня и составом электродного покрытия, поэтому электрод при ручной дуговой сварке является основным фактором, от которого зависит успех и дальнейшее ее развитие.

При сварке мало и среднеуглеродистых, низко и среднелегированных сталей применялись стержни из малоуглеродистой электродной поволоки, поэтому металлургия сварки этих сталей определяется только электродным покрытием, которое должно обеспечить правильный ход процесса, определенный химический состав наплавленного металла за счет легирования и с учетом расплавления основного материала, а также надлежащую термообработку шва в процессе его остывания под слоем шлака. Поэтому электрод должен иметь точные геометрические размеры, состав и физические свойства покрытия. При разнотолщинности (эксцентричности) покрытия его плавление будет неравномерным и шлак будет распределяться неравномерно. При этом сварка затрудняется даже в нижнем положении. Различие толщины покрытия в высококачественных электродах не должно превышать 10%, а колебание по диаметру – не более 3%.

По составу покрытия и физическим свойствам его компонентов отклонения должны быть минимальны. Например, увеличение содержания марганца на 1% или уменьшение его грануляции со 100 до 60 меш вызывает его увеличение в наплавленном металле соответственно на 0,25 или 0,30%.

Только при точном соблюдении указанных параметров покрытия можно гарантировать единообразие химического состава и физических свойств металла шва, а, следовательно, и служебных характеристик изделий.

Металлургические процессы при сварке в первом приближении можно разделить на три этапа: 1- процессы, происходящие на конце электрода, 2 – в дуговом промежутке, 3 – в ванночке расплавленного металла. При сопоставлении сварки на постоянном и переменном токе можно утверждать, что только третий этап почти не зависит от рода тока. Главным фактором хода металлургического процесса является температура. Даже при одинаковом количестве введенной энергии невозможно получить одинаковую температуру в дуге при использовании постоянного и переменного тока, т.к. в последнем случае энергия вводится в пульсирующем режиме и в отдельные моменты времени она будет равна нулю. Поэтому и температура в дуге переменного тока будет пульсирующей. В меньшей степени вследствие большей тепловой инерции будет пульсировать температура на конце электрода. Соответственно и ход химических реакций в дуге будет пульсирующим. Ванна расплавленного металла обладает большой тепловой инерцией, поэтому пульсирующая подача энергии не сказывается на ее температуре.

Пульсация температуры в дуге влияет на ход металлургических процессов и даже может препятствовать выполнению работ. Увеличение частоты переменного тока до 300 Гц существенно сглаживает пульсации температуры и условия прохож-

дения металлургических процессов приближаются к условиям сварки на постоянном токе.

Наложение на переменный ток промышленной частоты высокочастотного тока малой величины (подключением осциллятора) повышает стабильность дуги, но не сглаживает ее температуру, что было подтверждено составом шлака, снятого с капель электродного металла (таблица 7).

Таблица 7 *Состав шлака, собранного с капель при расплавлении электрода, % масс.*

Род тока	FeO	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MnO	MgO
Постоянный ток	8,00	1,72	7,79	46,68	23,10	3,41	5,52	следы
Переменный ток, 300 Гц	6,31	2,56	7,71	43,46	22,74	3,34	5,32	следы
Переменный ток, 50 Гц с наложением высокой частоты от осциллятора	11,43	5,98	6,94	39,17	19,87	3,84	6,35	следы

Примечание: электроды марки УОНИ-13/45 диаметром 4 мм, дуга горела между двумя электродами, капли падали в воду.

Если при сварке на постоянном и переменном токе повышенной частоты составы шлака достаточно близки, то при сварке на переменном токе промышленной частоты имеются существенные отличия. При частоте тока 50 Гц, когда пульсация температурного поля сглаживается недостаточно,

физико-химические реакции в дуге изменяют направление, следуя этим пульсациям. При спаде энергии согласно принципу Лешателье усиливаются экзотермические реакции, например, реакции окисления, а при нарастании энергии реакции идут в обратном направлении. В целом процессы окисления при сварке на переменном токе усиливаются, что было подтверждено химическим анализом наплавленного металла (таблица 8).

Даже при повышенной частоте 300 Гц содержание кислорода и азота в шве увеличивается, а содержание углерода и марганца уменьшается. При частоте 50 Гц углерод, кремний и марганец выгорают в наибольшей степени, а насыщение шва кислородом и азотом максимальное. Поэтому помимо повышения стабильности дугового процесса за счет применения осциллятора при применении покрытия УОНИ-13 необходима была корректировка ее рецептуры в сторону усиления группы элементов – раскислителей.

Таблица 8 *Состав наплавленного металла, % масс.*

Род тока	C	Si	Mn	S	P	O	N
Постоянный ток	O,12	0,28	0,86	0,021	0,028	0,0208	0,0090
Переменный ток, 300 Гц	0,10	0,28	0,74	0,026	0,031	0,0239	0,0140
Переменный ток, 50 Гц с наложением высокой частоты от осциллятора	0,08	0,23	0,58	0,026	0,028	0,0289	0,0176

Примечание: электроды марки УОНИ-13/45 диаметром 4 мм.

Необходимо было также аккумулировать энергию в дуге или повысить ее тепловую инерционность настолько, чтобы промышленная частота сварочного тока не вызывала заметной пульсации температуры в дуге. Этого можно достигнуть, уси-

лив образование окислов элементов с высокой теплотой образования (Ti, Al и Si) и путем уменьшения потерь на радиацию и рассеяние тепловой энергии (введением больших количеств CaF_2).

Повышение стабильности дугового разряда может быть осуществлено за счет введения в покрытие веществ с малым потенциалом ионизации и повышенной степенью ионизации. В конце 40-х годов не был достаточно изучен вопрос создания сварочных шлаков, обладающих нужными наперед заданными свойствами. Задача усложнялась еще и тем, что сварочные шлаки в отличие от металлургических, как было отмечено в части I, должны удовлетворять более широкому ряду требований.

Покрытия известных в СССР электродов, работающих на переменном и постоянном токе (ЦМ-7, ОММ-5 и др.), построены на шлаковой системе FeO-TiO_2-SiO_2-MnO. Эти марки электродов и им подобные не обладали универсальностью как в отношении возможности сварки любых марок конструкционных сталей, так и в отношении легкости выполнения швов в любых пространственных положениях. Кроме того ударная вязкость металла, наплавленного этими электродами не превышала 981 – 1177 кДж/м^2. Это, по мнению К.В. Петраня, объяснялось вполне закономерно повышенным содержанием в наплавленном металле кислорода, значительными (более 1 мкм) размерами и формой неметаллических включений, что являллось следствием введения в покрытие больших количеств оксидов железа и кремнезема.

Нельзя сравнивать введение железных руд в электродное покрытие с их использованием в мартеновских печах. При плавлении электродного покрытия в момент образования шлака на конце электрода и в дуговом промежутке FeO сразу связывается с SiO_2 и частично восстанавливается марганцем. Время для равновесного распределения кислорода между шлаком и сварочной ванной недостаточно. Поэтому наплавленный этими электродами металл содержит избыток кислорода, что затрудняет или делает невозможной сварку сталей, содержащих более 0,25% углерода.

4.2 Методика исследований.

В соответствие с теоретическими представлениями, изложенными выше, исследования по разработке покрытий для высококачественных универсальных электродов, независящих от рода тока, проводились по следующим направлениям:

1. Исключение фтористого кальция и усиление раскисляющей и денитрирующей групп покрытий.
2. Уменьшение содержания фтористого кальция с усилением раскисляющей и денитрирующей групп и введением соединений с низким потенциалом ионизации.
3. Увеличение фтористого кальция.
4. Увеличение фтористого кальция и введение соединений с низким потенциалом ионизации.

В качестве основы было принято покрытие на основе оксида кальция, не содержащее кислородных соединений металлов. Экспериментальные покрытия разделялись на группы по определенным признакам исследуемых материалов.

Все покрытия наносились путем опрессовки на электродные стержни диаметром 4 мм из малоуглеродистой стали одной плавки (таблица 9) и изготавливались из материалов одной партии (одного химического состава, таблица 10). Электроды изготавливались на мощном горизонтальном прессе, спроектированном и изготовленном в НИИ-13 к началу проведения исследований.

Таблица 9 *Химический состав проволоки, % масс.*

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Cu
0,12	0,47	Следы	0,023	0,026	0,18	0,12	0,07

Технологические испытания экспериментальных электродов при сварке в нижнем положении проводились на специальном автомате для сварки штучными электродами. Испытание пригодности электродов для сварки в вертикальном и потолочном положении шва проводилось вручную. Этому испытанию подвергались только те электроды, которые показывали вполне удовлетворительные результаты при сварке в нижнем положении.

Механические свойства наплавленного металла определялись только для окончательно отработанных вариантов. Полное развернутое исследование свойств электродов выполнялось после их опробования в цехах

заводов и получения отзывов от ряда квалифицированных рабочих – сварщиков.

4.2 Разработка составов покрытий.

Электроды I-й группы покрытий (таблица 11) были изготовлены с целью установить возможность получения необходимых свойств шлака без фтористого кальция, который нарушает стабилизацию дуги при работе на переменном токе. Несмотря на отсутствие плавикового шпата эта группа электродов не показала устойчивого горения на переменном токе: на больших токах (240 А) электроды №№ 1-5 давали частые срывы дуги вследствие быстрого плавления стержня и образования не расплавившегося «чехла» покрытия глубиной 5 – 6 мм (от его края до металла стержня).

Срывы дуги происходили и при нормальных режимах (140 – 160 А): 3 – 5 срывов при плавлении электрода длиной 400 мм. Шлак у всех электродов этой группы оказался неудовлетворительным: у электродов №№ 1 – 4 второй валик частично, а третий – более чем наполовину не покрывались шлаком. Электроды № 5, обладая наименьшей стабильностью, давали стекловидный и малоподвижный шлак, покрывающий все валики. В начале шва на длине 5 – 8 мм образовывались поры. Покрытия этой группы были признаны неудовлетворительными, но была изготовлена еще серия из 18 различных покрытий с целью улучшить стабилизацию дуги и повысить жидкотекучесть шлака, однако успех достигнут не был.

II-я группа покрытий предназначалась для улучшения свойств шлака I-й группы

путем введения в них плавикового шпата. Для стабилизации дуги дополнительно к жидкому стеклу вводилось 4% КОН, что по отношению к весу сухой шихты составляло около 1%. С целью проверки степени ухудшения стабилизации дуги при небольшом содержании плавикового шпата (2%) в электроды № 6 гидрат калия не вводился. Испытания подтвердили, что введение плавикового шпата улучшило сварочные свойства шлака, но недостаточно для удовлетворения установленных требований. При введении 2% плавикового шпата стабильность дуги не ухудшилась (3 – 5 срывов дуги на электрод при нормальном режиме сварки). Электроды №№ 7 – 10 плавились без обрывов дуги, но на повышенном режиме (240 А) наблюдались частые обрывы (5 - 7 на электрод) вследствие образования глубокого «чехла». Несмотря на то, что повысилась жидкотекучесть и уменьшилось поверхностное натяжение шлака, его покрывающая способность не улучшилась. Поры в начале шва сохранились, но при небольшой задержке (на 1 с) перемещения электрода их можно было избежать.

В покрытие III-й группы с целью улучшения свойств шлака было введено повышенное количество плавикового шпата и доломит. Улучшение стабилизации дуги, также как и во II-й группе, достигалось добавкой к жидкому стеклу КОН. Для аккумулирования энергии в дуге вводилось повышенное количество ферротитана. При испытании на нормальном режиме констатировалась безукоризненная стабилизация дуги, однако при повышенном токе этого не происходило: обрывы происходили через 5 – 6 с горения дуги, их количество составляло 5 – 7 на электрод. В месте обрыва наблюдался глубокий чехол. Сварочные свойства шлака несколько улучшились, особенно у электродов №№ 14 и 15. Однако при наплавке валика на валик середина третьего валика оказалась покрытой не полностью.

Поэтому покрытия третьей группы не были признаны удовлетворительными.

В IV-ю группу покрытий был введен полевой шпат с одновременным исключением кварца. Т.к. в этом компоненте содержалось 14% K_2O (оно может колебаться в минерале типа «ортоклаз» в количестве от 11 до 16,9%), то в жидкое стекло КОН не добавлялся. Как было установлено при испытании III-й группы покрытий, добавка 1% КОН, содержавшего 0,695% К (от веса сухой шихты), достаточна для безупречной стабилизации дуги при нормальном режиме сварки. Предполагалось, что добавка 10 – 18% полевого шпата, эквивалентная 1,15 – 2,08% К, обеспечит еще лучшую стабилизации дуги. Но это не подтвердилось при испытании: дуга обрывалась 3 – 4 раза (иногда 5 – 6 раз) при сгорании одного электрода. По-видимому, это связано с неполной диссоциацией в дуге полевого шпата. Увеличение тока до 240 А в отличие от других групп покрытий не приводило к ухудшению стабилизации дуги. Свойства шлака IV-й группу покрытий оказались неудовлетворительными: малы жидкотекучесть и смачиваемость,даже первые валики не полностью покрывались шлаком.

Таблица 10 *Состав компонентов для экспериментальных электродных покрытий, % масс.*

Наименование компонентов	C	Si	Mn	Al	Ti	S	P	$CaCO_3$	$MgCO_3$	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Al_2O_3+ Fe_2O_3	MgO	CaO	CaF_2	Na_2O+ Ka_2O	SO_3	P_2O_5
Мрамор	-	-	-	-	-	0,18	0,014	93,15	-	0,76	-	-	0,24	1,38	-	-	-	-	-
Плавиковый шпат	-	-	-	-	-	0,05	0,068	-	-	след	-	-	0,48	-	0,67	92,85	-	-	-
Кварцевый песок	-	-	-	-	-	0,16	0,029	-	-	95,56	-	-	-	-	-	-	следы	-	-
Полевой шпат	-	-	-	-	-	-	-	-	-	66,10	20,6	-	-	-	-	-	14,3	0,18	-
Доломит	-	-	-	-	-	нет	нет	54,06	45,15	1,04	след	след	-	-	-	-	-	-	-
Бентонит	-	-	-	-	-	-	следы	-	-	72,60	15,8	1,4	-	0,19	1,12	-	0,1	0,12	-
Гидрат окиси калия	Содержание КаОН – 96 %																		
Ферромарганец	0,3	3,08	89,30	-	-	0,076	0,046	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ферросилиций	-	68,71	0,95	-	-	0,006	0,013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ферротитан	0,06	3,87	-	3,89	22,1	0,24	0,028	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ферроалю-миний	0,08	0,11	0,15	59,18	-	0,007	0,012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 11 *Рецептура экспериментальных покрытий, % масс.*

Покрытие		Мрамор	Плавиковый шпат	Полевой шпат	Доломит	Кварц	Ферромарганец	Ферросилиций	Ферротитан	Феролюминий
Группа	№									
I[*1]	1	46,7	-	-	13,4	3,5	6,5	6,0	23,9	-
	2	47,0	-	-	15,5	4,5	6,5	6,5	20,0	-
	3	47,0	-	-	19,0	4,5	6,5	6,5	16,5	-
	4	67,5	-	-	-	4,0	6,5	7,0	15,0	-
	5	68,0	-	-	-	10,0	6,5	7,0	8,5	-
II[*2]	6	55,5	2,0	-	-	5,0	6,5	7,0	24,0	-
	7	58,5	3,0	-	-	5,0	6,5	7,0	20,0	-
	8	58,5	3,0	-	-	7,0	6,5	7,0	18,0	-
	9	61,5	4,0	-	-	5,0	6,5	7,0	16,0	-
	10	61,5	4,0	-	-	7,0	6,5	7,0	10,0	-
III[*3]	11	43,5	5,0	-	14,0	4,0	7,0	6,5	20,0	-
	12	45,5	5,0	-	14,0	4,0	7,0	5,5	19,0	-
	13	42,5	6,0	-	14,0	4,0	7,0	4,5	22,0	-
	14	43,5	7,0	-	14,0	4,0	7,0	4,5	20,0	-
	15	45,5	7,0	-	14,0	4,0	7,0	4,5	18,0	-
IV[*1]	16	51,0	7,0	18,0	-	-	5,0	3,0	16,0	-
	17	53,0	7,0	16,0	-	-	5,0	3,0	16,0	-
	18	55,0	7,0	14,0	-	-	5,0	3,0	16,0	-
	19	57,0	7,0	12,0	-	-	5,0	3,0	16,0	-
	20	59,0	7,0	10,0	-	-	5,0	3,0	16,0	-
V[*4]	21	45,0	20,0	20,0	-	-	5,0	10,0	-	-
	22	45,0	20,0	20,0	-	-	5,0	5,0	5,0	-
	23	40,0	20,0	20,0	-	-	5,0	5,0	10,0	-
	24	40,0	20,0	20,0	-	-	5,0	-	15,0	-
	25	35,0	20,0	20,0	-	-	5,0	-	20,0	-
VI[*5]	26	71,0	7,0	-	-	4,0	5,0	3,0	10,0	-
	27	69,0	7,0	-	-	4,0	5,0	3,0	12,0	-
	28	67,0	7,0	-	-	4,0	5,0	3,0	14,0	-
	29	65,0	7,0	-	-	4,0	5,0	3,0	16,0	-
	30	63,0	7,0	-	-	4,0	5,0	3,0	18,0	-
	31	61,0	7,0	-	-	4,0	5,0	3,0	20,0	-
	32	59,0	7,0	-	-	4,0	5,0	3,0	22,0	-
	33	57,0	7,0	-	-	4,0	5,0	3,0	24,0	-
	34	55,0	7,0	-	-	4,0	5,0	3,0	26,0	-
	35	53,0	7,0	-	-	4,0	5,0	3,0	28,0	-
VII[*6]	36	56,0	7,0	-	-	4,0	5,0	5,0	23,0	-
	37	56,0	7,0	-	-	4,0	6,0	6,0	21,0	-
	38	56,0	7,0	-	-	4,0	7,0	6,0	20,0	-
	39	56,0	7,0	-	-	5,0	7,0	6,0	19,0	-
	40	56,0	7,0	-	-	5,0	9,0	6,0	17,0	-
VIII[*1]	41	52,0	22,0	-	-	-	5,0	-	21,0	-
	42	52,0	23,0	-	-	-	5,0	-	20,0	-
	43	52,0	24,0	-	-	-	5,0	-	19,0	-

Таблица 11 (Продолжение) *Рецептура экспериментальных покрытий, % масс.*

Покрытие		Мра-мор	Плави-ковый шпат	Поле-вой-шпат	Доло-мит	Кварц	Ферро-марга-нец	Ферро-сили-ций	Ферро-титан	Феро-алюми-ний
Группа	№									
	44	52,0	25,0	-	-	-	5,0	-	18,0	-
	45	52,0	26,0	-	-	-	5,0	-	17,0	-
IX[*7]	46	52,0	27,0	-	-	-	5,0	-	16,0	-
	47	52,0	28,0	-	-	-	5,0	-	15,0	-
	48	52,0	29,0	-	-	-	5,0	-	14,0	-
	49	52,0	30,0	-	-	-	5,0	-	13,0	-
	50	52,0	31,0	-	-	-	5,0	-	12,0	-
X[*7]	51	54,0	32,0	-	-	-	4,0	-	10,0	-
	52	53,0	33,0	-	-	-	4,0	-	10,0	-
	53	52,0	34,0	-	-	-	4,0	-	10,0	-
	54	51,0	35,0	-	-	-	4,0	-	10,0	-
	55	50,0	36,0	-	-	-	4,0	-	10,0	-
XI[*7]	56	49,0	35,0	-	-	-	4,0	-	12,0	-
	57	47,0	35,0	-	-	-	4,0	-	14,0	-
	58	45,0	35,0	-	-	-	4,0	-	16,0	-
	59	43,0	35,0	-	-	-	4,0	-	18,0	-
	60	41,0	35,0	-	-	-	4,0	-	20,0	-
XII[*7]	61	44,0	35,0	-	-	-	4,0	-	16,0	-
	62	44,0	35,0	-	-	-	4,0	-	15,0	-
	63	44,0	35,0	-	-	-	4,0	-	14,0	-
	64	44,0	35,0	-	-	-	4,0	-	13,0	-
	65	44,0	35,0	-	-	-	4,0	-	12,0	-
XIII[*7]	66	42,0	35,0	-	-	-	4,0	1,0	17,0	1,0
	67	41,0	35,0	-	-	-	4,0	1,0	17,0	2,0
	68	40,0	34,0	-	-	-	4,0	2,0	17,0	3,0
	69	40,0	32,0	-	-	-	4,0	3,0	17,0	4,0
	70	40,0	32,0	-	-	-	4,0	2,0	18,0	4,0
XIV[*7]	71	37,0	35,0	-	-	-	4,0	1,0	19,0	4,0
	72	38,0	35,0	-	-	-	4,0	1,0	18,0	4,0
	73	39,0	35,0	-	-	-	4,0	1,0	16,0	4,0
	74	40,0	35,0	-	-	-	4,0	1,0	14,0	4,0
	75	41,0	34,0	-	-	-	5,0	1,0	13,0	4,0
	76	42,0	34,0	-	-	-	5,0	1,0	12,0	4,0
XV	77[*1]	42,0	34,0	-	-	-	4,0	1,0	15,0	4,0
	78[*8]	42,0	34,0	-	-	-	4,0	-	16,0	4,0
	79[*9]	42,0	34,0	-	-	-	3,0	-	17,0	4,0

[*1]жидкое стекло содо-натровое, модуль 2,7, плотность 1,43 г/см^3, 25% от веса сухой шихты;

[*2] жидкое стекло содо-натровое, модуль 2,7, плотность 1,43 г/см^3, 25% от веса сухой шихты, для №№ 7 – 10 то же + 4% КОН;

[*3] жидкое стекло содо-натровое, модуль 2,7, плотность 1,43 г/см^3, 25% от веса сухой шихты + 4% КОН;

[*4] жидкое стекло содо-натровое, модуль 2,7, плотность 1,43 г/см^3, 25 % от веса сухой шихты + 3% КОН;

[*5]жидкое стекло содо-натровое, модуль 2,7, плотность 1,43 г/см^3, 25 % от веса сухой шихты + 6% КОН;

[*6] жидкое стекло содо-натровое, модуль 2,7, плотность 1,43 г/см^3, 25 % от веса сухой шихты + 8% КОН;

[*7] жидкое стекло содо-натровое, модуль 2,7, плотность 1,43 г/см^3, 20 % от веса сухой шихты + 2% КОН;

[*8] жидкое стекло содо-натровое, модуль 2,7, плотность 1,45 г/см^3, 25 % от веса сухой шихты + 2% КОН;

[*9] жидкое стекло содо-натровое, модуль 2,7, плотность 1,43 г/см^3, 15% от веса сухой шихты + 4% (10% водного раствора крахмала)+ 2% (20% водного раствора бентонита).

В V-й группе покрытий для улучшения качества по сравнению с IV-й группой было увеличено содержание полевого шпата до 20%, а для аккумулирования энергии вводилось переменное количество ферросилиция и ферротитана. Для улучшения стабилизации в жидкое стекло введено 3% КОН. Испытания показали хорошую стабильность дуги при нормальном режиме и плохую – при токе 240 А (4 -6 обрывов). Сварочные свойства шлака оказались удовлетворительными, но в начале шва образовывались поры, которых можно было избежать при секундной задержке движения электрода. Сплошной покров шлака сохранялся при наплавке один на другой вплоть до 8 валика (больше не наплавлялось), но начиная со второго толщина покрова посредине наплавки утончалась до 0,2 мм, основная масса шлака сосредотачивалась по краям валика. Из-за недостаточной стабильности дуги при сварке на повышенном токе качество покрытий V-й группы было признано неудовлетворительным.

Введение 20% плавикового шпата в покрытия V-й группы оказалось нерациональным, поэтому покрытия VI-й группы были построены на ограниченном количестве плавикового шпата (7%) и усилении аккумулирования тепловой энергии за счет повышенных доз ферротитана. Для обеспечения хорошей стабильности дуги в жидкое стекло добавлялось 6% КОН. Испытания электродов, начиная с № 33, показали хорошие свойства шлака и стабилизацию дуги, но при повышенном токе наблюдались 1 -2 ее обрыва. Кроме того, начиная с третьего валика, шлаковый покров становится тонким (0,1 – 0,2 мм). Поэтому необходимо было улучшить покрытие в направлении повышения толщины шлакового покрова и повышения стабильности дуги при повышенном токе.

С этой целью в составе VII-й группы покрытий незначительно было увеличено содержание ферросилиция и кварца. В связи с повышенным количеством кремния необходимо было увеличить стабилизацию дуги введением в жидкое стекло 8% КОН. Лучшие результаты при испытании показало покрытие № 39: сварочные свойства шлака и стабилизация дуги оказались удовлетворительными, поры в начале шва не возникали даже при сварке по слегка загрязненной поверхности пластин. Процесс сварки сопровождался небольшим проплавлением основного металла и был квалифицирован разработчиками как «холодный». Ванна расплавленного металла была спокойная, зеркально чистая, покрытая совершенно прозрачной пленкой шлака, изолирующей ее от контакта с воздухом. Поэтому покрытие № 39 было признано вполне удовлетворительным и принято для дальнейших исследований.

Увеличение содержания плавикового шпата в покрытии предположительно способствует аккумулированию тепловой энергии в дуге, что в противоположность высокому потенциалу ионизации фтористых соединений может способствовать стабилизации дуги при сварке на переменном токе. Поэтому для подтверждения теоретических предположений в качестве второй самостоятельной линии при создании высококачественных электродных покрытий универсальных по роду тока, по маркам свариваемых сталей и по возможности ведения сварки в любых пространственных положениях авторы провели дополнительные исследования, акцентируя внимание на увеличение количества вводимого плавикового шпата.

В составе VIII-й группы покрытий одновременно с увеличением содержания плавикового шпата уменьшалось количество ферротитана. Испытание электродов показало недостаточную стабильность дуги, но улучшающуюся с повышением фтористого кальция: при плавлении электродов с покрытием № 41 количество обрывов дуги составляло 5 – 7 на один электрод, а с покрытием № 45 – только 3 – 4 обрыва. Однако из-за слишком быстрой кристаллизации шлака покрытия этой группы были признаны неудовлетворительными. Добавление в жидкое стекло 2% КОН полностью устранило обрывы дуги, но свойства шлака не изменились. Поэтому в последующие варианты покрытий в жидкое стекло вводилось 2% КОН с тем, чтобы после получения оптимального по составу шлака можно было бы приготовить вариант покрытия на содонатровом стекле и проверить его стабильность.

В покрытиях IX-й и X-й групп продолжилось последовательное увеличение содержания плавикового шпата и снижение в IX-й группе ферротитана. В X-й группе содержание ферротитана было стабилизировано.

Исследование электродов этих групп показало безукоризненную стабилизацию, при этом, начиная с покрытия № 52 стабилизация не нарушалась при очень высоком значении тока (350 А). При таком токе сжигается только 2/3 электродов, затем начинают плавиться покрытие и далее стержень вблизи электрододержателя. Однако свойства шлака не были вполне удовлетворительными из-за неполного покрытия шлаком при наплавке уже второго валика, когда имели место отдельные непокрытые участки.

В покрытиях XI-й группы с целью уменьшения скорости кристаллизации шлака уменьшалось содержание мрамора и увеличивалась концентрация ферротитана. Содержание плавикового шпата и ферромарганца оставалось постоянным. Испытание электродов с покрытиями этой группы показало безупречную стабилизацию как при нормальных, так и повышенных значениях тока. Величина чехла на конце электрода уменьшилась до 1,0 – 1,5 мм от торца электрода, который был покрыт тонким слоем шлака. Скорость кристаллизации шлака уменьшилась, но полного покрытия валика шлаком не удалось достигнуть.

Поэтому в покрытия последующей XII-й группы был введен ферроалюминий при последовательном уменьшении ферротитана. Содержание мрамора и плавикового шпата оставалось постоянным, также как и содержание ферромарганца. При испытаниях покрытий электродов этой группы стабилизация дуги при любых значениях тока было безукоризненным, сварочные свойства шлака были удовлетворительными. Покров валика при наплавке электродами покрытия № 64 оказался вполне удовлетворительным. Шлак равномерным слоем покрывал весь шов даже на 7-м валике, но скорость кристаллизации первого нуждалась в уменьшении.

С учетом полученных результатов в XIII-й группе покрытий было снижено содержание плавикового шпата и повышено содержание ферротитана и введен ферросилиций. Испытания электродов показало, что введение свыше 2% ферросилиция (электроды № 69) вызывало повышение разбрызгивания, не давая улучшения свойств шлака по скорости его кристаллизации. Снижение содержания ферроалюминия (менее 4%) начинает сказываться на уменьшении толщины шлакового пок-

рова посредине шва.

В покрытиях XIV-й группы содержание ферроалюминия было сохранено на уровне 4%, ферросилиция – 1% и варьировались концентрации плавикового шпата, мрамора и ферротитана. При испытаниях лучшие результаты показали покрытия №№ 74, 75 и 76. Стабилизация дуги и сварочные свойства шлака этих вариантов оказались настолько удовлетворительными, что дальнейших улучшений не требовалось. Ход процесса сварки электродами с этими покрытиями шел с глубоким проплавлением основного материала, что является необычным в практике сварки качественными электродами. Горячий ход процесса свидетельствовал о высокой тепловой изоляции дугового промежутка и значительном повышении энергии дуги за счет окисления алюминия и титана в столбе дуги. Составы покрытий №№ 74, 75 и 76, как показавшие вполне удовлетворительные результаты, были приняты для дальнейшего испытания.

После отработки состава покрытия с высоким содержанием плавикового шпата разработчики посчитали необходимым проверить стабильность дуги при горении электродов с покрытиями XV-й группы, не содержащими соединений калия, т.е. приготовленными с применением в качестве связующего раствора натрового стекла без добавок КОН. В состав этих покрытий внесены незначительные изменения по сравнению с покрытием №76: в покрытии № 77 уменьшено на 1% содержание ферромарганца, в покрытии № 78 по сравнению с покрытием № 77 исключен ферросилиций, а в покрытии № 79 на 1% уменьшено содержание ферромарганца по сравнению с покрытием № 78, за счет чего в покрытия XV-й группы добавлены соответственно 1, 2 и 3 % ферротитана. Испытания покрытий XV-й группы на стабильность горения дуги показали:

- при нормальном токе (150 А) в процессе расплавления электрода наблюдалось 1 – 2 обрыва дуги, столь незначительные, что ее возбуждение после обрыва происходило самостоятельно;
- при повышенно токе (240 А) обрывов дуги не наблюдалось;
- при заниженном токе (100 А) дуга обрывалась 3 – 4 раза, но затем легко возбуждалась.

Эти эксперименты подтвердили идею о возможности получить вполне устойчивую дугу при нормальных и низких значениях тока в случае высокого содержания фтористого кальция и без применения ионизирующих добавок соединений калия за счет еще большего аккумулирования энергии дуги.

4.3 Комплексные исследования разработанных электродов при сварке на переменном токе.

4.3.1 Комплексные исследования электродов № 39.

Для исследования были изготовлены партии электродов диаметром 3, 4 и 5 мм по металлическому стержню (по покрытию - диаметром 4,5, 6,0 и 7,2 мм). Для определения механических свойств наплавленного металла на пластины из малоуглеродистой стали размером 100×50×15 мм производили многослойную наплавку размерами 80×20×20 мм, из которой вырезались образцы для испытаний на растяжение (гагаринские диаметром 6 мм) и на ударную вязкость (размерами 55×10×10 мм с надрезом Менаже). Результаты механических испытаний приведены в таблице 12.

Таблица 12 *Результаты механических испытаний металла, наплавленного электродами № 39*

Положение шва	σ_{001}, МПа	σ_{02}, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU, кДж/м^2
Нижнее	316-363	377-407	531-562	27,5-33,4	75,0-84,1	2629-3149
Вертикальное	324-354	368-410	520-545	27,0-32,1	75,3-84,0	2570-3080
Потолочное	313-365	367-397	530-552	26,2-32,4	74,4-83,0	2448-2992

Механические свойства металла, наплавленного во всех пространственных положениях, достаточно высоки и не уступают механическим свойствам металла, наплавляемого электродами УОНИ-13/55. Необходимо особо обратить внимание на высокие показатели пластичности и ударной вязкости.

Технологические свойства электродов с покрытием № 39 при сварке в вертикальном и потолочном положениях шва оказались вполне удовлетворительными. В положениях, отличных от нижнего, сварка происходила настолько легко, что не требовала специальной тренировки сварщиков. Для сварки электродами других марок в вертикальном и потолочном положениях шва для предупреждения стекания жидкого металла применяли электроды диаметром не более 4 мм и пониженный ток. Электродами №39 диаметром 5 мм можно было успешно варить после небольшой тренировки во всех пространственных положениях даже на больших токах (240 А). Это открыло новые перспективы для выполнения скоростными методами наиболее трудоемких операций сварки в положениях отличных от нижнего, что до этого не было известно ни в СССР ни за рубежом. Показатели механических свойств металла, наплавленного в вертикальном и потолочном положениях при повышенном токе, приведенные в таблице 12, подтверждают удовлетворительное качество разработанных электродов. Высокие технологические и механические свойства наплавленного металла свидетельствуют о том, что ход металлургических процессов не зависит от величины тока и положения шва в пространстве.

Химический анализ наплавленного металла (таблица 13) показал, что он представляет собой малоуглеродистую сталь, легированную небольшим количеством марганца, с весьма низким содержанием кислорода и азота.

Таблица 13 *Химический состав металла, наплавленного электродами № 39, % масс.*

C	Mn	Si	S	P	Al	Ti	O	N
0,11	1,10	0,26	0,026	0,031	0,026	0,023	0,0182	0,0094

Наплавленный металл имел ферритно-перлитную мелкозернистую (соответствует № 8 по ASTM) структуру. Микроструктура также свидетельствовала о его высокой чистоте и отсутствии неметаллических включений. Отсутствие сильного роста зерна в валиках предыдущих слоев от наложения последующих слоев при многослойной наплавке подтверждает низкую склонность наплавленного металла к росту зерна.

Результаты испытания наплавленного металла на ударную вязкость при различных режимах нагрева, представленные в таблице 14 показали отсутствие у него склонности к старению. Это объясняется повышенной чистотой наплавленного металла по содержанию кислорода и азота.

Таблица 14 *Влияние различных видов термической обработки на ударную вязкость металла, наплавленного электродами с покрытием № 39*

KCU, кДж/м^2				
Без термообработки	Старение при температуре 120º С, 184 часа	30 кратный нагрев при температуре 650º С, охлаждение в воде, выдержка 120 час. при 20º С	Закалка в воду от температуры 950º С	Нагрев при температуре 600º С с выдержкой в печи 10 часов
2629-3149	2551-3188	2600-3041	1452-1776	2453-3031

Оценка универсальности электродов с покрытием № 39 в отношении возможности сварки различных марок конструкционных сталей производилась путем сварки пластин толщиной 15 – 20 мм в V-образную разделку и последующих механических испытаний образцов, вырезанных из сварных пластин (таблица 15).

Таблица 15 *Механические свойства сварных соединений, выполненных электродами с покрытием № 39*

Марка свариваемой стали	σ_{02}, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU, кДж/м^2	Место разрушения гагаринских образцов с поперечным швом
Ст.2	227-270	349-373	25,3-27,6	61,0-68,4	1982-2237	По основному металлу
Ст.5	265-287	478-502	18,4-21,0	40,5-49,1	1619-1893	- ″ -
Сталь 20	269-319	444-517	23,0-25,1	50,9-57,2	1727-1952	- ″ -
Сталь 40	314-377	572- 599	18,0-19,7	48,1-56,6	1550-1697	Одного образца по шву, 2-х по основному металлу
20ХГС	474-550	603-635	16,8-18,0	53,4-62,0	1432-1589	По шву, основной металл термически обработан до сварки
25Н3	460-540	596-617	15,5-19,0	49,3-57,5	1344-1481	- ″ -
ОХН3М	486-521	628-672	13,8- 20,0	53,7-59,0	1216-1442	- ″ -

В случае основного материала из малоуглеродистых сталей разрушение образцов при растяжении происходило по менее прочному, чем шов основному материалу. При более прочном, чем шов, основном материале разрушение происходило по шву. Поскольку надрез в образцах для испытания на ударную вязкость наносился по шву, то результаты всех испытаний примерно одинаковы. Технологические свойства электродов и сварочные свойства шлака, а следовательно, и формирование швов полностью сохранились при сварке всех опробованных сталей.

Испытание на пластичность наплавленного металла в диапазоне температур от кристаллизации до полного остывания производилось путем сварки жесткой пробы, представлявшей собой два кубика из броневой стали размерами 160×160×100 мм и 200×200×160 мм. Меньший кубик плоскостью размерами 160×100 мм ставился на плоскость размерами 200×200 мм большего кубика и приваривался к нему по замкнутому контуру угловым швом. Несмотря на чрезвычайно жесткий контур, трещин в швах не было обнаружено как при внешнем осмотре, так и после разрушения.

На основании полученных положительных результатов было принято решение о внедрении разработанных электродов в производство. С этой целью в НИИ-13 было изготовлено пять тонн электродов диаметром 4 и 5 мм (по проволоке) и переданы заводам и стройкам для промышленного применения.

Электродам было присвоена марка УП1/55 НИИ МВ, что означает: универсальное покрытие номер 1, число 55 в знаменателе показывает предел прочности наплавленного металла (в кг/мм^2), далее научно-исследовательский институт Министерства Вооружения.

В промышленности, особенно в строительной индустрии, часто не требовалась столь высокая прочность наплавленного металла, как при использовании электродов УП1/55 НИИ МВ. Поэтому были разработаны электроды с покрытием, содержащим меньшее количество ферромарганца и ферросилиция, влияющее на прочность наплавленного металла. При этом была сохранена основная шлакообразующая группа, а предел прочности металла, наплавленного новыми электродами, составил около 45 кг/мм^2 (441 МПа).

В результате исследования 22 экспериментальных вариантов покрытий были найдены необходимые концентрации ферромарганца и ферросилиция и отработан состав покрытия, обладающий всеми технологическими достоинствами и универсальностью, присущими электродам УП1/55 НИИ МВ. Новым электродам было присвоена марка УП1/45 НИИ МВ. Поскольку покрытие этих электродов содержит меньшее количество ферромарганца и ферротитана чем в покрытии УП1/55 НИИ МВ, то стоимость изготовления первых меньше чем вторых. Состав покрытия электродов УП1/45 НИИ МВ приведен в таблице 16, а в таблице 17- механические свойства наплавленного металла.

Таблица 16 *Состав покрытия электродов УП1/45 НИИ МВ, % масс.*

Мрамор	Плавиковый шпат	Кварц	Ферро-марганец	Ферро-силиций	Ферро-титан	Перовскит
54,0	7,0	5,0	2,5	5,0	15,0	11,5

Таблица 17 *Механические свойства металла, наплавленного электродами УП1/45 НИИ МВ в различных пространственных положениях*

Положение шва	σ_{001}, МПа	σ_{02}, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU, кДж/м^2
Нижнее	304-308	339-368	434-459	29,0-33,9	75,1-83,5	2845-3012
Вертикальное	295-307	329-353	430-453	29,1-35,0	76,2-84,1	2708-3041
Потолочное	299-318	334-351	422-460	28,6-34,1	75,6-83,3	2550-2982

4.3.2 Комплексные исследования электродов № 76.

Электроды с покрытием № 76 отличались весьма горячим ходом процесса сварки при меньшем суммарном содержании ферросплавов по сравнению с электродами УП1/55 НИИ МВ. Для сварки углеродистых сталей, содержащих более 0,3% С, и легированных сталей, необходимы электроды с холодным ходом сварки и неглубоким проплавлением основного металла. Для сварки малоуглеродистых и низколегированных сталей, которые широко применялись в мостостроении, котлостроении, гражданском судостроении, вагоностроении и др., особенно с загрязненной поверхностью (окалиной, ржавчиной, следами масел и т.п.) лучшие результаты можно получить при горячем ходе процесса и, следовательно, при глубоком проплавлении.

Весьма часто детали, предназначенные для сварки, не проходят тщательной очистки свариваемых кромок. Иногда подобная очистка весьма затруднительна и не достигает цели, т.к. сварка производится на открытых площадках и зачищенные поверхности быстро корродируют. Для таких отраслей промышленности выгоднее применять электроды с горячим ходом процесса. Поэтому предполагалось, что покрытия № 76 могут найти широкое применение, а для этого необходимо было провести большой комплекс исследований по программе, принятой для электродов УП1/55 НИИ МВ.

Результаты этих исследований приведены в сводных таблицах 18 -25, в которых сравниваются свойства всех электродов, разработанных для сварки на переменном токе. Необходимо отметить, что технологические свойства электродов с покрытием № 76, сварочные свойства шлака, универсальность в отношении рода тока, марок свариваемых сталей, прочностные характеристики, пластичность и ударная вязкость металла шва не отличаются от таких же характеристик электродов марки УП1/55 НИИ МВ, а универсальность с точки зрения сварки во всех пространственных положениях шва даже несколько выше чем у них.

Путем изменения количества ферросплавов в покрытии электродов № 76 было отработано новое покрытие электродов, обеспечивающее предел прочности наплавленного металла на уровне 45 кг/мм^2 (441 МПа) при полном сохранении всех других свойств электродов с покрытием № 76. Электроды с новым покрытием так-

же были подвергнуты комплексному исследованию по программе, использованной при исследовании электродов марки УП1/55 НИИ МВ.

Электродам № 76 и их менее прочному аналогу были присвоены соответственно марки УП2/55 НИИ МВ и УП2/45 НИИ МВ.

4.4 Сводные таблицы свойств электродов марок УП1/45 НИИ МВ, УП1/55 НИИ МВ, УП2/45 НИИ МВ и УП2/55 НИИ МВ

Таблица 18 *Рецептура покрытий УП НИИ МВ, доработанная с учетом производственного применения, % масс.*

Компоненты	УП1/45	УП1/55	УП2/45	УП2/55
Мрамор	54,0	56,0	43,0	42,0
Плавиковый шпат	7,0	7,0	34,0	34,0
Кварц	5,0	5,0	-	-
Ферромарганец	2,5	7,0	3,0	5,0
Ферросилиций	5,0	6,0	-	1,0
Ферротитан	15,0	19,0	16,0	14,0
Ферроалюминий	-	-	4,0	4,0
Перовскит	11,5	-	-	-
Связующее:	80,6% натрового стекла 18,0% калиевого стекла 1,4% бентонита	23% от веса сухой шихты		
	или натровое стекло, содержащее 8%КОН и 8% бентонита	25% от веса сухой шихты		

Таблица 19 *Рецептура покрытий УП НИИ МВ, доработанная с учетом производственного применения, % масс.*

Положение шва в пространстве	σ_{001}, МПа	σ_{02}, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU, кДж/м^2	Предел усталости, МПа
УП1/45 НИИ МВ							
Нижнее	301-312	337-359	428-453	28,0-33,7	76,4-82,0	2796-3080	177-199
Вертикальное	298-320	342-364	433-467	28,1-34,3	75,7-83,4	2777-2972	-
Потолочное	289-328	346-360	434-465	27,4-32,0	78,0-83,1	2727-3071	-
УП1/55 НИИ МВ							
Нижнее	333-368	376-411	528-552	28,3-34,1	77,8-84,3	2747-3178	208-227
Вертикальное	325-371	371-418	522-558	28,0-32,8	76,8-85,0	2737-3208	-
Потолочное	328-360	372-423	531-575	27,8-30,0	77,2-84,2	2815-2982	-
УП2/45 НИИ МВ							
Нижнее	306-313	333-374	415-478	27,9-35,6	75,0-80,2	2737-3149	187-194
Вертикальное	302-318	349-380	459-485	27,4-32,4	75,4-81,3	2786-3139	-
Потолочное	305-322	340-376	446-470	26,8-32,4	74,8-83,6	2600-3208	-
УП2/55 НИИ МВ							
Нижнее	340-375	369-409	526-572	29,2-31,9	76,7-85,2	2717-3247	205-239
Вертикальное	336-382	367-444	535-567	28,2-33,1	78,1-85,6	2747-3227	-
Потолочное	331-387	392-433	557-585	26,2-32,4	75,4-84,8	2659-3159	-

Таблица 20 *Механические свойства металла, наплавленного электродами марок УП НИИ МВ, при температуре 550° С*

Марка электрода	σ_{001}, МПа	σ_{02}, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	δ, %	ψ, %
УП1/45 НИИ МВ	213-227	256-279	345-360	28,4-30,1	80,6-82,8
УП1/55 НИИ МВ	252-288	287-306	322-344	24,2-27,7	79,4-81,3
УП2/45 НИИ МВ	220-233	255-281	348-367	27,9-31,8	79,1-81,4
УП2/55 НИИ МВ	258-271	298-322	331-356	25-26,8	78,2-80,9

Таблица 21 *Механические свойства металла, наплавленного при повышенных режимах электродами марок УП НИИ МВ диаметром 4 мм*

Марка электрода	Ток, А	σ_{001}, МПа	σ_{02}, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU, кДж/м^2
УП1/45 НИИ МВ	350	288-317	344-365	420-467	25,3-29,9	72,8-79,9	2443-3012
УП1/55 НИИ МВ	350	340-355	382-418	533-556	26,8-31,3	71,-76,2	2472-3120
УП2/45 НИИ МВ	350	300-322	361-387	412-484	26,7-30,9	70,8-75,4	2364-2835
УП2/55 НИИ МВ	350	327-372	376-413	519-570	27,2-29,6	71,6-78,8	2609-2982

Таблица 22 *Влияние различных видов термической обработки на ударную вязкость металла, наплавленного электродами марок УП НИИ МВ*

Марка электрода	KCU, кДж/м^2				
	Без термообработки	Старение при температуре 120º С, 184 часа	30 кратный нагрев при температуре 650º С, охлаждение в воде, выдержка 120 часов при 20º С	Закалка в воду от температуры 950º С	Нагрев при температуре 600º С с выдержкой в печи 10 часов
УП1/45 НИИ МВ	2865-3110	2884-3120	2874-3090	1619-1678	2698-3031
УП1/55 НИИ МВ	2884-3149	2855-3129	2894-3021	1560-1805	2668-3012
УП2/45 НИИ МВ	2904-2943	3129-3060	2835-3120	1599-1785	2688-3060
УП2/55 НИИ МВ	2835-3100	2884-3110	2865-3080	1648-1834	2639-3021

Таблица 23 *Химический состав металла, наплавленного электродами марок УП НИИ МВ*

Марка электрода	Диаметр электрода	C	Mn	Si	S	P	Al	Ti	O	N
УП1/45 НИИ МВ	3	0,12	0,79	0,20	0,026	0,030	0,030	0,021	0,0187	0,0100
	4	0,10	0,83	0,25	0,028	0,031	0,020	0,018	0,0200	0,0094
	5	0,12	0,76	0,23	0,025	0,030	0,022	0,023	0,0200	0,0094
УП1/55 НИИ МВ	3	0,10	0,98	0,27	0,025	0,031	0,025	0,016	0,0170	0,0098
	4	0,11	1,06	0,25	0,025	0,032	0,027	0,026	0,0189	0,0098
	5	0,11	1,12	0,27	0,023	0,029	0,027	0,021	0,0183	0,0093
УП2/45 НИИ МВ	3	0,11	0,81	0,22	0,024	0,029	0,027	0,022	0,0193	0,0097
	4	0,12	0,77	0,26	0,027	0,030	0,027	0,020	0,0189	0,0093
	5	010	0,80	0,24	0,026	0,030	0,025	0,017	0,0200	0,0096
УП2/55 НИИ МВ	3	0,13	1,05	0,28	0,022	0,028	0,023	0,024	0,0200	0,0100
	4	0,10	1,09	0,24	0,023	0,028	0,026	0,024	0,0196	0,0095
	5	0,11	1,07	0,27	0,023	0,030	0,027	0,019	0,0187	0,0095

Таблица 24 *Технико-экономические показатели электродов марок УП НИИ МВ*

Марка электродов	При нормальном режиме		При повышенном режиме	
	Коэффициент потерь, %	Коэффициент наплавки, г/А•час	Коэффициент потерь, %	Коэффициент наплавки, г/А•час
УП1/45 НИИ МВ	2,0	10,3	7,0	9,8
УП1/55 НИИ МВ	3,0	10,1	6,0	9,9
УП2/45 НИИ МВ	4,0	9,9	8,0	9,7
УП2/55 НИИ МВ	4,0	9,7	8,0	9,8

Таблица 25 *Значения тока при нормальном режиме сварки, Ампер*

Диаметр электрода, мм	Положение шва в пространстве		
	Нижнее	Вертикальное	Потолочное
3	100-160	80-130	80-150
4	150-240	140-160	140-180
5	190-300	140-180	140-180

4.5 Промышленное опробование и применение электродов УП НИИ МВ

В 1950 г. новые электроды вместе с сертификатами, характеризующими их свойства, были переданы для испытания ряду заводов и строительных организаций Ленинграда и других городов.

Сварка новыми электродами различных марок сталей проводилась в различных условиях сварщиками различной квалификации. Несмотря на это полученные многочисленные отзывы свидетельствовали о высоких технологических свойствах электродов: легкости выполнения сварки на переменном и постоянном токе в различных пространственных положениях шва, а также о высоких механических свойствах наплавленного металла и сварных соединений. Эти отзывы полностью подтвердили результаты лабораторных исследований.

Новыми электродами, изготовленными в лаборатории сварки НИИ-13, были сварены все стальные конструкции Семеновского моста через реку Фонтанку и Большого Крестовского моста через Малую Невку в Ленинграде.

На заводе «Большевик» были изготовлены сварные конструкции специального назначения из хромоникельмолибденовой стали, которые успешно прошли испытания в условиях эксплуатации.

На заводе «Арсенал» имени Фрунзе новыми электродами были сварены конструкции из никелевой стали. Швы были плотными, без пор и других дефектов, несмотря на то, что сварка производилась по незачищенной поверхности кромок.

На судостроительном заводе им. Жданова электроды были опробованы непосредственно на стапелях при изготовлении корпуса корабля. В этих условиях были также подтверждены их высокие технологические свойства при сварке в вертикальном и потолочном положениях швов. Такие же результаты были получены и на Балтийском судостроительном заводе им. Орджоникидзе, после чего было начато производство новых электродов в электродном цехе этого завода.

На металлическом заводе эти электроды были применены для сварки деталей

паровых турбин, насосов и гидротурбин и показали исключительно хорошие технологические свойства при работе как на переменном, так и на постоянном токе.

12 октября 1950 г. в НИИ-13 было проведено совещание передовиков производства, инженерно-технических работников предприятий и представителей научно-исследовательских институтов и вузов Ленинграда, на котором в единогласно принятой резолюции отмечалось, что запросы промышленности, остро нуждавшейся в высококачественных универсальных электродах для сварки на переменном токе, удовлетворены.

Часть V РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОКРЫТИЯ УОНИ-13.

Универсальность покрытия электродов УОНИ-13 заключается не только в том, что на его базе была создана серия марок электродов, соответствующих по современной классификации согласно ГОСТ 9467 типам Э42А, Э50А, Э55, Э60, Э70 и Э85 и обеспечивающих различный уровень прочностных и пластических свойств металла шва (наплавленного металла).

Во время войны покрытие УОНИ-13 было применено для различных наплавочных работ. В 1946 г. было закончено исследование свойств этих покрытий. При этом были подтверждены или выявлены новые области применения покрытий для специальных видов сварки и наплавки:

- цветных сплавов на медной основе (бронз и латуней);
- твердых литых сплавов (типа стеллитов, сормайтов и др.);
- быстрорежущей стали и ее заменителей;
- штамповой инструментальной стали (типа 5ХНМ, 5ХГМ и др.).
- Наиболее существенным положительным свойством покрытий

УОНИ-13 является возможность весьма успешного и точного легирования наплавленного металла теми элементами, у которых численное значение упругости диссоциации окислов выше, чем у SiO_2, а такими элементами при температуре дугового промежутка являются почти все металлы, за исключением Al и Ti [2]. Во всех случаях, несмотря на различие химического состава металла стержней, покрытия обеспечивают высокое качество и стабильность свойств наплавленного металла.

Бронзовые электроды с покрытием УОНИ-13 широко применялись для ремонтной наплавки изношенных деталей артиллерийских систем и других конструкций, а также для заварки дефектов цветного литья, что обеспечило большой технико-экономический эффект благодаря увеличению ресурса дорогостоящих деталей и уменьшению брака цветного литья.

До появления электродов УОНИ-13 ремонт кузнечнопрессового инструмента производился литыми стержнями из стеллита или сормайта с применением ацетиленокислородной наплавки, отличающейся низкой производительностью. Попытки

электродуговой наплавки были неудачными в связи с низким качеством электродных покрытий. Благодаря высококачественному покрытию типа УОНИ-13/45, наносимому на литые стержни из стеллита или сормайта, эта проблема была решена, и дуговая наплавка штампового инструмента получила широкое распространение в промышленности.

Технический эффект такой наплавки выразился в значительном повышении производительности, в расширении наплавочных работ и улучшении качества наплавленного металла, в экономии кислорода и ацетилена, в отсутствии потерь на угар и разбрызгивание по сравнению с электродами, имевшими другие типы покрытий.

В связи с дефицитностью быстрорежущей стали весьма широкое распространение получил наплавленный режущий инструмент. На крупных заводах во время войны и после нее около 80% этого инструмента изготавливалось путем наплавки быстрорежущей сталью или ее заменителями заготовок из углеродистой стали. Высокие технологические свойства покрытий УОНИ-13, отсутствие потерь электродных стержней из быстрорежущей стали на угар и разбрызгивание способствовали быстрому вытеснению других типов покрытий, которые ранее применялись для этой цели. При этом значительный технический эффект выразился в увеличении производительности наплавки, улучшении качества и расширении ассортимента режущего инструмента. Ежегодный экономический эффект, учитывающий только уменьшение потерь на угар и разбрызгивание, достигающих в среднем 15% при использовании других типов покрытий, только по одному заводу № 172 определялся экономией 3600 кг быстрорежущей стали.

В 1942 г. возникли большие трудности в получении быстрорежущей стали (марки РФ). В связи с этим К.В. Петранем были разработаны синтетические электроды, исследование возможностей которых было закончено в 1943 г. Синтетические электроды состояли из тонкостенных трубок, свернутых из полос углеродистой стали и начиненных порошкообразной легирующей шихтой. На наружную поверхность трубок наносилось покрытие УОНИ-13. Была разработана методика расчета легирующей шихты, гарантирующая получение наплавленного металла, химический состав которого полностью соответствовал составу быстрорежущей стали марки РФ-1. Синтетические электроды широко применялись во время и после войны.

В связи с большим развитием в послевоенные годы процесса горячей штамповки возникла потребность в многократном ремонте сложных штампов, гравюра которых периодически подвергалась недопустимому износу или скалыванию. Многочисленными исследованиями было установлено, что надежный результат ремонтной наплавки может быть получен только в том случае, если наплавленный металл имеет тот же химический состав, что и сталь, из которой изготовлен штамп.

Покрытие УОНИ-13 при нанесении на стержень любого состава дает минимальное изменение наплавленного металла по сравнению с металлом стержня. Это позволило успешно применять его при изготовлении электродов со стержнями из штамповой стали (5ХНМ, 5ХГМ и др.). Соответственно электродам присваивались марки УОНИ-13/5ХНМ, УОНИ-13/5ХГМ и т.п. Стойкость штампов, отремонтированных с помощью электродов УОНИ-13, практически не уступала стойкости но-

вых штампов. Метод ремонта штампов с применением наплавки получил широкое распространение в стране. Для этого на крупных заводах были организованы специальные мастерские. Только на одном заводе № 172 ежегодная экономия штамповой стали за счет ремонта ковочных штампов составляла более 400 тысяч рублей.

В 1949 г. была разработана серия экономно легированных электродов ЭН-40, ЭН-50 и ЭН-60 для упрочнения быстро изнашивающихся деталей путем наплавки. Наплавка может производиться на различные марки стали и чугун на постоянном и переменном токе. Стержни электродов изготавливались из проволоки Св.08А, а в покрытие фтористо-кальциевого типа с заданным количеством феррохрома для обеспечения необходимого содержания углерода добавлялось 1,0-2,5% кокса. Химический состав и твердость наплавленного металла представлены в таблице 26. Термическая обработка наплавленных деталей включает отжиг при 860 °С с последующим охлаждением с печью, закалку от 900° С в масло и отпуск при 250° С в течение 1 часа.

Таблица 26 *Химический состав и твердость металла, наплавленного электродами ЭН-40, ЭН-50 и ЭН-60.*

Марка	Химический состав, % масс.				Твердость, HRc после	
	C	Cr	Mn	Si	наплавки	термообработки
ЭН-40	0,55-0,60	1,85-2,00	0,50-0,70	0,30-0,50	12-15	40-50
ЭН-50	0,65-0,70	1,90-2,10	0,50-0,70	0,30-0,50	18-22	54-57
ЭН-60	0,90-0,95	2,20-2,50	0,60-0,80	0,50-0,70	21-25	59-62

Впоследствии во ФГУП «ЦНИИМ» на базе указанного покрытия были созданы средне и высоколегированные электроды для сварки и наплавки. Более того, большинство марок электродов для сварки легированных теплоустойчивых и высокопрочных сталей, разработанных ЦНИИ КМ «Прометей» и другими организациями, созданы на основе покрытия УОНИ-13 с использованием проволок разных марок и дополнительной незначительной корректировкой состава шлакообразующих и легирующих компонентов [6].

В 1951 г. были разработаны электроды для сварки малых толщин (1-2 мм), в 1952 г. - электроды БД (больших диаметров - 6-10 мм) с фтористо-кальциевым покрытием для сварки на переменном токе, в результате чего появилась возможность увеличить производительность труда за счет увеличения силы сварочного тока в несколько раз. Эти электроды успешно применялись для заварки дефектов и сварки крупногабаритных отливок. В 1967 г. были разработаны электроды марки УОНИ-13 /ЭП-56 для сварки высокопрочной стали марки ЭП-56 со стержнем из той же стали и марки УОНИ-13/1ННА для сварки маломагнитных сталей типа ДИ-8 со стержнем из стали ЭП-568. Металл шва, сваренного электродами УОНИ-13/1ННА имел магнитную проницаемость 1,6 Гаусс/ Эрстед, $\sigma_в$=800 МПа, δ_5=25%, ψ=45%, $a_п$=900 кДж/м^2.

Значительное количество работ под руководством К.В. Петраня и впоследствии Ю.М. Белова при участии В.А. Красавчикова и Л.И. Соловьевой было посвящено созданию материалов для наплавки (таблица 27).

Для наплавки кузнечно-прессового инструмента были разработаны электроды

Таблица 27 *Основные характеристики электродов для наплавки*

Марка	Свойства наплавленного слоя			Область применения	Что заменяет	Преимущества
	Теплостойкость,° С	Твердость HRC, после				
		наплавки	термообработки			
УОНИ-13/Н1-БК	800	28-32	46-50	Арматура АЭС, химической и нефтяной промышленности. Тяжелонагруженный штамповый инструмент, ножи горячей резки, валки и проводковая арматура станов горячей прокатки, ролики и брусья УНРС, керны захватов горячего металла для мостовых кранов.	Стеллит, ВЗК, ЦН-2, ЦН-6, ОЗН-6, ПГСР, ОЗИ-5	Цена ниже в 2-4 раза; меньше склонность к образованию трещин при наплавке; выше технологичность при мех. обработке наплавленных поверхностей.
УОНИ-13/Н6	900	32-35	46-49			
УОНИ-13/Н2	1000	32-36	50-52			
УОНИ-13/Т5	700	48-50	52-54	Быстроизнашивающиеся детали машин, работающие при средних ударных нагрузках (ножи, зубья землеройных машин, клыки роторных экскаваторов), средненагруженный кузнечно-прессовый инструмент, ножи горячей резки, восстановление клапанов и распределительных механизмов ДВС.	0ЗН-6, 0ЗШ-4 ВСН-10, ЭН-60М, Нп-Х2В8, Нп-45-Х2В8Г, Нп-60-Х3В10Ф, 0ЛН-21, ЭНП-2	Ниже стоимость за счет комплексного экономного легирования мартенситной основы.
УОНИ-13/Н3	500	50-52	-			
УОНИ-13/Н7	600	28-34	45-52			

УОНИ13/4Х10В5МФ (повысили стойкость вырубных штампов в 8 раз), УОНИ13/Н3А, УОНИ13/Н6 и др.

В 1972 г. для наплавки уплотнительных поверхностей запорной арматуры, работающей в агрессивной среде при высоких температурах и контактных давлениях, взамен электродов с высоким содержанием кобальта (типа Э-17Х28С2В4К59) Ю.М. Беловым и В.А. Красавчиковым были разработаны электроды УОНИ13/БК на базе проволоки Х32Н8 (твердость наплавленного металла после высокотемпературного старения 48-52 HRc). В 2002 г. был усовершенствован состав покрытия этих электродов с целью увеличения твердости наплавленного металла до 57-59 HRc, что позволило наплавлять ими режущие кромки ножниц гильотин.

В 2003 г. В.Б. Вихманом и В.В. Перцевой были разработаны новые высоколегированные электроды УОНИ13/КС, обеспечивающие кавитационную стойкость наплавленного металла на уровне лучших германских и швейцарских электродов.

В настоящее время трудно найти отрасль промышленности, в которой бы не использовались электроды УОНИ13. Это и строительные металлоконструкции, мостостроение, подъемно-транспортные машины и механизмы, транспортное, энергетическое и металлургическое машиностроение, оборудование химических и нефтехимических производств, нефтегазодобывающее оборудование, магистральные трубопроводы, судостроение и судоремонт. Особую роль электроды УОНИ-13 играют при сварке оборудования атомных энергетических установок, обеспечивая надежность сварных швов, работающих при температуре до 350º С, высоком давлении и в условиях радиоактивного облучения. На протяжении многих лет различными организациями предпринимались попытки заменить, усовершенствовать или улучшить электроды УОНИ-13. Однако и на сегодняшний день электроды УОНИ-13 являются одними из лучших отечественных электродов. [6]

Литература

1. Ю.М.Белов, В.Б. Вихман. Константин Вацлавович Петрань – выдающийся русский ученый в области сварки. «Сварочные материалы» (к 70-летию создания электродов УОНИ-13). Доклады международной научно-технической конференции «Петраньевские чтения», 18 -22 мая 2009 г., Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета. С. 2 -11.

2. К.В. Петрань, Н.М. Кизин, А.П. Бибиков. Электроды УОНИ-13. «Автогенное дело», № 8, 1947, с. 4 - 9

3. К.В. Петрань. Технический отчет по теме Г-13-78 «Разработка рецептур и технологического процесса изготовления высококачественных электродов для электродуговой сварки. НИИ № 13 НКВ СССР. 1940, 96 с.

4. К.В. Петрань. Технический отчет № 1056 «Универсальные электроды УОНИ-13 для дуговой электросварки». НИИ № 13 МВ СССР. 1946, 60с.

5. К.В. Петрань. Технический отчет № 1606 «Электроды для сварки на переменном и постоянном токе сталей любых марок, во всех пространственных положениях шва и новая рецептура покрытий УОНИ-13/45 и УОНИ-13/55 для массового производства на мощных электродных прессах». НИИ № 13 МВ СССР. 1951, 97 с.

6. И.М. Лившиц. Электроды УОНИ-13 – универсальные электроды для сварки сталей различного назначения. «Сварочные материалы» (к 70-летию создания электродов УОНИ-13). Доклады международной научно-технической конференции «Петраньевские чтения», 18 -22 мая 2009 г., Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета. С. 32 -35.

ГИДРОКСИДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ПОКРЫТИЯХ СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

И.В. Горынин,
академик РАН,
В.А. Малышевский,
д.т.н.,
Ю.Д.Брусницын,
к.т.н.,
ФГУП «ЦНИИКМ «Прометей»
г. Санкт-Петербург
mail: victorm@crism.ru

В.Т. Калинников,
академик РАН,
А.И. Николаев,
член-кор. РАН,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ РАН
г. Апатиты
mail: office@chemy.kolasc.net.ru

Ю.В. Аввакумов,
инж.,
А.Н. Быков,
инж.,
ОАО «ПО «Севмаш»
г. Санкт-Петербург
mail: ipogsv@sevmash.ru

В докладе рассматриваются технологические аспекты повышения потребительских свойств сварочных электродов за счет предупреждения развития в обмазочных массах процессов образования гидроксидных соединений и совершенствования на этой основе всего технологического процесса производства продукции для сварки конструкционных сталей

Введение

Вопросы надежности и ресурса работоспособности конструкций из высокопроч-

ных и хладостойких сталей во многом связаны с водородной хрупкостью металла сварных швов, выполняемых ручной дуговой сваркой покрытыми электродами или автоматической сваркой под агломерированным флюсом, в начальной стадии производства которых в качестве связующего применяется жидкое стекло – водный раствор щелочных силикатов.

По существу жидкое стекло является единственным источником водорода, участвующего в процессе образования металла сварных швов. До этого момента цепочка технологических операций от выбора и подготовки компонентов (в том числе жидкого стекла) неоднократно изменяет состояние и структурные формы присутствия водорода: в обмазочных массах, в покрытиях электродов, в шлаковых расплавах и в кристаллизующемся наплавляемом металле. Технология производства электродов и флюсов далеко не всегда учитывает эти изменения, в результате чего нестабильность качества в последние годы остается основной характеристикой потребительских свойств сварочных электродов российских предприятий [1, 2].

Состояние проблемы

Есть гидроксидные соединения в покрытиях электродов или нет? Положительный ответ на этот вопрос в сварочной литературе [3-11] дается признанием щелочного характера взаимодействия жидкого стекла с порошками металлов и ферросплавов, т.е. гидролиза с образованием гидроксидов, выделением водорода и тепла. Но тем не менее, продукты гидролиза не учитываются в качестве источника водорода при рассмотрении проблемы водородной хрупкости металла сварных швов конструкционных сталей.

Взаимодействие жидкого стекла с неметаллическими компонентами подразумевается, но никакой значимости этому процессу не придается. Продукты щелочного гидролиза не рассматриваются в качестве инициаторов пористости сварных швов. Значит ли это, что в покрытии электродов к моменту сварки гидроксидных соединений нет? В то же время не отрицается наличие в покрытии кристаллизационной (связанной) воды.

Такая неопределенность в этом вопросе, по нашему мнению, лишает производителей возможности управления технологическими процессами.

Литература по растворимому и жидкому стеклу [4, 5 12, 13], по химии цементов [14, 15], по получению адсорбентов и композиционных защитных покрытий методами «золь-гель технологий» [16-21] свидетельствует об общих закономерностях, пригодных и для понимания процессов, протекающих в три этапа и определяющих качество сварочных материалов.

1. Взаимодействие начинается немедленно после подачи в сухую смесь компонентов жидкого стекла и идет при нормальных температурах с выделением тепла (щелочной гидролиз порошков ферросплавов, металлов, мрамора и оксидов). При этом в первую очередь, как и в последующих операциях, образуются гидроксидные соединения.

2. Зародыши силикатов и гидросиликатов в щелочных растворах не образуются.

Они появляются только в осажденных гелях или в осадках в период выдерживания при комнатной температуре, при старении, а также при повышении температуры.

3. Начало кристаллизации зародышей в композиционных покрытиях наблюдается при температурах в интервале 150-200º С. Гели и осадки при этих температурах остаются аморфными. Дальнейшее повышение температуры до 500º С способствует росту кристаллов гидросиликатов. При этом придается значение наличию в смесях, осадках и частицах геля жидкой фазы, а также гидроксидов в качестве строительного материала [16-19]. В условиях нормальных температур эти процессы идут очень медленно [13-14]. С удалением жидкой фазы начинаются реакции в твердом состоянии. В них участвуют гидроксидные соединения, а также, сухой остаток жидкого стекла [22]. При температурах 600-700º С равновесие сдвигается в сторону безводных фаз [15].

Недостаток времени, температуры, отсутствие соответствия состава шихтовой смеси, необходимых для образования совершенной кристаллической структуры гидросиликатов (оксо-гидроксокомплексов кальция, алюминия, титана, ванадия, хрома, молибдена) как будто бы делает проблематичным их образование в технологических процессах производства сварочных электродов.

Сопоставление результатов исследовательских испытаний в условиях предприятий ОАО «Ижорские заводы» и ОАО «ПО «Севмаш» (2002-2010 гг.) с общими закономерностями поведения жидкостекольных композиционных смесей позволили представить визуальную модель образования гидратированных соединений в обмазочных массах и покрытиях электродов фтористо-кальциевого типа (рисунок 1).

Рисунок 1 *Визуальная модель образования гидроксидов:*
а - традиционные рецептуры УОНИИ-13,
б - рецептуры с минеральными сплавами (ожидаемое состояние)

О гидроксидах и оксигидроксидах разных мнений, очевидно, быть не может: щелочной гидролиз охватывает как металлы и их оксидную защиту, так и минеральные компоненты. Гидроксидные соединения образуются практически немедленно после контакта с минеральными компонентами и на всех последующих операциях, включая технологическую прокалку и прокалку перед сваркой. Увлажнение покрытия в период хранения электродов способствует продолжению образования гидроксидов и гидросиликатов. При длительном хранении гигроскопическая влага электродных покрытий может взаимодействовать с сухим остатком жидкого стекла с образованием гидросиликатов, превращая гигроскопическую воду в кристаллизационную форму [6]. Таким образом, гидроксидные соединения и гидросиликатные продукты получают возможность реально участвовать в сварочных процессах.

По-видимому, нестабильность потребительских свойств современных электродов преимущественно связана с выбором сырья, условиями выполнения технологических операций, температурой, временным фактором, случайным изменением параметров жидкого стекла и другими сопутствующими явлениями, так или иначе оказывающими влияние на образование гидроксидов, оксогидроксидов, а также структур близких к структурным формам оксо-гидроксокомплексов различных металлов, содержащих не только кристаллизационную воду, но и ионы гидроксила.

При расплавлении покрытия неизбежно в расплав попадают ионы гидроксила и катионы. В расплавленном шлаке может сохраняться ближний порядок расплавленных соединений покрытия. Не исключено, что ионы гидроксила будут захватываться более энергетически сильными катионами - «ловушками», которые, оставаясь в неметаллических включениях, придают им адгезионные способности, позволяющие удерживаться на границах кристаллов, образуя тем самым локальные очаги ослабления за счет зарождения микротрещин при тепловых деформациях металла шва.

Для оценки возможного образования таких включений целесообразно использовать значения силовой характеристики катионов раскисляющих и легирующих металлов [23], (рисунок 2.): чем больше значение силовой характеристики катионов, тем сильнее катионы удерживают гидроксильные группы. Это и есть «ловушки» с аккумулированным водородом в виде гидроксила. Они могут представлять реальную опасность для разрушения конструкций [8]. «Выпады» результатов испытаний наплавленного металла при отрицательных температурах также можно считать прямым следствием появления «ловушек».

Экспериментальная часть

Методические проработки. По существу, это исследовательские испытания в промышленных условиях традиционных технологий электродного производства с позиций новых подходов, в основе которых «предотвращение условий, способствующих взаимодействию жидкого стекла с компонентами электродных покрытий и негативному влиянию последствий химических реакций в обмазочных массах на потребительские свойства сварочных материалов».

Методика выполнения экспериментов ориентирована на выявление деталей тех-

ПОДХОДЫ К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Рисунок 2 *Силовые характеристики катионов, наиболее важных для сварочных материалов*

нологических операций, отражающихся на сварочно-технологических свойствах электродов и на механических свойствах наплавленного металла, в том числе, на работу удара (KV, Дж) при отрицательных температурах (-20…-60º С).

Расчеты рецептур электродных покрытий и минеральных сплавов производились с использованием расчетной компьютерной программы и диаграмм фазовых равновесий неметаллических систем, в основу которой заложено постоянство состава расплавленного покрытия (шлака) [24].

Результаты испытаний, обсуждение, подходы

Минеральные сплавы позволяют вводить в покрытия сварочных электродов компоненты, природные и техногенные аналоги которых обладают высокой химической активностью к водным растворам щелочных силикатов (глинозем, нефелин, сыннириты, фториды, оксиды, а также многие другие виды минерального сырья).

Функциональное назначение минеральных сплавов:

- наиболее полно обеспечить отсутствие взаимодействия жидкого стекла с компонентами сухой шихты;
- способствовать легкому образованию жидкой фазы при расплавлении покрытия, обеспечивая при этом одновременную ассимиляцию расплавом зерен компонентов по всей толщине покрытия, идущей преимущественно за счет контактного плавления [25];
- обладать свойствами рафинирующих шлаковых расплавов.

Следует констатировать, что плавленые минеральные сплавы (миналы, они же комплексные компоненты электродных покрытий) проявили себя в качестве идеального средства предотвращения взаимодействия компонентов с жидким стеклом.

Новыми компонентами минеральных сплавов наряду с традиционными были нефелиновые и сфеновые концентраты, природно-легированное минеральное сырье, содержащее как основные элементы покрытия – оксиды калия, натрия, кальция, алюминия, титана, так и примеси оксидов рубидия, цезия, галлия, РЗМ, ниобия и тантала [26].

В таблицах 1, 2, и 3 представлены результаты испытаний опытных и опытно-штатных партий для рассмотрения их с позиций влияния технологических факторов на развитие химических реакций в обмазочных массах.

Обсуждение, подходы.

1. Жидкое стекло. Традиционное натровое жидкое стекло ОАО «ПО «Севмаш» отличается высокой плотностью и повышенной вязкостью. Применение его в 60-80 годы прошлого столетия не могло способствовать проявлениям «водородной хрупкости». Всеобщее стремление к использованию в производстве сварочных электродов жидкого стекла пониженной плотности и вязкости привело на ПО «Севмаш» к применению разбавленных смешиванием «растворов». При использовании для получения жидкого стекла воды горячего водоснабжения отчетливо проявилась его повышенная химическая активность практически во всех технологических процессах производства опытных электродов. Представленные в таблицах 1-3 материалы исследовательских испытаний при температуре -60^{o} С в редких случаях не имеют «выпадов» по работе удара (KV Дж), несмотря на использованные «минеральных сплавов» в покрытиях в количестве от 10 до 40% (таблица 1: 1302 и 13221, таблица 2: 135 и 130; 33 и 32; таблица 3: АС1-01).

2. Интенсивный смеситель. Наличие звездочки с рабочей поверхностью из твердых сплавов и повышенной скоростью вращения (240 об/мин.) способствует развитию реакций, разрушая пленки из ее продуктов.

3. Сварка короткими валиками, сварка по шлаку, сварка в вертикальном и потолочном положениях усиливает все негативные процессы, растет содержание диффузионно- подвижного водорода и количество «ловушек», остающихся в наплавленном металле, снижается общий уровень результатов испытаний, увеличивается количество «выпадов». Выпады появляются не только при температуре -60^{o} С, но и при температурах -40 и -20^{o} С (таблица 2 -п.33, 331).

Сварка на подъем 3 - 5^{o} (таблица 1) с увеличением длины валиков, наплавленных одним электродом, до 250 - 270 мм может исключить неблагоприятное влияние шлакового расплава, как источника ионов гидроксила, но, по-видимому, до некоторого пока неизвестного предела.

В настоящей работе этот предел наверняка был превзойден: активность мрамора Коелги, плавикового шпата, жидкого стекла, ферросилиция (примеси Ca и Al), ферромарганца (карбиды) оценивалась как высокая.

Таблица 1 *Результаты испытаний в ОАО «ПО «Севмаш» в 2008-2009 г.г. наплавленного металла установочных партий электродов с покрытием композиций на основе алюмосиликатов кальция с диоксидом титана (проволока Св-08АА, Ø 4 мм)*

Установление влияния технологических факторов																			
Технологические факторы Длительность замеса / ∑ до опресссовки, мин Порядок введения ж.стекла, % к массе сухой шихты. Давление опрессовки кгс/см²	**Вариант покрытия** Дата изготовления	**Номер партии**	**Покрытие Расчетное содержание, %**				Длина валика от 1 эл-да Lв, мм. Ток сварк, А Сварщик	**Содержание в наплавленном металле, %**				**Результаты испытаний на растяжение, Тисп. +20° С**				**Результаты испытаний на ударный изгиб**			
			Минала		Сумма, %			N	O	**Si**	**Mn**	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ, %	ψ, %	KV, Дж при температуре,° С			
			Номер плавки	Доля, %	**Неф / Сфен**	**K_2O / Na_2O**										**-20**	**-30**	**-40**	**-60**
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Типовая технология 8 / 45 *Р-245-235*	*Т1(Т1-3)-0 01.02.08*	821	155 157 **158**	9.9 0,4 **14,9**	**6.8 / 4.5**	**0,8** / 5.0	250-270** 180 Селяков	0.09	0.056	**0.31**	**1.30**	**560**	**485**	**31**	**72**	**108 132 94 111**	**98 96 52 82**		**62 90 72 75**
10 / 30 *15+2+1, 24% Р-235 и менее*	*Т1(Т1-3)-0 03.02.09*	1311	156 **158-1** **Al_2O_3** **TiO_2**	15.0 **11.0** **5,9** **5,3**	**7.0 / 4.0**	**1,6** / 5,2	350** Родионов	0.015	0.056	**0.29**	**1.44**	**620**	**550(?)**	**19** дефект	**20**	**116 132 116 121**	**108 108 94 103**	**90 85 102 92**	**68 82 80 77**
Максимальное содержание Al_2O_3 *(нефелина)* ***20/40*** *14+3+2,* ***25%*** ***Р=215-158***	*Т1(Т1-3-)-0 ал.3 15.12.08*	1303	**156** **157** 158 **Al_2O_3** **TiO_2**	**16.0** **12.0** 10,3 **12.6** **7,9**	**макс 11.8 / 4.3**	**1.5** / 6.2	250-270 170** Чепик	0.010	0.06	**0.28**	**1.31**	**530 540**	**415 450**	**33 31**	**71 72**	**114 110 136 120**	**112 105 94 104**	**106 114 90 102**	**56 12* 82 50**
+Оксиды железа **20/55** 17,5+0,5, 23,7% Р=230-220	*Т1(Т1-3)-0 15.12.08*	1300	156 157 **158-1** **Fe_2O_3**	6 9 **8** **4,3**	**5.8 / 4.2**	**1.3** / 5.4	250-270 170** Чепик	**0,010**	0,06	**0,21**	**1.14**	**510**	**440**	**31**	**76**	**132 128 110 123**	**129 131 48 103**	**129 123 138 130**	**81 50 94 75**
Повышение т-ры плавления покрытия **53/73** 13+3+2+1+1+1+1+1, 30,7% Р=134-130	*Т1(Т1-3)-0Б2 15.12.08*	1302	156 **245** **322-1**	11,2 **10,0** **9**	**7.2 / 6.3**	**3.6 / 4.1**	250 -270 170** Чепик	**0,010**	0,06	**0.26**	**0,90**	**500**	**430**	32	72	**25* 112 93 77**	**52 106 69 76**	**61 38* 60 53**	**4* 7* 6* 5,7**
Повышение т-ры плавления покрытия *15+2+1+0,5, 24,7% Р=156*	*Т1(Т1-3)-0Б22 03.02.09*	**13221**	156 **322-1** **158-1**	9.9 **5.7** **12**	5.8 / 5.5	3.2 / 5.2	350 170** Ленин	0.011	0.075	**0.26 018**	**0.99** 0.82	**530 540**	**440 450**	**30 30**	70 72	**84 94 104 94**	**86 88 120 98**	**96 64 90 83**	**34* 40* 45* 40**

* выпады, ** сварка на подъем

Таблица 2 *Результаты испытаний в ОАО «ПО «Севмаш» в 2008-2010 г.г. наплавленного металла опытно-штатных партий сварочных электродов типа УОНИ-13/55Р (проволока Св-08АА Ø 4 мм)*

Установление влияния технологических факторов																			
Технологические факторы	Вариант покрытия Дата изготовления	Номер партии	Покрытие Расчетное содержание, %				Длина валика от 1 эл-да Lв, мм. Ток сварк, А Сварщик	Время, мин		Содержание в наплавленном металле, %		**Результаты испытаний на растяжение, Тисп. +20° С**				**Результаты испытаний на ударный изгиб**			
			Минала		Сумма, %			замеса	∑ до опрессовки	Si	Mn	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ, %	ψ, %	KV, Дж при температуре,° С			
			Номер плавки	Доля, %	Неф / Сфен	K_2O / Na_2O										**-20**	**-30**	**-40**	**-60**
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
*Обычное ж.стекло 25% **20° С***	*Т1(Т1-3)-2(-5) 30.04.08*	**130**	155 158 **TiO_2** **Al_2O_3**	13,6 17,1 **5,3** **6,9**	**мин** **6.8** **5.1**	**мин** **0.9** 5,3	370-390** 155 Цивилев			**0.51-0,58**	**1.60-1,79**	**650**	**580**	**18,5**	**65**	**112** **126** **114** **117**	**118** **108** **118** **115**	-	**60** **30*** **64** **51/62**
*В/м. ж. ст.31%, **31° С** Карбамид Р=115-78*	*Т1(Т1-3)-2(-5) 30.04.08*	**135**	155 158 **322-1** **TiO_2** **Al_2O_3**	10.6 16.3 **10.9** **5.3** **6.7**	**7.4** **6.3**	**макс** **3.6** 4,1	370-390** 155 Цивилев			**0.49**	**1.53**	**630**	**530**	**27**	**72**	**60** **52** **66** **59**	**54** **56** **54** **55**	-	**28*** **38*** **26*** **31**
> Al_2O_3 ж.ст. 23,7 % бегунковый смеситель Р=190-170	*Т1(Т1-3)-2 Опытно-штатная партия 16.03.10*	**33**	156 158 **TiO_2** **Al_2O_3**	15.4 10.0 **8.9** **9.1**	**8.6** **3.0**	**0.9** 4.7	160 Ленин сварка по шлаку (?)	**6**	**63**	**0.19**	**0.80**	**540** **530**	**470** **460**	**25,9** **29.0**	**63** **72**	**110** **32*** **86** **76**	**36*** **72** **96** **68**	**40*** **48** **38*** **42**	**38*** **10*** **14*** **21**
Повторные испытания	*Т1(Т1-3)-2 п.33*	(331)	156 158 **TiO_2** **$Al2O_3$**	15.4 10.0 **8.9** **9.1**	**8.6** **3.0**	**0.9** 4.7	160 Ленин сварка по шлаку (?)	-	-	-	-	**540** **530**	**435** **465**	**23.5** **25.0**	**71** **70**	**36*** **70** **82** **63**	**63** **28*** **77** **56**	**17*** **55*** **26*** **33**	**14*** **7*** **8*** **10**
> Al_2O_3 ж. ст. 22.7% бегунковый смеситель Р=190-150	*Т1(Т1-3)-0 17.03.10 Опытно-штатная партия*	***32***	156 158 **TiO_2** **Al_2O_3**	8,9 14,0 **10,0** **8,7**	**7.9** **3.0**	**0.9** 4.3	160**(?) Ленин	**3**	**23**	**0.25**	**0.9**	**510** **530**	**450** **465**	**26** **27**	**73** **72**	**128** **132** **124** **128**		**100** **114** **100** **105**	**60** **64** **110** **78**
Алюмосиликатная композиция с CaO Норм. условия	*Al-Si-Ca 30.04.10 Опытно-штатная партия*	***ТО-2***	**156** **Al_2O_3**	**13,1** **5,4**	мин **6.0** **0.0**	мин **0.7** **4.5**	170** Плешков			**0.20**	**1,00**	**520** **510** **520**	**430** **420** **420**	**28,0** **27,0** **24,0**	**71** **72** **72**	**146** **152** **174** **154**		**138** **105** **136** **126**	-

Таблица 2 (Продолжение) *Результаты испытаний в ОАО «ПО «Севмаш» в 2008-2010 г.г. наплавленного металла опытно-штатных партий сварочных электродов типа УОНИ-13/55Р (проволока Св-08АА Ø 4 мм)*

Технологические факторы	Вариант покрытия Дата изготовления	Номер партии	Покрытие Расчетное содержание, %				Длина валика от 1 эл-да Lв, мм. Ток сварк, А Сварщик	Время, мин		Содержание в наплавленном металле, %		**Результаты испытаний на растяжение, Тисп. +20° С**				**Результаты испытаний на ударный изгиб**			
			Минала		Сумма, %			замеса	∑ до опрессовки	Si	Mn								
			Номер плавки	Доля, %	Неф / Сфен	$\frac{K_2O}{Na_2O}$						$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	KV, Дж при температуре,° С			
																-20	**-30**	**-40**	**-60**
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Алюмосиликатная композиция с CaO Норм. условия; ж/с NaK Св08-А, разд Б	*Опытно-штатная партия 10.11.06 Ижорский завод*	***337***	54 **$Al2O_3$**	15,3 **29,7**	**0.0** / **0.0**	—	165** Большаков	3	<20	**0,35**	**0,97**	**500**	**380**	**32**	**71**	**137** **122** **134** **131**		**114** **127** **108** **116**	**80** **58** **82** **73**
Требования НТД										**0,18-0,45**	**0,8 -1,2**	**≥490**	**≥375**	**≥22**		**≥47**			

** выпады, ** сварка на подъем*

Таблица 3 *Результаты испытаний наплавленного металла опытных электродов с миналами в покрытии, (ОАО «ПО «Севмаш», проволока Св-08АА, Ø 4 мм, ОАО «Ижорские заводы» - проволока СВ-08А, Ø 4 мм, 2004 -2006 г.г.)*

№ рецептуры	Покрытие		Mn, %	Si, %	Характеристика наплавленного металла							
	Минал Al_2O_3	Доля, %			$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5, %	ψ,%	Работа удара KV, Дж, при Тисп			
									-20° С	-40° С		-60° С
АС1-01 05.2004 г. п.5.0 Ижорский завод	АС1 пл.18 AlO_3 ж.с. Na-K	11,0 5,9	1,23	0,44	573	463	29	77	-	124 100 64 96		(42)* (43)* 71 52
АС1-01 07.2006 г	АС1 пл.1 Al_2O_3	10,8 6,2	1.07	0.42	559	451	30	62	140 100 130 123	128 136 130 131		90 100 56 82
АС1 07.2006 г	ОФ-6 Al_2O_3 CaF_2	19,5 5,0 17,3	1.08	0.46	559	451	32	72	90 138 140 123	104 140 96 122		(24)* 50 104 59/77
АС1-001 07.2006 г	ОФ-6 Al_2O_3 CaF_2	37,1 9,0 34,7	1.25	0.57	598	520	27.0	70	110 114 152 125	104 126 106 112		(29)* 81 97 69/89
АС-1-02 10.2004 г	АС1Ф2 пл.2 Al_2O_3 CaF_2	14,6 5,0 14,0	1.43	0.45	564	463	33	73	-	104 88 124 106	120 104 104 106	102 76 70 79	80 82 60 79

* выпады, 2004 г. – сварка в горизонтальном положении, 2006 г. – сварка на подъем

4. Было установлено, что повышение в покрытии электродов оксида калия выше 2,5% нежелательно, поскольку при содержании его в пределе 3,2-4,6% намечается тенденция к ухудшению результатов испытаний.

5. Повышение содержания оксида алюминия, скорее всего, не отразилось на результатах испытаний (таблица 1, партия 1303, таблица 2, партия 32, 337). Это должно означать, что оксиды алюминия, как и других металлов, работают, создавая комплексный шлаковый расплав с определенными физическими свойствами, но не придают шлаку свойства адгезива. Последнее присуще только гидрооксидным соединениям и оксо-гидроксокомплексным структурам.

6. Присутствие карбидов в обмазочных массах, в том числе и в плавленых миналах не является непредвиденным исключением. В этом плане введение небольшого количества оксидов трехвалентного железа (таблица 1, п. 1300) почти всегда может быть полезным.

Понимание процессов в обмазочных массах и их последствий требует выработки новых подходов по всей цепочке (разработка – изготовление - применение сварочных электродов), не исключая их специализации по назначению «для сварки в

горизонтальном положении», «для сварки в потолочном положении» «для сварки в вертикальном положении».

Экономический аспект проблемы. Главное и непререкаемое возражение – дорогостоящее использование электродуговых флюсоплавильных печей. Что это: отход от природного сырья? В рецептурах только мрамор и кварцевый песок. Все остальные компоненты-концентраты гравитационного, флотационного, химического, электромагнитного обогащения, а для корунда использование металлургического оборудования.

Положительный фактор – увеличение надежности и ресурса работоспособности конструкций, работающих в северных условиях, швы которых выполнены сварочными материалами (электроды, агломерированные флюсы), изготовленными по технологиям, учитывающим необходимость исключения условий, способствующих образованию гидроксидных соединений в обмазочных и флюсовых массах.

При выполнении сварочных работ должна быть исключена «сварка по шлаку» с целью предупреждения образования опасных «ловушек» гидроксила в виде неметаллических включений по границам кристаллов в металле сварных швов.

Заключение

Представленные в докладе материалы, а также работа в целом, выполненная на ОАО «ПО «Севмаш», позволяют констатировать следующее.

1. Использование минеральных сплавов в составе покрытий электродов типа УОНИ-13 значительно уменьшает образование гидроксидных соединений в обмазочных массах, что прежде всего отражается на степени окисленности поверхности наплавленных валиков, способствует предупреждению пористости даже при исключении ферротитана из состава покрытия, повышает работу удара при отрицательных температурах (до 90 - 130 Дж при -40° С и 75 - 80 Дж при – 60° С). Для опытных электродов с пределом текучести наплавленного металла 485 - 520 МПа использование миналов позволяет на отдельных партиях получить значение работы удара в пределах 90 - 130 Дж при температуре испытаний -40° С и 60 - 75 Дж при – 60° С (при отсутствии «выпадов» менее 50 Дж).

2. Установлена четкая связь результатов испытаний для определения работы удара (KV, Дж) при температуре –60° С с фактическими параметрами выполняемых технологических операций, с химической активностью компонентов (мрамор, плавиковый шпат и др.), с содержанием примесей кальция и алюминия в ферросплавах, с химической активностью жидкого стекла - водного раствора щелочных силикатов. Взаимодействие последнего с компонентами, входящими в состав сухой шихты, неизбежно: щелочная деструкция компонентов с образованием гидроксидов и оксигидроксидов начинается с момента контакта и с коротким инкубационным периодом продолжается до полного израсходования или удаления жидкой фазы.

3. Выпады в результатах испытаний тесно связаны с неметаллическими включениями, располагающимися по границам зерен металла шва. Опасными явля-

ются включения, имеющие в своих составах катионы (Al3+, B3+, Zr^{4+}, Ti^{4+}, Nb^{5+}, V^{5+}, Mo^{6+}, Cr^{6+}, Mn^{4+}), обладающие высоким значениям силовой характеристики к захваченным из шлакового расплава ионам гидроксила (OH)-. Фактические значения выпадов могут отличаться от максимального или среднего значения результатов испытаний на 30 - 80%, что свидетельствует о неслучайном их появлении в наплавленном металле. Более того, известно, что такие включения способны инициировать микротрещины (флокены), которые при деформации от ударной нагрузки определяют значение выпада.

4. Установлена четкая связь появления выпадов в результате испытаний наплавленного металла при температуре -60° С с технологией, техникой и условиями сварки проб для испытаний свойств наплавленного металла: «сварка по шлаку», «сварка на спуск», «сварка короткими и широкими валиками», «сварка в вертикальном и потолочном положении», которые способствуют образованию упомянутых неметаллических включений.

5. В итоге следует подчеркнуть, что проблемы образования гидроксидных соединений в обмазочных массах связаны с проблемой надежности и работоспособности сварных конструкций, имеют прямое отношение к продукции электродно-флюсового производства всех российских предприятий, а также к предприятиям - потребителям сварочных электродов и агломерированных флюсов.

Литература

1. Сидлин З.А., К вопросу о качестве современных отечественных электродов для ручной дуговой сварки.// Технология машиностроения-2008-№1-с.35-38

2. Сидлин З.А., Состояние производства сварочных материалов в России // Автоматическая сварка-2009-№ 2-с.31-34.

3. Клементов В.И. Применение жидкого стекла в покрытиях электродов для дуговой сварки // Институт технико-экономической информации АН СССР-Москва-1954 г 19 с.

4. Григорьев П.Н., Матвеев М.А., Растворимое стекло // М., Госстройиздат, 1956, 444 с.

5. Сидлин З.А., Производство электродов для ручной дуговой сварки // Киев, Экотехнология, 2009, 462 с.

6. Походня И.К., Явдощин И.Р., Пальцевич А.П., Швачко В.И., Котельчук А.С. Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие металла с газами; Под редакцией академика И.К. Походни // Киев, «Наукова думка» 2004, 442с

7. Походня И.К., Управление водородом при сварке // Труды ВОМ-2001, часть 1, Донецк 2001, с. 68-70

8. Походня И.К., Швачко В.И., Степанюк С.П. Водородные ловушки в сварных швах //Труды ВОМ-2001, часть II. Донецк 2001, с. 296-298.

9. Походня И.К. Сварочные материалы: состояние и тенденции развития // Сварочное производство -2003-№ 6-с. 26-40

10. Походня И.К. Металлургия дуговой сварки конструкционных сталей и сварочные материалы // Сварочное производство – 2009, № 4, с.3-15

11. Скорина Н.В., Марченко А.Е., Химическая активность ферросплавов в жидком стекле // Автоматическая сварка – 2006, № 2, с.47-50

12. Айлер Р. Химия кремнезема ч.1, ч.2. // М. Мир, 1982, 1127с.

13. Корнеев В.И., Данилов В.В. Жидкое и растворимое стекло // Санкт-Петербург, Стройиздат, 1996, 216с

14. Турричиани Р. Вопросы химии пуццоланов // Химия цементов, издательство литературы по строительству, М., 1969, с. 353-366

15. Илюхин В.В., Кузнецов В.А. и др., Гидросиликаты кальция; Под редакцией академик Н.В. Белова, // М., Наука 1979, 184 с.

16. Жданов С.П. Общие закономерности и особенности кинетики кристаллизации цеолитов // Адсорбция и адсорбенты. М. Наука, 1987, с. 222-230

17. Феоктистова Н.Н., Втюрина Л.М., Влияние аморфных затравок на кинетику кристаллизации цеолита Na-A // Известия академии наук. Серия химическая, 1994, № 3, с. 799-804

18. Кузнецова Л.А., Голубева Т.Ю., Хашковский С.В., Композционные материалы и покрытия на основе водных растворов силикатов // Температуроустойчивые функциональные покрытия, часть 1, Санкт-Петербург 1997, с. 93-98.

19. Кузнецова Л.А., Голубева Т.Ю., Хашковский С.В., Химически стойкие эмали, полученные методом золь-гель технологии // Температуроустойчивые функциональные покрытия, часть 2, Санкт-Петербург 1997, с. 77-79

20. Чепик Л.Ф., Мащенко Т.С., Трошина Е.П., Использование золь-гель процессов при формировании толстых эмалеподобных покрытий на металлических поверхностях // Температуроустойчивые функциональные покрытия, часть 1, Санкт-Петербург 1997, с. 110 – 114

21. Ящишин И.Н., Вахула Я.И., Васийчук В.А., Романив А.С., Формирование температуроустойчивых тонкослойных стеклопокрытий на основе растворимого

стекла // Температуроустойчивые функциональные покрытия, часть 2, Санкт-Петербург 1997, с. 73-75

22. Николаев А.И., Печенюк С.И, Семушина Ю.П., Семушин В.В., Кузьмин Л.Ф., Рогачев Д.Л., Михайлова Н.Л., Брусницын Ю.Д., Рыбин В.В. Взаимодействие компонентов электродных покрытий с жидким стеклом при нагревании // Вопросы материаловедения, 2009, № 3(59), с.397-403

23. Годовиков А.А. Периодическая система Д.И. Менделеева и силовые характеристики элементов // Новосибирск Наука, 1981, 95 с.

24. Брусницын Ю.Д., Брусницын М. Ю. Компьютерное моделирование сварочных шлаков с использованием диаграмм фазовых равновесий неметаллических систем /Методические рекомендации 2000 41с; Инструкция пользователя-2001 17 с; Комплект диаграмм фазовых равновесий к компьютерной программе «Расчет состава сварочных шлаков электродных покрытий и флюсов»-2001 57с/ СПб: ЦНИИ КМ «Прометей»//Свидетельство РосАПО о регистрации программы ЭВМ №960442 от 01.10.1996 г

25. Залкин В.М. Природа эвтектических сплавов и эффект контактного плавления // М, Металлургия. – 1987, 152 с.

26. Рыбин В.В., Калинников В.Т., Брусницын Ю.Д., Николаев А.И. и др. Высококачественные компоненты сварочных материалов из минерального сырья Кольского полуострова и промышленных отходов // Научные основы химии и технологии переработки комплексного сырья и синтеза на его основе функциональных материалов. Материалы научно-технической конференции.–Апатиты: Изд-во КНЦ РАН-2008 -Т.1-с 22-23

27. Баранов А.В., Брусницын Ю.Д., Кащенко Д.А., Боков А.А. Новые технологии в производстве сварочных электродов // Сборник материалов 2-го научно-практического семинара по сварочным материалам стран СНГ «Дуговая сварка. Материалы и качество. Магнитогорск 26-30 сентября 2005, с. 24-26

28. Брусницын Ю.Д., Кащенко Д.А., Дикарев В.В. Воронова О.В. и др. Разработка сварочных электродов с использованием плавленых миналов // Материалы IV Международной конференции стран СНГ «Сварочные материалы. Разработка. Технология. Производство. Качество. Конкурентоспособность», Краснодар 18-21 июня 2007- с 23-33

29. Брусницын Ю.Д., Кащенко Д.А., Малышевский В.А., Рыбин В.В., Шекин С.П., Калинников В.Т., Николаев А.И., Бураков Р.В., Быков А.Н., Захватаев С.В., Москалев И.Д., Харченко И.В., Отработка композиций минеральных сплавов и промышленной технологии их изготовления с использованием минерального сырья Кольского полуострова // Петраньевские чтения. Сварочные материалы (к 70-летию создания электродов УОНИ-13). Доклады международной научно-

технической конференции 18-22 мая 2009 года с. 90-102.

30. Малышевский В.А., Брусницын Ю.Д., Кащенко Д.А., Праслова Е.Г., Калинников В.Т., Николаев А.И., Аввакумов Ю.В., Быков А.Н. , Пожидаева Е.Н., Дикарев В.В., Лившиц И.М., Воронова О.В. К концепции формирования потребительских свойств сварочных материалов и эксплуатационных характеристик металла сварных швов хладостойких сталей // 6-ая Международная научно-практическая конференция «Сварочные материалы. Дуговая сварка. Производство. Качество» г. Краснодар, пос. Агой, 06-10 июня 2011г.

31. Малышевский В.А., Кащенко Д.А., Брусницын Ю.Д., Калинников В.Т., Николаев А.И. К концепции формирования потребительских свойств сварочных материалов и эксплуатационных характеристик металла сварных швов хладостойких сталей // Сборник тезисов XIX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии, Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2011, Т 3, с. 259.

32. Малышевский В.А., Брусницын Ю.Д., Аввакумов Ю.В., Быков А.Н. О подходах к улучшению потребительских свойств сварочных электродов на «ПО «Севмаш» // XL Ломоносовские чтения 9-10 ноября 2011 года, Сборник докладов г Северодвинск. 2012г с. 117-129

33. Патент РФ № 2249498 Минеральный сплав для покрытия сварочных электродов и керамических флюсов /Малышевский В.А., Брусницын Ю.Д., Дикарев В.В., Рогов В.С. и др.Приоритет изобретения 17 сентября 2003г., опубликовано 10.04.2005. Бюл. № 10

34. Патент РФ № 2257987 Электродное покрытие /Малышевский В.А., Брусницын Ю.Д., Дикарев В.В., Рогов В.С. и др.Приоритет изобретения 10 ноября 2003 г Опубликовано 10.08.2005 Бюл. № 22

35. Патент РФ № 2383419 Электрод для сварки хладостойких низколегированных трубных сталей категории К60, Х70 / Горынин И.В.,. Малышевский В.А., Брусницын Ю.Д., Кащенко Д.А. и др. Приоритет изобретения 22 июля 2008 г Опубликовано 10.03.2010 Бюл. № 7

36. Патент РФ № 2387525 Электрод для сварки хладостойких низколегированных трубных сталей категории Х80/ Горынин И.В.,. Малышевский В.А., Брусницын Ю.Д., Кащенко Д.А. и др. Приоритет изобретения 24 июля 2008 г Опубликовано 27.04.2010 Бюл. № 12

37. Патент РФ № 2433027 Покрытие электродов для сварки углеродистых и низколегированных сталей /АввакумовЮ.В., Малышевский В.А., Брусницын Ю.Д., Калинников В.Т. и др. Приоритет изобретения 20 апреля 2010 г Опубликовано 10.11.2011 Бюл. № 31

ОТДЕЛИМОСТЬ ШЛАКА ОТ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ШВА ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ.

З.А. Сидлин,
д.т.н.
ООО «ТЕХПРОМ»
г. Москва

Проанализированы различные факторы, влияющие на отделимость шлака от поверхности сварного соединения, предложено широко апробировать в качестве приемо-сдаточной характеристики отделимости шлака результаты испытаний методом «падающего груза».

Современные тенденции совершенствования электродов для ручной дуговой сварки плавлением непременно учитывают, как важнейшее обстоятельство, необходимость облегчения труда сварщиков. Естественно, что безусловным приоритетом при этом обладает достижение высокой степени эксплуатационной надежности сварных изделий и конструкций. В то же время падающий, к сожалению, социальный престиж профессии рабочего-сварщика, снижение общего профессионального уровня и существенное увеличение среднего возраста работающих ведут к все возрастающей роли при выборе сварочных электродов показателей их сварочно-технологического свойств. Именно здесь сегодня основное поле конкуренции различных производителей. Однако сравнение сварочно-технологических свойств электродов даже одного назначения во многих случаях затруднено отсутствием общепризнанных методик оценки. При этом наша многолетняя практика свидетельствует о целесообразности оценки каждого отдельного показателя комплекса сварочно-технологических свойств электродов по объективным методикам с последующим решением, во многих случаях, компромиссной задачи [1,2].

Рассмотрим вышесказанное на примере показателя отделимости сварочного шлака от поверхности шва.

Согласно формулировке ГОСТ 9466-75 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки сталей и наплавки» «образующийся при сварке шлак должен легко удаляться после охлаждения» (п. 3.12), что контролируют «наблюдением при сварке или наплавке образцов» (п.5.16). Такая запись делает оценку отделимости шлака весьма субъективной. В то же время потребителям и изготовителям электродов хорошо известны проблемы, связанные с затрудненным шлакоотделением, особенно характерным для электродов с основным видом покрытия. Исследованию этих проблем посвящен ряд работ отечественных авторов, по результатам которых вскрыт механизм взаимодействия на границе металл-шлак [3-14 и др.].

Основной причиной плохой отделимости шлаковой корки от поверхности шва при сварке является ее срастание с металлом шва [3]. Это срастание обусловлено окислением поверхности металла шва и образованием в поверхностном слое шлака соединений, обладающих кристаллической решеткой, аналогичной кристаллической решетке соединений, составляющих оксидный слой на поверхности металла. В таком случае имеются необходимые условия по созданию совместной решетки [10]

Промежуточный слой между металлом и шлаком обогащен элементами, легирующими металл шва. Вследствие избирательного окисления расплавленным шлаком элементов, имеющих большее сродство к кислороду, нежели железо, образуются оксиды со структурой, близкой к структуре α-Fe [8].

При сварке сталей, легированных титаном, хромом, ванадием на границе металл-шлак выявлены прослойки, представляющие собой оксиды (например, TiO) или шпинели типа (Fe, Mn)O•V_2O_3, (Fe, Mn)O•CrO_3 и т.п. Однако наличие шпинелей в шлаке не является обязательным условием сцепления шлаковой корки с металлом шва. Для такого сцепления необходимо наличие промежуточного слоя с параметрами кристаллической решетки, обеспечивающими его эпитаксиальный рост или текстурирование на подложке металла шва [5].

Диффузионная подвижность ионов титана, ванадия, ниобия в шлаках на порядок ниже, чем железа, никеля, марганца, поэтому их концентрация в виде оксидов на межфазной границе, а особенно-между зернами, существенно выше. Именно этим объясняют заклинивание остатков шлака в виде т.н. «березовой коры», ориентированной в направлении межзеренных границ [14].

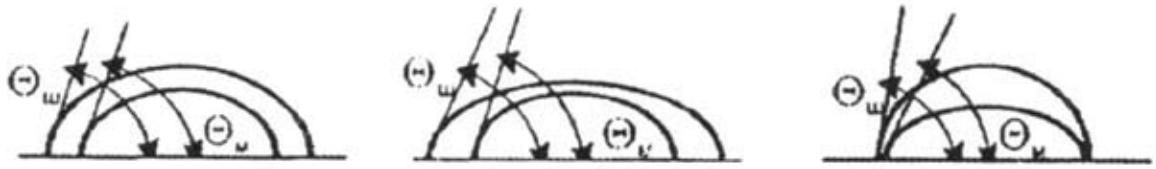
При ориентированной кристаллизации на подложке, которой служит поверхность металла шва, происходит рост этих соединений в плоскости и объеме, приводящий, в конечной итоге, к образованию прочного сцепления между шлаком и металлом. Прочность сцепления возрастает при наличии в поверхностном слое металла большой плотности дислокаций [7].

Условия образования оксидной пленки и ее физико-химические свойства зависят от составов основного материала и электрода, а также от режимов сварки, определяющих температурно-временные факторы существования и кристаллизации расплавленного металла и шлака. При неблагоприятных условиях взаимодействия металла и шлака на этапе кристаллизации может происходить интенсивное образование шпинелей, остающихся на поверхности швов после отделения шлака. Такая картина выявлена, например, для хромоникелевых электродов с легированием ниобием.

Отделимость шлака также существенно зависит от рельефа поверхности сварного шва. При бугристой, крупночешуйчатой форме поверхности будет наблюдаться ухудшение шлакоотделимости вследствие заклинивающего эффекта. Степень заклинивания для электродов одной и той же марки и партии поставки зависит от положения шва в пространстве, квалификации сварщика, формы разделки кромок и расположения шва в разделке (при многослойной сварке). Даже при гладкой равномерной поверхности шва заклинивающий эффект наиболее ярко проявляется

при сварке корневых проходов многослойных швов и при сварке в узкую разделку. Это происходит, в первую очередь, за счет пластической деформации свариваемых кромок и их стягивания в процессе сварки.

Вообще, значимо для отделимости шлака его распределение на поверхности шва и примыкающего свариваемого металла. В работе [13] рассмотрено три основных варианта распределения шлака, зависящее от краевых углов смачивания шлака ($Q_ш$) и металла ($Q_м$), представленные на рисунке 1. Равномерное распределение шлака (рисунок 1, а) обеспечивается при равенстве краевых углов смачивания. Полная контактная поверхность шлака максимальна при $Q_ш<Q_м$ (рисунок 1, б), а минимальна, обеспечивая (при прочих равных условиях) более легкую отделимость шлака – при $Q_ш>Q_м$ (рисунок 1, в).



а) *б)* *в)*

Рисунок 1 *Основные варианты распределения шлака (1) на шве (2):*
а – $Q_ш = Q_м$, б - $Q_ш \le Q_м$, в - $Q_ш \ge Q_м$

Весомыми факторами, влияющими на легкость отделимости шлака, являются физические показатели последнего – коэффициент теплового расширения (КТР) [13] и механическая прочность. Например, показатели КТР в диапазоне температур 200-900º С для шлаков электродов марок УОНИ-13/55 и ОЗН-350 (11,2 и 25,0)•10^{-6} град$^{-1}$ (для стали 20 значение КТР 13,2•10^{-6} град $^{-1}$) кореллируют с показателями шлакоотделения (таблица 2). Но такая корреляция существует, вероятно, только при отсутствии срастания шлака с поверхностью металла. Следует отметить и существенные различия в показателях КТР для электродов разных партий поставок, полученных даже одним и тем же исследователем. Например, если в работе [15] указан КТР (30-35)•10^{-6} град $^{-1}$, то в работе [13] его значение для тех же электродов составляет 18•10^{-6} град$^{-1}$.

В условиях самопроизвольного хрупкого разрушения шлака хорошая его отделимость возможна и при умеренных значениях КТР. Вообще, одним из перспективных направлений улучшения отделимости шлака с поверхности швов, особенно корневых слоев (в многослойных швах) и при сварке в узкую разделку является создание электродов с саморассыпающимися шлаками [11,12]. Такие шлаки рассыпаются в порошок после охлаждения, что связано с образованием ортосиликата кальция ($2CaO•SiO_2$), существующего в нескольких модификациях, обладающих разными физическими свойствами. При охлаждении шлака в благоприятных условиях при температуре ниже 675° С происходит превращение, сопровождающееся уменьшением плотности с 3,1 г/см^3 до 2,8 г/см^3 и увеличением удельного объема кристаллической решетки образующейся модификации на 10-12%. В охлаждающемся затвердевшем шлаке возникают напряжения, приводящие во многих случаях

к его самопроизвольному растрескиванию. Необходимым условием является также ограничение скорости остывания шлака в интервале температур 1200-900° С.

Практически, в условиях РДС, саморассыпающиеся шлаки получали в макетах опытных электродов, изготовленных без силикатного связующего [12]. При определенной технологии сварки саморассыпающиеся шлаки наблюдали и при использовании промышленных марок электродов, изготовленных на стандартном связующем – растворе силиката. В частности, их обнаружили при сварке с предварительным подогревом стыковых соединений стали в V-образную разделку электродами марки АНО-9 (при сварке без подогрева распад шлака не происходил) [11]. В собственных экспериментах автора саморассыпающиеся шлаки получали при исследовании промышленных высоконикелевых электродов для сварки чугуна в определенном диапазоне сварочных токов и скоростей сварки. В работе [16] саморассыпающиеся шлаки получали, заменяя в покрытии электродов марки УОНИ-13/55 кварцевой песок минералом ревдинскит состава Mg 35,4; NiO 28,9; SiO_2 20,5; Al_2O_3 3,8; CaO 4,7, % мас. Ревдинского и Уфалейского месторождений. Оптимального эффекта достигали при содержании ревдинскита 8-12%.

Однако создание электродов, обеспечивающих получение саморассыпающихся шлаков при их применении в широком диапазоне реальных условий сварки, требует кропотливой работы.

Как уже отмечалось, стандартизированные требования к отделимости шлака достаточно субъективны. Не намного более объективна балльная система оценок по дифференциальному методу, заложенная НАКСом в РД 03-613-03 таблица 1 [17].

Таблица 1 *Бальная система отделимости шлака*

Характеристики отделимости шлака	Оценка балл
Плохая. При окончании процесса сварки не отделяется.	1
Низкая. Требуется значительное механическое усилие для отделения шлака.	2
Удовлетворительная. Отделяется при дополнительном механическом воздействии.	3
Хорошая. Отделяется при незначительном механическом воздействии.	4
Высокая. Отделяется при сварке без дополнительного механического воздействия.	5

Для количественной оценки отделимости шлака из известных наиболее рациональна следующая методика [11,19], где в качестве объекта испытания принят образец с разделкой, форма и размеры которых приведены на рисунке 2. Установлено, что стабильность и воспроизводимость результатов испытаний зависят от чистоты обработки кромок разделки. Для оценки отделимости шлака в разделку образца выполняют валиковый шов, после охлаждения которого на воздухе до комнатной температуры образец готов к испытаниям. Можно оценивать отделимость шлака с любого слоя шва. В зависимости от характеристик шлака угол разделки в образце можно изменять.

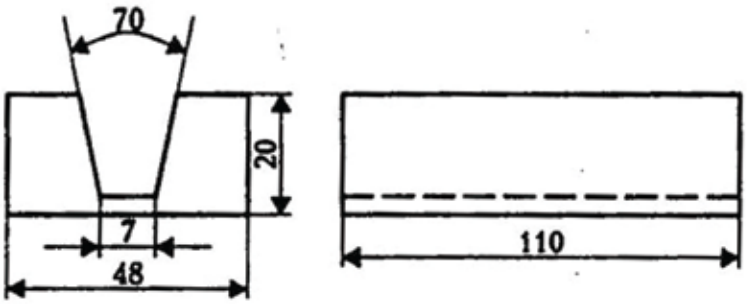


Рисунок 2 *Форма и размеры образца для определения отделимости шлака*

Для определения отделимости шлака используют установку маятникового типа (миниатюрный аналог копра для испытаний на ударную вязкость). Маятниковое приспособление с грузом свободно вращается на оси, закрепленной между стойками установки. Испытуемый образец укладывают на опорный узел. Энергию удара можно регулировать фиксируемой штырем высотой подъема груза. Опытным путем установлена необходимая масса груза маятника, равная 2 кг, которой соответствует запас энергии в пределах 0,012-1,6 кгс•м, при его подъеме от 10 до 180°. Падающий груз прикладывает к тыльной стороне образца ударную нагрузку, направление приложения которой совпадает с направлением сил сцепления шлака с металлом шва, действующих, в основном, нормально к поверхности шва.

В качестве критерия отделимости принята величина энергии, которая затрачивается на удаление шлака из разделки. Показатель отделимости определяется из следующего выражения:

$$A_{уд}=PL(1-\cos\varphi)/S_{св},$$ где

P - масса груза маятника, кг;

L - длина маятника, м;

φ - угол подъема маятника, град;

$S_{св}$ - поверхность шва в разделке, освободившаяся от шлака после удара, см^2.

Чем больше значение $A_{уд}$, тем хуже отделимость шлака.

Описанную методику использовали как в исследованиях [11], так и при определении отделимости шлака промышленных электродов марок УОНИ-13/45, УОНИ-13/55, ТМУ-21 и ОЗН-350 при сварке электродами диаметром 4 мм на токе 150-170 А [13].

Как следует из таблицы 2, наиболее легко отделяется шлак электродов ОЗН-350, несколько хуже – шлак электродов ТМУ-21 и значительно хуже – шлак электродов УОНИ-13/55. Результаты дилатометрических исследований коррелируют с отделимостью шлака: $A_{уд}$ тем меньше (отделимость лучше), чем больше КТР шлаков - $25•10^{-6}$, $18•10^{-6}$ и $11,2•10^{-6}$ град$^{-1}$ для электродов ОЗН-350, ТМУ-21 и УОНИ-13/55, соответственно.

О корректности и воспроизводимости методики свидетельствуют результаты работы [18], приводимые в той же таблице (значения $A_{уд}$ средние из 10 опытов, $I_{св.}$ = 160 - 180 А, диаметр электродов – 4 мм); данные для электродов УОНИ-13/55 и УОНИ-13/45 тождественны.

Таблица 2 *Показатели отделимости шлаковой корки*

Марка электрода, Ø 4 мм	Отделимость шлака $A_{уд}$•10^2* кгс•м/см^2		$\frac{A_{уд}\ 1слоя}{A_{уд}\ 2слоя}$
	С первого слоя	Со второго слоя	
УОНИ-13/55 УОНИ-13/45	$\frac{13,9\text{-}17,3}{15,4}$	$\frac{9,2\text{-}11,3}{10,5}$	1,47
ТМУ-21	$\frac{7,3\text{-}12,0}{8,6}$	$\frac{3,8\text{-}5,1}{4,3}$	2,0
ОЗН-350	$\frac{4,2\text{-}5,7}{5,0}$	$\frac{2,8\text{-}3,5}{3,2}$	1,56
Опытные ($К_{мп}$=40%)	$\frac{7,5\text{-}11,4}{9,2}$	$\frac{4,1\text{-}6,0}{5,0}$	1,84
Те же ($К_{мп}$=63%)	$\frac{10,9\text{-}15,8}{13,8}$	$\frac{7,5\text{-}9,0}{8,2}$	1,68
Те же ($К_{мп}$=91%)	$\frac{18,7\text{-}24,8}{20,4}$	$\frac{13,3\text{-}15,6}{14,7}$	1,39
МР-3	10,0	н.д. **	-
48ХН2	6,0	н.д.	-
48ХН5	6,5	н.д.	-

*)- в числителе приведены минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние из 10 определений

**) н.д. – нет данных.

В таблице 2 также приведены результаты определения отделимости шлака опытных электродов с покрытием основного вида и различными коэффициентами массы. С повышением коэффициента массы покрытия отделимость шлака ухудшается. Отделимость шлака с корневого слоя хуже, чем с последующих слоев шва. Эти данные находятся в соответствии со схемами заклинивания шлака в разделках в процессе сварки корневого слоя шва (рисунок 1).

При затрудненной (неполной) отделимости шлака, даже при испытании с наибольшей энергией удара, отделимость оценивают по относительной площади шва, свободной от шлака.

Такая методика оценки шлакоотделения показала достаточную эффективность при разработке и усовершенствовании электродов различного назначения [1,18 и др.]. Целесообразна её широкая апробация при приемо-сдаточных испытаниях электродов для набора данных с целью последующего нормирования показателя шлакоотделения для электродов различных типов и видов и введения его в стандарты.

Выводы:

На основе анализа опубликованных данных о механизме взаимодействия на границе металл - шлак при РДС покрытыми электродами, измерений КТР, результатов приемо-сдаточных испытаний по нормированным методикам предложено широко апробировать в качестве приемо-сдаточной характеристики результаты испытаний методом «падающего груза».

По результатам апробации могут быть получены данные для установления объективных норм по показателю «отделимость шлака» и стандартизации методики.

Литература

1. Сидлин З.А., Яровинский Х.Л. Некоторые вопросы управления сварочно-технологическими свойствами покрытых электродов // Управление сварочными процессами, Тула. ТПИ. 1977. С. 73-78.
2. Сидлин З.А. К вопросу оценки сварочно-технологических свойств покрытых металлических электродов // Электродное производство на пороге нового тысячелетия. С-Петербург, 2000. С. 68-69.
3. Рабкин Д.М., Готальский Ю.Н. и др. Об отделимости шлаковой корки при автоматической сварке под флюсом. // Автоматическая сварка. 1950. №3.
4. Подгаецкий В.В. Механическое удерживание шлака на шве при автоматической сварке. // Автоматическая сварка. 1950. №6.
5. Походня И.К., Явдощин И.Р., Карманов В.И., Войткевич В.Г. Механизм сцепления шлаковой корки с поверхностью шва // Автоматическая сварка. 1974. №5. С. 5-9.
6. Ворновицкий И.Н., Петров Г.Л. Черкасский А.Л., Улучшение отделимости шлака из глубоких разделок неповоротных стыков трубопроводов. М. Информэнерго. 1975.50 с.
7. Походня И.К., Карманов В.И., Войткевич В.Г. Исследование особенностей механизма сцепления шлаковой корки с металлом шва, легированного титаном и ванадием // Автоматическая сварка. 1976. №6. С. 1-4.
8. Походня И.К., Карманов В.И., Войткевич В.Г., Явдощин И.Р. Исследование физико-химических закономерностей сцепления шлака с металлом // Тезисы докладов Всесоюзный конференции по сварочным материалам. Киев. 1976. С. 33-34.

9. Ворновицкий И.Н., Петухов Б.П., Черкасский А.Л. Дилатометрические свойства сварочных шлаков на основе мрамор-плавиковый шпат // Всесоюзная конференция по сварочным материалам. Киев. 1976. С. 22-25.

10. Готальский Ю.Н., Стретович А.Д. О механизме сцепления шлаковой корки с металлом шва // Сварочное производство. 1977. №10. С. 48-50.

11. Походня И.К., Карманов В.И, Упырь В.Н. Отделимость шлаковой корки электродов с основным покрытием // Автоматическая сварка. 1980. №11. С. 33-34,41.

12. Ворновицкий И.Н., Савельев В.Г., Сидлин З.А. Реализация силикатного распада в сварочных шлаках // Сварочное производство. 1997. №5. С. 11-12.

13. Ворновицкий И.Н. Электроды с железным порошком в покрытии. М. РНТСО. 2000. 78с.

14. Волобуев О.С., Потапов Н.Н., Волобуев Ю.С., Ершов А.В. // К вопросу о влиянии коэффициента линейного расширения на отделимость шлаковой корки. // Сварочное производство. 1989. №8. С. 37-39.

15. Ворновицкий И.Н., Трусов А.Г. Черкасский А.Л. Электроды для сварки в узкую разделку неповоротных стыков трубопроводов тепловых электростанций // Всесоюзная конференция по сварочным материалам. Киев. 1976. С. 34-35.

16. Любич А.И., Макаренко В.Д., Чигарев В.В, Чернов В.Ю. Технологические свойства электродов с основным покрытием при использовании новых сырьевых материалов // Сварочное производство. 1989. №11. С. 19-21

17. РД 03-613-03 Порядок применения сварочных материалов при изготовлении, монтаже, ремонте и реконструкции технических устройств для опасных производственных объектов // Сборник нормативных документов системы аттестации сварочного производства. М. 2003. С. 5-34.

18. Гежа В.В., Шарапов М.Г. Сравнительный анализ сварочно-технологических характеристик электродов с покрытием основного типа, применяемых для сварки корпусных сталей// Вопросы материаловедения. С-Петербург. 2000. №3. С. 97-101.

19. Ворновицкий И.Н., Малашонок В.А., Черкасский А.Л. Методика количественной оценки отделимости шлака // Сварочное производство. 1975. №2. С. 47-48.

К КОНЦЕПЦИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Ю.Д. Брусницын,
к.т.н.,
Д.А. Кащенко,
инж.,
ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»
г. Санкт-Петербург

В докладе рассматриваются вопросы управления технологическими процессами с целью повышения потребительских свойств сварочных электродов с позиции исклю-чения условий, способствующих взаимодействию компонентов сварочных материалов с жидким стеклом с образованием гидроксидных соединений

Введение

Потребительские свойства (сварочно-технологические и эксплуатационные) являются основой для разработки рецептур покрытий сварочных электродов и технологических процессов их изготовления. Вопросы качества современных сварочных электродов и состояния их производства в России в последних десятилетиях представлены в статьях д.т.н. З.А. Сидлина [1,2]. В общем виде можно считать, что в статьях изложена существующая ныне концепция по рассматриваемому вопросу. Потребительские свойства, прежде всего сварочно - технологические свойства - самые яркие и легко доступные для визуальных наблюдений и оценки показатели применения сварочных электродов при сварке конструкций, которые в последние годы, как отмечает З.А. Сидлин, становятся определяющими при выборе их марки и изготовителя.

Главную проблему в обеспечении конкурентоспособности отечественных электродов З.А. Сидлин связывает со стабильностью их качества, считая при этом, что положительные свойства любой хорошей марки электродов могут быть сведены к нулю, если не будут удовлетворительно разрешены вопросы технологии их промышленного изготовления. Одну из причин нестабильности качества электродов З.А. Сидлин видит в отсутствии единых подходов различных производителей к решению постоянно возникающих вопросов по сырью.

По-видимому, это положение можно распространить на другие технологические аспекты производства сварочных электродов.

Состояние вопроса

Использование в сварочных материалах в качестве связующего водных растворов щелочных силикатов создает систему, в которой неизбежно идет взаимодействие растворов с компонентами сухой смеси - порошками ферросплавов и неметал-

лических веществ при температурах окружающей среды 20 – 25º С.

Инкубационный период развития реакции для различных видов компонентов может значительно отличаться и даже не укладываться в рамки длительности технологических операций. Однако нельзя отрицать, что активные металлы в шихте или примеси их соединений могут провоцировать ускорение взаимодействия. Если признать, что в данной системе идет гидролиз – щелочная гидролитическая деструкция компонента, то придется согласиться с неизбежностью образования гидроксидных соединений. Фактически вопрос о продуктах химических реакций в обмазочных и флюсовых массах длительное время остается открытым или воспринимается неоднозначно.

Взаимодействие натриевого жидкого стекла с ферросплавами и мрамором исследовалось В.И. Клементовым в 50-х годах ушедшего века [3] , на основании результатов которых им даны рекомендации по подготовке к применению жидкого стекла при опрессовке электродов с целью улучшения пластичности обмазочных масс и торможения реакций между стеклом и компонентами шихты в покрытиях основного типа, в том числе, о необходимости добавки соды в шихту и перманганата калия в жидкое стекло. При этом В.И. Клементов отмечал, что влага, остающаяся в покрытиях после прокалки электродов, может влиять на ход сварочного процесса, тем более, что она должна быть преимущественно конституционного и кристаллизационного типа.

В эти же годы вышла в свет известная книга П.Н. Григорьева и М.А. Матвеева [4], в которой авторы связывают взаимодействие жидкого стекла с компонентами электродного покрытия с его щелочной активностью. Авторы свидетельствуют, что по исследованию Каргина при взаимодействии разбавленных и концентрированных растворов жидкого стекла с солями щелочноземельных металлов (например, углекислого кальция) не происходит образования силикатов этих металлов. Продук-тами этого взаимодействия являются гель кремнезема и гидроксид кальция, адсорбируемые коллоидным SiO_2. Соглашаясь с ним, они признают возможность взаимодействия мрамора (как и углекислых солей других щелочных металлов), с образованием геля SiO_2 и $Ca(OH)_2$ в качестве промежуточных продуктов. В конечном счете, по их мнению, должен образовываться гидросиликат кальция, который, однако, может подвергаться гидролизу с обратным получением исходных продуктов, т.е $Ca(OH)_2$ и $SiO_2 \cdot nH_2O$. Затвердевание таких смесей авторы относят к активному кремнезему как к цементирующей связке.

Авторы считают, что порошки алюминия и щелочноземельные металлы интенсивно вступают в реакцию с жидким стеклом, образуя гидроксиды с выделением водорода и теплоты (типичная реакция гидролиза) и осадки соответствующего силиката. Рассматривая технологию применения жидкого стекла в производстве сварочных электродов, они полагают, что растворы щелочных силикатов не только являются вяжущим веществом, но и вступают во взаимодействие с составными частями электродных покрытий, отмечая при этом, что химическая активность жидкого стекла зависит от его щелочности (pH). Повышение пластичности обмазочных масс происходит за счет увеличения вязкости жидкого стекла и возникновения в

нем большого количества коллоидных образований.

Нам представляется, что, несмотря на некоторую неопределенность о конечных продуктах взаимодействия жидкого стекла с различными веществами и их роли в обмазочной массе, они не потеряли своей значимости в настоящее время и нашли дальнейшую проработку в монографии З.А. Сидлина [5].

З.А. Сидлин обращает внимание изготовителей сварочных электродов на наиболее высокую активность к жидкому стеклу ферросилиция, алюминия, ферромарганца, металлического марганца, а также примесей кремния и алюминия в ферросплавах, активизирующих реакцию. При этом З.А. Сидлин не отрицает возможность образования гидроксидов. З.А. Сидлин свидетельствует: «практикой установлено, что свежеизмельченные порошковые материалы отличаются особенно высокой химической активностью в среде жидкого стекла». Это он относит не только к активным ферросплавам и металлам, но и к таким, казалось бы, инертным материалам, как мрамор. Однако З.А. Сидлин не делает напрашивающихся выводов о конечных продуктах реакций в обмазочных массах и в покрытиях сварочных электродов.

В двухтомной монографии Ральфа Айлера [6], крупного американского специалиста в области коллоидной химии кремнезема и силикатов, в которой отражены результаты более 3000 работ исследователей разных стран, можно найти ответы на многочисленные вопросы, возникающие при производстве и применении в промышленности растворов щелочных силикатов. Этот фундаментальный труд Ральфа Айлера по многим аспектам цитируется в монографии Корнеева В.И. и Данилова В.В. [7], посвященной вопросам, связанным с производством и применением растворимого и жидкого стекла в на-стоящее время. Отметим здесь лишь отдельные результаты исследований, касающихся рассматриваемого нами вопроса.

Р. Айлер [6] отмечает, что если реакция мономерного кремнезема $Si(OH)_4$ с ионами алюминия Al^{3+} протекает в течении длительного времени при 25º С, то образуется силикат алюминия в коллоидной форме с составом галлуазита ($Al_4[(OH)_8|(Si_4O_{10})]+4H_2O$ [8]).

Образование этого минерала зафиксировано нами после прокаливания при температуре 900º С партии флюса ОФ-6, забракованной по неудовлетворительным показателям сварочно-технологических свойств.

Образованием гидроксида алюминия в обмазочных массах, наблюдаемое нами на ОАО «ПО» Севмаш», можно объяснить трудности опрессовки электродов, в состав покрытия которых введен порошок алюминия (повышение давления опрессовки, увеличение эксцентричности, невозможность продолжения опрессовки). Аналогичное поведение обмазочной массы наблюдалось на Ижорском заводе в 2005 году при опрессовке опытных электродов типа УОНИИ-13, с плавленым миналом, на поверхности зерен которого высадились хлопья алюмогеля (гидроксиды и оксигидроксиды алюминия), накопившегося в оборотной воде, используемой для грануляции расплава.

В.И. Корнеев [7] приводит следующую цитату из монографии Р. Айлера [6]: «кристаллизация силикатов кальция при комнатных температурах возможна только при развитии деструктивных процессов, приводящих к образованию мономерных си-

ликатных анионов. Поэтому развитию процессов кристаллизации силикатов кальция будут способствовать повышение температуры, высокая щелочность системы и дефицит воды в ней».

Подобная ситуация возможна только в процессе сушки при температуре 40-90º С и последующей прокалки электродов.

В.И. Корнеев, рассматривая взаимодействие порошков алюминия, отмечает, что в щелочных растворах пленка оксида алюминия растворяется, алюминий лишается защитного покрытия и реакция с ним может идти с выделением водорода до полного израсходования алюминия, образуя при этом твердеющую систему.

Он отмечает также, что растворы щелочных силикатов эффективно взаимодействуют со многими твердыми веществами, такими как глины, карбонаты, силикаты, фториды, оксиды и гидроксиды, образуя твердеющие системы. Кристаллизация силикатов – процесс очень медленный. Практически всегда при взаимодействии ионов щелочноземельных металлов с силикатами образуются аморфные продукты нестехиометрического состава, которые невозможно зачастую трактовать как определенные химические соединения или их смесь».

В работах сотрудников института химии силикатов РАН по использованию золь-гель технологии для получения адсорбентов можно найти экспериментально подтвержденные выводы, которые вполне применимы для понимания обсуждаемых процессов в обмазочных массах. В работах С.П. Жданова [9], Н.Н. Феоктистовой и Л.М. Втюриной [10] установлено, что зародыши цеолитов типа Na-A и Na-X не возникают в щелочных растворах силикатов и алюмината натрия. Не возникают они и при осаждении силикаалюмогелей. Но они появляются лишь при выдерживании щелочных силикаалюмогелей при комнатной температуре, а также в процессе старения гелей при температурах ниже температуры кристаллизации цеолитов (90º С).

Как отмечает С.П. Жданов [9], рост кристаллов цеолитов в силикаалюмогелях происходит непосредственно за счет компонентов их жидкой фазы - силикатных и алюмосиликатных ионов в интермицилярной жидкости силикаалюмогелей [10].

Распространение этого положения на производство сварочных материалов может означать, что ускоренное удаление жидкой фазы из обмазочных масс прекращает образование зародышей силикатов при достаточно низких температурах, при которых, однако, разложение гидроксидных соединений еще не произойдет. Наши условия более близки к использованию золь-гель технологии для получения композиционных покрытий различного назначения, где в качестве связующего используются растворы щелочных силикатов или кремнеорганическое соединение - тетраэтоксисилан (ТЭОС) [11, 12, 13].

В основе получения композиционных покрытий [11] и эмалей [12] заложено использование водных гелирующих растворов щелочных силикатов и высокодисперсных оксидов магния, циркония, цинка или соединений хрома, алюминия, циркония, цинка, кобальта, железа и др. от 2 до 10 массовых процентов (наполнителя -80%, связки-20%).

В этих работах дается подробное обоснование выбора состава жидкого стекла, его модуля SiO_2/R_2O=3. анализируются процессы гидратации и удаления воды

из образующихся гелей, контактные взаимодействия с наполнителями, как в водных растворах, так и в процессе термообработки в интервале 80-800º С. Определен температурный интервал формирования покрытий - (150-200º С). Установлено, что существенное влияние на свойства композиций и покрытий оказывают процессы контактного взаимодействия оксидного наполнителя и силикатной связки, как в водных растворах, так и в процессе термообработки.

В работе [13] исследован золь-гель процесс по смешанной алкоксидно - солевой технологии, основа которого состоит в осуществлении в жидкой фазе реакции гидролитической поликонденсации тетраэтоксисилана (ТЭОС источник SiO_2) в присутствии широкого набора неорганических соединений с целью получения шихтовой массы, соответствующего составу эмалевого покрытия. Понятие «шихтовая масса» в данном случае включает получение гомогенного устойчивого раствора-золя, оксидная формула которого соответствует составу определенной эмали, и, затем, перевод синтезированного золя в гель.

Далее гель наносится на поверхность металла и подвергается высокотемпературной обработке. Процесс формирования эмалеподобного покрытия происходит при существенно более низких температурах порядка - 650-850º С (вместо 1300-1600º С - температуры варки фритты в зависимости от состава исходной гелевой шихтовой массы. Этот метод считается полезным при получении многокомпонентных оксидных материалов.

Из детального ознакомления с работами [11-13] вытекает, что сделанные в них выводы об образовании покрытий различного назначения могут быть использованы для понимания процессов формирования промежуточных продуктов и их влияния на свойства электродных покрытий, а в по-следующем, для создания научно-обоснованного технологического процесса производства конкурентноспособной продукции с высокими потребительскими характеристиками.

В этом плане представляет практический интерес работа [14], в которой в итоговом варианте стеклообразующая система для жаростойких покрытий состояла из следующих ингредиентов: растворимого натриевое стекла $Na_2O{\cdot}3{,}5\ SiO_2$, растворимого калиевое стекла $K_2O{\cdot}3SiO_2$, алюмината натрия $Na_n\ [Al(OH)_m]$, борной кислоты.

Алюминат натрия (по [15]-гидроксоалюминат натрия) вводился в виде раствора дисперсного порошка алюминия в концентрированном растворе NaOH. При этом концентрация алюминия в системе в пересчете на оксид алюминия не должна была быть более установленных в работе концентраций Al_2O_3, вызывающих в зависимости от модуля жидкого стекла гелеобразование в течении 30 минут.

В качестве технологических добавок в систему вводились оксиды марганца для повышения прочности сцепления с подложкой и $KMnO_4$ для получения устойчивого к коагуляции и гелеобразованию стеклообразующего коллоидного раствора, время перехода в гель которого в итоге составило 4 суток.

Коллоидный раствор, полученный при сливании всех растворов в оптимальном порядке, наносился пульверизатором или окунанием на подложку из стали Х18Н10Т или 08КП, нагретую до 500º С. Качественное бездефектное стеклопокрытие полу-

чали оплавлением при температуре в интервале 790-820º С по выработанному режиму. Толщина слоя готового покрытия составляла 30-70 мкм.

Следует подчеркнуть, что в коллоидном растворе не содержалось порошков металлов, как это имеет место в обмазочных массах. Однако, перманганат калия и здесь, как и в работах [3, 5], способствовал задержке взаимодействия составляющих коллоидного раствора, коагуляции и гелеобразованию, после которого использование вязкой пасты в данной работе было бы невозможно.

По-видимому, перманганат калия выступает в роли не только окислителя, но и ингибитора реакции щелочных растворов, в том числе, с неметаллическими компонентами.

Поскольку алюминат натрия, растворяясь в водных растворах щелочных силикатов, гидролизуется до гидроксида алюминия [15], то в составе геля может присутствовать как гидроксид алюминия, так и оксогидроксоалюминат натрия $Na_2[Al_2O(OH)_6]$ или гидроксоалюминат натрия $Na[Al(OH)_6]_2$, как это ожидается в [14]. Эти соединения придают стеклопокрытию необходимые адгезионные свойства.

В монографии [4] затронут вопрос участия гидроксида кальция в образовании в гелях гидросиликатов кальция. Уже в то время этот вопрос не был новым: во времена Римской империи известь (CaO) смешивалась с продуктами вулканических извержений (пуццоланами), смесь затворялась водой и после реакции гидроксида кальция с активным кремнеземом продуктов извержений, получался пуццолановый цемент. Затвердевание цемента и достижение необходимой прочности происходило в течение нескольких лет. В исследованиях [16] было зафиксировано образование в пуццолановом цементном тесте через 6 месяцев гидросиликатов типа тоберморита $Ca_{10}[(OH)_6 \mid Si_{12}O_{31}]\cdot 8H_2O$ [8] и обнаружен остаточный портландит в количестве 3,1-3,6%.

В монографии «Гидросиликаты кальция» [17] авторы отмечают, что кристаллы портландита возникают в первые же моменты взаимодействия портландцемента с водой и количество их в массе цементного камня со временем увеличивается. Из насыщенных растворов KOH кристаллы и сростки портлантдита выпадают в течение 1-3 суток, а при затворении избытком воды они возникают в течение всего процесса гидратации (0,5-15 месяцев) в наиболее близких к естественным условиях в системе цемент-вода при температуре 15-25º С.

Осажденные из щелочных растворов силикаты кальция аморфны при обычных температурах. Кристаллические продукты могут образоваться или в автоклавных условиях или из очень разбавленных растворов, а также при старении. При осаждении силикатов щелочноземельных и многовалентных металлов наряду с силикатами или раньше их всегда образуются как гидроксиды металлов, так и гели кремнезема [7].

Гидроксиды - исходный материал для образования гидросиликатов (гидроксокомплексных соединений), таких как, например, на основе двух-кальциевого силиката $Ca_5[SiO_4]_2(OH)_2=2Ca_2SiO_4\cdot Ca(OH)_2$ и трехкальциевого $Ca_6[Si_2O_7](OH)_6=Ca_3[Si_2O_7]\cdot 3Ca(OH)_2$. Термическая устойчивость последних, как и других форм кальциевых гидросиликатов (тоберморита, гиллербрандита,

фошагита) характеризуется интервалом 600-700º С, в котором они теряют кристаллизационную воду, превращаясь в безводные соединения. Появление и рост кристаллов в аморфной фазе осадков наблюдается в интервале 200 -600º С [17].

По-видимому, можно допустить образование подобных гидрсиликатов соединений в электродных покрытиях. Они, также как и гидроксиды, могут быть источником воды, водорода, кислорода, первоначальной причиной пористости и водородной хрупкости металла сварных швов, а также ухудшения отделения шлаковой корочки.

Если в составы сухой шихты ввести алюминий, магний, бор, ванадий, марганец, также их соединения, по-видимому, не избежать образования в обмазочных массах гидроксидов этих металлов и сложных оксогидроксокомплексов (алюминатов, титанатов, ванадатов, боратов) щелочных и щелочноземельных элементов в условиях нормальных и повышенных температур.

Сделанные выше выводы не совпадают с позицией сотрудников ИЭС им. Е.О.Патона, изложенной в обобщающей монографии [18], в частности, в виде тезиса о сухом остатке жидкого стекла в покрытии электродов, «содержащим связанную влагу, который и есть источник водорода в металле шва». Этот тезис в различных вариациях приводится как в прежних, так и в последующих публикациях [19,20,21,22].

Взаимодействие жидкого стекла с металлами в докладе и в статье А.Е. Марченко и Н.В. Скорины [23], признается химическими реакциями щелочного характера.

Управление технологическими процессами

Приведенные выше материалы изучения и практического применения водных растворов щелочных силикатов позволяют констатировать не только неизбежность их взаимодействия с компонентами сварочных материалов, но и существенное и осязаемое на практике влияние продуктов химических реакций на потребительские характеристики сварочных электродов.

Подходы к выбору природного и техногенного сырья, а также к минеральным сплавам (плавленым миналам), затрагивались в докладах на конференциях 2011 года [24, 25, 26]. Здесь они получают дальнейшее развитие.

Мрамор и жидкое стекло. Процессы взаимодействия с позиций, изложенных в монографии [7], объясняются следующим образом.

Если ионы Ca^{2+} осаждаются на поверхности коллоидных частиц кремнезема в жидком стекле, заряженных отрицательно, то адсорбция ионов кальция приводит к частичной или полной перезарядке поверхности частиц кремнезема и это является причиной коагуляции, осаждения или гелеобразования, что в конечном итоге ускоряет процессы затвердевания обмазочной массы, образования гидроксидов и зародышей гидроксосиликатов. Иллюстрация этого явления на практике всем известна: применение известняка Угловского месторождения в семидесятых годах, а в настоящее время – мягких пород мрамора Коелгинского месторождения.

В других случаях осаждение кремнезема на кальциевых поверхностях твердой фазы является первой стадией, и тогда взаимодействие реагентов в течение дли-

тельного времени ограничивается узкой зоной контакта фаз, и диффузия ионов кальция оказывается лимитирующей стадией. Обновление поверхности механическими способами в таких случаях становится мощным кинетическим фактором. Это, прежде всего относится к мрамору (содержание его в основных покрытиях – 35-53%).

Отсюда следует ряд выводов о выборе сырья для его переработки в компоненты электродных покрытий и рекомендаций по предотвращению или снижению уровня взаимодействия компонентов с жидким стеклом.

1. Мрамор или мраморизованные известняки целесообразно использовать из месторождений горных пород с прочностью на сжатие не менее 80-100 МПа (по месторождениям в порядке справки: Прохоро-Баландинское – 128 МПа, Коелгинское - 40-80 МПа, Белогорское – 114-214 МПа, Уфалейское – 150 МПа, Никитинское – 130-150 МПа);

2. Целесообразно отказаться от использования мрамора и плавикового шпата в качестве флегматизаторов при измельчении ферросплавов и металлов с заменой их на кварциты;

3. Следует отказаться от разбивающих устройств в интенсивных смесителях или изыскать другие конструкции;

Плавиковый шпат. Химическая активность его в щелочных растворах, в жидком и твердом состоянии считается очень высокой. В нашем случае, например, в обмазочных массах ионы кальция легко замещаются на ионы щелочных металлов, что немедленно приводит к образованию гидроксида кальция (в покрытиях и в керамических флюсах обнаружено до 3% фтористого натрия [27]), В работе [28] было установлено, что фтористый кальций способствует снижению работы удара образцов из наплавленного металла при отрицательных температурах.

Глинозем, как техногенный продукт, не пригоден для использования в электродных покрытиях (высокая химическая активность к щелочным растворам). Его замена на электрокорунд также не вызывает восторга, поскольку высокая плотность плавленого корунда препятствует полному расплавлению зерен и получению равномерной концентрации оксида алюминия во всем объеме шлака расплавляемого покрытия (контактное плавление [29]).

Оксиды бора, титана, ванадия, хрома, марганца, железа, циркония, ниобия, молибдена в аспекте взаимодействия с растворами щелочных силикатов не являются исключением, и их поведение аналогично алюминию.

В наших технологиях следует замедлять процессы взаимодействия на все время, которое необходимо для удаления жидкой фазы из связующего и его сухого остатка, т.е. время, когда могут интенсивно развиваться процессы образования гидроксидов, оксигидроксидов, возникать зародыши и кристаллизоваться оксо- и гидроксокомплексы.

Для задержки процессов коагуляции и гелеобразования можно использовать ингибиторы, очень малые добавки которых, например, перманганата калия,

З.А. Сидлин рекомендует вводить в виде насыщенного раствора в количестве 5 - 10 $см^3$ на 1 литр жидкого стекла [5]. Это в 2 раза меньше рекомендаций В.И. Клементова. Однако, по рекомендациям [15] при применении веществ в качестве ингибиторов химических реакций их концентрация должна быть в 10^3-10^6 раз меньше концентрации реагентов рассматриваемой реакции.

Следовательно возможно дальнейшее снижение концентрации добавки перманганата калия в жидкое стекло в качестве ингибитора с целью задержки коагуляции и осаждения или выпадения геля, т.е. процессов способствующих повышению давления в цилиндре пресса вплоть до полной остановки опрессовки электродов.

Образование зародышей гидросиликатов (оксо – гидроксокомплексов) происходит только в выпавшем геле в период сушки электродов, а также одновременно с кристаллизацией - в период прокаливания в интервале 150 - 200º С, выдержки при 360-380º С и в период охлаждения с печью. Окончание кристаллизации гидросиликатов заканчивается при температурах 600-700º С [17].

В нашем случае кристаллизация гидросиликатов может происходить при длительном хранении и при повторной прокалке перед сварочными работами.

По-видимому, следует отказаться от натриево - калиевого жидкого стекла, которое способствует интенсивному увлажнению покрытия электродов, повторному растворению сухого остатка и возобновлению взаимодействия с компонентами. Тем более, что натриевое жидкое стекло обладает более высокой клейкостью, позволяет использовать для ее повышения и улучшения пластичности обмазочных масс карбамид, что помогает исключить из покрытий КМЦ как вещество, которое также считается источником водорода [18].

Следует также отметить, что разбавленные растворы щелочных силикатов обладают наибольшей активностью. Это означает, что как будто бы следует возвратиться к жидким стеклам повышенной плотности, в которых диффузия реагентов замедляется практически до прекращения взаимодействия.

Очевидно, что при смешивании двух растворов для получения необходимых параметров третьего раствора, следует вводить тепловую гомогенизацию.

Следует также иметь в виду, что вода, попавшая в жидкое стекло приводит к его быстрому разложению [4, 7]. Особенно это отражается на сохранении свойств высокомодульных растворов. Поэтому следует вводить в практику обязательное высушивание смесителей, дозировочных устройств и других емкостей для хранения жидкого стекла после промывки горячей водой или паром.

Вполне вероятно, что при рассмотрении условий отдельного производства рекомендации, сделанные выше, потребуется дополнить и конкретизировать.

Заключение

Все изложенные в докладе выводы сделаны при сопоставлении выполнения опытных работ в условиях промышленного производства электродов на ОАО «Ижорские заводы» и ОАО «ПО «Севмаш» с общими закономерностями, связанными со свойствами водных растворов щелочных силикатов и их использованием в различных технологиях, в том числе, отнесенных к нанотехнологиям. Выносить краткое

изложение выводов в заключительный раздел авторы не сочли целесообразным, поскольку их необходимо понять в том контексте, на основании которого они сделаны и применить к условиям конкретного производства.

Эти выводы касаются не только технологий с использованием мине-ральных сплавов, но и рекомендуются для существующих предприятий с целью стабилизации качества их продукции на новом уровне потребительских характеристик.

Литература

1. Сидлин З.А. К вопросу о качестве современных отечественных электродов для ручной дуговой сварки.// Технология машиностроения-2008-№1-с.35-38.
2. Сидлин З.А. Состояние производства сварочных материалов в России // Автоматическая сварка-2009-№ 2-с.31-34.
3. Клементов В.И. Применение жидкого стекла в покрытиях электродов для дуговой сварки // Институт технико-экономической информации АН СССР-Москва-1954 г 19 с.
4. Григорьев П.Н., Матвеев М.А. Растворимое стекло // М., Госстройиздат, 1956, 444 с.
5. Сидлин З.А. Производство электродов для ручной дуговой сварки // Киев, Экотехнология, 2009, 462 с.
6. Айлер Р. Химия кремнезема ч.1, ч.2. // М. Мир, 1982, 1127с.
7. Корнеев В.Н., Данилов В.В. Жидкое и растворимое стекло // Санкт-Петербург, Стройиздат, 1996, 216с
8. Штрунц Х. Минералогичекие таблицы // Гос.научно-техническое издательство литературы по горному делу, М. 1962,532 с.
9. Жданов С.П. Общие закономерности и особенности кинетики кристаллизации цеолитов // Адсорбция и адсорбенты. М. Наука, 1987, с. 222-230.
10. Феоктистова Н.Н., Втюрина Л.М. Влияние аморфных затравок на кинетику кристаллизации цеолита Na-A // Известия академии наук. Серия химическая, 1994, № 3, с. 799-804.
11. Кузнецова Л.А., Голубева Т.Ю., Хашковский С.В. Композционные материалы и покрытия на основе водных растворов силикатов // Температуроустойчивые функциональные покрытия, часть 1, Санкт-Петербург 1997, с. 93-98.

12. Кузнецова Л.А., Голубева Т.Ю., Хашковский С.В. Химически стойкие эмали, полученные методом золь-гель технологии // Температуроустойчивые функциональ-ные покрытия, часть 2, Санкт-Петербург 1997, с. 77-79.

13. Чепик Л.Ф., Мащенко Т.С., Трошина Е.П. Использование золь-гель процессов при формировании толстых эмалеподобных покрытий на металлических поверхностях // Температуроустойчивые функциональные покрытия, часть 1, Санкт-Петербург 1997, с. 110 – 114.

14. Ящишин И.Н., Вахула Я.И., Васийчук В.А., Романив А.С. Формирование температуроустойчивых тонкослойных стеклопокрытий на основе растворимого стекла // Температуроустойчивые функциональные покрытия, часть 2, Санкт-Петербург 1997, с. 73-75

15. Химический энциклопедический словарь // Москва «Советская энциклопедия», 1983.

16. Турричиани Р. Вопросы химии пуццоланов // Химия цементов, издательство литературы по строительству, М., 1969, с. 353-366.

17. Илюхин В.В., Кузнецов В.А. и др. Гидросиликаты кальция; Под редакцией академик Н.В. Белова // М., Наука 1979, 184 с.

18. Походня И.К., Явдощин И.Р., Пальцевич А.П., Швачко В.И., Котельчук А.С. Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие металла с газами; Под редакцией академика И.К. Походни // Киев, «Наукова думка» 2004, 442с.

19. Походня И.К. Управление водородом при сварке // Труды ВОМ-2001, часть 1, Донецк 2001, с. 68-70.

20. Походня И.К., Сварочные материалы: состояние и тенденции развития // Автоматическая сварка – 2003-№3, с. 9-20.

21. Походня И.К. Сварочные материалы: состояние и тенденции развития // Сварочное производство -2003-№ 6-с. 26-40

22. Походня И.К. Металлургия дуговой сварки конструкционных сталей и сварочные материалы // Сварочное производство – 2009, № 4, с.3-15

23. Скорина Н.В., Марченко А.Е. Химическая активность ферросплавов в жидком стекле // Автоматическая сварка – 2006, № 2, с.47-50

24. Малышевский В.А., Брусницын Ю.Д., Кащенко Д.А., Праслова Е.Г., Калинников В.Т., Николаев А.И., Аввакумов Ю.В., Быков А.Н. , Пожидаева Е.Н., Дикарев В.В., Лившиц И.М., Воронова О.В. К концепции формирования потребительских свойств сварочных материалов и эксплуатационных характеристик металла сварных швов хладостойких сталей // 6-ая Международная научно-практическая конференция «Сварочные материалы. Дуговая сварка. Производство. Качество» г. Краснодар, пос. Агой, 06-10 июня 2011г.

25. Малышевский В.А., Брусницын Ю.Д., Кащенко Д.А., Калинников В.Т., Николаев А.И. К концепции формирования потребительских свойств сварочных материалов и эксплуатационных характеристик металла сварных швов хладостойких сталей // Сборник тезисов XIX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии

26. Малышевский В.А., Брусницын Ю.Д., Аввакумов Ю.В., Быков А.Н. О подходах к улучшению потребительских свойств сварочных электродов на «ПО «Севмаш» // XL Ломоносовские чтения 9-10 ноября 2011 года, г. Северодвинск, Сборник докла-дов, 2012г.

27. Брусницын Ю.Д. К вопросу о физико-химических процессах в керамических сварочных флюсах и электродных покрытиях на шлаковой основе мрамор–плавиковый шпат // Судпромгиз, Сварка-1959 № 2, с. 95-109.

28. Брусницын Ю.Д., Кащенко Д.А., Малышевский В.А., Рыбин В.В., Шекин С.П., Калинников В.Т., Николаев А.И., Бураков Р.В., Быков А.Н., Захватаев С.В., Москалев И.Д., Харченко И.В., Отработка композиций минеральных сплавов и про-мышленной технологии их изготовления с использованием минерального сырья Кольского полуострова // Петраньевские чтения. Сварочные материалы (к 70-летию создания электродов УОНИ-13). Доклады международной научно-технической кон-ференции 18-22 мая 2009 года с. 90-102.

29. Залкин В.М. Природа эвтектических сплавов и эффект контактного плавления // М, Металлургия. – 1987, 152 с.

О ПРОБЛЕМАХ ПРОИЗВОДСТВА СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

И.М. Лившиц,
инж.,
ООО «Ижорские сварочные материалы»
г. Санкт-Петербург

Рассматриваются проблемы, связанные с нестабильностью качества электродов, приходом на российский рынок иностранных производителей, отсутствием средств на модернизацию оборудования, отсутствием серьезной конкуренции среди российских производителей легированной проволоки, со сложностью приобретения качественных материалов, используемых в покрытиях, с аттестацией электродов и политикой «дешевых электродов», проводимой при закупках госкорпорациями – монополистами.

Сварка, как один из способов изготовления металлических конструкций является основным технологическим процессом соединения, применяемым в различных отраслях промышленности. При этом ручная дуговая сварка покрытыми электродами из-за своей простоты и доступности по-прежнему остается ведущим способом, несмотря на постоянное совершенствование технологии, механизации и автоматизации производства.

В связи с этим изготовление и поставка высококачественных сварочных электродов для нужд Российской промышленности является весьма важной и актуальной задачей. Тем более, что по данным некоторых источников был отмечен рост производства сварочных электродов в России в 2011 году на 4% по сравнению с предыдущим годом [1].

Однако, на всех уровнях сохраняется устойчивое мнение о достаточно низком качестве сварочных электродов, изготовленных российским производителями. Впрочем, такое же мнение существует и относительно электродов, произведенных в странах СНГ (Украина, Белоруссия, Казахстан и др.). Мне бы не хотелось сейчас вступать в полемику по данному вопросу по следующим причинам. Во-первых это не является предметом настоящего доклада, во-вторых мое мнение может являться достаточно субъективным и в третьих с подобными утверждениями очень часто трудно спорить, так как для этого есть поводы, хотя в последние годы многие передовые предприятия России значительно продвинулись с точки зрения повышения качества электродов.

Единственное, о чем бы хотелось сказать, так это о том, что, с моей точки зрения, главное отличие российских электродов от лучших образцов зарубежных аналогов заключается в отсутствии стабильности качества отечественных электродов, особенно по их сварочно-технологическим характеристикам. Это можно отнести практически ко всем нашим производителям. Одно и то же предприятие может изготовить какую-либо партию высочайшего качества. Но повторить его в следующей партии и более того держать этот уровень постоянно – не представляется возмож-

ным. Это можно объяснить как объективными, так и субъективными причинами. Так что же мешает нашим предприятиям достигнуть уровня лучших мировых аналогов сварочных электродов.

Главное, о чем бы хотелось сказать – это отсутствие системного подхода к организации производства сварочных электродов. Причем это не только вина предприятий, изготовителей электродов, а скорее полное отсутствие какой-либо политики государства в этом вопросе. Понятно, что мы живем в условиях рыночной экономики (или нам так кажется), но без определенных шагов со стороны государственных институтов отрасль может просто погибнуть.

Возможно это преувеличение. Но ситуация складывается именно таким образом, что производство сварочных электродов на предприятиях Российской Федерации находится не в очень хорошем состоянии. Большинство предприятий сократили объемы производства. В этом плане особняком стоит Лосиноостровский электродный завод , который сумел в этих тяжелых условиях победить в конкурентной борьбе «Спецэлектрод» и продолжает наращивать выпуск электродов.

Еще одна тенденция, которая просматривается на рынке электродов РФ – наращивание присутствия иностранных компаний. Причем это не экспансия со стороны китайских и турецких производителей, которую в европейской части страны мы не сильно замечаем. Имеется ввиду приобретение иностранными компаниями, можно сказать, лучших предприятий - производителей сварочных электродов. Этот процесс начался несколько лет назад, когда фирма «ESAB» приобрела компанию «Свэл» (электродное производство предприятия «Северная верфь», а ранее Ленинградского судостроительного завода им. Жданова). Еще многие помнят, что электроды УОНИ-13/55 этого предприятия были одними из лучших в стране. После этого фирма «ESAB» приобрела Сычевский электродный завод, который по своему оснащению, уровню технологической дисциплины превосходил другие предприятия. И вот совсем недавно, в мае этого года «ESAB» купил еще одно предприятие – Завод сварочных электродов «СИБЭС» в Тюмени.

Параллельно другая фирма «Lincoln Electric» приобрела такие предприятия как «Орловский сталепрокатный завод» и ОАО «Межгосметиз» г. Мценск.

Очевидно этот процесс приобрел необратимый характер и очередные покупки российских предприятий со стороны зарубежных фирм возможны в ближайшее время. Возможно, это не самое плохое развитие событий, тем более, что страна находится на пороге вступления в ВТО, когда усилится конкуренции со стороны иностранных производителей электродов. Но все равно, как говорится «за державу обидно». Хотя с другой стороны, приобретенные предприятия получают возможность переоснастить производство более совершенным оборудованием, которое не всегда является новым, а скорее всего «бывшим в употреблении».

Кроме того предприятия получают доступ к новым технологиям и главное – к сырьевой базе.

Проблема сырьевой базы сегодня является одной из главных проблем производства сварочных электродов.

Сварочная проволока.

Если говорить о низкоуглеродистой проволоке (Св.08 и Св.08А), то проблем с поставками и качеством проволоки практически не существует. Другое дело, когда речь заходит о низколегированных и высоколегированных марках. А еще, если требуется поставка таких проволок с ограничениями по химическому составу, то проблема часто остается неразрешимой. Дело в том, что ушел с этого рынка металлургический завод «Серп и Молот». Произошли структурные изменения и замена собственников завода «Ижсталь», на котором производится модернизация стана. В результате уже около года проволока не выпускается. Остается завод «Электросталь», который требует 100 % предоплаты и ожидание проволоки продолжается, как минимум, 4 месяца, а в результате можно будет получить проволоку с отклонениями от ТУ.

Главная проблема в поставках легированных и высоколегированных проволок – это небольшая потребность, что крайне не выгодно производителям. Могут предложить заказать плавку массой 60 тонн, при годовой потребности в в заказываемой марке не более 3 – 5 тонн.

В результате этого на наш рынок потоком пошла сварочная проволока из Китая и Индии, которая процентов на 30 дешевле отечественной.

Плавиковошпатовый концентрат.

На протяжении многих лет использовался плавиковый шпат Калангуйского месторождения (Читинская область). К настоящему времени его запасы были исчерпаны, поэтому приходилось искать альтернативные варианты. Очень хорошо себя зарекомендовал плавиковый шпат Суранского месторождения. Однако легкодоступные запасы этого материала закончились. Требуется дальнейшая разработка этого месторождения, создание инфраструктуры. Но для этого необходимы большие капитальные вложения. Государству до этого дела нет, а частный капитал не привык вкладывать средства, отдача от которых будет не так быстро. Поэтому наши предприятия стали закупать концентрат из Монголии. И если в начале качество материала было удовлетворительным, то в последнее время поступал концентрат очень низкого качества, содержание CaF_2 вместо 95 % доходило до 80 и ниже. Причем каждый мешок значительно отличался по химическому составу, что затрудняло его использование. В связи с этим перешли на использование мексиканского концентрата.

Еще одна проблема заключается в том, что, если флотационный концентрат на рынке еще приобрести возможно, то кусковой практически отсутствует полностью. А есть определенные марки сварочных материалов, где возможно использование только кускового плавиковошпатового концентрата.

Рутиловый концентрат.

Об этой проблеме говорили уже не один раз, но она продолжает оставаться. Вольногорский комбинат в очередной раз резко увеличил его цену, да и проблемы с поставками до конца не решены.

Двуокись титана.

Эта проблема не так масштабна из-за того, что относится только к высоколегированным электродам, где содержание двуокиси титана в покрытии составляет более 10%. Таких электродов не очень много, но от этого проблема не исчезает. Единственным изготовителем двуокиси титана для сварочных материалов (марка ТСМ) был НИПМ в г. Челябинске. Однако там из-за смены собственников и малой потребности отсутствует интерес к изготовлению этого материала.

Есть и другие проблемы с поставками сырья, в частности, ферросплавов и металлических порошков. Отрадно, что появилось предприятие ООО «Мелдис-Ферро», которое осуществляет поставки ферросплавов в измельченном виде, но есть вопросы к стабильности качества поставок.

Существует еще одна проблема, о которой тоже нельзя забывать. Имеется ввиду тот факт, что альтернативой ручной сварки является полуавтоматическая сварка в среде углекислого газа и сварка порошковой проволокой. Нельзя сказать, что эти виды сварки представляют сегодня угрозу для электродного производства, но в ряде отраслей промышленности (судостроение, вагоностроение, строительные металлоконструкции и др.) полуавтоматическая сварка вытеснила ручную. Этим тоже можно объяснить общее снижение объема выпуска и потребления сварочных электродов. Здесь вспоминаются слова, которые приписываются академику Патону Б.Е., о том, что ручная сварка должна уйти в историю. Это очень спорное заявление, но по некоторой информации в нормативных документах Газпрома уже не предусматривается такой вид сварки как ручная дуговая сварка покрытыми электродами. Безусловно, что с развитием технологий механизированные способы сварки будут преобладать и объем использования ручной сварки (как и производство электродов) будут снижаться, но в обозримом будущем электроды из нашего обихода не исчезнут и будут успешно применяться в определенных условиях (ремонт, небольшие участки и т.д.).

Еще одной важной проблемой производства сварочных электродов является оборудование для изготовления или точнее сказать его отсутствие. Большинство предприятий оснащено устаревшим технологическим оборудованием, которое не позволяет осуществлять изготовление высококачественных электродов. Исключение составляют несколько (не более 10 предприятий) которые оснащены импортным оборудованием, да и то возраст этого оборудования превышает 30 лет. Несмотря на то, что появились фирмы, которые разрабатывают и изготавливают специальное оборудование, такие как Ротэкс, Велма и др. все равно приобрести полный комплект оборудования невозможно, да и без доработок это оборудование часто просто не работает. Закупка же оборудования за рубежом требует больших капитальных затрат, при этом не всегда импортное оборудование оправдывает свое назначение. В качестве примера могу привести приобретение у итальянской фирмы «Simplex Rapid» правильно-отрезного автомата мод. RTB/6-T1. Как это принято сегодня, этот поставщик был выбран в результате «тендера». В конечном итоге из-за небольшой экономии были получены большие проблемы, которые приходится решать на ходу.

В связи с этим хотелось бы отметить, что все эти «тендеры» и «конкурсы» скорее беда, чем благо, так как главным критерием остается цена вопроса и к мнениям специалистов прислушиваются в последнюю очередь.

Кстати, «тендеры» являются еще одной большой проблемой, стоящей перед производителями сварочных материалов. Дело в том, что все закупки электродов также производятся на конкурсной основе, и производители, стремясь победить в этой борьбе, начинают снижать цену на продукцию. Но есть предел, ниже которого опуститься нельзя и здесь приходится выбирать: или проиграть или находить выходы из создавшегося положения. Но ведь всем хорошо известно, что снизить цену без ухудшения качества практически невозможно. Это значит можно использовать не ту сварочную проволоку или не те марки шихтовых материалов или не выполнить какие-то испытания и т.д. В результате мы получаем вариант «дешевые электроды», а о том, какие будут последствия, никто не задумывается. Возможно это допустимо, если эти электроды будут использованы при сварке обычных конструкций, где последствия могут быть не очень опасными. Устраивать же подобные конкурсы в атомном энергетическом машиностроении, по моему мнению, просто преступно. К сожалению, государственная корпорация Росатом проводит именно такую политику «дешевых электродов». Более того проводятся не просто конкурсы между предприятиями, представившими свои предложения, а назначается так называемый *редукцион*, т.е. аукцион наоборот. Это значит, что торги продолжаются до тех пор, пока кто-либо не назначит минимальную цену. В результате таких «торгов» часто выигрывают неизвестные фирмы, какие-то посредники. Какие электроды они могут поставить для сварки оборудования АЭС и к каким последствиям это приведет никто не задумывается.

А ведь для поставок на АЭС требуется лицензия РОСТЕХНАДЗОРА. Но, как правило, у всех поставщиков необходимые разрешительные документы имеются. И, к сожалению, получить необходимую лицензию, сертификат соответствия или свидетельство об аттестации в настоящее время не так сложно. Главное – это представить полный комплект соответствующих документов и произвести оплату услуг, которые выполняют так называемые уполномоченные организации. Если на бумаге все написано правильно, то лицензия у вас в кармане. В мае этого года мы получили очередную лицензию АЭС на сварочные материалы. Процедура была достаточно длительной, обошлось это удовольствие за 10 000 руб. (госпошлина) и 200 000 руб. (экспертиза документов). А еще совсем недавно в 2006 году, для получения лицензии требовалось оплатить госпошлину в размере 1000 руб., но при этом пройти процедуру обследования предприятия со стороны инспекторов Госатомнадзора, которые проверяли не только наличие «бумажных» процедур, но реальную возможность изготовления материалов для АЭС.

Аналогичная ситуация и в других надзорных органах: Российском Морском Регистре Судоходства, Российском Речном Регистре и т.д.

Отдельно хочется сказать про НАКС. На протяжении многих лет их критикуют, не без основания. Но сейчас требуется от критики перейти к конкретным предложениям, касающимся аттестации сварочных материалов для применения на опасных

производственных объектах. Необходимо:

- Отменить разделение объектов на группы опасных технических устройств и аттестацию материалов производить без привязки к этим группам, что существенно упростит ситуацию и исключит невозможность использования электродов марки УОНИИ-13/55 для сварки мостовых конструкций, при условии, что эти электроды имеют свидетельство НАКС на следующее оборудование - ГО (газовое), КО (котельное), ПТО (подъемно-транспортное), НГДО (нефтегазодобывающее), ОХНВП (оборудование химических, нефтехимических нефтеперерабатывающих и взрывопожароопасных производств), кроме того одобрены РМРС, РРС и РОСТЕХНАДЗОРОМ РФ для АЭС. Более абсурдной ситуации не придумаешь.
- Отменить требование по аттестации электродов по диаметрам. Необходимо производить аттестацию конкретной марки электродов без привязки к ее диаметрам, что является неприемлемым с технической точки зрения.

Есть еще и проблемы в области стандартизации сварочных материалов. Но это уже совсем другая история.

ПОРЯДОК АТТЕСТАЦИИ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМЕ САСВ РОСТЕХНАДЗОРА

А.М. Левченко,
к.т.н.,
ООО «РСЗ МАЦ» НАКС
Ю.Н. Кручинин,
инж., специалист 4-го уровня,
АЦСМ-48 НАКС
г. Санкт-Петербург

Приводится порядок аттестации сварочных материалов в аттестационном центре АЦСМ-48 НАКС в Санкт-Петербурге для применения в системе САСВ РОСТЕХНАДЗОРА.

Аттестация сварочных материалов наряду с аттестацией сварщиков, сварочного оборудования и технологии сварки, является важным этапом по проверке подготовленности промышленного предприятия к изготовлению оборудования, трубопроводов и строительных металлоконструкций, а также одним из звеньев системы аттестации сварочного производства на объектах, подконтрольных Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору.

Основными целями аттестации сварочных материалов в соответствии с РД 03-613-03 являются:

- проверка соответствия фактических технологических свойств и характеристик сварочных материалов свойствам и характеристикам, указанным в сопроводительной документации, и требованиям действующих стандартов, технических условий и других нормативных документов для сварочных материалов;
- определение возможности применения аттестуемых сварочных материалов для проведения работ при изготовлении, реконструкции, монтаже и ремонте технических устройств путем проверки соответствия фактических свойств и характеристик сварочных материалов, свойств наплавленного металла и металла шва требованиям действующих для технических устройств нормативных документов.

Аттестация сварочных материалов ставит своей задачей обеспечение надежности и безопасности продукции сварочного производства путем создания системы объективно независимой оценки и подтверждения соответствия сварочных материалов, требованиям нормативных документов, относящихся к сфере деятельности Ростехнадзора. Для достижения этой цели разработан комплекс требований, определяющих правила и процедуру аттестации сварочных материалов, называемый

системой аттестации сварочных материалов (САСв), состоящий из:

- **организационной структуры** (Ростехнадзор, Национальное Агентство Контроля Сварки (НАКС), аттестационные центры, расположенные в различных регионах страны);
- **методической базы для проведения аттестации**, включающей НД Ростехнадзора по группам технических устройств, устанавливающей требования к объему испытаний и уровню качества наплавленного металла, металла шва и сварных соединений, выполненных аттестованными сварочными материалами, а также специальные руководящие документы, такие как РД 03-613-03, «Рекомендации по применению РД 03-613-03» и другие руководящие материалы в форме протоколов НТС НАКС, описывающие методику проведения и объем испытаний сварочных материалов в зависимости от их вида, назначения и характера применения в производстве.

Чтобы представить уровень требований, которые предъявляется при аттестации к сварочным материалам в соответствии с РД 03-613-03 в России в сравнении с национальными стандартами, действующими в ведущих промышленно-развитых странах, в таблице 1 приведен объем испытаний, которым подвергаются покрытые электроды для сварки углеродистых или низколегированных сталей.

Таблица 1 *Сравнительный объем контролей покрытых электродов для сварки углеродистых и низколегированных сталей*

Страна	Применяемый стандарт	Виды испытаний при разрушающих контролях										Виды неразрушающих контролей		
		ХСн	СРн	СРш	СРс	УИн	УИш	СИс	[Н]	УШ	Тш	ВИК	РГК	УЗК
США	AWS A5.5	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	+	+	-
ЕС	ISO 2560	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-
Россия	РД 03-613-03	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+*	+*

Условные обозначения, применяемые в таблице:
ХСн – химический состав наплавленного металла;
СРн – статическое растяжение наплавленного металла (σв, σт, δ);
СРш – статическое растяжение металла шва (σв, σт, δ);
СРс – статическое растяжение сварного соединения (σв);
УИн – ударный изгиб наплавленного металла;
УИш – ударный изгиб металла шва;
СИс – статический изгиб сварного соединения;
[Н] – содержание диффузионного водорода в наплавленном металле;
УШ – контроль углового шва;
Т – твердость наплавленного металла шва
* - один из методов

Из представленных в таблице 1 данных можно сделать следующие выводы:

1. Общее количество видов механических испытаний при аттестации по требованиям РД Ростехнадзора превышает аналогичные значения в США и ЕС (в РФ – 8 видов испытаний, в США и ЕС – только по 5). Это означает, что аттестуемый сварочный материал (в данном случае покрытые электроды) по требованиям НД Ростехнадзора более полно контролируется с точки зрения применимости по прямому назначению для изготовления сварных конструкций, чем сварочный материал, изготовленный только по требованиям соответствующих национальных стандартов в странах США и ЕС.

2. Отличительной особенностью разрушающих испытаний электродов по РД 03-613-03 является проведение контроля как наплавленного металла, так металла шва и сварного соединения (для сравнения в США 3 из 5 испытаний - это контроль наплавленного металла, причем характеризующих именно уровень механических свойств металла, наплавленного электродами). При этом основной особенностью проведения испытаний сварочных материалов в США и ЕС является то, что в стандартах AWS и ISO нет требований по контролю уровня свойств сварных соединений, как это требуется при аттестации материалов в России в соответствии с РД 03-613-03.

3. Объем неразрушающих видов контроля, используемых в США и ЕС, в сравнении с РФ формально одинаков, однако, при проведении аттестации электродов **по требованиям РД 03-613-03 для контроля ВИК, РГ (УЗК) установлены конкретные нормы оценки**, в то время как при контроле по AWS и ISO уровень допускаемой дефектности наплавленного металла (металла шва) по ВИК фактически отсутствует.

Важным элементом в ряду организационных мер САСв является деятельность аттестационных центров (АЦСМ), в которых и производится непосредственно проверка применимости на объектах Ростехнадзора как аттестуемой марки сварочных материалов от предприятия-изготовителя или его уполномоченного поставщика, так и отдельных партий сварочных материалов непосредственно у потребителя сварочной продукции. АЦСМ в этой части выполняют следующие функции:

- осуществляют, в соответствии с областью аккредитации, указанной в Свидетельствах об аккредитации или иных документах об аккредитации, аттестацию сварочных материалов;

- предоставляют заявителям необходимую информацию о правилах и процедурах аттестации в пределах своей компетенции.

Деятельность АЦСМ регламентируется Положением об АЦСМ, нормативными документами, руководящими и методическими документами САСв, условиями действия документа об аккредитации.

В настоящее время на территории Российской Федерации действуют 27 центров по аттестации сварочных материалов и один аттестационный центр

в Германии (г. Росток). На рисунке 1 представлена география расположения АЦСМ на территории России и за рубежом. Из представленной схемы видно, что АЦСМ располагаются как с запада на восток, так и с севера на юг, перекрывая всю территорию России.

Рисунок 1 *Расположение АЦСМ на территории РФ*

На рисунке 2 представлена блок-схема, описывающая общий порядок проведения аттестации сварочных материалов в АЦСМ-48, заявленных от предприятия-изготовителя или его уполномоченного поставщика. Как следует из приведенной схемы, процедура аттестация в АЦСМ-48 полностью соответствует требованиями РД 03-613-03, «Рекомендаций по применению ию РД 03-613-03», а также протоколу НТС НАКС №25 от 24.06.2012 г.

В процессе механических испытаний металла шва, наплавленного металла и сварного соединения используются образцы в соответствии с ГОСТ 6996-66. Примеры образцов после механических испытаний приведены на рисунке 3.

За время функционирования АЦСМ с 2003г. среди аттестаций сварочных материалов можно выделить следующие работы:

1. Аттестация импортных сварочных материалов для использования при изготовлении печи пиролиза в 2006г. (г. Саратов). Одновременно было выполнено 18 аттестаций для покрытых электродов и сварочной проволоки сплошного сечения. Заявитель аттестации ООО «Ленкор».

2. Аттестация покрытых электродов марки Filarc 56S и проволоки сплошного сечения марки Lincoln MD SG-2 при изготовлении нефтепровода, проложенного по дну Каспийского моря. Заявитель аттестации – «Макдермот Каспиан Констракторс Инк.» (США).

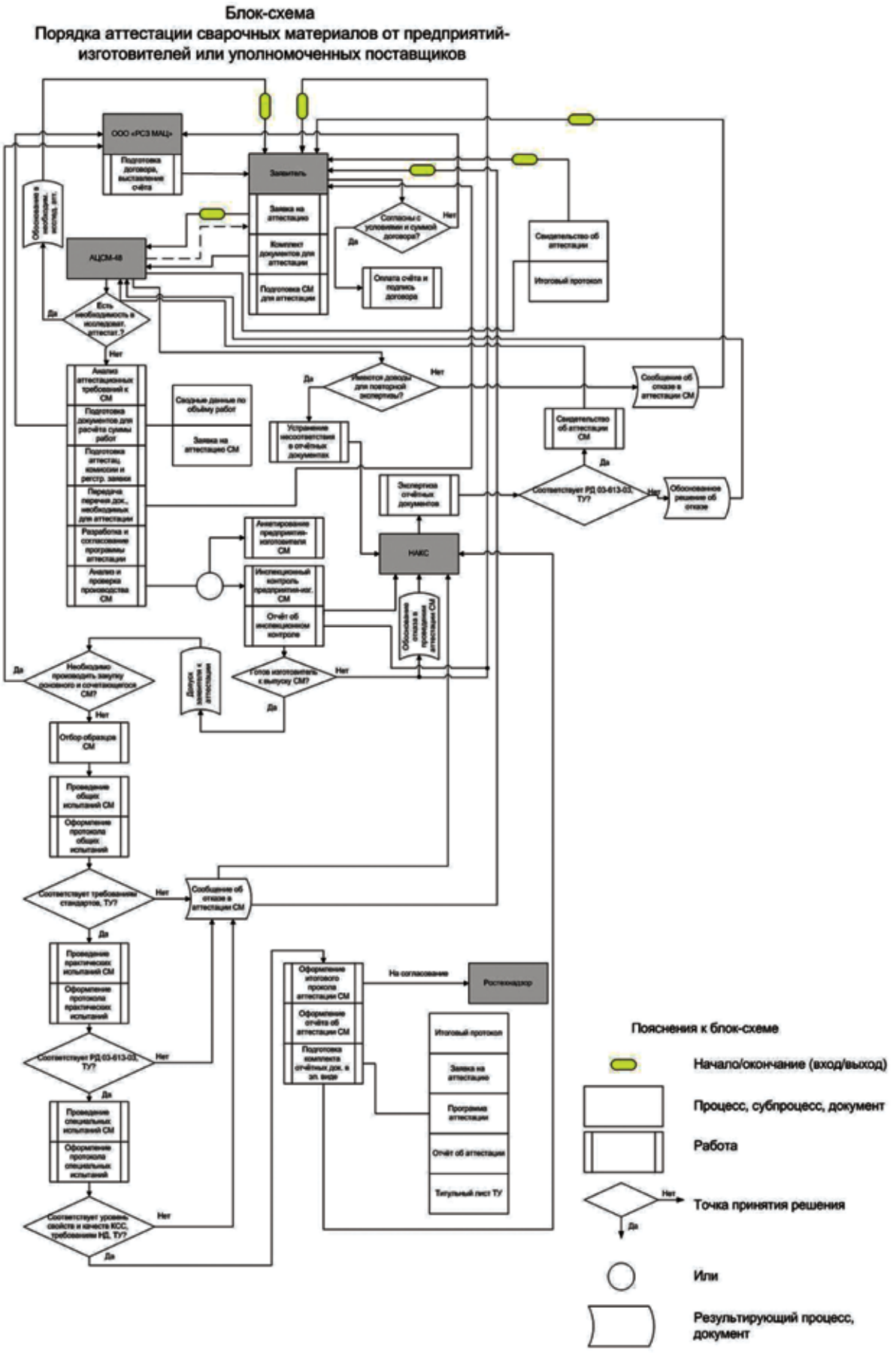


Рисунок 2 *Порядок проведения аттестации сварочных материалов в АЦСМ-48*

Рисунок 3 *Образцы после механических испытаний*

3. Аттестация сварочных материалов в 2007 г. для изготовления буровой платформы «Приразломная» для эксплуатации в Баренцовом море по заявке предприятия ОАО «ПО «Севмаш». Было выполнено более 20 аттестаций для электродов марок 48ХН-2, 48ХН-4, ЭА-48М/22 и др., проволоки сплошного сечения Св-07ХНМД, Св-04Х19Н11М3, порошковой проволоки марки DW-62L (Япония).

4. Аттестация сварочных материалов, применяющихся для строившегося газопровода «НОРДСТРИМ» по дну Балтийского моря в 2010 г. Заявитель аттестации – фирмы Allseas Deepwater Constractors S.A. (Голландия) и Saipem S.p.A (Италия). Одновременно были аттестованы импортные электроды марок Murex Hitrex 8016-G, Bohler Fox FV 65, Filarc 56S, проволока сплошного сечения марок OK Aristorod 13.08, OK Autrod 12.66, OE SD3 1Ni 1/2Mo, S3 Mo TiB, порошковая проволока марки OK Tubrod 15.19, сварочный флюс марки OP 132.

Общий **ежегодный объем аттестаций сварочных материалов, проведенный АЦСМ за период с 2004 по 2012 г.г., представлен на рисунке 4.**

Рисунок 4 *Годовое количество аттестаций сварочных материалов*

Рисунок 5 *Новая площадка НАКС в г. Санкт-Петербург*

Как видно из диаграммы, обычное среднегодовое количество аттестаций составляет порядка 60-63 шт.

В планах АЦСМ-48 на ближайшую перспективу заложено исполнение процедур аттестации на базе новой строящейся площадки (Рисунок 5).

В 2013 г. намечено переоснастить парк сварочного, инструментального оборудования, а также оборудования для механических испытаний и для определения химического состава наплавленного металла, что позволит более оперативно проводить аттестационные работы при одновременном снижении себестоимости затрат на ее осуществление.

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ СПЛАВА ЭП 937 ВИ (ХН40МДБ)

З.А. Сидлин,
д.т.н.,
ООО «ТЕХПРОМ»
г. Москва

Результаты проведенных исследований позволили рекомендовать для сварки резервуаров из сплава ХН40МДБ для концентрированной серной кислоты (96 – 98 %) промышленные электроды марки ОЗЛ-37-2

Сплав ХН40МДБ является новым коррозионно-стойким конструкционным материалом со следующими показателями химического состава, в % мас: C ≤ 0,03; Cr 20-22; Ni 39-42; Mo 5,0-6,5; Cu 1,5-2,2; Si ≤ 0,2; Mn 0,8-1,5; Nb 15%C-0,8; Fe ост; S ≤ 0,02; P ≤ 0,02; Al ≤ 0,2; N2 ≤ 0,03; B расч. 0,02; Ce расч. 0,03. Механические свойства сплава ХН40МДБ: $\sigma_{02} \geq 196$ Н/мм, $\sigma_{в} \geq 490$ Н/мм, $\delta_5 \geq 30\%$.

Сварка конструкций из чисто аустенитного сплава ХН40МДБ сопряжена со значительными трудностями из-за повышенной склонности сварных соединений к образованию горячих трещин в процессе сварки и к межкристаллитной коррозии при эксплуатации. Отсутствие специальных сварочных материалов потребовало исследований по выбору приемлемых материалов (из существующих).

Отечественной промышленностью выпускается ряд марок электродов для сварки коррозионно-стойких сплавов на железоникелевой и никелевой основе [1, 2]. Основные характеристики электродов, наиболее приемлемых для рассмотрения в качестве сварочного материала в данной работе, представлены в таблице 1.

Из рассмотрения данных таблицы 1 видно существенное различие по легированию сплава ХН40МДБ и наплавленного электродного металла (в первую очередь по никелю и молибдену). Представленные в таблице 1 электроды марок ОЗЛ-37-2, 03Л-17У и АНВ-28 предназначены для сварки, в частности, основного технологического оборудования цехов получения серной кислоты, изготавливаемого из коррозионно-стойких железоникелевых сплавов 06ХН28МДТ (ЭИ 943), 03ХН28МДТ (ЭП 516), стали 03Х21Н21М4ГБ (ЭИ 35). При этом наиболее высокой сопротивляемостью металла шва межкристаллитной коррозии, его более высокой стойкостью против образования горячих трещин (в первую очередь межваликовых трещин), большей стабильностью показателей механических свойств металла шва обладают электроды ОЗЛ-37-2. От электродов ОЗЛ-17У и АНВ-28 они выгодно отличаются высокой коррозионной стойкостью в многослойных швах, подверженных повторному влиянию термического цикла сварки.

Рассмотрение электродов ОЗЛ-21 представляло интерес для проверки возможности протекторной защиты от коррозионного разрушения зоны сварного соединения за счет перелегирования металла шва.

Таблица 1 *Основные характеристики промышленных марок электродов (типичные данные)*

Марка электрода	Тип наплавленного металла	Содержание элементов в наплавленном металле, в %										Механические свойства металла шва		
		C	Si	Мп	Cr	Ni	Mo	Fe	Cu	$N_в$	Прочие	бв, Н/мм^2	8,%	KCU, Дж/см^2
ОЗЛ-37-2	03Х24Н25М3Г2Б	0,030	0,45	2,2	24,6	26,8	3,8	ост.	2,9	0,55	-	613	35	155
ОЗЛ-17У	03Х23Н26М3Д3Г2Б	0,035	0,5	2,1	23,4	26,4	3,4	ост.	2.9	0,45	-	587	32	182
АНВ-28	04Х23Н27М4Д3Г2Ф	<0,04	<0,6	2	22,8	26	4,3	ост.	2,8	-	V 1,1	>550	>25	> 100
ОЗЛ-21	02Х20Н60М15В3	0,016	0,24	0,32	19,1	осн.	15,3	0,8	-	-	W3,4	810	28	95
Д-47	03Х25Н29М5Д3Г2Б	0,030	0,45	2,3	24,6	29	5	ост.	2,9	0,55	-	>580	>25	> 100
Wei 320 (Япония)	05Х21Н33Г2М2Д3Б	0,020	0,37	1,98	20,38	34,56	2,41	н.д.	-	0,42	-	582	34,2	н.д.
Сандвик 27.31.4LCu (Швеция)	02Х27Н31М3Д	<0,03	н.д.	н.д.	27	31	3	ост.	1	-	-	540	35	н.д.
NiCr28M (ФРГ)	03Х28Н36М4Д2	<0,03	н.д.	н.д.	28	36	3,8	ост.	1,8	-	-	>550	>25	> 55 Дж (работа разруш.)
UTP4221 (ФРГ)	03Х26Н40М3Д2Б2Т	<0,05	0,75	1,2-3,0	24-28	38-42	2,5-4,0	ост.	1,5-3,0	-	Ti< 1,0	540	30	н.д.

В таблице 1 представлены также данные о зарубежных электродах, состав наплавленного металла которых приближен к составу сплава ХН40МДБ [3]. Однако имеются существенные отличия по легированности как от основного сплава, так и от известных за рубежом английских сплавов Нионел-825 и Карпентер N20NB3 близкого уровня легирования, также предназначенных для эксплуатации в растворах серной кислоты. Электроды Wei 320, дающие наплавленный металл со стабильной аустенитной структурой, требуют при их использовании существенных ограничений по тепловложению. Наплавленный электродами NiCr28M металл обладает удовлетворительными механическими характеристиками и коррозионной стойкостью в серной кислоте. Наиболее близкие к сплаву ХН40МДБ по концентрации никеля электроды УТП 4221 существенно отличны по содержанию хрома, углерода, титана.

В последние годы распространены электроды марки Сандвик 27.3I.4L.Cu и сталь аналогичного состава марки Саникро 28 (фирма Сандвик, Швеция) в качестве наиболее коррозионностойкого и технологичного материала. В этой связи в рамках работы опробовали опытный вариант отечественных электродов аналогичного легирования, представленный в таблице 1 под индексом Д-47.

Следует особо указать, что электроды для сварки стабильно аустенитных сталей и сплавов, предназначенных для эксплуатации в наиболее агрессивных средах, к которым относятся и растворы серной кислоты высоких концентраций, являются технически сложной продукцией, выпускаемой только наиболее квалифицированными фирмами. Составы таких электродов выходят за рамки нормируемых стандартами на покрытые металлические электроды для коррозионностойких сталей и сплавов (ANSJ/AWS 5.4, США; JIS Z 3221, Япония; NFA 81-343, Франция).

С точки зрения сварки высоколегированные стали и сплавы, а тем более стабильно аустенитные, являются сложными металлургическими и технологическими системами. Содержание вредных примесей в них понижено, в то же время для электродных покрытий применяют те же шлако- и газообразущие компоненты, что и для электродов общего назначения. Одной из основных задач при сварке является достижение достаточной стойкости против образования горячих трещин в условиях значительных ограничений по составу и структуре наплавленного металла. Следует учесть существенные отличия по структуре и свойствам листового металлопроката и литого металла шва даже при одинаковом их составе.

Требование обеспечения необходимой коррозионной стойкости металла шва и сварного соединения в целом накладывает жесткие ограничения по типам используемых электродных покрытий. При этом в качестве ведущей выдвигается проблема получения сверхнизкоуглеродистого наплавленного металла. При сварке электродами с основными покрытиями происходит науглероживание наплавленного металла за счет взаимодействия металла с углекислым газом, образующимся при диссоциации карбидов.

Повышенное содержание никеля в сплаве ХН40МДБ еще более усложняет задачу получения сварного соединения требуемого качества. В первую очередь это опять-таки связано с ужесточением требований по концентрации углерода в на-

плавленном металле. Известно, что максимально допустимое содержание углерода является функцией влияния легирующих элементов на его термодинамическую активность. С повышением в аустенитных сталях содержания никеля, а также кремния термодинамическая активность углерода возрастает и вероятность выпадения карбидной фазы, приводящая к появлению склонности к МКК, возрастает [4]. Хром и марганец действуют противоположно. Если при концентрации в стали никеля 10% допустимое содержание углерода составляет 0,02%, то при 40% никеля - всего 0,006% [5], что для металла шва при ручной дуговой сварке недостижимо. Впрочем, это недостижимо и для других методов сварки, т.к. не может быть обеспечено соответствующими сварочными проволоками. Стабилизация металла титаном или ниобием приводит к увеличению склонности к образованию горячих трещин при сварке [6]. Последнее обстоятельство усугубляется развитием в условиях пониженной основности покрытия протеканию кремневосстановительного процесса.

Значащим фактором являются сварочно-технологические характеристики электродных покрытий, существенно зависящие от металлургического типа покрытия и влияющие на свойства реальных сварных соединений.

Отдельным вопросом является необходимость тщательного соблюдения при сварке однофазных аустенитных сталей и сплавов предписанной технологии сварки. Важно отметить, что отрицательные последствия нарушения технологии далеко не всегда выявляются в процессе изготовления изделий, но часто сказываются на эксплуатационной стойкости сварных соединений. Некоторые характерные дефекты, возникающие при отклонениях от оптимальной технологии, такие как микронадрывы, склонность к МКК, пониженная пластичность не видны исполнителям и контролерам. Основные положения по технологии сварки таких сталей и сплавов изложены в отраслевом стандарте химического машиностроения [7], однако технология должна быть конкретизирована с учетом физико-химических свойств свариваемого металла, конструктивных особенностей и назначения сварного изделия, требований к его эксплуатационным характеристикам и пр.

С учетом всего вышеизложенного и проводили выбор электродов и разработку технологии сварки емкостей из сплава ХН40МДБ для серной кислоты концентрацией 96-98%, эксплуатируемых в условиях естественных климатических температур г. Москвы.

Необходимые исследования проводили на листовом сплаве ЭП 937 ВИ (ХН40МДБ) одной плавки толщиной 5 мм. Исходя из анализа сварочных материалов, представленных в таблице 1, для исследований были выбраны электроды промышленных марок ОЗЛ-37-2 и ОЗЛ-21, а также опытного варианта Д-47 на базе электродов ОЗЛ-37-2 с дополнительным легированием наплавленного металла молибденом и никелем. Сварку осуществляли на паспортных режимах тока в нижнем положении, определяя соответствие оперативных свойств электродов требованиям ГОСТ 9466-75. Стойкость металла шва против образования горячих трещин определяли показательными и малометаллоемкими технологическими пробами: "тавровая" и "встречные кратера". Осмотр проб после разрушения проводили с увеличением 5$^{\times}$. Сварку заготовок для изготовления образцов для коррозионных испытаний выпол-

няли с V- образной разделкой кромок под углом 45°, в два прохода, включая подварочный шов. Коррозионные испытания сварных образцов проводили по методу ВУ ГОСТ 6032 при кипячении в течение 48 ч в растворе 50% H_2S0_4 + 40г/л Fe_2 $(S0_4)_3$.

Микроструктуру различных зон сварного соединения изучали на световом микроскопе МИМ-8М при увеличении 300×.

Полученные результаты показали хорошую свариваемость сплава ХН40МДБ при использовании всех проверенных электродов с точки зрения металлургической совместимости и сварочно-технологических свойств электродов. Во всех случаях дефекты в швах в виде трещин, пор, шлаковых включений, непроваров отсутствовали. Выявлены только кратерные трещины в жестких пробах, характерные для полностью аустенитных швов, что не препятствует применению электродов, но требует специальных технологических приемов при сварке и должно быть отражено в технологических рекомендациях. Результаты коррозионных исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2 *Результаты коррозионных испытаний образцов сварных соединений*

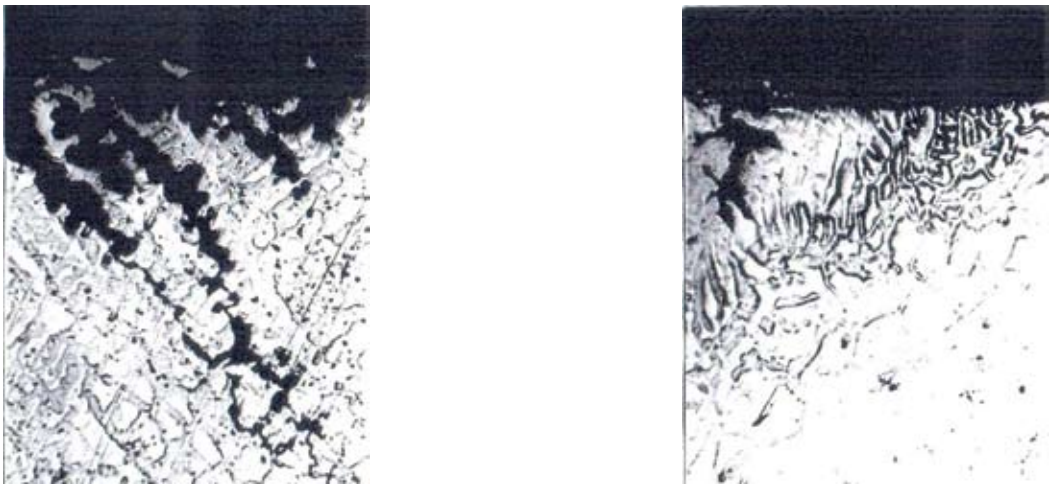
Марка (индекс) электрода	Скорость коррозии, г/м²·ч	Вид коррозии
ОЗЛ-37-2	0,33	Равномерная коррозия
ОЗЛ-21	0,53	Преимущественное разрушение металла шва. МКК по второй фазе
Д-47	0,35	Равномерная коррозия, несколько большая у линии сплавления

Визуальный осмотр образцов показал повышенную коррозию металла швов, выполненных электродами ОЗЛ-21, что совпадает с данными весовых потерь, которые следует оценивать с учетом доли металла шва в сварном соединении.

Микроструктура различных зон сварных соединений представлена на рисунках 1 - 4. Основной металл во всех случаях имеет средне- и мелкозернистую аустенитную структуру (рисунок 1). Следы коррозионного разрушения металла отсутствуют, что свидетельствует о его хорошей свариваемости.

Рисунок 1 *Микроструктура основного металла (после коррозионных испытаний), 300×*

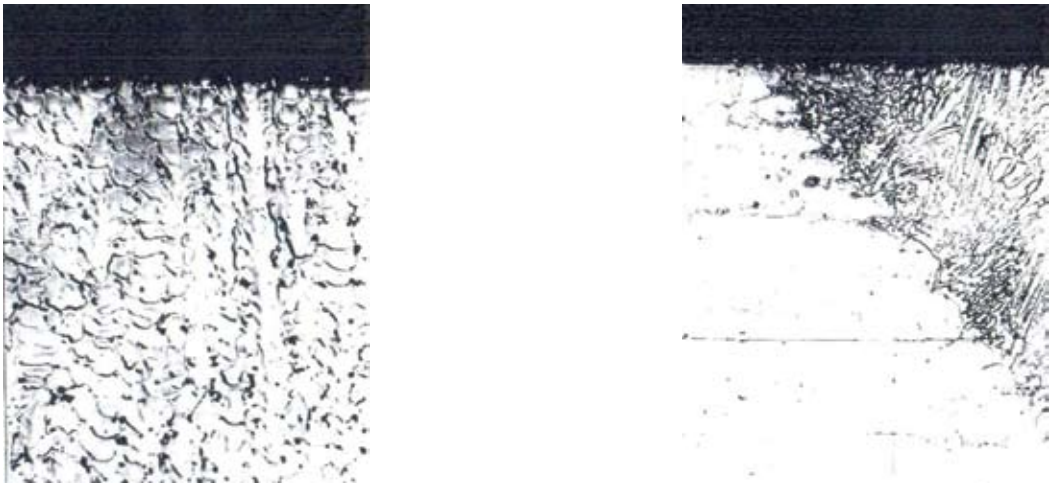
Металл, наплавленный электродами ОЗЛ-21, отличается крупнозернистым строением с дендритной неоднородностью и выделениями второй фазы (интерметаллидов). Именно по этим выделениям развивается межкристаллитная коррозия глубиной до 500 мкм в металле шва и до 100 мкм по линии сплавления на стороне металла шва (рисунок 2).



а *б*

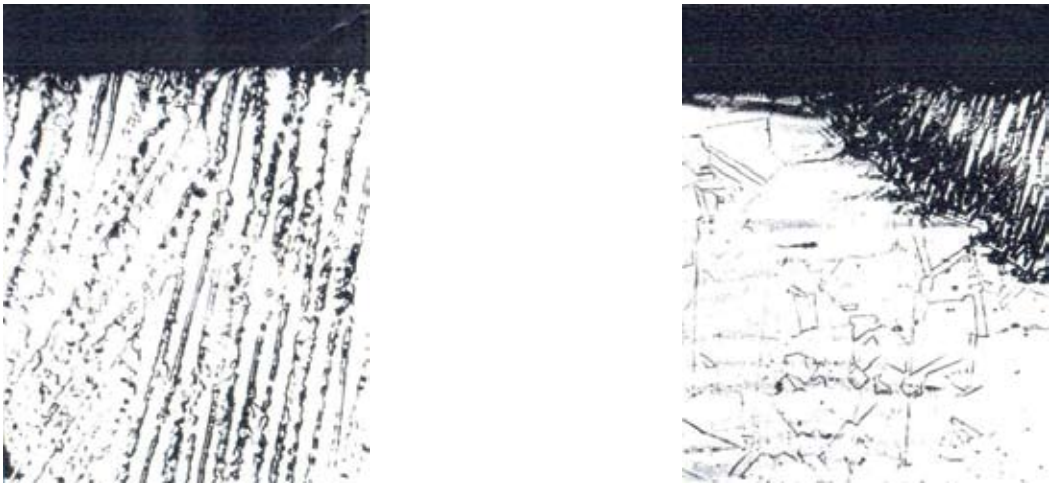
Рисунок 2 *Микроструктура сварного соединения (после коррозионных испытаний), выполненного электродами ОЗЛ-21: а - металла шва; б - линия оплавления*

Наплавленный металл, выполненный электродами ОЗЛ-37-2, обладает крупнозернистым строением с дендритной неоднородностью и незначительными выделениями второй фазы. Отмечена общая равномерная коррозия сварного соединения без признаков межкристаллитного разрушения (рисунок 3). Практически аналогичные результаты дают электроды Д-47. Можно отметить только несколько повышенную травимость металла шва у линии оплавления (рисунок 4).



а *б*

Рисунок 3 *Микроструктура сварного соединения (после коррозионных испытаний), выполненного электродами ОЗЛ-37-2: а - металл шва; б - линия сплавления, 300*[×]



а *б*

Рисунок 4 *Микроструктура сварного соединения (после коррозионных испытаний) выполненного электродами Д-47: а - металл шва; б - линия сплавления, 300×*

Микронадрывы в металле шва и сварного соединения отсутствовали для всех электродов.

Полученные результаты позволили рекомендовать для сварки резервуаров из сплава ХН40МДБ для концентрированной серной кислоты (96 – 98 %) промышленные электроды марки ОЗЛ-37-2, надежно зарекомендовавшие себя в течение ряда лет применения для сплавов типа ХН28МДТ. На базе результатов исследований были разработаны соответствующие технологические указания.

Литература

1. Сварочные материалы для дуговой сварки. Справочное пособие (под ред. Н.Н. Потапова). Т. 2. М. Машиностроение 1993. 768 с.

2. Жизняков С.Н., Сидлин З.А., Ручная дуговая сварка. Материалы. Оборудование Технология. Киев. Экотехнология. 2006. 368 с.

3. Сидлин З.А. Зарубежные высоколегированные сварочные электроды. М. Черметинформация. 1986. 29 с.

4. Могутнов Б.М., Томилин И.А., Шварцман Л.А. Термодинамика железоникелевых сплавов. М. Металлургия. 1972. 328 с.

5. Гуляев А.П., Токарева Т.Б. Влияние углерода и никеля на межкристаллитную коррозию аустенитных хромоникелевых сталей МГОМ, 1971, №2, С. 29-37

6. Гутнов Р.Б., Маслова Т.М., Павлов В.П. и др. Разработка сварочных материалов для коррозионностойких железоникелевых сплавов типа ХН28МДТ. Металлург. 1983. №9. С. 23-24

7. ОСТ 26.260.3-2001 Сварка в химическом машиностроении. М. 2001

ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА ЮРИЯ МИХАЙЛОВИЧА БЕЛОВА

1 октября 2011 г. скончался крупный специалист в области разработки сварочных материалов профессор Юрий Михайлович Белов.

Ю.М. Белов родился 18.05. 1927 г. в г. Самаре. В 1952 г. после окончания Ленинградского института водного транспорта он поступил на Кировский завод на должность мастера сварочного цеха в турбинном производстве, затем был переведен в отдел главного сварщика на должность начальника лаборатории. Работая на заводе, Юрий Михайлович приобрел большой производственный и жизненный опыт, а также необходимые знания и желание заниматься научно-исследовательской работой.

С 1958 по 1978 г.г. Юрий Михайлович плодотворно трудился в Центральном научно-исследовательском институте материалов (ЦНИИМ, г. Ленинград) вначале под руководством К.В. Петраня в должности ведущего инженера – руководителя группы наплавки, а с 1969 г. возглавлял лабораторию сварки, затем отдел сварки.

В 1967 г. под руководством Ю.М. Белова были разработаны электроды марки УОНИ-13/4Х10В5МФ, предназначенные для наплавки кузнечно-прессового инструмента. Наплавка этими электродами рабочих поверхностей вырубных штампов повысила ресурс их работы в 8 раз. Эти электроды и технология наплавки с их применением внедрены на многих заводах, в том числе: «Большевик», «Кировском», «Турбинных лопаток», «Невском машиностроительном», «Баррикады», «Ижорском», «Пермском машиностроительном» и др. В 1965 г. Ю.М. Белов защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Исследование автоматической наплавки электродной лентой под флюсом». Разработанный по теме диссертации флюс марки ФК-45/5Х10В5МФА для автоматической наплавки лентой из стали 20Х13 обеспечивает характеристики наплавленного металла близкие к получаемым при использовании электродов УОНИ-13/4Х10В5МФ. Технология автоматической наплавки кузнечно-прессового инструмента массой до 12 тонн внедрена на тех же заводах, а также на Горьковском машиностроительном заводе при наплавке валков диаметром 1800 мм для раскатного стана и крупногабаритных барабанов для предприятий бумажной промышленности и при производстве полимеров.

В 1969 г. Ю.М. Белов вместе со своим аспирантом (впоследствии кандидатом технических наук) В.А. Красавчиковым разработали новые электроды для наплавки уплотнительных поверхностей запорной арматуры, работающей в средах высокой агрессивности, при температурах до 600° С взамен дорогостоящих и дефицитных электродов на кобальтовой основе, которые успешно внедрены на ряде заводов при производстве оборудования для атомной энергетики и в других отраслях промышленности. Новым электродам была присвоена марка УОНИ-13/ БК. При этом экономический эффект от внедрения указанных электродов только на одном предпри-

ятии «Знамя труда» (г. Санкт-Петербург) в 1970 – 1972 г.г. составил 1,5 миллиона рублей.

Одновременно с работой в области наплавки Юрий Михайлович принимал активное участие во внедрении аргонодуговой сварки сверхвысокопрочных сталей СП-28 и СП-33 при создании сосудов высокого давления на Горьковском машиностроительном заводе и на ленинградском заводе «Большевик», а после ухода на пенсию К.В. Петраня возглавил научное направление по разработке технологии сварки этих сталей.

В 1978 г. Ю.М. Белов перешел на преподавательскую работу во ВТУЗ при Ленинградском металлическом заводе, где создал кафедру сварки. С 1979 по 2007 г. кафедрой под его руководством было выпущено 525 инженеров, которые трудятся на многих предприятиях страны, таких как Металлический завод и Ижорские заводы в г. Санкт-Петербурге, «Атоммаш» в г. Волгодонске и др., а также в научно-сследовательских институтах, в том числе в ОАО «ЦНИИ КМ «Прометей» (г. Санкт-Петербург).

Последние два десятилетия трудовая деятельность Юрия Михайловича Белова была тесно связана с Санкт- Петербургским Электродным заводом.

ЗАО «Электродный завод» - один из старейших производителей сварочных электродов, образованный в 1944 году для обеспечения предприятий Министерства Энергетики и Электрификации СССР качественной продукцией. В 1970 г. на заводе был налажен выпуск электродов УОНИ-13/БК, и более сорока лет эти электроды используются при строительстве и ремонте тепловых и атомных станций. С тех пор тесное сотрудничество и дружеские отношения связывали Юрия Михайловича с сотрудниками завода. А в середине 90-х годов он стал ведущим инженером-технологом завода., совмещая эту работу с руководств кафедрой сварки на Металлическом заводе.

С этого времени творческая жизнь Юрия Михайловича была посвящена разработке новых сварочных материалов, в которых нуждалась промышленность. В те годы многие предприятия страны не имели возможности приобретать новое оборудование и нуждались в наплавочных электродах для восстановления изношенной техники. Юрий Михайлович разработал серию электродов для наплавки:

- деталей из углеродистых сталей, работающих в условиях значительных ударных нагрузках, или в условиях значительного абразивного износа (ЭЛЗ-Н2);
- для восстановления штампов горячей штамповки (ЭЛЗ-Н3);
- электроды нового поколения с улучшенными сварочно-технологическими свойствами для наплавки высоколегированных сталей (ЭЛЗ-НВ-1 и ЭЛЗ-НВ-4).

Одновременно с наплавочными электродами Юрий Михайлович работал над созданием электродов на базе рутилово-основного покрытия для сварки нержавеющих сталей с целью улучшения их сварочно-технологических свойств. В результате этой работы было освоено производство электродов марок: ЭА-400/10У, ЭА-400/10Т, ЭА-395/9, ЦЛ-11, НЖ-13, ОЗЛ-6, обладающих легким зажиганием и легким повторным возбуждением дуги, незначительным разбрызгиванием, что значительно об-

легчает труд сварщиков, способствует повышению производительности сварочных работ. К достоинству электродов так же относится отличное формирование шва, близкое к качеству шва, выполненного аргонодуговой сваркой. По всем свойствам электроды соответствуют лучшим мировым аналогам.

Особое место в научной и производственной деятельности профессора Белова занимает разработка и внедрение в производство агломерированных флюсов. В 60…70 годах Юрий Михайлович много работал в этой области, но к сожалению в то время промышлнность использовала в основном плавленые флюсы. И только в начале XX века на электродном заводе был реализован научный потенциал, ранее накопленный опыт в создании керамического флюса. Под его руководством проектируется участок по производству агломерированного флюса, разрабатывается и выпускается новое промышленное оборудование, внедряются передовые технологии. Завод приступает к выпуску сразу нескольких марок наплавочного флюса для выполнения восстановительной наплавки оборудования: ЗЛЗ-ЖСН-5, ЗЛЗ-ФКН-45, ЗЛЗ-ФКН-1/55(Б} и сварочного флюса для сварки углеродистых и низколегированных сталей: ЭЛЗ-ФКН-1/55(ТМ). Флюс находит применение в разных отраслях промышленности: при наплавке поверхностей бурильных труб, крановых колес, плунжеров прессов, при наплавке деталей машин непрерывной разливки стали, уплотняющих поверхностей запорной арматуры. Работая на заводе, Юрий Михайлович продолжал поддерживать тесную связь с кафедрами сварки ведущих ВУЗов города, с научно-исследовательскими институтами. Он руководил дипломными проектами студентов, рецензировал научные работы и диссертации, разрабатывал и внедрял новые технологии сварки под флюсом, консультировал молодых ученых и опытных инженеров-сварщиков, принимал участие в разработке отраслевых стандартов по сварке, в организации конференций, выставок, семинаров, Особую гордость Юрий Михайлович испытывал за своих учеников. Только на электродном заводе трудятся четверо его выпускников, которые уже зарекомендовали себя квалифицированными специалистами в области сварки и успешно руководят участком по производству флюсов, электродным цехом, принимают активное участие в разработке новых марок сварочных материалов, реконструкции завода, внедрении нового современного оборудования.

Своими делами и высокими человеческими качествами Юрий Михайлович Белов при жизни заслужил глубокое уважение в профессиональной среде и оставил по себе светлую память.

В.Б. Вихман, М.И. Кучерова, С.Н. Фролов

ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЙ БЕСКОБАЛЬТОВЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ И СКОЛЬЗЯЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАПОРНОЙ И РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АРМАТУРЫ, РАБОТАЮЩЕЙ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ДО 650°С

Ю.М. Белов,
ведущий специалист, к.т.н.,
Ю.Б. Семендяев,
инж.,
С.Н. Фролов,
инж.
ЗАО «Электродный завод»
г. Санкт-Петербург

Приведены результаты НИР, ОКР и эксплуатационной проверки высокохромистого, бескобальтового материала для наплавки уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры и других деталей оборудования. Показано, что он обладает высокими физико-механическими, сварочно-технологическими свойствами и может применяться взамен кобальтового стеллита, электродов ЦН-12М и др. в арматуростроении, теплоэнергетике и других отраслях промышленности.

Надежная эксплуатация современного оборудования и трубопроводов энергетической, химической, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности невозможна без применения процесса наплавки их рабочих поверхностей коррозионно- и износостойкими материалами.

В настоящее время для наплавки уплотнительных поверхностей арматуры, пар трения скольжения различных машин, насосов работающих в средах высокой агрессивности (теплоносители, кислоты и их смеси, щелочи и т.д.) применяется кобальтовый стеллит марки ВЗК, а также электроды марок ЦН-12М и ЦН-6Л [1].

Основным недостатком этих наплавочных материалов является высокая склонность к образованию горячих и холодных трещин, которая вызывает необходимость производить наплавку с предварительным и сопутствующим подогревом до 650 – 700º С, а после наплавки охлаждать детали с печью от 700º С до комнатной температуры + 20º С. При наплавке стали типа 18-8 такой термический режим практически всегда приводит к появлению ножевой коррозии в зоне сплавления наплавленного и основного металла. В результате этого наплавленные детали нередко выходят из строя после 10 – 18 месяцев эксплуатации. Кроме того, наплавленный металл весьма трудно поддается механической обработке. При обнаружении дефектов в наплавленном слое удаление их во многих случаях невозможно. Кобальтовый стеллит весьма дорог, а наличие его в арматуре работающей в первом контуре АЭС нежелательно из-за возможности образования радиоактивного изотопа Co^{60} [2].

В связи с изложенным был проведен большой объем НИР и ОКР по созданию

наплавочных материалов, которые не имели бы перечисленных выше недостатков, т.е. отвечали следующим требованиям:

- отсутствие необходимости в предварительном и сопутствующем подогреве деталей в процессе наплавки и сложной термической обработки их после наплавки;
- материал для наплавки уплотнительных поверхностей арматуры, работающей в контакте со средами высокой агрессивности при температуре до 350º С не должен содержать дефицитных легирующих элементов, и, одновременно, гарантировать коррозионную стойкость не ниже, чем у кобальтового стеллита;
- твердость наплавленного металла в исходном состоянии после наплавки должна быть не выше 30 HRC, а после простой термической обработки от 40 до 56 HRC в зависимости от требований заказчика;
- отпускоустойчивость наплавленного металла должна быть до 650º С включительно.

В результате обширных многолетних исследований был определен состав низкоуглеродистого высокохромистого бескобальтового металла, который при наплавке не требовал никакого предварительного и сопутствующего подогрева, а также последующего замедленного охлаждения наплавленных деталей с печью [3], [4], [5].

Было установлено что, для получения слоя наплавленного металла оптимального химического состава, без горячих и холодных трещин, а также других дефектов, его ручная электродуговая– и автоматическая наплавка под слоем флюса должны выполнятся по принципу – *чем холоднее наплавляемая деталь, тем лучше.*

Для получения твердости такого наплавленного металла в диапазоне от 30 до 58 HRC требуется выполнение простой термической обработки – отпуск: нагрев в диапазоне температур от 620º С до 840º С, выдержка при температуре от 2 до 10 часов, последующее охлаждение на воздухе.

Результаты коррозионных испытаний наплавленного металла оптимального химического состава в различных агрессивных средах приведены в таблице 1. Они показывают, что разработанный материал относится к группе «совершенно стойких» по ГОСТ 5272 – 80. Его коррозионная стойкость значительно выше, чем стеллита.

Испытания образцов на термическую выносливость по режиму: нагрев до 300º С в печи, охлаждение в проточной воде с температурой +20º С показали, что после 200 циклов трещин в наплавленном слое металла не образуется.

Был также проведен большой объем испытаний наплавленного металла на термическое старение при температурах 350 – 400 – 450 – 500 – 550 – 650º С с выдержкой 5000 часов. Результаты измерения твердости наплавленных образцов после различных выдержек при температуре 450 и 650º С приведен в таблице 2.

Полученные результаты испытаний свидетельствуют об отсутствии структурных и фазовых превращений в наплавленном металле, приводящих к изменению его твердости в процессе отпуска при указанных выше температурах в течении 5000 часов.

Таблица 1 *Результаты коррозионных испытаний наплавленного стеллита и высокохромистого бескобальтового наплавленного металла*

Наплавленный материал	Агрессивный продукт	Фаза продукта	Скорость коррозии, г/м²час		
			30 суток	90 суток	80 суток
Стеллит	Концентрированная азотная кислота	газовая	0,006	0,008	–
		жидкая	0,008 0,020	0,098 0,021	–
Высокохромистый наплавленный материал		газовая	0	–	0
		жидкая	0	–	0
Стеллит	Смесь азотной и плавиковой кислот	газовая	0,0006 0,0019 0,0109	–	0,0002 0,0010 0,0017
		жидкая	0,0055 0,0079	–	0,0011 0,0020
Высокохромистый наплавленный материал		газовая	0 0,0008	–	0,0003 0,0004
		жидкая	0	–	0,0004 0,0005

Таблица 2 *Результаты испытаний высокохромистого бескобальтового наплавленного металла на термическую стабильность.*

Исходная твердость образца наплавленного металла, HRC	47,6	46,0	48,0	48,0	47,5	48,0	48,0	48,0
Время выдержки образца при температуре испытания, час	10	30	50	100	500	1000	3000	5000
Твердость наплавленного металла после выдержки при 450º С, HRC	46,0	48,0	47,6	46,0	49,0	48,5	46,5	47,0
Твердость наплавленного металла после выдержки при 650º С, HRC	–	47,5	49,5	47,5	49,0	47,5	49,5	48,0

Детальные металлографические исследования образцов также не выявили каких-либо структурных изменений в наплавленном металле, что является дополнительным подтверждением высокой термической стабильности высокохромистого бескобальтового наплавленного металла.

В соответствии с программой испытаний оптимального химического состава материала для оценки его работоспособности и коррозионной стойкости в условиях близких к эксплуатационным, были изготовлены опытно-промышленные партии вентилей с условным проходом Ду = 50 мм и клиновых задвижек с условным проходом Ду = 80 мм, уплотнительные поверхности которых были наплавлены этим материалом.

После наработки 3000 циклов закрытий и открытий для вентилей и 4200 циклов для клиновых задвижек (шестикратный ресурс) – вентили и задвижки были герметичны при крутящем моменте 0,5 Н × м, что полностью отвечает требованиям ТУ на арматуру. Задиров и налипаний металла на уплотнительных поверхностях обнаружено не было.

Коррозионные испытания вентилей и задвижек в рабочих средах также не выявили каких-либо коррозионных разрушений как уплотнительных поверхностей так и зоны сплавления наплавленного и основного металла деталей из стали 0Х18Н10Т.

На основании положительных результатов проведенного комплекса испытаний высокохромистый бескобальтовый материал был рекомендован для наплавки уплотнительных поверхностей арматуры, работающей в различных кислотах и их смесях, щелочах, а также в среде пара с температурой 600º С. Предприятиям – изготовителям и потребителям арматуры с уплотнительными поверхностями наплавленными этим материалом была выдана гарантия на ее надежную работу в течении 10 лет, что в 2,5 раза превышает срок службы уплотнительных поверхностей из кобальтового стеллита марки В3К.

Для получения указанного выше наплавленного материала созданы и выпускаются серийно электроды для ручной дуговой наплавки марок “УОНИ – 13/Н1БК”, “ЭЛЗ – НВ1” и “ЭЛЗ – НВ4”. Для автоматической электродуговой наплавки под слоем флюса электродной проволокой создан керамический (агломерированный) флюс марки “ЭЛЗ – ФКН – Х32Н8”

Указанные электроды включены в отраслевой стандарт «СТ ЦКБА 053-2008». Электроды аттестованы Морским регистром судоходства РФ и НАКС. Они используются в производстве арматуры на Курганском, Благовещенском арматурных заводах, на Зеленодольском судостроительном заводе им. А. М. Горького, фирмой «Галс» (Санкт-Петербург) и др. За десятилетний период применения высокохромистого наплавочного материала – заменителя кобальтового стеллита марки В3К в промышленности, замечаний по его работоспособности в различных условиях эксплуатации не было.

Опытно-конструкторские работы, проведенные предприятиями различных отраслей промышленности показали, его большие возможности для решения многих задач стоящих перед ними. Например: было установлено и многократно подтверждено, что высокохромистый наплавочный материал может широко использоваться не только для наплавки уплотнительных поверхностей арматуры, изготовленной из стали 0Х18Н10Т, но и для арматуры, изготовленной из углеродистых и теплоустойчивых сталей с выполнением переходного слоя проволокой марки Св-07Х25Н13 (по ГОСТ 2246) под флюсом марки ЭЛЗ-ФКН-17Б (по ТУ 1718 – 070 – 11142306 – 2010).

Выводы

1. Технологичный высокохромистый бескобальтовый коррозионностойкий наплавочный материал позволяет решить задачу повышения качества и эксплуатационной надежности выпускаемой предприятиями арматуры, работающей в различных агрессивных средах.

2. Разработаны на базе этого материала и серийно выпускаются электроды и керамические флюсы для ручной и автоматической электродуговой наплавки рабочих поверхностей арматуры и других деталей оборудования. Они надежно обеспечивают хорошие санитарно-гигиенические условия труда сварщиков за счет полного исключения высокотемпературного предварительного и сопутствующего подогрева деталей в процессе их наплавки, что также способствует повышению качества выпускаемой продукции.

Литература

1. Гуревич Д.Ф., Шпаков О.Н., Соболев О.А. «Промышленная арматура для химически активных сред», Санкт-Петербург, Химия. 1993, 418с.

2. «Наплавочные материалы стран - членов СЭВ», Каталог. Международный центр научной и технической информации, Киев-Москва, 1979, 618с.

3. Химушин Ф.Ф. «Жаропрочные стали и сплавы». Издание 2 М: Металлургия. 1969.

4. Белов Ю.М., Красавчиков В.А. «Новый материал для наплавки уплотнительных поверхностей арматуры, работающей в агрессивных средах», Ленинград, ЛДНП. 1972

5. Белов Ю.М., Красавчиков В.А. и др. Авторское свидетельство №238692, Электрод для наплавки.

ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА ЮРИЯ МИХАЙЛОВИЧА БЕЛОВА

С процессом создания сварочных электродов и сварочных материалов неизменно связано имя одного из старейших сварщиков Санкт-Петербурга профессора, кандидата технических наук Юрия Михайловича Белова. Всю свою научную творческую жизнь он отдал сварке - работал в ЦНИИМе, много лет учил и взращивал студентов на кафедре сварки во ВТУЗе, которую он возглавлял, работал на ЗАО "Электродный завод".

Много лет он отдал общественной работе в секции "Сварочное производство" Ленинградского дома научно - технической пропаганды , занимаясь ею с большим энтузиазмом, любовью и бескорыстием. Это были самые разнообразные формы работы: выездные мероприятия на ведущие предприятия Ленинграда и Ленинградской области с целью наглядного обучения и знакомства с лучшим опытом в сварочном

В первом ряду (слева на право): А.Е. Вайнерман, Р.К. Козлов, Ю.М. Белов, Л.Б. Тихонова, В.Н. Земзин, И.А. Закс. Во втором ряду: Ю.Б. Флоринский, Г.Г. Утлинский, В.Ю. Шишкин, Б.Т. Тимофеев, А.Д. Диомидовский.

производстве ; ежемесячные теоретические семинары. в т.ч. постоянно действующий семинар «Актуальные проблемы в сварке», на который свободно могли прийти все желающие с любого предприятия или ВУЗа и задать все интересующие его вопросы. Семинар шел в форме свободной дискуссии. Юрий Михайлович издавал через ЛДНТП брошюры и наглядные пособия в помощь производству, с удовольствием оказывал консультации, был человеком очень четким и конкретным , никогда не опаздывал и относился с уважением к знаниям и умению других людей. Его не стало 1 октября прошлого года, но в сердцах многих и многих его воспитанников, соратников и коллег он всегда останется вот таким жизнеутверждающим, и мудрым, как он выглядит на фото в ЛДНТП.

Л.Б. Тихонова, уч. секретарь,
Санкт-Петербургское Общество Научно-технических знаний
г. Санкт-Петербург

ОТРАБОТКА РЕЖИМОВ ЭЛС ВЫСОКОПРОЧНЫХ И ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ СО СКВОЗНЫМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ И ПО ЗАЗОРУ С ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКОЙ

Н.В. Александров
к.т.н.
С.Н. Курта,
Н.В. Вовченко,
С.И. Шекин
к.т.н.
А.А. Круглова
к.т.н.
ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»
г. Санкт-Петербург

Результаты исследований и испытаний показывают перспективность разработки технологии ЭЛС для хладостойких высокопрочных сталей типа АБ2 и высокопрочных среднеуглеродистых сталей типа 38Х2Н2МА.

Важнейшей составной частью реализации государственных программ освоения запасов углеводородного сырья на морском шельфе Российской Федерации является создание современных средств освоения шельфа, которые предусматривают использование сварных конструкций и оборудования из хладостойких и высокопрочных сталей типа 40Х2МА.

В настоящее время для изготовления стальных конструкций и сварных изделий машиностроения наиболее широко используется дуговая сварка плавлением. Дуговая сварка позволяет решать большинство стоящих перед машиностроением и строительством задач, но она не всегда обеспечивает высокую производительность сварочных работ и качество сварных узлов, в частности при изготовлении толстолистовых конструкций и изделий из высокопрочных среднеуглеродистых сталей типа 40Х2МА. Получение качественных сварных соединений сталей данного класса со свойствами, равноценными свойствам основного металла, связано со значительными трудностями. Типовые технологии дуговой сварки, как правило, предусматривают предварительный и сопутствующий подогрев свариваемых изделий, а также последующую термообработку сварного соединения.

Повышение производительности сварочных работ при изготовлении толстолистовых конструкций из сталей типа АБ2 и изделий из высокопрочных среднеуглеродистых сталей, снижение их стоимости и повышение качества сварных соединений может быть достигнуто применением электронно-лучевой сварки (ЭЛС).

В рамках Федеральной целевой программой «Развитие гражданской морской техники» на 2009-2016 годы в ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей проводятся опытно-конструкторские работы по отработке технологии электронно-лучевой сварки

хладостойких и высокопрочных толстолистовых сталей. Целью настоящей работы является:

- снижение стоимости сварочных работ, повышение качества и производительности сварки деталей из хладостойких сталей применительно к конструкциям нефтедобывающих платформ и изделий машиностроения;
- выполнение работ по технологическому направлению «Судостроительное производство» целевой программы «Развитие гражданской морской техники» на 2009-2016 годы.

Повышение производительности сварочных работ, снижение их стоимости и повышение качества сварных соединений может быть достигнуто применением ЭЛС. ЭЛС относится к методам сварки высококонцентрированными источниками энергии и обладает широкими технологическими возможностями, позволяя соединять за один проход металлы и сплавы толщиной от 0,1 мм до 400 мм. Развитие оборудования и технологии ЭЛС позволяет ей решать всё более сложные задачи в различных областях техники. Высокая плотность мощности в электронном пучке (108 – 1010 Вт/м^2) обеспечивает глубокое проплавление металла и позволяет производить однопроходную сварку металла больших толщин без использования присадочного материала. Проведение процесса сварки в вакууме (10^{-2} – 10^{-3} Па) обеспечивает защиту сварочной ванны и дополнительное рафинирование металла сварного шва.

Работы проводились на установке ЭЛУ-20Б, которая имеет следующие технические характеристики:

Внутренние размеры вакуумной камеры, мм
Длина 5000
Ширина 2800
Высота 3000
Рабочее давление, Па (мм.рт.ст.) ..... 6,7*10 $^{-3}$ Па(5*10^{-5})
Вес сварных металлоконструкций, кг ..... ≤ 5000
Энергоблок ЭЛА-60Б имеет номинальную мощность 60 кВт

Проведен анализ и выбор технологических и конструктивных решений для реализации технологии электронно-лучевой сварки применительно к элементам конструкций и оборудованию нефтедобывающих платформ из высокопрочных хладостойких судостроительных сталей типа АБ2 и высокопрочных среднеуглеродистых сталей в диапазоне толщин 10 – 150 мм.

Для отработки режимов сварки без добавления присадочного материала были подготовлены образцы стали АБ2-2 (10ХН3МД) и стали 38Х2Н2МА на которых были сделаны пробные провары электронным лучом на установке ЭЛУ-20Б (рисунок 1).

Рисунок 1 *Макрошлифы пробных проваров стали АБ2-2 и 38Х2Н2МА*

Для качественной оценки результатов было проведено исследование макро- и микроструктуры сварных соединений сталей АБ2-2 и 38Х2Н2МА, показавшее отсутствие протяженных дефектов типа трещин при наличии преимущественно мартенситной структуры в сварных швах, формирующейся в условиях высокой скорости теплоотвода в основную массу металла при термическом цикле ЭЛС (рисунки 2 и 3).

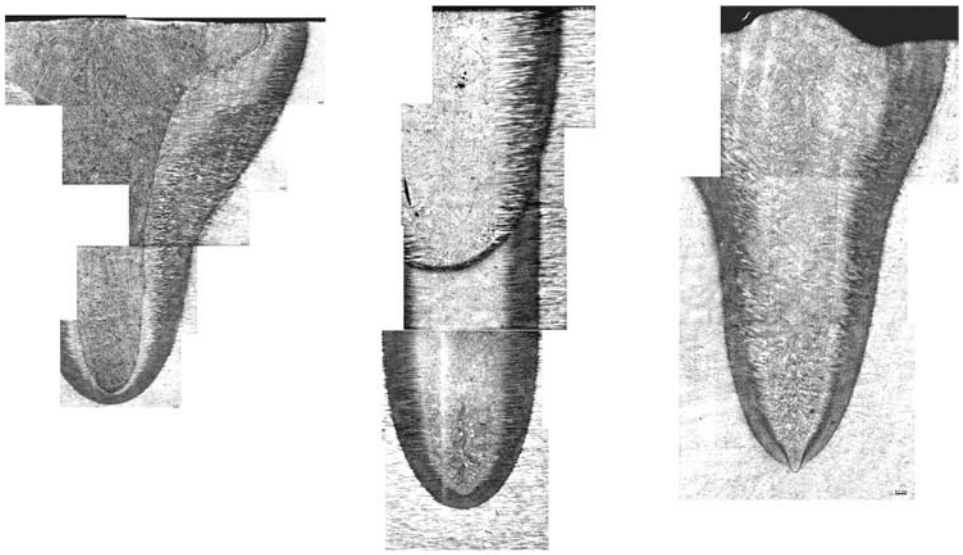


Рисунок 2 *Типичные макрошлифы сварных швов сталиАБ2-2, толщиной 100мм*

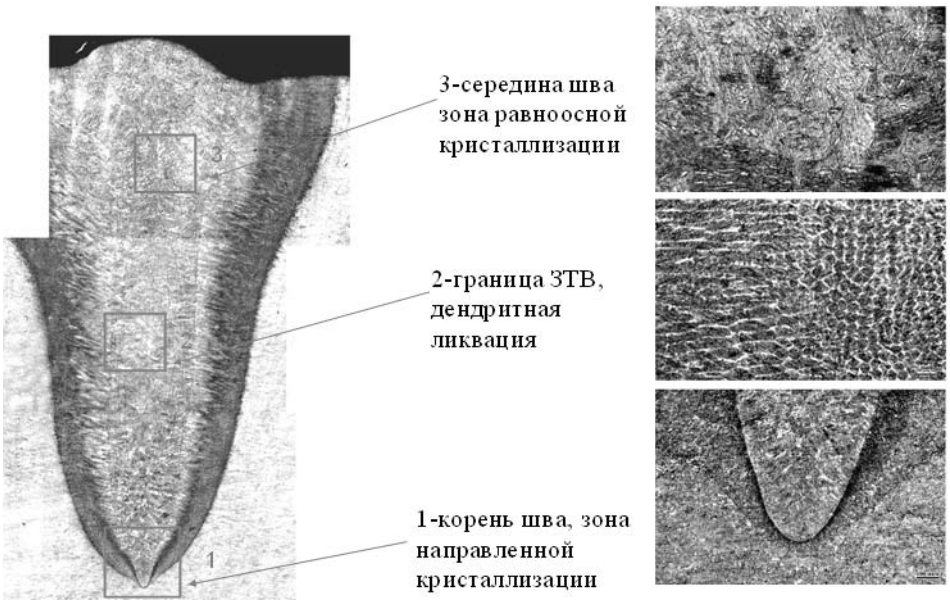


Рисунок 3 *Микроструктура сварного шва стали АБ2-2*

На основании металлографических исследований были выбраны режимы сварки, обеспечивающие полный провар металла и отсутствие дефектов формирования (Рисунки 4 и 5).

Рисунок 4 *Макрошлиф сварного соединения стали АБ2-2 толщиной 100 мм (сварка без разделки кромки)*

Была проведена предварительная отработка режимов сварки стали АБ2-2 с разделкой свариваемых кромок и использованием присадочного материала. Для подачи присадочного материала (07ХН3МД) был разработан механизм подачи (рисунок 6).

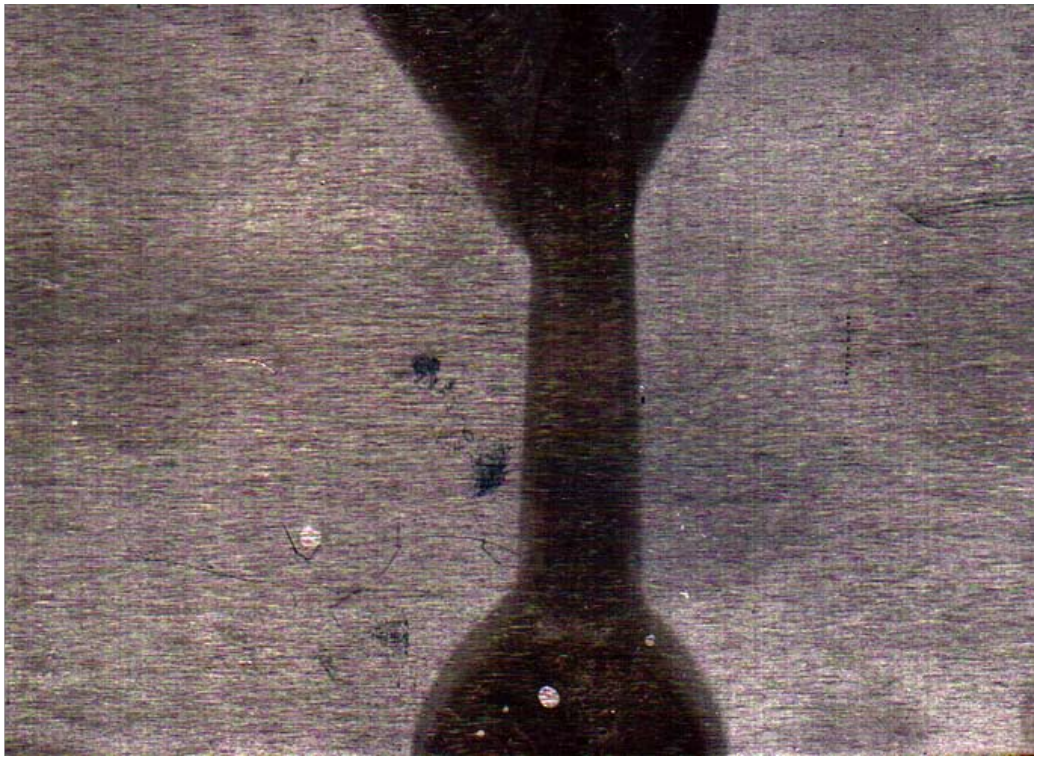


Рисунок 5 *Макрошлиф сварного соединения стали 38Х2Н2МА толщиной 50 мм*

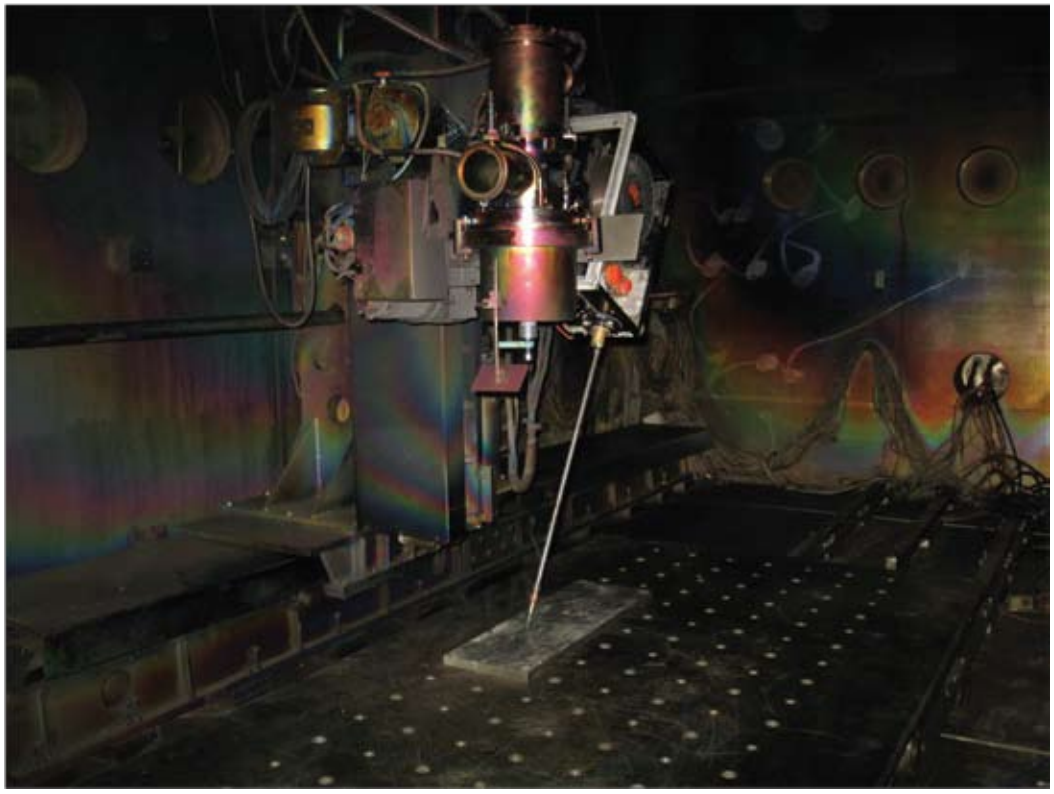


Рисунок 6 *Механизм подачи присадочной проволоки, установленный на манипулятор электронной пушки*

Сварку с присадкой используют для предотвращения неполноразмерности шва (при больших зазорах в стыке) или поддержания в металле шва заданной концентрации легкоиспаряющихся элементов. В качестве присадки применяют в основном проволоку диаметром 0,8... 1,2 мм, подаваемую в сварочную ванну позади электронного пучка под углом 15...45° к его оси или укладываемую на стык перед началом сварки. Для материалов больших толщин сварка с присадкой является особенно актуальной. Использование присадки позволяет произвести соединение деталей толщиной до 150 мм с разделкой свариваемых кромок. В процессе отработки режимов электронно-лучевой сварки в лабораторных условиях механизм подачи сварочной проволоки был реализован на основе механизма подачи сварочной проволоки, используемой при механизированной сварке плавящимся электродом.

При разработке технологии ЭЛС высокопрочных хладостойких судостроительных сталей, а также высокопрочных сталей типа 40Х2МА необходимо учитывать, что данные материалы в процессе изготовления приобретают остаточную намагниченность, которая приводит к ряду негативных явлений при ЭЛС, в частности, к искривлению траектории электронного пучка и связанному с этим непровару стыка по всей толщине.

Компенсировать уход электронного пучка от стыка возможно лишь при сварке тонколистовых материалов при условии однородного распределения намагниченности вдоль стыка с помощью отклоняющей системы сварочной электронной пушки. В остальных случаях необходимо размагничивание изделия. Для преодоления указанного недостатка был выбран метод, заключающийся в намагничивании изделий реверсивным постоянным током в пределах гистерезисной петли с убывающей амплитудой тока намагничивания в катушке тороида.

Были изготовлены пробные образцы сварных швов стали АБ2-2, толщиной 100 мм с разделкой. Форма разделки и макрошлиф представлен на рисунке 7. Сред-

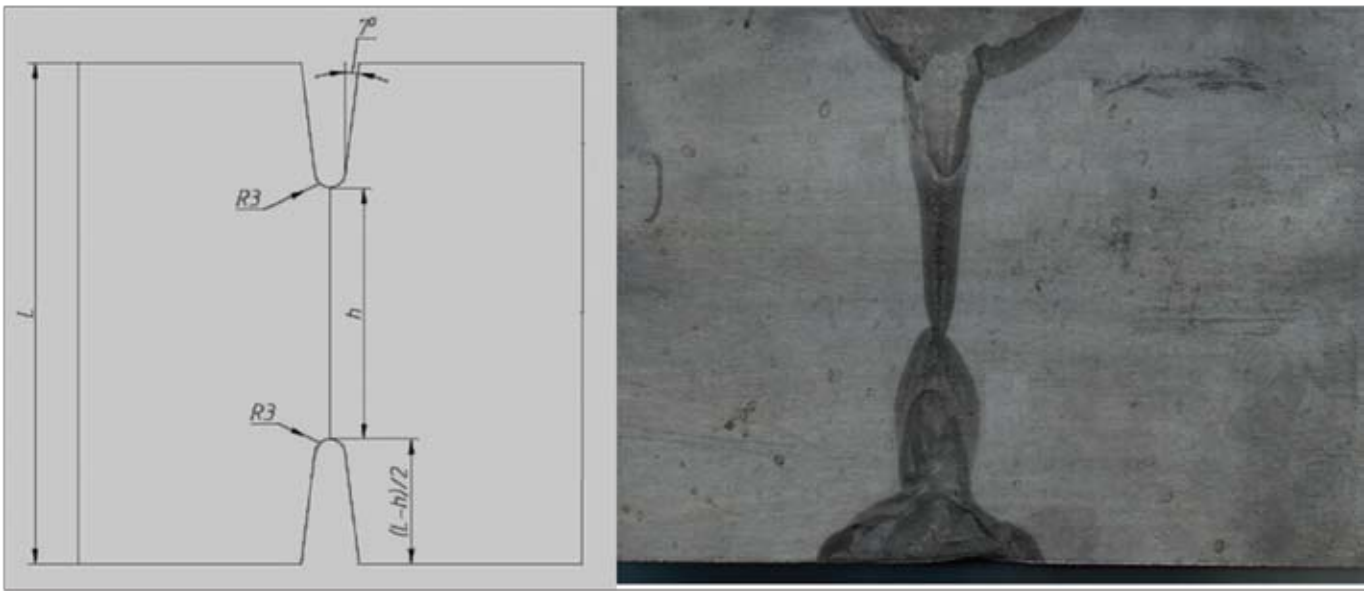


Рисунок 7 *Схема разделки и макрошлиф сварного соединения стали АБ2-2 толщиной 100мм, выполненного с присадочной проволокой*

няя часть разделки (h=50 мм) сваривалась электронным лучом за один проход. Затем с помощью присадочного материала заполнялись чаши разделок.

При заполнении разделки был применен способ круговой развертки электронного луча. Формирование при развертке усредненного распределения плотности мощности электронного пучка поперек шва с «провалом» в приосевой области уменьшает амплитуду корневых пиков и расширяет корень шва. Также применение развертки существенно облегчает решение проблемы «прицеливания» электронного луча в зону подачи присадочного материала (Рисунки 8 и 9).

Рисунок 8 *Отработка подачи присадочной проволоки в разделку*

Рисунок 9 *Кольцевая развертка электронного луча*

После изготовления сварных образцов были проведены испытания соединений с применением неразрушающих и разрушающих методов контроля, в том числе испытания на ударный изгиб при температуре минус 60° С.

Сварные образцы были подвергнуты рентгенографическому контролю по ГОСТ 7512. Результаты контроля удовлетворительные.

При испытании сварных соединений стали АБ2-2 на растяжение с использованием малогабаритных цилиндрических образцов с поперечным швом (тип II по ГОСТ 6996) было установлено, что металл шва равнопрочен основному металлу. Работа удара металла шва, выполненного без разделки кромок, полученная при испытаниях образцов Шарпи (тип IX по ГОСТ 6996) при температуре минус 60º С, находится на уровне работы удара основного металла. Таким образом, по прочности и работе удара металл шва сварных соединений хладостойкой стали АБ2-2 удовлетворяет требованиям Российского Морского Регистра Судоходства для сварных соединений категории 5Y62.

Работа удара металла шва сварного соединения из высокопрочной стали марки 38Х2Н2МА, выполненного без разделки кромок, при испытаниях образцов Менаже (тип VI по ГОСТ 6996) при температуре плюс 20º С составляет в среднем 43,8 Дж. и удовлетворяет требованиям Российского Морского Регистра Судоходства для сварных соединений категории 5Y62.

Работа удара металла шва сварного соединения из хладостойкой стали марки АБ2-2, выполненного с разделкой кромок, при испытаниях образцов Шарпи (тип IX по ГОСТ 6996) при температуре минус 60º С оказалась ниже требований Российского Морского Регистра Судоходства для сварных соединений категории 5Y62 на 13%. Для повышения этой характеристики требуется проведение дополнительных исследований.

Химический состав металла шва сварного соединения стали марки АБ2-2 толщиной 100 мм, выполненного без разделки кромок, по основным значащим элементам соответствует основному металлу.

Результаты исследований и испытаний показывают перспективность разработки технологии ЭЛС для хладостойких высокопрочных сталей типа АБ2 и высокопрочных среднеуглеродистых сталей типа 38Х2Н2МА.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВВОДИМЫХ В ЭЛЕКТРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА СОДЕРЖАНИЕ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛЕ ШВОВ

С.В. Юркинский,
к.т.н.
ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»
г. Санкт-Петербург

Применение технологических добавок в электродном покрытии в виде щавелевой кислоты и ее солей позволяет обеспечить более полную дегидратацию покрытия, что приводит к снижению содержания диффузионного водорода в наплавленном металле на 1,0...1,5 см /100 г.

Для выполнения исследований изготавливались электроды типа 48ХН с шлаковой основой покрытия $CaO\text{-}CaF_2\text{-}SiO_2\text{-}TiO_2$ и различными технологическими добавками. Термообработку электродов выполняли в лабораторных камерных печах по режиму: сушка 180° С выдержка 1,5 часа, прокалка 420° С выдержка 2 часа. Содержание диффузионного водорода определяли хроматографическим методом. Остаточное содержание влаги в покрытии после термообработки (потенциальное содержание водорода) определяли по методике, рекомендованной МИС: образец покрытия массой 5 - 10 г помещался в трубчатую печь при температуре 1100° С, по которой проходил кислород и весь водород из покрытия, окисленный до водяного пара, собирался в специальные поглотители.

Особенности дегидратации образцов электродного покрытия и жидкого стекла исследовали на дериватографе модели М103 в воздушной среде в динамических условиях при скорости нагрева 4,5 ± 1,0° С/мин. Пробы массой 500 - 800 мг нагревались в керамическом тигле. Одновременно регистрировали температуру пробы (Т, ° С), изменение ее массы (ТГ, г), скорость изменения массы (ДТГ, г/мин).

Целью исследований являлось определение вида и количества технологической добавки, приводящей к снижению содержания диффузионного водорода в металле шва. В качестве таких добавок были выбраны щавелевая кислота, аммоний щавелевокислый (соль щавелевой кислоты) и карбонат аммония. Практическое значение имеет оценка влияния указанных технологических добавок на степень дегидратации электродного покрытия и содержание водорода в металле шва.

Известно, что при взаимодействии указанных веществ с щелочным силикатом образуется гель кремнезема и свободная вода, которая должна удаляться при достаточно низких температурах (110-120° С).

$$Na_2O_nSiO_2 + (NH_4)_2CO_3 \leftrightarrow nSiO_2\downarrow + Na_2CO_3 + NH_3\uparrow + H_2O$$

$$Na_2O_nSiO_2 + H_2CrO_4 \leftrightarrow nSiO_2\downarrow + Na_2CrO_4 + H_2O$$

$$Na_2O_nSiO_2 + (NH_4)_2CrO_4 \leftrightarrow nSiO_2\downarrow + Na_2CrO_4 + NH_3\uparrow + H_2O$$

Для исследований применяли метод термогравиметрирования. Были изготовлены образцы-имитаторы электродного покрытия, состоящие из порошка рутилового концентрата (инертный наполнитель), жидкого стекла и одной из добавок. При изготовлении образцов смешивали наполнитель с раствором (20±0,2)-процентного натриево-калиевого жидкого стекла (модуль 2,9 плотность 1,45 г/см^3) с одной из добавок в количестве 0,5%. Образцы смеси массой 500 - 800 мг обезвоживали до твердого состояния в вакуумном эксикаторе и затем нагревали в керамических тиглях до температуры 800° С на дериватографе модели М103. Результаты исследований представлены на рисунке 1

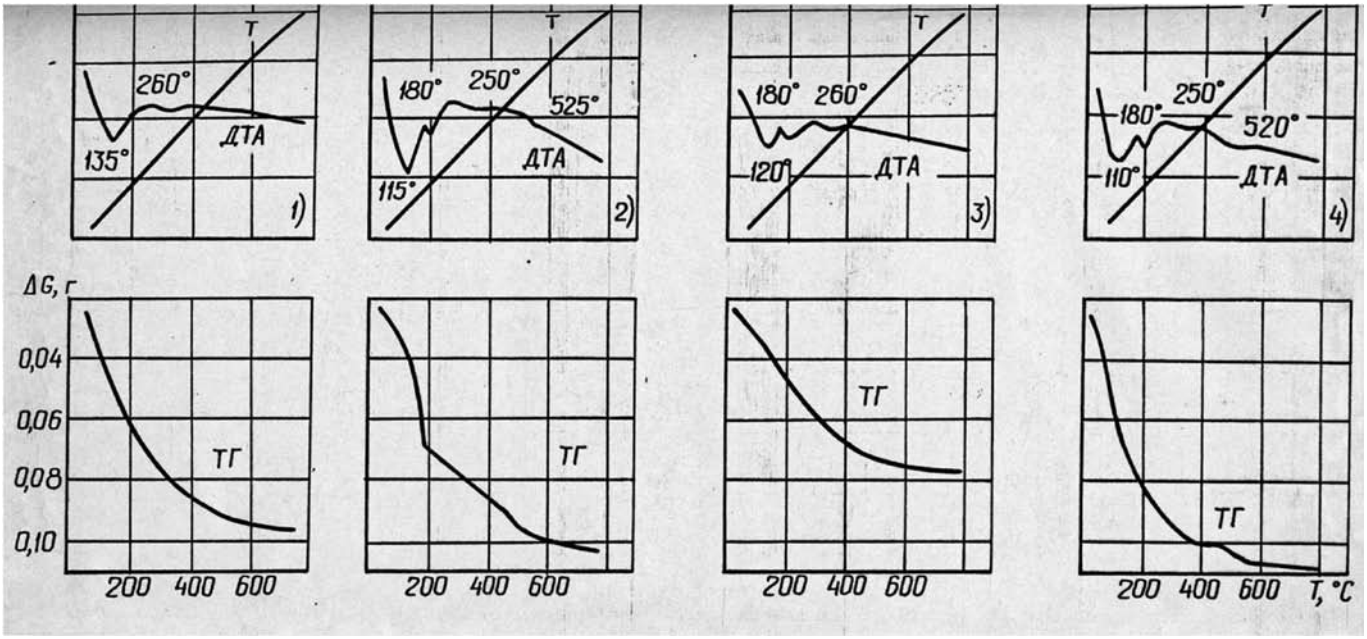


Рисунок 1 *Дериватограммы обмазочных масс: 1 – без технологических добавок, 2 – с добавками 0,5 % (NH4)2C*

Установлено, что дегидратация исследуемых образцов с добавками сопровождается поглощением тепла, что выражается минимумами на кривых ДТА. Дегидратация начинается при 105…135° С и протекает, в основном, в три стадии в следующих температурных интервалах: первый – 105…135° С, второй – 180…200° С, третий – 330…360° С. Для образцов без технологических добавок характерны две основные стадии удаления влаги 125…135° С и 320…340° С. Таким образом, введение технологических добавок приводит к появлению дополнительных стадий дегидратации.

Дегидратация образцов, обработанных щавелевой кислотой или ее солью, начинается при температуре 110…115° С и протекает более интенсивно. Вторая стадия дегидратации смещается почти на 100° С в сторону меньших температур, что приводит к более полному удалению влаги в интервале температур, характерных для термообработки электродных покрытий. Потеря массы образцов при температуре 520…525° С, вероятно, связана с разложением продукта реакции взаимодействия щелочного силиката со щавелевой кислотой. Особенности взаимодействия технологических добавок с жидким стеклом, выявленные на образцах при дериватографических исследованиях, сохраняются и в покрытиях электродов основного вида (таблица 1). Увеличение количества добавок щавелевой кислоты или ее солей, при

Таблица 1 *Влияние количества и вида технологических добавок на потенциальное содержание влаги в покрытии и содержание диффузионного водорода в наплавленном металле*

Технологическая проба	Количество технологической добавки, % масс	Расход жидкого стекла, % к массе	Потенциальное содержание влаги в покрытии, % масс.	Содержание диффузионного водорода, $см^3/100$ г
Без добавок	0	25	0,21	5,2-5,5 / 5,3
Карбонат аммония	0,25	25	0,20	5,1-5,6 / 5,4
	0,50	25	0,15	4,6-4,9 / 4,7
	0,75	25	0,17	4,0-5,1 / 5,0
	1,0	25	0,16	4,9-5,2 / 5,0
	0,50	23	0,15	4,4-4,8 / 4,6
Щавельная кислота	0,50	25	0,15	4,5-4,8 / 4,7
	0,50	23	0,14	4,4-4,9 / 4,6
Аммоний щавелиево-кислый	0,50	25	0,17	4,9-5,2 / 5,1
	0,50	23	0,17	4,9-5,1 / 5,0

сохранении расхода связующего, позволяет снизить фактическое содержание водорода на 1,1…1,5 $см^3/100$ г и потенциальное содержание его в электродном покрытии. Применение таких добавок позволяет уменьшить расход связующего, что обеспечивает дополнительное снижение содержания диффузионного водорода при сохранении хороший технологических свойств обмазочной массы.

Заключение

Показано, что применение технологических добавок в электродном покрытии в виде щавелевой кислоты и ее солей позволяет обеспечить более полную дегидратацию покрытия и позволяет уменьшить количество вводимого жидкого стекла при сохранении высоких технологических свойств обмазочной массы, что приводит к снижению содержания диффузионного водорода в наплавленном металле на 1,0…1,5 $см^3/100$ г.

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ СТАЛЕЙ КАТЕГОРИЙ Х90-Х100 ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

В.В. Гежа,
С.И. Шекин
к.т.н.
ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»
г. Санкт-Петербург

Результаты испытаний сварных соединений, выполненных с использованием разработанных агломерированных флюсов показали, что флюс марки 48АФ-56 в сочетании с проволоками марок Св-08Г1НМА и Св-08ГН2МДТА полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к сварным соединениям труб категории Х90, а флюс марки 48АФ-59 в сочетании с проволоками марок Св-08ГН2МДТА и Св-03ХН3МД полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к сварным соединениям труб категории Х100.

В рамках настоящей работы была изготовлена и испытана серия труб с категорией прочности Х90 и Х100, сварка которых производилась по разработанной технологии под созданными в ЦНИИ КМ «Прометей» новыми флюсами марок 48АФ-56 и 48АФ-59, соответственно [1, 2]. Для сварки стали категории Х90 использовались проволоки марок Св-08ГН2МДТА и Св-08Г1НМА, а для стали категории Х100 проволоки марок Св-08ГН2МДТА, Св-08Г1НМА и Св-03ХН3МД.

Химический состав металла швов и основного металла труб с категорией прочности Х90 и Х100 представлен в таблице 1.

Таблица 1 *Химический состав металла швов*

Категория прочности	Анализируемый участок	Массовая доля элемента, %							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
Х90	ОМ	0 ,08	0,43	1,93	0,008	0,003	0,05	0,40	0,2
	Внутренний шов	0,05	0,30	1,61	0,012	0,003	0,04	0,56	0,24
	Наружный шов	0,05	0,28	1,58	0,008	0,004	0,04	0,56	0,24
Х100	ОМ	0,06	0,22	1,84	0,007	0,003	0,04	0,40	0,19
	Внутренний шов	0,06	0,30	1,66	0,011	0,003	0,25	1,05	0,33
	Наружный шов	0,05	0,32	1,58	0,012	0,004	0,24	1,09	0,36

Категория прочности	Анализируемый участок	Массовая доля элемента, %						
		Mo	V	Ti	Nb	Al	N	B
Х90	ОМ	0,30	0,05	0,015	0,04	0,03	0,006	-
	Внутренний шов	0,34	<0,01	0,02	0,03	0,03	0,009	0,0017
	Наружный шов	0,33	<0,01	0,01	0,03	0,03	0,008	0,0017
Х100	ОМ	0,33	0,03	0,015	0,04	0,03	0,006	-
	Внутренний шов	0,39	<0,01	0,02	0,04	0,02	0,008	0,0019
	Наружный шов	0,38	<0,01	0,02	0,04	0,02	0,009	0,0020

Из таблицы видно, что металл сварных швов микролегирован в оптимальном (с точки зрения обеспечения вязкости) диапазоне титаном, ниобием, алюминием и бором. Причем, ниобий находится на верхнем пределе. Ванадий в шве практически отсутствует. Титан и бор определяются наличием этих элементов в основном и сварочных материалах, долей участия основного металла в сварочной ванне и процессами протекания окислительно-восстановительных реакций. Содержание ванадия и ниобия в конкретном случае определяется лишь долей участия основного металла в сварном шве, так как сварочные материалы этих элементов не содержат. Возможно увеличение содержания ванадия в сварном шве посредствам введения феррованадия во флюс. Но в связи с тем, что ниобий в шве находится на предельно высоком уровне, увеличение ванадия не представляется целесообразным.

Результаты испытаний металла сварных швов на статическое растяжение представлены в таблице 2. Вырезка образцов производилась вдоль сварного шва. Из таблицы 2 следует, что сварные соединения с принятым усилением равнопрочны основному металлу.

Таблица 2 *Результаты испытаний на статическое растяжение металла сварных швов*

Категория прочности	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
X90	633	701	20,5	68
	619	693	23,0	66
X100	662	753	22,0	72
	663	769	20,5	68

Результаты, полученные при определении работы удара металла шва, показаны на рисунке 1. Из анализа приведенных зависимостей следует, что металл сварных соединений на трубах категории X90 обеспечивает необходимый уровень хладостойкости до температуры минус 60º С, а для труб категории X100 - до температуры минус 40º С, что соответствует требованиям ISO 3183 [3].

Для определения работы удара по линии сплавления разметка образцов производилась следующим образом: образец располагался параллельно поверхности листа, при этом надрез пересекал линию сплавления в своей центральной точке.

Результаты определения работы удара по линии сплавления, представленные на рисунке 2, показали, что линия сплавления на сварных соединениях труб категории X90 обеспечивает необходимый уровень хладостойкости до температуры минус 40º С, а для труб категории X100 до температуры минус 20º С в соответствии с требованиями [3].

Образцы для определения CTOD и J- интеграла при статическом изгибе с трещиной типа SEB испытывались при температуре минус 10º С по [4, 5]. Результаты испытаний сварных соединений категорий X90 и X100 представлены в таблицах 3 и 4, соответственно. Из приведенных в таблицах данных следует, что металл сварного шва обеспечивает высокий уровень CTOD, более 0,2 мм, тогда, как уровень CTOD линии сплавления находится на уровне 0,09 – 0,18 мм.

Результаты металлографических исследований различных зон сварных соедине-

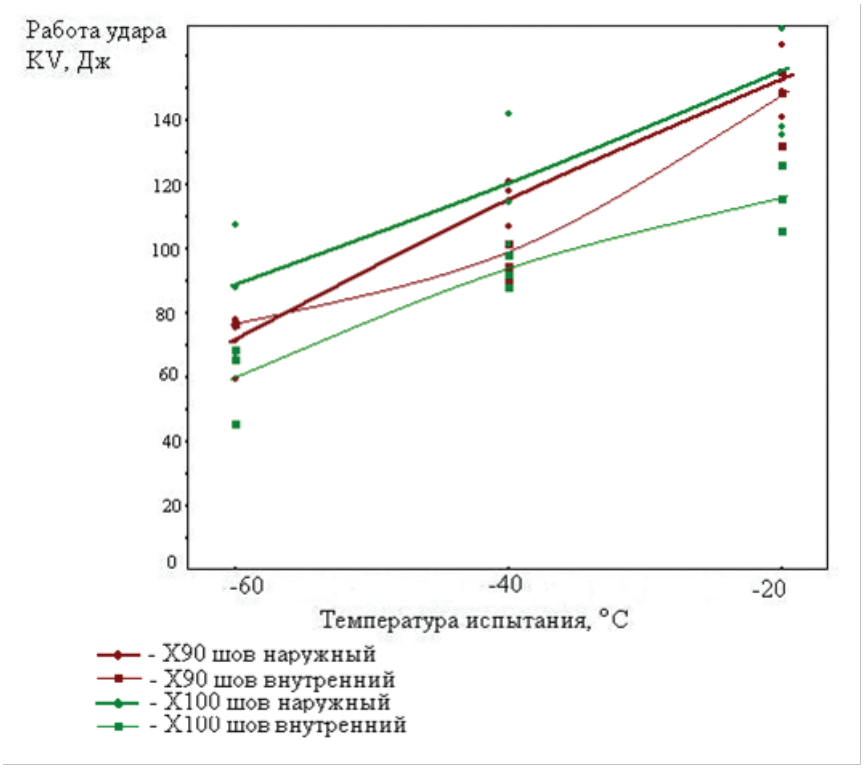


Рисунок 1 *Влияние температуры испытания на работу удара металла шва*

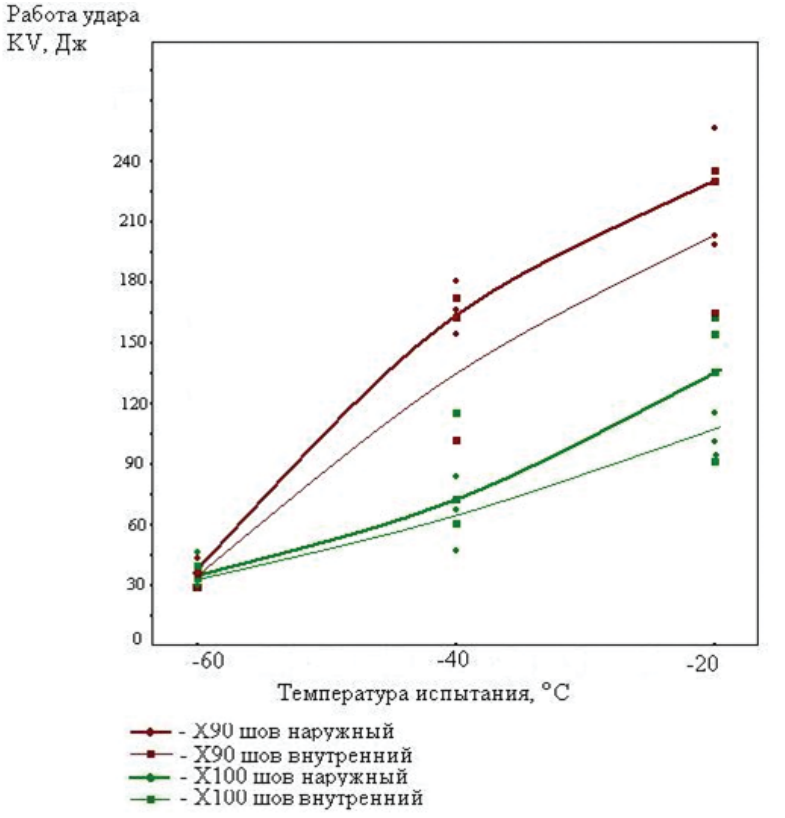
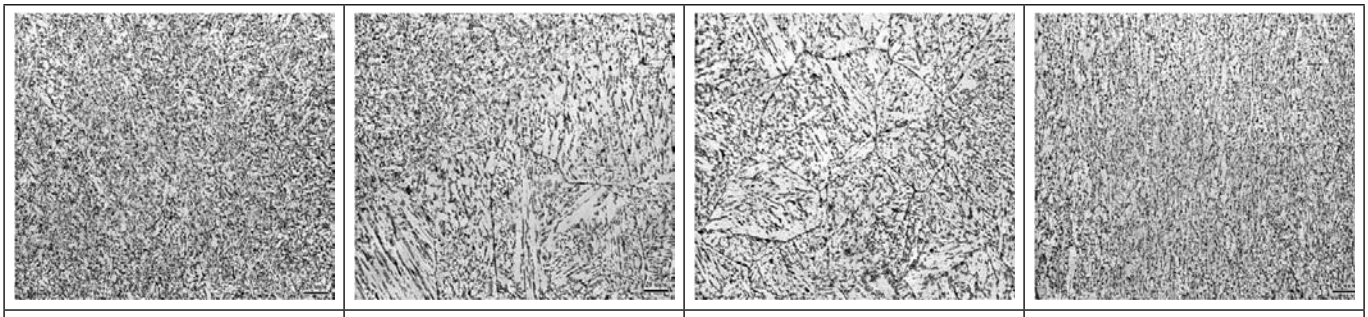
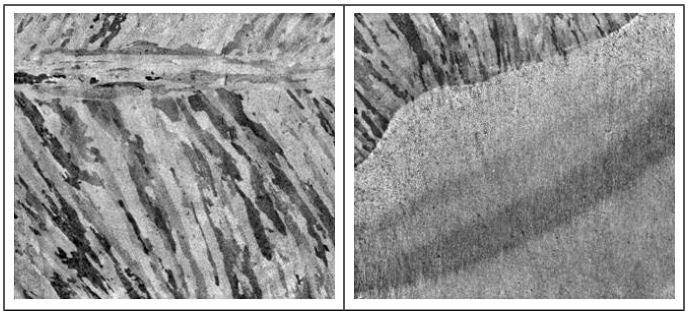


Рисунок 2 *Влияние температуры испытания на работу удара по линии сплавления*

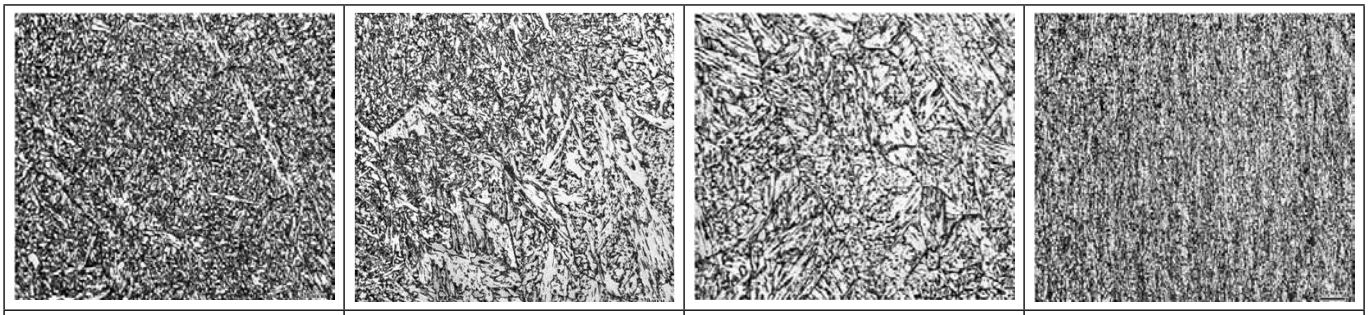


x500	x500	x500	x500
Сварной шов	Линия сплавления	ЗТВ	Основной металл

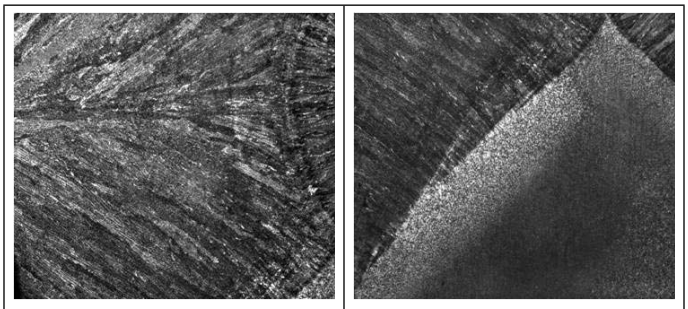


x50	x50
Сварной шов	ЛС

Рисунок 3 *Микроструктура металла различных зон сварного соединения на листовой стали категории Х90*



x500	x500	x500	x500
Сварной шов	Линия сплавления	ЗТВ	Основной металл



x50	x50
Сварной шов	ЛС

Рисунок 4 *Микроструктура металла различных зон сварных соединений на листовой стали категории Х100*

Таблица 3 *Результаты испытаний по определению CTOD и J- интеграла при статическом изгибе для сварного соединения выполненного на стали категории Х90*

Место надреза	Ширина, мм	Высота, мм	Средняя длина трещины, мм	Ти, °С	Стабильный подрост, мм	Критическое событие	Нагрузка текучести, кН	Нагрузка в расчётной точке, кН	CTOD, мм	Пластическая составляющая перемещения. мм	J интеграл, Н/мм	Упругая сост. J интеграла, Н/мм	Пластич. сост. J интеграла, Н/мм	K(J), МПа·м$^{0.5}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ШОВ	21.0	42.1	22.04	-10	>3	M	22.31	25.64	0.35	1.15	379	86	293	288
ШОВ	20.9	42.1	21.72	-10	>3	M	22.92	24.37	0.39	1.25	364	86	278	283
ШОВ	21.0	42.1	21.56	-10	>3	M	23.39	25.00	0.34	1.05	330	85	245	270
Л.С.	21.0	42.1	21.46	-10	0.1	C	23.62	21.23	0.09	0.18	84	58	26	136
Л.С.	21.0	42.1	21.64	-10	0.1	C (срыв 6.3%)	23.44	24.35	0.11	0.24	104	62	42	151
Л.С.	21.0	42.1	21.96	-10	0.1	C	22.49	23.32	0.15	0.39	150	71	79	182

Критические события: C — срыв без статического подроста или с подростом менее 0.20 мм, U — срыв после статического подроста трещины 0.20 мм и более, M — первое достижение плато максимальных нагрузок, достигнутое — образец разгружен.

Таблица 4 *Результаты испытаний по определению CTOD и J- интеграла при статическом изгибе для сварного соединения выполненного на стали категории Х100*

Место надреза	Ширина, мм	Высота, мм	Средняя длина трещины, мм	Ти, °С	Стабильный подрост, мм	Критическое событие	Нагрузка текучести, кН	Нагрузка в расчётной точке, кН	CTOD, мм	CTODср., мм	Пластическая составляющая перемещения. мм	J интеграл, Н/мм	Упругая сост. J интеграла, Н/мм	K(J), МПа·м$^{0.5}$
Шов	12.9	25.9	12.96	-10	-	M	10.26	21.35	0.20	0.21	0.63	196	51	208
Шов	12.9	26.0	11.95	-10	-	M	12.09	24.64	0.26		0.77	240	52	229
Шов	12.9	26.0	12.71	-10	-	M	10.82	21.73	0.16		0.47	155	48	185
Л.С.	12.9	26.0	12.3	-10	0.05	C (pop-in)	11.5	22.47	0.10	0.12	0.24	106	47	153
Л.С.	12.8	26.1	12.69	-10	0.05	C	10.93	23.25	0.18		0.53	201	56	210
Л.С.	12.8	26.0	12.51	-10	0.05	C	11.06	22.74	0.15		0.43	162	52	189
Л.С.	12.8	26.0	12.46	-10	0.05	C	11.15	22.8	0.13		0.36	144	52	178
Л.С.	12.8	26.0	12.62	-10	0.02	C (pop-in)	10.88	17.87	0.04		0.08	44	33	98

ний иллюстрируют рисунки 3 и 4. Металлографические исследования показали, что металл сварных швов, выполненных на сталях Х90 и Х100, имеет ферритную структуру с участками реечного бейнита. При этом в структуре областей крупного зерна и полной перекристаллизации, наблюдается стабилизация аустенитных участков или частичное их превращение в мартенсит с образованием аустенитно-мартенситных участков. Зона термического влияния представляет собой крупнозернистую структуру, состоящую из бейнита, феррита, аустенитно-мартенситных участков и выделений цементита. Большой рост зерна в ЗТВ обусловлен, высокими погонными энергиями при сварке.

Заключение

Полученные результаты испытаний сварных соединений, выполненных с использованием разработанных агломерированных флюсов показали, что флюс марки 48АФ-56 в сочетании с проволоками марок Св-08Г1НМА и Св-08ГН2МДТА полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к сварным соединениям труб категории Х90, а флюс марки 48АФ-59 в сочетании с проволоками марок Св-08ГН2МДТА и Св-03ХН3МД полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к сварным соединениям труб категории Х100.

Исследование вязкости металла сварного шва и линии сплавления при отрицательных температурах показало, что сварные соединения стали категории Х90 удовлетворяют требованиям, предъявляемым к работе удара до температуры испытания минус 40º С, а на стали Х100 - до температуры минус 20º С. При этом значения работы удара, определяемые по линии сплавления, ниже работы удара по центру шва при соответствующих температурах. Значения CTOD для шва имеют показатели выше 0,2 мм, т.е. находятся на достаточно высоком уровне; значения CTOD для линии сплавления находятся в интервале 0,1 – 0,15 мм.

Литература

1. ТУ 5929 - 025-07516250-2008. Флюс сварочный марки 48АФ-56. Опытная партия. Технические условия.
2. ТУ5.965-11959-2009 Флюс сварочный агломерированный марки 48АФ-59. Опытная партия. Технические условия.
3. ISO 3183 INTERNATIONAL STANDART
4. УЕИА 003 ПМ2-2. Программы и методики.
5. BS7448 ч1, ч2. Британский стандарт.

НОВЫЕ СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ И НАПЛАВКИ ИМИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ И РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ.

А.Е. Вайнерман,
к.т.н.,
С.А. Пичужкин,
к.т.н.,
С.П. Чернобаев,
инж.,
М.М. Веретенников,
инж.,
А.А.Вайнерман,
инж.,
ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»
г. Санкт-Петербург

Разработан ряд новых сварочных материалов для сварки изделий из медных сплавов, разработаны и исследованы новые технологические приемы сварки медных сплавов и разнородных металлов, обеспечивающие свойства соединений на уровне свойств свариваемых материалов.

Для повышения коррозионной стойкости судовых трубопроводов систем забортной воды ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» вместо труб из сплава марки МНЖ5-1 разработал трубы с повышенной коррозионной стойкостью из сплава марки МНЖМц11-1,1-0,6 с 10 - 12% никеля.

За рубежом для сварки сплавов, содержащих 9 - 11% никеля, преимущественно используется универсальная сварочная проволока типа 70Cu-30Ni. Содержание никеля в этой проволоке составляет 29,0 - 32,0%, что значительно превышает содержание его в основном металле. Это может приводить к усилению коррозии труб у границы сплавления со швом в результате контактной коррозии (металл шва будет существенно электроположительнее основного металла). Кроме того высокое содержание никеля в проволоке увеличивает ее стоимость. В то же время, чтобы обеспечить необходимую коррозионную стойкость сварных соединений труб из медно-никелевых сплавов, содержание никеля в металле шва должно быть несколько больше, чем его содержание в металле трубы.

ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» разработал новую сварочную проволоку марки Св-МН18, содержащую 16 - 18% никеля, а так же железо, марганец, кремний

и титан и технологию ручной и механизированной аргонодуговой сварки труб из сплава марки МНЖМц11-1,1-0,6 между собой и с приварными деталями из бронз Бр.АЖНМц9-4-4-1, Бр.А9Ж4Н4Мц1 и латуни Л90, обеспечивающие получение свойств сварных соединений на уровне свойств основного металла.

Для исключения прожогов механизированную сварку стыков труб следует выполнять комбинированным способом, т.е. по корневому проходу, предварительно выполненному ручным аргонодуговым способом неплавящимся электродом.

Радиографический контроль стыковых сварных соединений труб показал отсутствие в швах недопустимых дефектов (трещин, непроваров, пор, включений).

Металлографические исследования показали, что структура металла шва во всех случаях однофазная и представляет собой α-твердый раствор в меди никеля, алюминия, цинка и других компонентов свариваемых сплавов и сварочной проволоки.

Механические свойства сварных соединений труб размерами 38 × 3 мм, 90 × 5 мм и 160 × 5 мм определяли при испытании на статическое растяжение и статический изгиб сегментных образцов с усилением шва по ГОСТ 6996, вырезанных поперек шва, а сварных соединений сплава МНЖМц11-1,1-0,6 с бронзой Бр.А9Ж4Н4Мц1 и латунью Л90 выполняли на образцах, полученных из сварных стыковых соединений пластин из этих сплавов.

Предел прочности сварных соединений труб составляет 296 - 361 МПа. Угол загиба сварных образцов при испытании на статический изгиб составил 180° без трещин и надрывов.

В сварных соединениях медно-никелевого сплава с латунью наименее прочным участком является латунь, разрушение сварных соединений вне зависимости от способа сварки происходило по латуни ($\sigma_в$ = 205 - 230 МПа); в сварном соединении медно-никелевого сплава с бронзой разрушение происходило по зоне термического влияния медно-никелевого сплава или по сварному шву ($\sigma_в$ = 316 - 323 МПа).

Коррозионную стойкость труб из сплава марки МНЖМц11-1,1-0,6 и их сварных соединений определяли в 3,5% растворе NaCl в воде при комнатной температуре при испытании на общую, избирательную, щелевую, струевую коррозию и коррозию под напряжением.

Сравнительные коррозионные испытания показали, что коррозионная стойкость труб из сплава марки МНЖМц11-1,1-0,6 и их сварных соединений выше коррозионной стойкости применяемых в настоящее время труб из сплава марки МНЖ5-1 и их сварных соединений: при испытании на струевую коррозию в 1,73 - 2,12 раза, при испытании на общую коррозию в 3,80 - 4,25 раза, при испытании в щелевом зазоре в 2,67 - 2,80 раза.

Разработанные сварочная проволока марки Св МН-18 и технология аргонодуговой сварки с ее применением труб из сплава марки МНЖМц11-1,1-0,6 обеспечивают возможность изготовления судовых трубопроводов систем забортной воды с коррозионной стойкостью в морской воде в 1,7 раза и сроком службы в 2,5 раза выше, чем у аналогичных трубопроводов из сплава марки МНЖ5-1 и их сварных соединений.

Для сварки изделий из алюминиевых бронз марок БрА9Ж4Н4, БрА9Ж4Н4Мц1, БрАЖНМц9-4-4-1 разработана сварочная проволока марки БрАЖНМц8,5-4-5-1,5, а для сварки бронзы БрА7Мц14Ж3Н2 сварочная проволока марки БрМцАЖН12-8-3-2, обеспечивающие равнопрочность и коррозионную стойкость металла шва и сварных соединений.

Для сварки медно-никелевых сплавов с содержанием никеля 29 - 42% с целью обеспечения прочности и коррозионной стойкости металла шва на уровне прочности и коррозионной стойкости основного металла, а также для ремонта изделий из этих сплавов нами была разработана сварочная медно-никелевая проволока марки Св-МНЖМцТК 40-1-1-0,3-0,1. При сварке ею пластин толщиной 10 мм из сплава МНЖМц 30-1-1 твердость металла наплавки составила 232 - 244 HV, а предел прочности металла шва составил 390 - 450 МПа, что находится на уровне предела прочности основного металла (390 - 440 МПа).

С применением различных (в зависимости от необходимости) присадочных материалов разработаны технологические процессы сварки медных сплавов со сталями различных классов и наплавки медных сплавов на стали.

При способах сварки (наплавки) медных сплавов со сталями без применения специальных технологических приёмов сварочная дуга горит непосредственно между неплавящимся электродом и свариваемыми (наплавляемыми) изделиями. При этом происходит расплавление и перемешивание основного и присадочного металла с образованием общей сварочной ванны. Переход железа в количестве больше 3 - 4 % из основного металла в металл шва приводит к образованию в металле шва новой фазы на основе железа (железистой составляющей), которая в процессе кристаллизации выделяется как вдоль границы сплавления в виде кристаллизационных прослоек, так и в виде отдельных включений по сечению металла шва.

Эта фаза имеет низкие пластичность, ударную вязкость, при растяжении разрушается при напряжениях ниже предела текучести медных сплавов. С появлением выделений железистой составляющей в металле шва ударная вязкость сварных соединений понижается в 3 - 10 раз, а усталостная прочность – в 2 - 5 раз по сравнению с металлом без железистых составляющих. Это связано как с низкими свойствами самой железистой составляющей, так и с возникновением микроискажений при появлении новой фазы на основе железа.

Для получения наиболее высоких пластических свойств, ударной вязкости, усталостной прочности сварку (наплавку) рассматриваемых соединений следует выполнять с минимальным расплавлением стали и минимальным переходом железа в металл шва (наплавленный металл). Для этого необходимо, чтобы между дугой и сталью находился слой жидкого медного сплава, препятствующий проплавлению стали и обеспечивающий её смачивание.

Для исследования фазы на основе железа и отработки новой технологии была произведена ручная аргонодуговая наплавка неплавящимся электродом проволоки Св-МН18 на сталь 3 и сварены модельные соединения пластин из стали АБ2 и медно-никелевого сплава при помощи специальных технологических приёмов, позволяющих свести к минимуму степень проплавления стали (применен присадочный

материал состоящий из слоя ленты и прутка или проволоки одного и того же состава). При этом лента прихватывается к стали перед сваркой. Сварка ведётся по ленте. При такой сварке наблюдаем достаточно однородную структуру металла шва от поверхности металла шва к корню без включений железистой составляющей.

Рентгеноструктурный анализ образцов, полученных наплавкой Св-МН18 на сталь Ст. 3 и сваркой пластин из стали АБ2 с медным сплавом обычным способом показал, что при аргонодуговой наплавке неплавящимся электродом наплавленный металл двухфазный, он представляет собой твёрдый раствор на основе меди и твердый раствор на основе α-железа (железистые составляющие) с параметром кристаллической решетки 2,872 — 2,878 Å. Сплав МН18 является однофазным и представляет собой твердый раствор на основе меди с параметром кристаллической решетки 3,602 Å, а применявшаяся для наплавки и сварки пластины из сталей Ст.3 и АБ2 — твёрдые растворы на основе α-железа с параметрами кристаллической решетки соответственно 2,868 Å и 2,871 Å.

При сварке без расплавления стали во всех зонах соединения параметр кристаллической решётки фазы на основе меди практически не отличается от сплава МН18 и равен 3,602 - 3,605 Å. При сварке с расплавлением стали значения параметра решётки металла шва достигают 3,611 - 3,616 Å в самых насыщенных железом зонах – в корне шва и у границ сплавления.

Были измерены микронапряжения 2 рода в металле наплавки и в сварных соединениях. При сварке с расплавлением стали эти микронапряжения в фазе на основе железа достигали 600 МПа и в фазе на основе меди – 296 - 339 МПа, что близко к значениям предела текучести соответственно металла железистой составляющей и матрицы металла шва. Наличие железистых составляющих в зоне сплавления в металле наплавки может явиться причиной резкого понижения механических свойств (прочности при знакопеременных, вибрационных и ударных нагрузках, ударной вязкости, угла загиба) биметаллических образцов, полученных наплавкой и сваркой с расплавлением стали.

Исследовали также состав и структуру металла шва и их влияние на свойства соединений при сварке плавлением алюминиевых бронз со сталью. Исследования выполняли на образцах из стыковых сварных соединений бронзы марки БрА9Ж4-Н4Мц1 со сталью марки АБ2, полученных аргоно-дуговой сваркой с применением проволоки из бронзы марки БрАЖНМц8,5-4-5-1.

Рассмотрены три степени расплавления стали - повышенная (вари-ант 1 - содержание железа в металле шва 25 - 40%), средняя (вариант 2 – содержание железа в металле шва от 16 до 25%), пониженная (вариант 3 – содержание железа в металле шва не более 16%).

Металлографическое исследование показало, что структура металла шва при всех вариантах сварки состоит преимущественно из двух фаз: α-фазы – матрицы металла шва, имеющей светлую окраску, и φ-фазы - от-дельных выделений железистой составляющей по сечению металла шва и кристаллизационных прослоек в зоне сплавления сталь- шов.

α-фаза содержит медь (основа), алюминий, железо и другие эле-менты, перешед-

шие из стали и бронзы. Она имеет ГЦК – кристаллическую решетку (с параметром а= 3,654 - 3,660 Å). Повышение степени расплавления стали при сварке приводит к обеднению α-фазы основными упрочняющими элементами, особенно алюминием из-за их перехода в образующуюся в металле шва φ-фазу, что приводит к существенному снижению прочности α-фазы.

φ-фаза является новой фазой в металле шва, образующейся при сварке плавлением алюминиевых бронз со сталями и отсутствующей в исходных материалах, и содержит железо (основа), медь, алюминий, углерод, а также другие элементы, содержащиеся в стали и бронзе. φ-фаза имеет ОЦК – кристаллическую решетку (с параметром а = 2,890 - 2,895 Å) и представляет собой сложный твердый раствор переменного состава указанных элементов (пересыщенный по меди) в α-железе. φ-фаза образуется по сечению металла шва в виде закристаллизовавшихся из расплава выделений избыточного твердого раствора на основе железа и у границы сплавления металла шва со сталью в виде кристаллизационной прослойки толщиной 5 - 70 мкм и более.

Исследования микротвердости показали, что в металле шва наблюдается значительная механическая неоднородность. Микротвердость выделений φ – фазы составляет 2480 - 4900 МПа и существенно превышает микротвердость матрицы металла шва 1890 - 2335МПа.

Были исследованы механические свойства металла φ -фазы образующейся при сварке бронзы со сталью. Из-за их малых геометрических размеров определить механические свойства этих структур непосредственно в шве невозможно. Поэтому были выплавлены пластины с химическим составом, соответствующим φ -фазе. Установлено, что, сплавы с составом

φ - фазы имеют предел прочности 429 - 813 МПа, ударную вязкость – 2 - 5 Дж/см^2 и относительное удлинение 0 - 2,3% . Такие низкие значения относительного удлинения и ударной вязкости этих структур не могут не сказаться на свойствах сварного соединения.

Ударная вязкость металла шва, особенно в зоне сплавления шва со сталью, значительно зависит от степени расплавления стали. С увеличением степени расплавления стали ударная вязкость заметно уменьшается. При надрезе по зоне сплавления металла шва со сталью только при минимальном расплавлении стали ударная вязкость находится на уровне ударной вязкости бронзы БрА9Ж4Н4Мц1 (~30 Дж/см^2), во всех остальных случаях она ниже ударной вязкости бронзы в 2 - 5 раз.

При сварке со значительным расплавлением стали наблюдается хрупкое разрушение образца, а ударная вязкость составляет 7 – 9 Дж/см^2. В зоне сплавления наблюдается преимущественно кристаллизационная прослойка шириной до 200 мкм, а вблизи нее и в шве - значительное количество выделений φ - фазы, площадь которых составляет 40 – 56%, при этом содержание железа в данных участках шва составляет до 40%.

При средней степени расплавлении стали наблюдаются участки с хрупким и с вязким разрушением (как межзеренным, так и внутризеренным), а ударная вязкость составляет 16 - 20 Дж/см^2. При этом в зоне сплавления имеют место как участки

с диффузионной прослойкой, так и участки с кристаллизационной прослойкой, выделения φ - фазы занимают площадь на уровне 25 – 35%, а содержание железа составляет 16 – 25%. При минимальном расплавлении стали характер разрушения вязкий (внутризеренный), а ударная вязкость составляет 30 - 38 Дж/см^2.

Одной из серьезных проблем, возникающих при наплавке меди и медных сплавов на стали, является межкристаллитное проникновение медного сплава в сталь. Глубина таких проникновений может составлять от нескольких микрометров до десятков миллиметров в зависимости от составов медных сплавов и сталей. Эти проникновения могут существенно влиять на механические свойства наплавленных изделий. Авторы работы наплавляли бронзу Бр. ОФ 6,5-0,4 на заготовки из стали Ст.3 для испытаний на растяжение образцов с продольной границей сплавления. Глубина проникновений в этих образцах составляла от 1,5 до 7 мм, в зависимости от режима наплавки. Перед испытанием на растяжение металл наплавки практически полностью удалялся до стали, что позволяло авторам оценить, главным образом, влияние проникновений на прочность стали. Предел прочности таких образцов при их испытании на растяжение составлял 435 МПа при глубине проникновений 1,5 мм и 204 МПа при глубине проникновений 7 мм (предел прочности аналогичных образцов из стали Ст.3 без наплавки составил 460 -490 МПа). Исследование влияния проникновений медных сплавов в сталь на сопротивление усталости наплавленных образцов при циклических испытаниях на растяжение показало, что при наплавке сплава МНЖКТ 5-1-0,2-0,2 на высокопрочную сталь ($\sigma_в$ = 883 - 981 МПа) межкристаллитные проникновения медного сплава глубиной до 1,2 мм не влияют на усталостную прочность биметаллических образцов. В тоже время проникновения глубиной 2 - 13 мм, образующиеся при наплавке оловянной бронзы на сталь 35ХНМА, снижают усталостную прочность биметалла с 98,1 - 128 МПа на базе 50•106 циклов до 98,1 МПа на базе 3,8 - 4,2•105 циклов.

Наплавляли также на сталь проволоки диаметром от 2 до 4 мм из меди М00б, из бронзы Бр. ОЦ 4-3 и Бр. АЖНМц 8,5-4-5-1,5, из медно-никелевых сплавов, содержащих различное количество никеля: МНЖКТ 5-1-0,2-0,2 (Ni≈5%); Св-МН18 (Ni≈18%), МНЖМцТК 40-1-1-0,3-0,1 (Ni ≈ 40%); монель-металл марки НМЖМц 28-2,5-1,5 (Ni≈68%). Для сравнения производили наплавку на сталь никелевой проволоки марки НП-1 (Ni ≈ 100%).

Наплавку медных сплавов выполняли на пластины размером 110 × 250 × 10 мм из стали АБ2 в состоянии поставки (по 3-4 валика на пластину). Наплавку вели ручным аргонодуговым способом неплавящимся вольфрамовым электродом. В результате металлографических исследований шлифов было установлено, что проникновения медных сплавов в сталь на всей протяженности имеют однородную литую структуру и образуют со сталью плотное металлическое соединение, пустоты в проникновениях отсутствуют.

Проникновения начинаются у границы сплавления медный сплав – сталь и идут в сталь по границам зерен. Проникновения проходят по од-ной или нескольким границам зерна. Они имеют разную ширину и длину. Одно и то же межкристаллитное проникновение по своей длине может иметь участки с одинаковой шириной и пере-

менной шириной; границы одного и того же проникновения на отдельных участках могут быть параллельны, а могут идти под углом друг к другу.

Анализ результатов металлографических исследований глубины проникновений медных сплавов в сталь АБ2 показывает следующее. Максимальное значение глубины межкристаллитного проникновения получено при наплавке оловянными бронзами. По-видимому, олово усиливает поверхностную активность медного сплава по отношению к стали и, соответственно, усиливают адсорбционный эффект понижения прочности стали в контакте с расплавом бронзы.

При исследовании наплавок бронзы Бр. АЖНМц 8,5-4-5-1,5 были обнаружены проникновения в сталь АБ2 глубиной до 350 мкм, что находится на уровне глубины межкристаллитных проникновений (0,1-0,5 мм), полученных при сварке этой бронзы со сталью АБ2.

Для исключения межкристаллитного проникновения меди в сталь в качестве подслоя исследовали влияние концентрации (0-100%) никеля в медно-никелевых сплавах на глубину межкристаллитного проникновения этих сплавов в сталь АБ2 при наплавке. Установлено, что с увеличением концентрации никеля в медно-никелевых сплавах глубина межкристаллитных проникновений этих сплавов в сталь АБ2 при наплавке уменьшается. Так, при наплавке на сталь АБ2 меди марки М00б глубина межкристаллитного проникновения меди в сталь составила 473 мкм; при наплавке медно-никелевого сплава марки МНЖКТ 5-1-0,2-0,2 (Ni≈5%) глубина межкристаллитного проникновения составила 292 мкм; при наплавке медно-никелевого сплава марки МНЖМцТК 40-1-1-0,3-0,1 (Ni≈40%) глубина межкристаллитного проникновения составила 22 мкм; при наплавке монель-металла марки НМЖМц 28-2,5-1,5(Ni≈68%) и никелевой проволоки марки НП-1 (Ni≈100%) проникновения отсутствовали.

Можно предположить, что никель является элементом, понижаю-щим поверхностную активность жидкой меди по отношению к стали и, соответственно, уменьшающим адсорбционный эффект понижения прочности стали под действием поверхностно-активного медного сплава. Результаты выполненной работы показывают, что чем выше содержание никеля в медно-никелевом сплаве, тем меньше глубина межкристаллитного проникновения медного сплава в сталь.

Применительно к стали АБ2 рекомендуется применение в качестве подслоя сплав с более низким содержанием дефицитного никеля (медно-никелевый сплав с 40% никеля).

Таким образом, во ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» разработан ряд новых сварочных материалов для сварки изделий из медных сплавов, разработаны и исследованы новые технологические приемы сварки медных сплавов и разнородных металлов, обеспечивающие свойства соединений на уровне свойств свариваемых материалов.

ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ В МЕТАЛЛЕ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ НА ОСНОВЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

В.Н. Старцев,
к.т.н.,
ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»
г. Санкт-Петербург

Разработанная термодинамическая модель сварочного процесса позволяет сделать количественную оценку концентрации газов, растворенных в металле шва. У исследователей и разработчиков сварочных материалов появился математический инструмент, с помощью которого можно оценивать, например, влияние содержания компонентов во флюсе, электродном покрытии, наполнителе порошковой проволоки и т. д. на растворимость газов в металле и прогнозировать количественные изменения их содержания в металле шва при практически любых изменениях составов сварочных материалов.

Процесс дуговой сварки является металлургическим процессом, который условно можно разделить на ряд стадий: плавление электрода, плавление основного металла, переход капли жидкого металла через дуговой промежуток, образование сварочной ванны и перемешивание в ней металла электрода и основного металла. Физико-химические процессы, протекающие в сварочной зоне, определяют металлургию сварки. Здесь одновременно идет большое количество различных процессов, связанных с взаимодействием расплавленного металла со сварочными флюсами, шлаками и газами, а также с охлаждением и кристаллизацией металла шва и структурными и объемными превращениями основного металла в зоне термического влияния. Металлургические процессы при сварке отличаются рядом особенностей, влияющих как на ход их развития, так и на получаемые результаты, которые существенно отличают металлургию сварки от металлургии в сталеплавильных агрегатах. Такими особенностями являются:

1. Малый объем сварочной ванны и в то же время достаточно большие относительные количества реагирующих в ней фаз.

2. Высокие температуры в различных областях сварочной зоны и большой перегрев расплава в ванне.

3. Движение жидкого металла, интенсивное перемешивание расплавленных продуктов, их непрерывное обновление и обмен в сварочной ванне.

4. Высокие скорости охлаждения и кристаллизации расплавленного металла.

В этих условиях наблюдается активное взаимодействие расплавленного металла с окружающей газовой средой и флюсами, нагретыми до высоких температур. Кроме того, металл растворяет в себе газы из окружающей среды, и, в первую очередь,

такие, как водород, азот и кислород. В процессе охлаждения эти газы частично выделяются, однако значительное количество их остается в металле. Протекание всех процессов происходит с большой скоростью. Однако, в связи с кратковременностью существования расплава и постоянного обновления взаимодействующих фаз, часть реакций и процессов в сварочной зоне может не доходить до полного завершения и, следовательно, не достигать равновесного состояния. Это и определяет физико-химические и механические свойства сварного шва.

Насыщение металла газами приводит, как показали многочисленные эксперименты, к изменению механических свойств металла и к нарушению сплошности шва. Так, например, с ростом содержания азота в стали повышаются прочностные свойства и снижаются пластические свойства. Кроме того усиливается склонность металла шва к старению. Наличие водорода в металле резко снижает его пластичность и ударную вязкость. Присутствие водорода в наплавленном металле способствует также образованию трещин в сварном соединении. Водород хорошо ликвирует сам и усиливает ликвацию других примесей, что также отрицательно сказывается на свойствах металла. Кислород, поглощенный в процессе сварки, находится в металле, как в растворенном состоянии, так и в виде различных оксидов и этим снижает его прочностные и пластические свойства. Поэтому важно знать кинетику процессов насыщения металла газами и выделения их из металла.

Традиционный физико-химический анализ металлургических процессов основан на использовании ведущих (преобладающих) реакций. Однако такой подход очень ненадежен и зачастую приводит к ошибкам, поскольку при изменении внешних параметров (температуры, давления, исходного состава) список ведущих реакций может меняться. Поэтому использование методов термодинамического моделирования является исключительно плодотворным для исследования металлургических процессов [1, 2].

Любая термодинамическая система имеет свои конкретные особенности. Предложено много термодинамических моделей, но параметры большинства из них известны лишь для небольшого числа веществ. Ситуация усложняется тем обстоятельством, что связь между параметрами модели и равновесным составом является нелинейной. Фазовый состав системы заранее неизвестен и должен быть установлен в процессе вычислений, поэтому целевая функция не является непрерывной и может иметь разрывы в точках фазовых переходов. Это также усложняет решение задачи. Кроме того, зачастую значение целевой функции очень слабо меняется в окрестности решения, поэтому иногда в процессе решения можно получить неверный химический и фазовый состав системы.

Показано, что если поведение газовой фазы описывается уравнением состояния идеального газа и образующиеся в системе конденсированные растворы идеальные, то целевая функция является выпуклой, и единственное решение термодинамической задачи всегда существует [2].

Исследование термодинамических свойств компонентов в многокомпонентных расплавах на основе железа, прогноз состава образующихся соединений и неметаллических включений невозможен без учета термодинамических свойств компонен-

тов металлургических расплавов. В большинстве систем нет надежного описания концентрационных зависимостей термодинамических свойств в широком интервале температур и концентраций. Имеется значительный разброс экспериментальных данных и параметров взаимодействия. Все это создает дополнительные трудности при термодинамическом расчете металлургических процессов.

Для исследования реакций, протекающих в сварочной ванне, с точки зрения качественной их оценки и определения наиболее вероятного направления, с успехом можно применять термодинамический метод, базирующийся на понятии термодинамического равновесия, о чем говорилось выше.

Рассмотрим три основных вида сварки: сварка под флюсом, сварка покрытыми электродами и сварка в защитных газах. Каждый вид сварки имеет свои особенности. Сформулируем физическую модель сварки под флюсом применительно к термодинамическому расчету. В сварке участвуют металл свариваемого изделия, металл проволоки, порошкообразный флюс и воздух, который находится в промежутках между гранулами флюса. Все эти компоненты в процессе сварки участвуют в определенных соотношениях. Отличие моделей сварки покрытыми электродами и в защитных газах от сварки под флюсом будет заключаться в том, что вместо флюса в одном случае участвует покрытие электрода, а в другом - защитные газы. При этом воздух может подмешиваться к реагирующим веществам в случае плохой защиты.

Строго говоря, понятие термодинамического равновесия в целом неприменимо к зоне плавления при сварке, поскольку металл в сварочной ванне и контактирующие с ним фазы непрерывно изменяют свою температуру, а зона плавления непрерывно разбавляется новыми порциями еще непрореагировавших веществ: флюса, основного металла и сварочной проволоки. Тем не менее, это понятие, а также расчетные и опытные данные о константах равновесия отдельных реакций оказываются весьма полезными для анализа металлургических реакций при сварке по двум причинам:

- в каждом элементарном объеме реакционной зоны реакции стремятся к состоянию равновесия и, следовательно, использование термодинамических данных позволяет в большинстве случаев предсказать наиболее вероятное их направление;
- в зоне плавления при сварке реакции взаимодействия протекают с большими скоростями и поэтому можно ожидать состояния, близкого к равновесному.

Химическое равновесие может описываться в двух эквивалентных формах: с помощью констант равновесия или условия минимизации свободной энергии. Однако использование метода минимизации свободной энергии позволяет провести расчет каждого компонента системы без установления реакционных приоритетов, как это требуется в методе, использующем константы равновесия.

Математическая модель.

Имеется набор реактантов, который содержит *L* химических элементов. В результате химических реакций система содержит *NS* компонентов продуктов реакции, из которых *NG* газообразные. Все термодинамические характеристики компонентов,

такие как, химический потенциал μ_j, теплоемкость *Cp*, теплота образования H^0_j, энтропия S^0_j, внутренняя энергия U^0_j являются функциями температуры *T*. Будем искать состав продуктов реакции при постоянных температуре T_0 и давлении P_0. По полученным значениям мольных долей газообразных водорода, азота и кислорода рассчитываются их количество, растворенное в металле.

Считается, что все газы являются идеальными и отвечают следующему уравнению состояния:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \tag{1}$$

где:

P - давление;
V - удельный объем;

$n = \sum_{j=1}^{NG} n_j$ - число молей на единицу смеси, *NG* - количество газов;

R - газовая постоянная;
T- температура.

Для выбранных нами условий термодинамического состояния *PT* условием минимизации свободной энергии является условие минимизации энергии Гиббса. Для смеси из *NS* компонентов энергия Гиббса на килограмм смеси будет:

$$g = \sum_{j=1}^{NS} \mu_j \cdot n_j \tag{2}$$

где μ_j- химический потенциал на килограмм-моль компонента *j*;
Химический потенциал может быть записан в следующей форме:

$$\mu_j = \begin{cases} \mu_j^0 + R \cdot T \cdot \ln \dfrac{n_j}{n} + R \cdot T \cdot \ln P \\ \mu_j^0 \end{cases} \quad \begin{matrix} j = 1 \ldots NG \\ j = NG+1 \ldots NS \end{matrix} \tag{3}$$

где μ^0_j- химический потенциал в стандартных условиях.
Условие баланса масс:

$$\sum_{j=1}^{NS} a_{i,j} \cdot n_j - b_i^0 = 0 \qquad (i=1....L) \tag{4}$$

где $a_{i,j}$- количество килограмм-атомов элемента *i* на килограмм-моль компонента *j*;

b^0_i-количество килограмм-атомов элемента i на килограмм реактантов;

L- количество химических элементов в системе.

Определим функцию *G* как:

$$G = g + \sum_{i=1}^{L} \lambda_i (b_i - b_i^0) \tag{5}$$

где λ_i- множители Лагранжа.

Тогда условие равновесия будет иметь вид:

$$\delta G = \sum_{j=1}^{NS} \left[\mu_j + \sum_{i=1}^{L} \lambda_i \cdot a_{i,j} \right] \delta n_j + \sum_{i=1}^{L} (b_i - b_i^0) \delta \lambda_i = 0 \tag{6}$$

Принимая, что вариации δn_j и $\delta \lambda_i$ являются независимыми, имеем:

$$\begin{aligned} \mu_j + \sum_{i=1}^{L} \lambda_i \cdot a_{i,j} = 0 \qquad & (j=1....NS) \\ b_i - b_i^0 = 0 \qquad & (i=1....L) \end{aligned} \tag{7}$$

Полученные уравнения не все являются линейными, поэтому требуются дополнительные итерационные процедуры. Используя уравнения (4), (7) и два тривиальных уравнения $T=T_0$ и $P=P_0$ получаем уравнения Ньютона-Рафсона, которые после приведения к безразмерному виду запишутся как:

$$\sum_{i=1}^{L} \sum_{j=1}^{NG} a_{k,j} \cdot a_{i,j} \cdot n_j \cdot \pi_i + \sum_{j=NG+1}^{NS} a_{k,j} \cdot \Delta n_j + (\sum_{j=1}^{NG} a_{k,j} \cdot n_j) \cdot \Delta ln(n) + (\sum_{j=1}^{NG} \frac{a_{k,j} \cdot n_j \cdot H_j^0}{R \cdot T}) \cdot \Delta ln(T) =$$

$$= b_k^0 - b_k + \sum \frac{a_{k,j} \cdot n_j \cdot \mu_j}{R \cdot T} \qquad (k=1....L) \tag{8}$$

$$\sum_{i=1}^{L} \sum_{j=1}^{NG} a_{i,j} \cdot n_j \cdot \pi_i + (\sum_{j=1}^{NG} n_j - n) \cdot \Delta \ln(n) + (\sum_{j=1}^{NG} \frac{n_j \cdot H_j^0}{R \cdot T}) \cdot \Delta \ln(T) = n - \sum_{j=1}^{NG} n_j + \sum_{j=1}^{NG} \frac{n_j \cdot \mu_j}{R \cdot T} \tag{9}$$

$$\sum_{i=1}^{L} a_{i,j} \cdot \pi_i + \frac{H_j^0}{R \cdot T} \cdot \Delta \ln(T) = \frac{\mu_j}{R \cdot T} \qquad \text{где} \quad \pi_i = \frac{-\lambda_i}{R \cdot T} \quad (j=NG+1,...,NS) \tag{10}$$

Для получения решения системы уравнений (8-10) используется итерационная процедура Ньютона-Рафсона. Данная процедура дополнена несколькими тестовыми расчетами, чтобы преодолеть такие практические трудности, как задание начальных значений переменным, включение или исключение из расчета конденсированных продуктов реакции, наличие фазовых переходов и тройных точек, проблемы сходимости и расчета с заданной точностью.

В результате расчета получаем фракционный состав и термодинамические свойства продуктов химических реакций при сварке, такие как энтальпия, внутренняя энергия, энергия Гиббса, энтропия, молекулярный вес, плотность, теплоемкость, показатель политропы и др. По известным мольным долям газообразных водорода, азота и кислорода рассчитывается их количество, растворенное в металле. Для этого была использована теория растворов неэлектролитов, согласно которой, давление пара каждого компонента раствора и мольная доля этого компонента в растворе связаны соотношением, называемым законом Генри. Так как для атомарных водорода и азота не удалось обнаружить зависимостей коэффициента Генри, использовался закон Сивертса: см ниже уравнения (11) и (12). Для кислорода закон Генри использовался в классическом виде: см. уравнение (13) [3].

$$[\%H] = k_H \cdot \sqrt{P_{H2}} \qquad \lg k_H = \frac{-1670}{T} - 1.68 \qquad (11)$$

$$[\%N] = k_N \cdot \sqrt{P_{N2}} \qquad \lg k_N = \frac{-564}{T} - 1.095 \qquad (12)$$

$$X_O = k_O \cdot P_O \qquad \ln k_O = \frac{44922.8}{T} - 10.98 \qquad (13)$$

где: P_{H2}, P_{N2}, P_O – парциальные давления водорода, азота, кислорода;
k_H, k_N, k_O – коэффициенты Генри для водорода, азота, кислорода;
[*%H*], [*%N*] – массовые доли водорода и азота растворенные в железе;
X_O – мольная доля кислорода растворенного в железе.

Результаты расчета.

Расчеты были проведены применительно к процессам сварки под флюсом для двух типов флюсов. В качестве первой пары сварочных материалов рассматривалось сочетание проволока марки Св10ГНА и керамический флюс марки 48АФ51. Проволока имела состав: 0.12% C, 0.2% Si, 1.2% Mn, 0.2% Cr, 1.2% Ni, 0.012% S, 0.015% P, 0.015% N, 0.005% O, остальное железо. Керамический флюс принимался следующего состава: 28.4% MgO, 23% Al_2O_3, 27% CaF_2, 0.6% Fe_2O_3, 2.5% Mn, 1.5% FeTi, 0.2% FeB, 0.8% FeSi, 16% $CaTiSiO_5$. Влажность флюса отвечала требова-

ниям ГОСТ Р 52222-2004 и в расчетах принималась равной 0.1%. Относительная влажность воздуха принималась равной 80%.

Второй парой сварочных материалов для расчета была выбрана проволока марки Св08ГСМТ и плавленый флюс марки ФЦ16. Состав проволоки: 0.08%C, 0.4% Si, 1.5% Mn, 0.015% S, 0.008% P, 0.015% N, 0.02% H, 0.008% O, остальное железо. Плавленый флюс следующего состава: 10% MgO, 20% Al_2O_3, 15% CaF_2, 20% CaO, 5% MnO, 30% SiO_2.

Относительная влажность воздуха и влажность флюса в первом и втором варианте расчета были приняты одинаковыми. В расчетах также принималось, что углерод в состав стали входит в виде Fe_3C, сера в виде соединения FeS, кислород в форме FeO, фосфор в виде соединений Fe_2P и Fe_3P в соотношении 50% на 50% по массе. Соотношение массы металла и флюса, участвующих в процессе сварки, принималось 1:1.

Расчеты проведены по специально разработанной компьютерной программе для четырех температур (1850К, 1900К, 2000К, 2100К) при условии, что течение всех процессов шло при атмосферном давлении. В результате расчетов получены фракционный состав и термодинамические свойства продуктов химических реакций при сварке. По рассчитанным мольным долям газообразных водорода, азота и кислорода последующим расчетом определено их количество, растворенное в металле (таблицы 1 и 2).

Таблица 1 *Концентрация водорода растворенного в металле сварочного шва, $см^3$/100г металла*

Проволока + флюс	Температура, К			
	1850	1900	2000	2100
Св10ГНА + 48АФ51	2.1681	2.2874	2.5222	2.7414
Св08ГСМТ + АЦ16	1.7957	1.8944	2.0884	2.2736

Таблица 2 *Концентрация азота и кислорода растворенного в металле сварного шва*

Проволока + флюс	Компонент, ед. изм.	Температура (К)			
		1850	1900	2000	2100
Св10ГНА + 48АФ51	N, масс. доли	0.0016403	0.0016708	0.0017288	0.0017822
	O, мол. доли	0.27792E-6	0.46276E-6	0.12687E-5	0.43291E-5
Св08ГСМТ + АЦ16	N, масс. доли	0.0022382	0.0022800	0.0023592	0.0024332
	O, мол. доли	0.24469E-6	0.40651E-6	0.10984E-5	0.31363E-5

Примечание: E-5 и E-6 обозначает 10^{-5} и 10^{-6} , соответственно.

Расчеты были проведены для составов проволок и флюсов, отвечающих соответствующим ГОСТам и ТУ, и показали, что концентрации растворенных газов в металле удовлетворяют техническим требованиям.

Таким образом, разработанная термодинамическая модель сварочного процесса позволяет сделать количественную оценку концентрации газов, растворенных в металле шва. Практическая значимость этой модели состоит в том, что у исследователей и разработчиков сварочных материалов появился математический инструмент,

с помощью которого можно оценивать, например, влияние содержания компонентов во флюсе, электродном покрытии, наполнителе порошковой проволоки и т. д. на растворимость газов в металле и прогнозировать количественные изменения их содержания в металле шва при практически любых изменениях составов сварочных материалов.

Литература

1. Г.Б. Синярев, Н.А. Ватолин, Б.Г. Трусов. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов.-М.:Наука.- 1982
2. W.R. Smith, R.W. Missen. Chemical Reaction Equilibrium Analysis: Theory and Algorithms. NY, John Wiley, 1982
3. Е.Л. Корзун, А.Г. Пономаренко. О термодинамическом описании жидких растворов кислорода в железе. ISSN 2077-1908 Наукові праці ДонНТУ, Металургія, вып.11(159), 2009

ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДИФФУЗИОННОГО ВОДОРОДА В НАПЛАВЛЕННОМ МЕТАЛЛЕ

А.М. Левченко
к.т.н.,
О.В. Панченко,
к.т.н.
ФБГОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
г. Санкт-Петербург

Разработан прибор для определения диффузионного водорода в наплавленном металле. Проведены сопоставительные эксперименты по сравнению измерительной системы нового прибора и жидкостного манометра, используемого согласно стандартной вакуумной методике ГОСТ 23338.

Для определения содержания диффузионного водорода существует вакуумная методика, которая отражена в ГОСТ 23338 [1]. Методика обладает высокой точностью и признана классификационными обществами Det Norske VERITAS, British Lloyd, Germanischer Lloyd, Российским Морским Регистром Судоходства. Применимость вакуумной методики по ГОСТ 23338 осложняется отсутствием современного промышленного оборудования для ее использования. Целью работы являлось создание и апробация прибора для определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле.

Разработка прибора

Основные требования, предъявленные к прибору перед разработкой:

- пределение содержания водорода осуществляется по вакуумной методике ГОСТ 23338;
- экспериментальные результаты определения содержания диффузионного водорода должны выводиться на компьютер и экспортироваться в задаваемые программные пакеты,
- питание прибора должно осуществляться от электрической сети 380 или 220 В, электробезопасность должна соответствовать ГОСТ Р 12.1.019-2009 [2],
- прибор должен быть изготовлен из безопасных для здоровья, негорючих материалов, безопасных в эксплуатации.

Разработанный прибор представляет собой вакуумную систему (рисунок 1), питающуюся от трехфазной сети 380 В. Вакуум обеспечивается форвакуумным насосом. Измерительная система питается отдельно от сети 220 В. В измерительной системе используется четыре вакуумметра для одновременного определения

содержания водорода на четырех образцах. Давление водорода определяется по теплопроводности газа внутри вакуумной камеры. Сигнал с вакуумметра считывается компьютером и выводится на экран в виде зависимости давления водорода в камере от времени, а также в виде содержания водорода в наплавленном металле (рисунок 2). Сигналом вакуумметра является напряжение, по которому при сопоставлении с тарировочной кривой определяется давление водорода в камере. Погрешность измерения давления водорода складывается из погрешности измерения водорода устройством, по которому тарировался датчик (она составляет ± 0,1%), и погрешности устройства, измеряющего выходное напряжение датчика, которая не превышает ± 2,5%. Для определения содержания диффузионного водорода вводятся температура окружающей среды, массы образцов до и после наплавки. Общие данные прибора приведены в таблице 1, фотография прибора - на рисунке 3.

Таблица 1 *Технические характеристики прибора*

Диапазон измерений концентрации диффузионного водорода	0,5 – 15 $см^3$/100 г наплавленного металла
Погрешность измерения содержания диффузионного водорода	± 2,6 %
Электропитание вакуумной системы	50 Гц, 380 В
Электропитание измерительной системы	50 Гц, 380 В
Глубина вакуума	$5x10^{-3}$ мм.рт.ст.
Габариты	710x490x1310 мм
Масса	22 кг

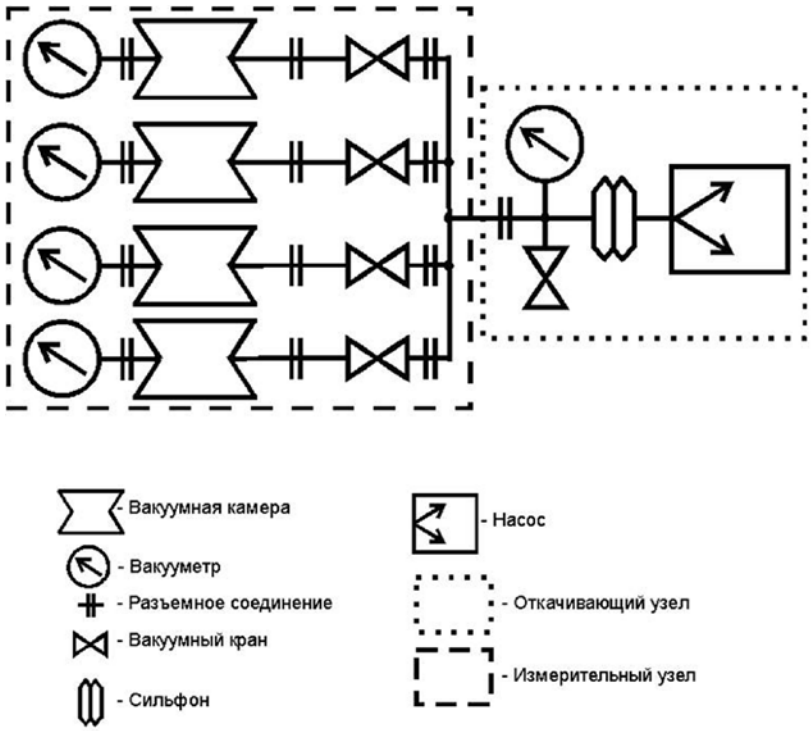


Рисунок 1 *Блок-схема вакуумной системы прибора*

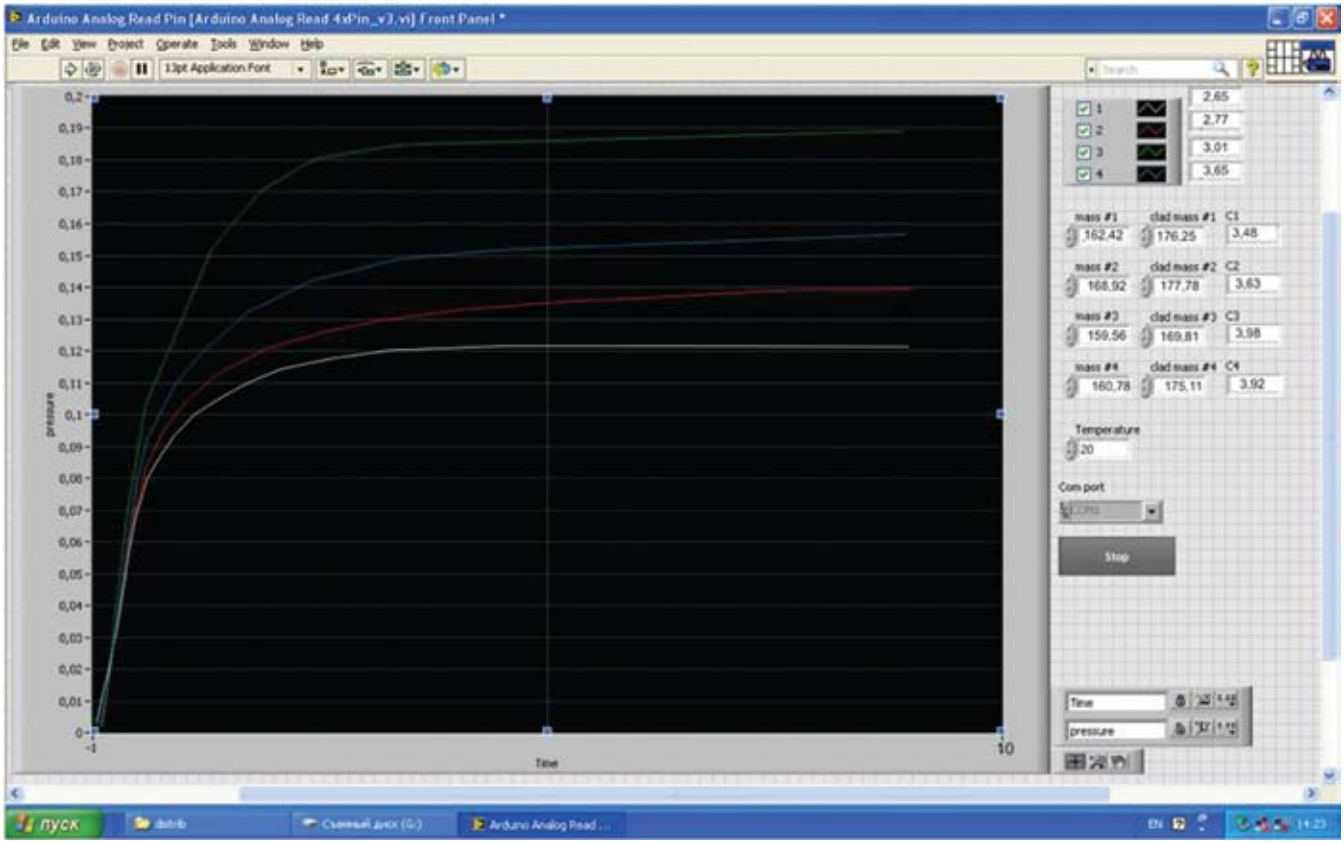


Рисунок 2 *Интерфейс прибора для определения диффузионного водорода*

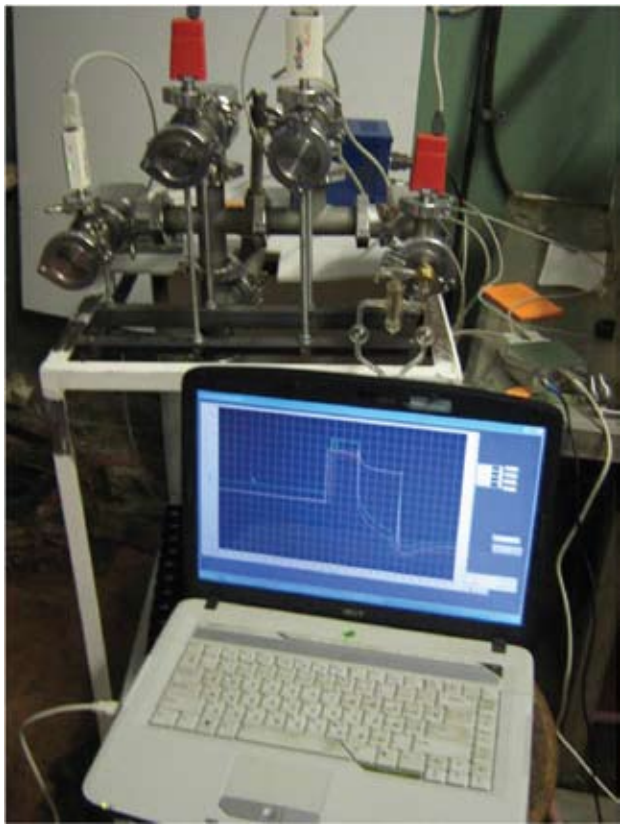


Рисунок 3 *Фото прибора для определения диффузионного водорода*

Экспериментальная проверка прибора

Для проверки был проведен эксперимент по определению содержания диффузионного водорода для электродов марок УОНИИ 13/55 и ESAB OK 48.00 диаметром 4 мм. Содержание диффузионного водорода определялось по вакуумной методике ГОСТ 23338 при помощи нового прибора, к камерам которого одновременно были подключены датчик давления и жидкостный манометр по ГОСТ 23338 [1]. Для сопоставления было изготовлено четыре образца, по два для - каждой марки электрода. Режим прокалки электродов соответствовал требованиям производителя для каждой марки. Режим сварки также был выбран исходя из диапазона, заданного производителем, и был одинаковым для электродов одной марки. Результаты измерений, выполненных с помощью нового прибора и с помощью жидкостного манометра приведены в таблице 2.

Таблица 2 *Технические характеристики прибора*

Марка электрода	Содержание водорода, измеренное при помощи нового прибора	Содержание водорода, измеренное при помощи жидкостного манометра	Разница между экспериментальными данными, %
ESAB OK48.00	4,16	4,15	0,24
	4,88	4,87	0,20
УОНИИ 13/55	7,83	7,78	0,64
	7,91	7,85	0,76

Результаты сопоставления экспериментальных данных показывают, что погрешности измерений отвечают требованиям вакуумной методики (не превышают ± 5%) [1].

Выводы:

1. Создан прибор для определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле.
2. Прибор имеет улучшенные эксплуатационные характеристики за счет применения современных материалов и средств измерения.
3. Точность измерительной системы нового прибора выше, чем у стандартной вакуумной установки по ГОСТ 23338 (точность вакуумной установки по ГОСТ 23338 ± 5 %, точность нового прибора ± 2,6%).

Литература

1. ГОСТ 23338-91. Сварка металлов. Методы определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и металле шва. 21 с.
2. ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ. Общие требования и номенклатура видов защиты. 27 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ С ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧЕЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕЙ

К.В. Гулаков,
инж.,
ГТУ
г. Брянск,

М.Г. Шарапов,
д.т.н.,
ЦНИИ КМ «Прометей»
г. Санкт-Петербург, Россия

В.А. Лебедев,
д.т.н.,
И.В. Лендел,
инж.,
ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины
г.Киев, Украина

Нейросетевое моделирование может быть использовано как эффективный метод досто-верной оценки параметров сварного соединения и наплавленного валика от комплекса специально вводимых воздействий, в том числе и импульсной подачи электродной проволоки с управляемыми параметрами.

С каждым годом объем продукции за рубежом и в нашей стране, в частности, в производстве которой используется механизированное дуговое оборудование с применением различных технологий нестационарных процессов и режимов сварки, увеличивается. Обусловлено это тем, что технологии сварки и наплавки, и соответствующее оборудование имеет возможность комплексно решать широкий круг задач, а именно:

- возможность регулирования в широких пределах геометрических параметров сварочных швов (валиков);
- сварка по повышенным зазорам, а также сварка и наплавка в различных пространственных положениях;
- улучшение структуры металла сварного шва и валика наплавленного металла (уменьшается размер зерна);
- уменьшение разбрызгивания электродного металла;
- повышение стабильности возбуждения дуги и её горения;
- расширение диапазона толщин металла, который сваривается или наплавляется за один проход;

- существенное снижение энерго- и ресурсозатрат – как приоритетная задача разработки механизированного дугового оборудования и технологических процессов сварки, наплавки и резки;

- расширение сфер и объектов, где может быть применено механизированное дуговое оборудование.

Варьируя параметрами импульсного дугового процесса сварки (ИДСП), можно эффективно воздействовать на форму и размеры сварочной ванны, кристаллизацию металла, а также на формирование шва, временные и остаточные деформации и другие показатели процесса сварки. ИДСП может применяться для конструкций ответственного назначения из разных марок сталей, алюминиевых, медных, никелевых и титановых сплавов толщиной от 1 до 50 мм при выполнении швов во всех пространственных положениях.

За последнее время появилось достаточно большое число разработок, цель которых повлиять на механизированный дуговой процесс путём введения управляемых нестационарных режимов во все системы полуавтомата. Всё это оказывается возможным, благодаря новому уровню технических средств как в области исполнительных элементов – электродвигателей постоянного тока и источников сварочного тока с высокими показателями динамических характеристик, так и в области техники управления и регулирования. Последнее в большей мере относится к силовой управляемой электронике и к элементной базе на основе средств микроэлектроники и вычислительной техники.

Необходимо указать на важный раздел разработок механических устройств для подачи электродной проволоки – устройств с импульсным характером движения. Источники с импульсными алгоритмами выходных параметров достаточно хорошо изучены в части их влияния на результаты технологического процесса. При этом высокий уровень этого изучения обусловлен постоянно возрастающими возможностями современных источников и поисками новых алгоритмов управления важнейшего процесса – переноса электродного метала.

Многочисленные конструкции механических преобразователей, генерирующих импульсы подачи электродной проволоки, по их влиянию на геометрические характеристики сварного соединения изучались лишь в локальных областях, и это связано с существенными ограничениями в управлении параметрами импульсов, в том числе и оперативного управления, а также с использованием методик измерения, имеющих недостаточную точность.

В настоящее время существует разработка относительно совершенного и эффективного механизма подачи электродной проволоки на основе вентильного компьютеризованного электропривода. Высокие показатели динамических характеристик (полоса воспроизводимых частот без существенного искажения формы импульса – не менее 60 Гц) получены как за счёт конструктивных особенностей новых разработок электропривода, так и благодаря отсутствию промежуточных механических звеньев (подающий ролик установлен непосредственно на валу электродвигателя), обладающих неизбежными дополнительными инерционностями элементов и зазорами между ними. Такой механизм подачи “РМ-80” показан на рисунке 1. Он обес-

печивает следующие алгоритмы движения ролика – проволоки:

- конвенциальное движение;
- импульсное движение в идеализированной форме (представлено на рисунке 2) с возможностью реализовывать этот алгоритм полностью или фрагментарно, например, исключить реверс, а также регулировать любой из обозначенных параметров.

Рисунок 1 *Импульсный механизм подачи на основе вентильного электропривода: 1 - блок цифрового управления; 2 - вентильный электродвигатель; 3 - устройство с прижимным и подающим роликом; 4 - кассета для проволоки.*

Вариант реального импульсного движения показан на рисунке 3.

В экспериментальной части работы использовались: источник сварочного тока – ВС-300 (источник выбран потому, что обеспечивает ступенчатое амплитудное регулирования выходного напряжения без искажения его фазы); сварочный трактор ТС-17 (рисунок 4, позиция 1), оборудованный импульсным механизмом подачи на основе безредукторного вентильного электропривода (позиция 2).

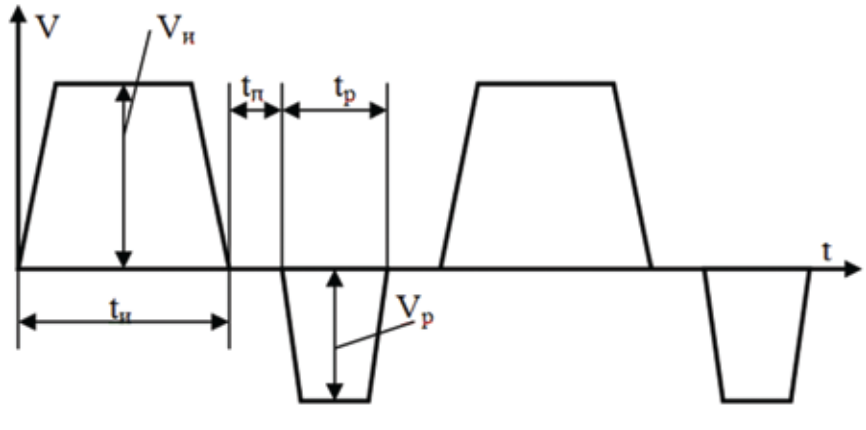


Рисунок 2 *Циклограмма импульсной подачи электродной проволоки:*
$t_и$ – длительность импульса; $t_п$ - длительность паузы; $t_р$ – длительность реверса; $V_и$ – скорость в импульсе; $V_р$ – скорость в реверсе

Валики наплавлялись в среде углекислого газа. Полярность – обратная. Вылет электрода – 12 мм. Напряжение на дуге находилось в пределах 20-22 В. Сварочная проволока Св-08Г2С (омедненная) диаметром 1,2 мм. Наплавку проводили на стальную пластину из Ст.3 толщиной 6 мм. При этом каждый последующий валик выполняли при одной и той же начальной температуре пластины. Также задавались частотой импульсов и скважностью.

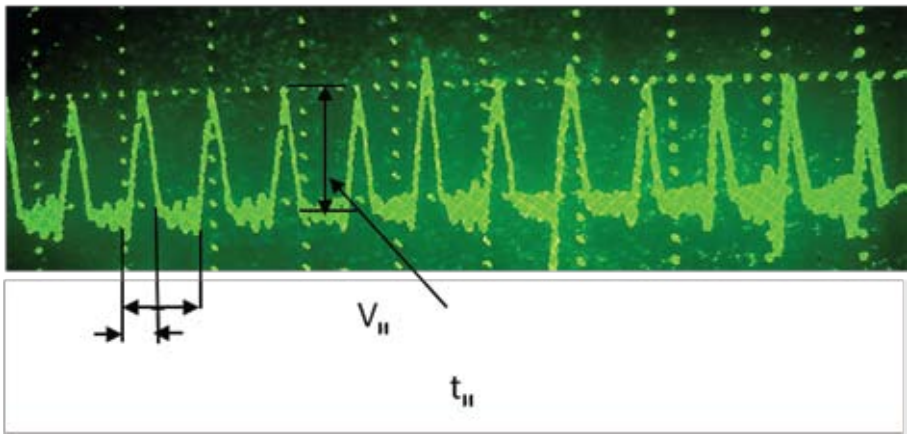


Рисунок 3 *Пример осциллограммы скорости импульсной подачи*

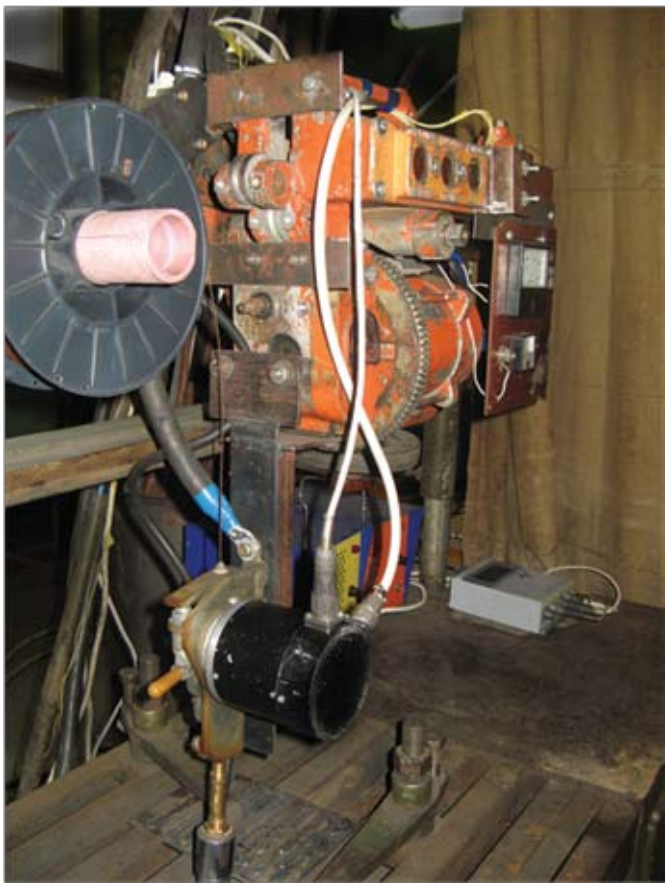


Рисунок 4 *Внешний вид лабораторной установки*

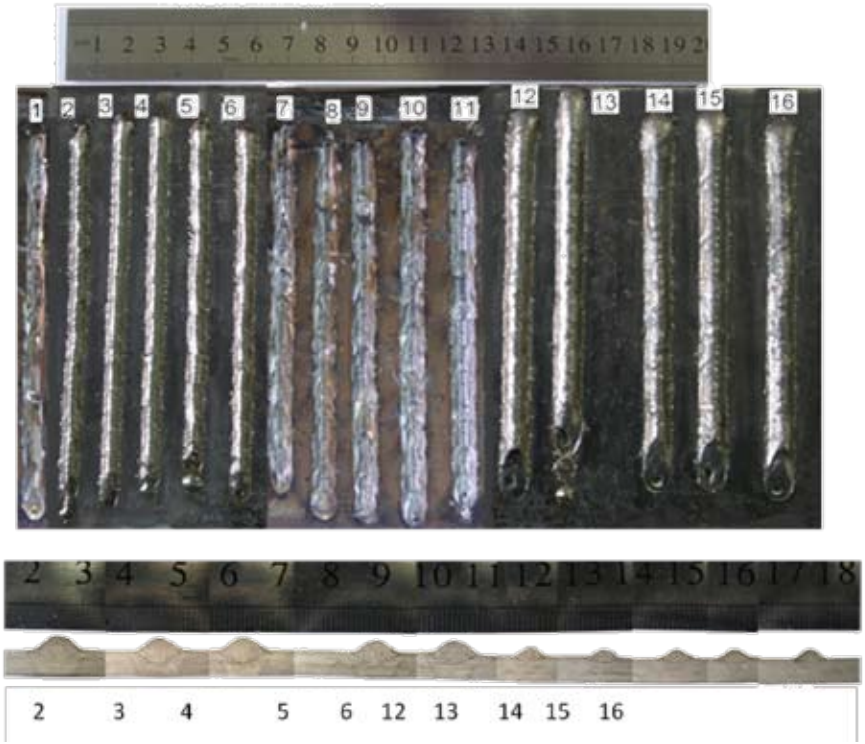


Рисунок 5 *Валики наплавленного металла, характеристики которых используются для построения нейросетевой модели*

Полученные результаты можно представить в виде функции каждого из параметров шва, как зависимости от двух параметров (скважности и частоты импульса), при этом третий параметр (скорость подачи) фиксирован. Виды поверхностей отклика соответствующих функций приведены на рисунках 6 и 7.

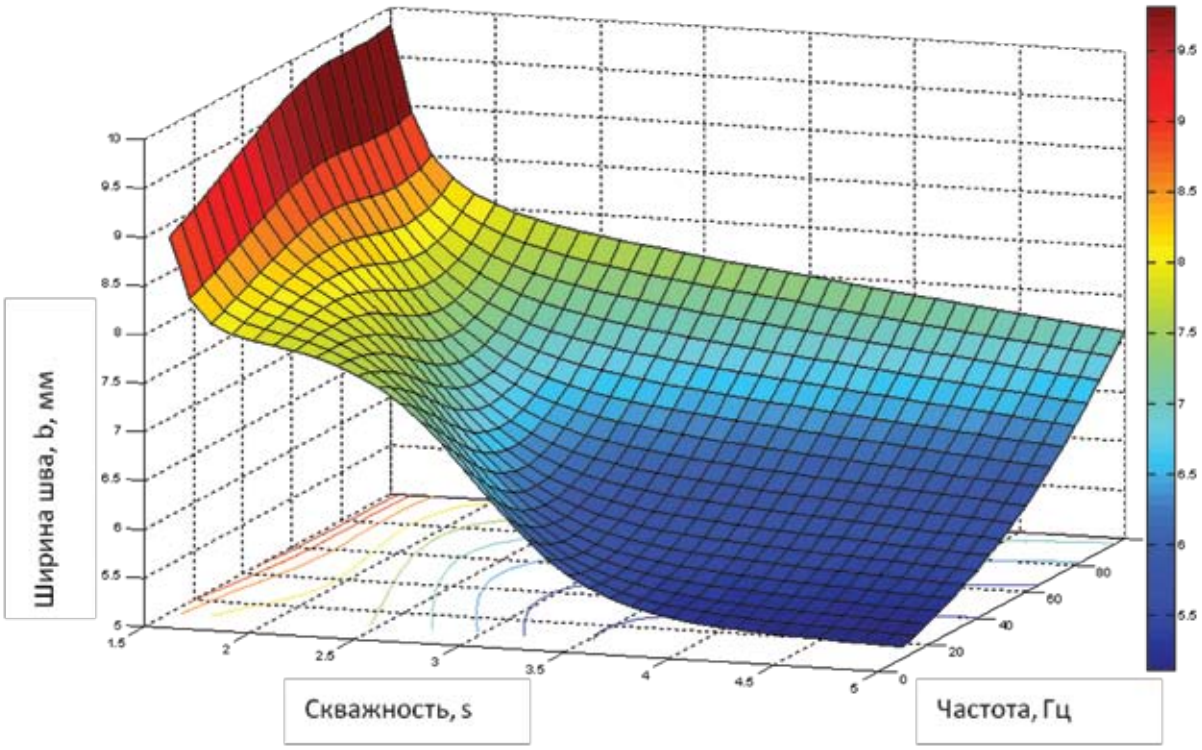


Рисунок 6 *Зависимость ширина шва от скважности и частоты*

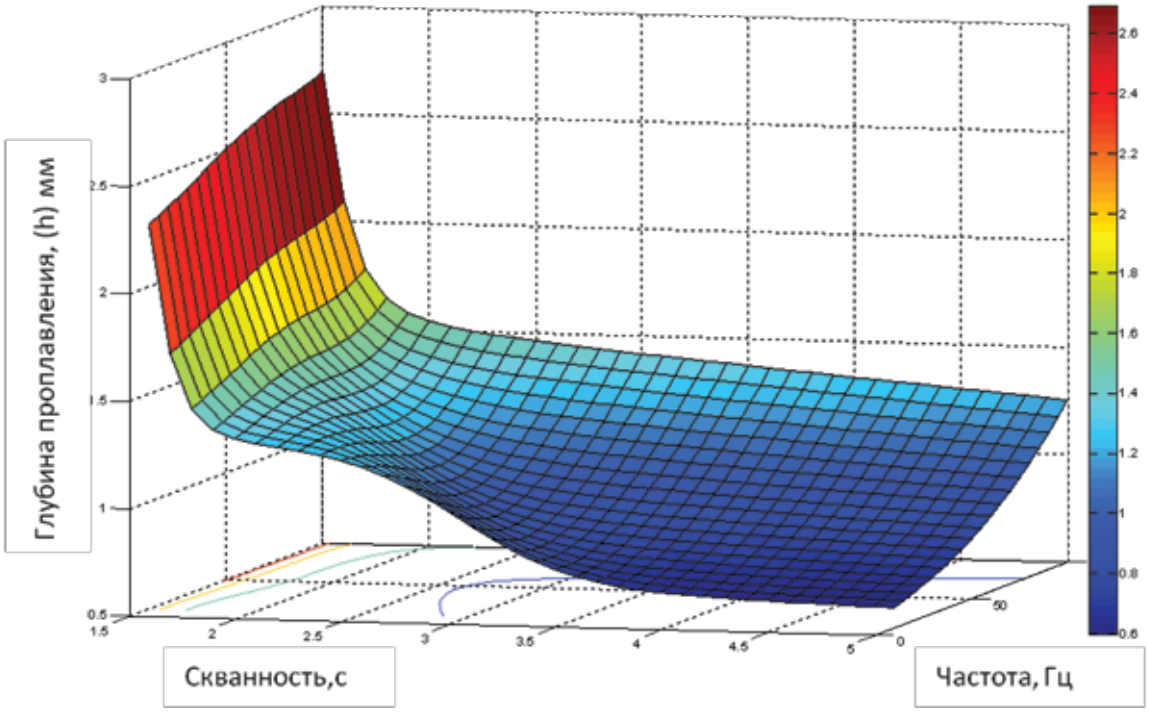


Рисунок 7 *Зависимость глубины проплавления от скважности и частоты*

Результаты проведенного исследования достаточно близки к компьютеризованным измерениям характеристик наплавленных валиков, образцы макрошлифов которых представлены на рис. 5.

Заключение

Нейросетевое моделирование может быть предложено как эффективный метод достоверной оценки параметров сварного соединения и наплав-ленного валика от комплекса специально вводимых воздействий, в том числе и импульсной подачи электродной проволоки с управляемыми параметрами.

При интерполяции некоторые параметры импульсной подачи намерено могут быть выбраны из числа тех, которые на практике достаточно сложно реализовать. Однако, если интересен возможный конечный результат, то эту возможность исследователям и разработчикам предоставляет метод нейросетевого программирования.

СОВРЕМЕННАЯ ВЕСОВАЯ ЛИНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ И КЕРАМИЧЕСКИХ ФЛЮСОВ

Ю.Б. Семендяев,
инж.,
М.И. Кучерова,
инж.,
Д.В. Арсюков,
инж.,
В.В. Майоров,
инж.,
ЗАО «Электродный завод»
г. Санкт-Петербург

Приводится описание спроектированной и изготовленной весовой линии для производства сварочных электродов и керамических флюсов. Дано подробное описание системы программного управления линией.

Одним из самых ответственных процессов при производстве сварочных материалов является процесс приготовления сухой шихты. От точности выполнения этой операции зависят такие свойства сварочных материалов, как сварочно-технологические свойства, химический состав наплавленного металла, механические свойства металла шва.

Технологическим отделом был изучен и проанализирован опыт работы весовых линий заводов: ЗАО «Магнитогорский метизно-колибровочный-Метиз»; ОАО «Межгосметиз-Мценск»; ЗАО «Северсталь-Метиз»; завода «ANYKSCIU VARIS» . За основу была выбрана весовая линия электродного завода «ANYKSCIU VARIS» (Литва). Проект весовой линии был разработан специалистами завода совместно с литовской компанией «КЕМЕК», специализирующейся на выпуске оборудования и программ автоматического дозирования.

Техническое задание на проектирование весовой линии включало следующие задачи:

1. Весовая линия должна единовременно обслуживать 3 прессовых линии и участок керамических флюсов (до 4-х разных рецептур сварочных материалов). Каждый рецепт, включает в себя до 15 материалов. Вес одного отвеса (рецепта) до 150 кг.

2. Линия должна обеспечивать возможность изготовления большой номенклатуры сварочных материалов: более 60 марок (35 компонентов материалов).

3. За один час линия должна дозировать не менее 13 отвесов.

4. Весовая линия должна работать в автоматическом и ручном режиме.

5. Должна быть предусмотрена быстрая смена комплектующих при ремонте и обслуживании линии.

Схема размещения блоков с бункерами материалов и механическим оборудованием показана на рисунках 1 и 2.

Металлоконструкции и накопительные бункеры спроектированы и изготовлены специалистами завода. Каждый бункер снабжен сводообрушителем и датчиками уровня материалов. Питатели шнековые итальянские имеют длину от 1000 до 2000 мм. Привода немецкие имеют две скорости вращения: первую – обеспечивающую производительность до 20 кг/мин, вторая – замедленная для довешивания. Скорости могут регулироваться под каждый материал. Дозатор из нержавеющей стали объемом 0,3 $м^3$ (на 150 кг материала) с разгрузочным устройством. Дозатор установлен на тензодатчиках.

Схема электронного оборудования автоматизированной весовой линии с программным управлением (структура системы) приведена на рис.3.

Система охватывает следующие контрольно-учетные операции производства:

1. Контроль состояния загруженности бункеров материалов.
2. Контроль и управление рецептурой отвесов.
3. Контроль заданий производства для прессовых линий и флюсового участка.
4. Контроль и управление дозировкой рецептов.
5. Учет и отслеживание транспортировочных емкостей с дозированными отвесами.

Алгоритм работы системы:

5.1. Заполнение бункеров.

Процесс работы начинается с заполнения бункеров материалами. Процесс заполнения не автоматизирован (будет отдельный проект), но содержит функцию контроля уровня заполнения бункеров и систему предупреждения нижнего уровня в бункере. Пользовательский интерфейс позволяет вводить информацию о находящихся в бункерах материалах, их номерах партий и количестве. Пользователь так же может получить информацию о том, сколько было израсходовано материала при дозировании после последнего указания о заполнененности бункера.

5.2. Формирование задания.

Процесс формирования задания происходит с заполнения строчки задания в базе данных и с указанием рецепта, который должен быть реализован. Задание может поступить в производство только после создания технологом конечного рецепта. Технолог получает запрос на формирование рецепта для задания. Проанализировав информацию рецепта базового или последнего произведенного рецепта заказанной марки, технолог корректирует и подтверждает его. Мастер электродного цеха (ЭЦ), получив подтвержденный рецепт для задания, запускает его в производство, указав линию, весовщицу, которая будет обслуживать линию, количество отвесов.

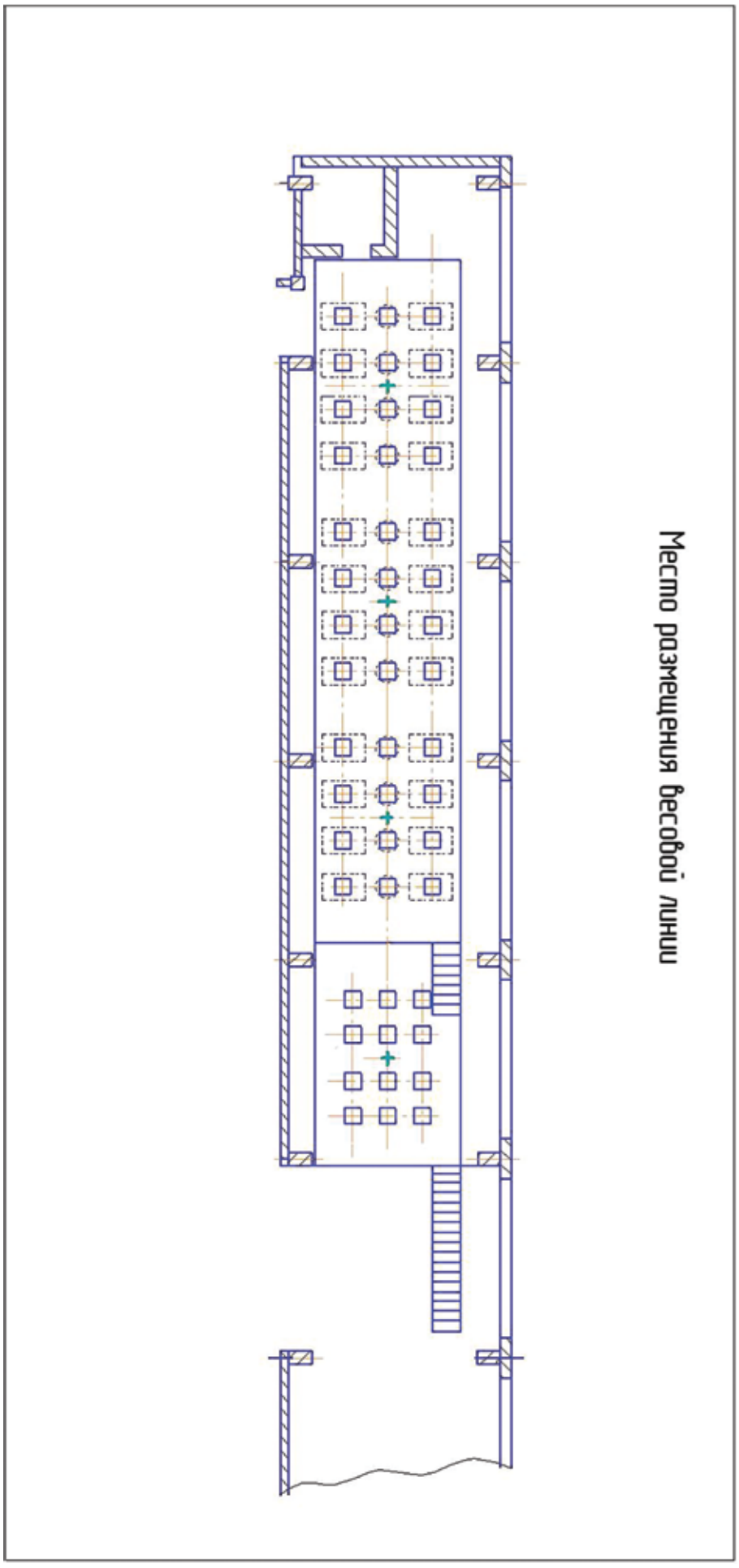


Рисунок 1 *Схема размещения блоков с бункерами материалов и механическим оборудованием*

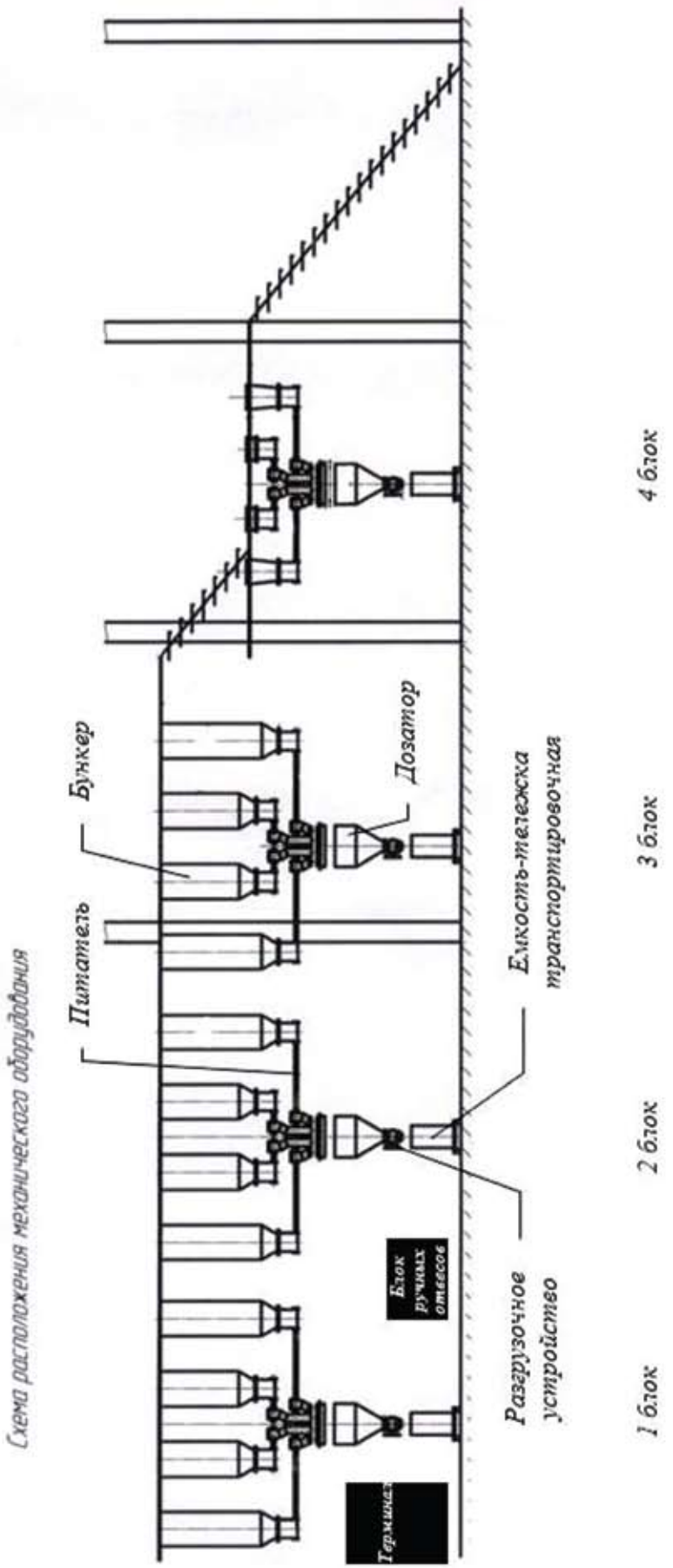


Рисунок 2 *Схема размещения блоков с бункерами материалов и механическим оборудованием*

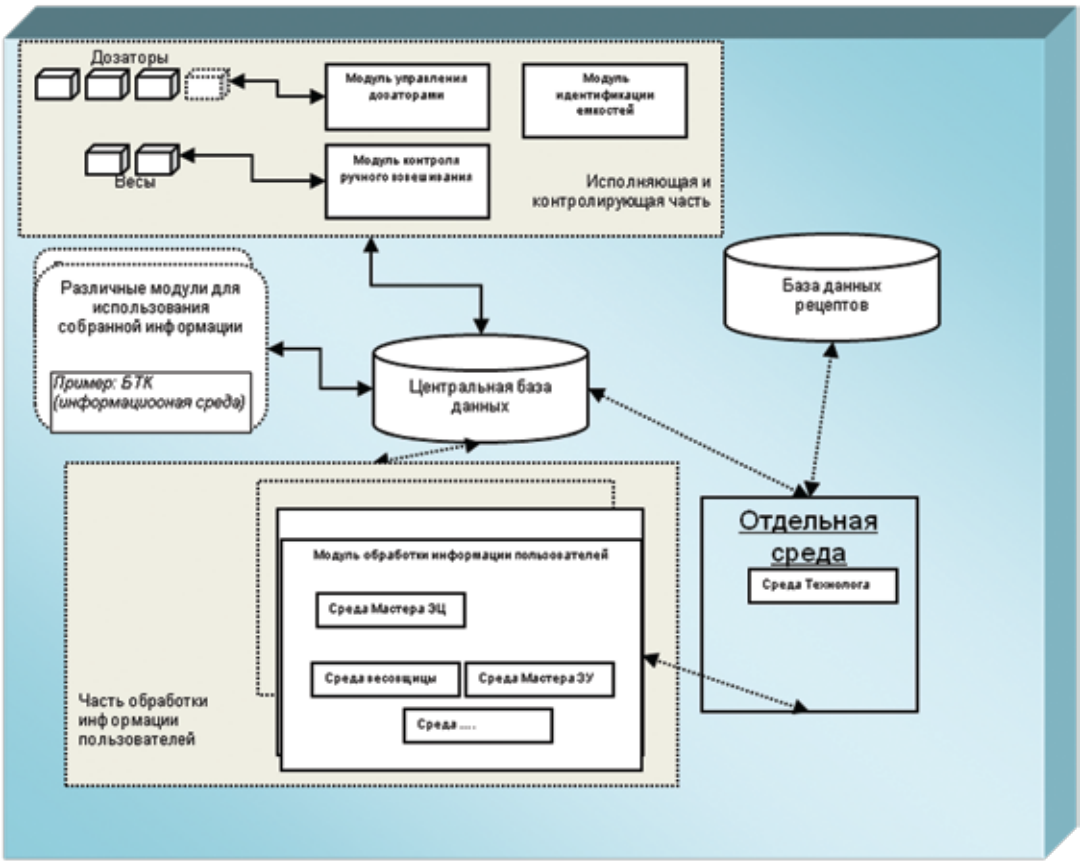


Рисунок 3 *Схема автоматизированной весовой линии с программным управлением*

Информация о задании включает в себя следующие пункты:

- номер партии сварочного материала,
- марка сварочного материала,
- диаметр электрода,
- линия производства,
- количество отвесов,
- весовщица,
- уникальный номер (предлагается последний существующий + 1) – номер отвеса.

5.3. Процесс дозирования.

Сформированное задание передается в производство. В месте расположения дозаторов расположены терминалы с информацией для весовщиц и места их идентификации. Каждая весовщица имеет личную идентификационную карточку, при помощи которой идентифицируется в системе, когда она готова обслуживать линию. Идентификация в системе дает команду сформировать запуск системы на дозирование для идентифицировавшейся весовщицы. Поставив задание в очередь на производство, система автоматически рассчитывает какие материалы и на каких блоках должны дозироваться. На терминале выводится информация одновременно

для 4-х линий. Для каждой линии выводится следующая информация:

- Фамилия весовщицы,
- Марка сварочного материала,
- Диаметр электрода,
- Номер и/или цвет линии,
- Количество материалов в отвесе,
- Уникальный номер (номер отвеса),
- Список блоков в том порядке, в котором они планируют получать задания.

Весовщица видит на терминале номер блока, с которого она должна получить первую порцию одного блока (рисунок 4). Если весовщица должна обслуживать несколько линий, то на терминале предлагается указать, какую линию она будет обслуживать. При работе нескольких весовщиц система ставит в очередь задания для всех идентифицировавшихся весовщиц и старается распределить процесс дозирования с учетом того, чтобы достигнуть наиболее эффективного результата.

Рисунок 4 *Экран весовщиц*

Получив команду о дозировании порции одного блока, весовщица устанавливает емкость под устройство выгрузки из указанного дозатора и идентифицирует ее посредством считывания идентификатора емкости. После этого емкость привязывается к номеру отвеса задания и будет контролироваться ее позиционирование и транспортировка.

На терминале блока с момента начала дозирования первого материала появляется оперативная информация о номере бункера блока из которого идет дозирование и

количества материала (последовательно для каждого блока). После полного дозирования порции одного блока появляется суммарная цифра, означающая количество материалов, прошедших дозирование. Идентификация емкости одновременно является подтверждением того, что материалы, прошедшие дозирование могут быть выгружены в емкость.

После окончания процесса дозирования одного блока система позволяет выгрузить содержимое дозатора в емкость. Одновременно на терминале высвечивается номер следующего блока, на котором дозируется следующая часть отвеса – порции одного блока.

При разгрузке порции одного блока в емкость на терминале блока идет обратный отсчет до нуля веса выгружаемых материалов.

Если в отвесе необходимо заполнение материалами при помощи ручного дозирования, то система сообщает об этом на терминале. Весовщица, как и в случае с другими дозаторами, должна идентифицировать емкость у блока ручных отвесов. Система автоматически поместит рецепт материалов в весовой терминал, который будет направлять действия весовщицы при ручном дозировании. Результат дозирования с весового терминала так же будет сохранен в центральной базе данных.

Получив дозированные материалы со всех блоков дозирования, весовщица идентифицирует емкость у пульта распечатки чека емкости. После идентифицирования емкости, происходит распечатка чека. На чеке присутствует следующая информация:

- дата,
- марка сварочного материала,
- диаметр электрода (для электродов),
- уникальный номер отвеса,
- фамилия весовщицы.

Полученный чек весовщица прикрепляет к емкости и транспортирует ее к подъемнику.

5.4. Обслуживание системы.

Процесс производства является гибким в течение времени, и рецептура, как и задания, могут меняться в течение рабочего дня. Ответственные за систему лица, используя систему идентификации, могут получить доступ к заданиям, которые запущены в производство с любого терминала системы. В зависимости от привилегий им буде предоставлена информация о производстве и возможность ее корректировки.

5.5. Разрешение внештатных ситуаций.

К нештатным ситуациям можно отнести следующие случаи:

1. Отключение электричества, при котором система полностью или частично обесточивается и не может продолжать выполнение задачи.

2. Остановка функционирования части дозатора по причине поломки, застревания шнека, окончания материала в бункере и т.п.

3. Ошибочное выполнение действий обслуживающим персоналом.

Во всех случаях, кроме долгосрочного обесточивания всей системы в целом:

- система, по возможности, определяет неисправность и останавливает процесс работы неисправного блока системы или его части на которую влияет неисправность, информирует обслуживающий персонал о неисправности;
- ответственные лица, используя привилегии доступа к системе, на любом из существующих и имеющих питание и связь с центральным сервером системы терминалов системы могут получить доступ к информации о состоянии системы в целом и ее конкретных узлах (получить информация о состоянии блоков дозирования и возможности частичного управления отдельными блоками), получить отображение информации о производимом на момент остановки задании, имеют возможность аннулировать задание или порцию, разрешить продолжение выполнения задания, если это возможно.

Основные модули системы:

1. центральная база данных,
2. рабочая среда мастера заготовительного участка,
3. рабочая среда мастера электродного цеха,
4. рабочая среда технолога,
5. рабочая среда весовщицы,
6. информационная среда бюро технического контроля,
7. устройства дозирования,
8. устройство контроля ручного дозирования.

Программа имеет модуль формирования отчетов, который может быть вызван из любой среды. Модуль формирует заранее указанные формы отчетов. Отчеты, которые могут быть сформированы, привязываются к среде и могут быть сформированы и распечатаны только пользователями конкретной рабочей среды.

Таким образом, новая весовая линия позволяет:

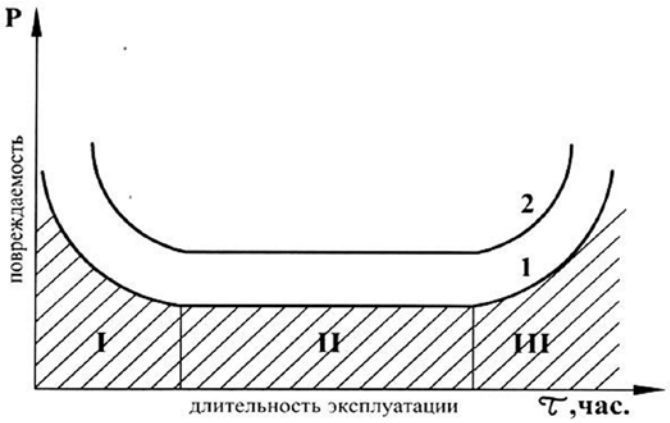
1. исключить влияние человеческого фактора на точность взвешивания,
2. контролировать достоверность состава отвесов шихты заданному рецепту,
3. значительно улучшить условия работы весовщиц.
4. одновременно обслуживать четыре линии производства сварочных материалов.

ХАРАКТЕР ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Ю.В. Зеленин,
к.т.н.
ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»
г. Санкт-Петербург

Для увеличения долговечности сварных соединений РУ типа БН необходимо определить, сформулировать и регламентировать требования к применяемым основным и сварочным материалам с учетом используемой технологии сварки. На основании анализа литературы и опыта эксплуатации энергоблоков можно утверждать, что главным требованием должно быть обеспечение содержания феррита в структуре металла шва в строго определенных пределах, регламентированных с учетом применяемой технологии сварки за счет использования сварочной проволоки с исходным содержанием феррита, при наличии надежных экспериментальных данных по длительной прочности и склонности к тепловому охрупчиванию металла шва на длительной временной базе.

К настоящему времени накоплен значительный опыт эксплуатации энергоустановок, в т. ч. на сверхвысоких параметрах, основные узлы которых изготовлены из аустенитной и перлитной стали [1]. Опыт эксплуатации и результаты экспериментальных исследований позволили установить закономерности повреждаемости, в том числе сварных соединений, что достигает свыше 90% общей повреждаемости оборудования (рисунок 1).



I - до 10000-30000 час.;
II - до 100000 час.;
III - свыше 100000 час.
1- высокое качество изготовления энергооборудования;
2 - низкое качество изготовления энергооборудования.

Рисунок 1 *Схема повреждаемости энергоблоков от времени эксплуатации.*

В начальный период эксплуатации энергоблоков наблюдается повышенная, снижающаяся со временем, "технологическая" повреждаемость сварных соединений, вызванная дефектами, пропущенными при изготовлении, а также ошибками расчета и проектирования (участок I на рисунке 1). При работе длительностью свыше 10…30 тыс. часов повреждаемость сварных стыков стабилизируется и остается на низком уровне для узлов, работающих при температуре ниже 450° С (участок II на рисунке 1). Отказы в этом случае обусловлены нарушением режима эксплуатации и хранения оборудования (возникают термоусталостные и коррозионные повреждения), а также связаны с недостатками проектирования и конструктивного оформления узлов. Следует отметить, что повреждаемость стыков, работающих при температурах выше 450…480° С, после эксплуатации свыше 50…100 тыс. часов увеличивается и имеет тенденцию к постоянному росту [2]. Третий участок повреждаемости (участок III на рисунке 1) вызван старением металла в результате работы при повышенной температуре и образованием трещин в ОШЗ сварных соединений, что приводит к, так называемым, локальным разрушениям в околошовной зоне (ЛРОЗ) и образованию трещин коррозионного характера, преимущественно также в ОШЗ.

Время эксплуатации сварных соединений до образования трещин зависит от марки используемого материала, конструктивного оформления узла (минимальное время до образования трещин у соединений трубопроводов с дренажными трубами, с массивными тройниками, арматурой) и вида сварного соединения. В последнем случае минимальное время до образования трещин наблюдается у тавровых сварных соединений. При этом фактор правильного выбора материала сварного узла является во многих случаях определяющим.

Анализ известных результатов исследований наиболее характерных случаев образования трещин в сварных соединениях, произошедших в I, II и III периодах эксплуатации (по рисунку 1) РУ БН-600, позволяет определить основные причины повреждаемости [3-7].

Первому участку приведенной на рисунке 1 кривой повреждаемости соответствует выход из эксплуатации в первый и второй год работы восьми модулей основного и промежуточного перегрева парогенератора ПГН-200М РУ БН-600. На поверхности верхней трубной доски модулей были обнаружены трещины, в основном на ремонтных швах вварки труб в трубную доску и перемычках трубной доски. Начало трещин находилось в месте перехода вальцованная труба – невальцованная труба, где осуществляется активный теплообмен между натрием (второй контур) и паром (третий контур). Трещины со стороны II контура имеют большее раскрытие, что свидетельствует о значительных напряжениях при образовании трещин при давлении меньшем, чем в I-м контуре. О значительной деформации, сопровождающей образование трещин, свидетельствуют также "утяжины" в конце трещины, смещение кромок трещины.

Металлографический анализ подтвердил напряженное состояние металла – структуру металла труб и трубной доски отличает значительная степень деформации, выражающаяся в многочисленных линиях и полосах скольжения. Высокий

уровень напряжений и дополнительное упрочнение металла за счет выявленного деформационного рельефа уменьшают его пластичность и увеличивают склонность к преждевременному образованию трещин. В этом случае причинами повреждения узлов являлись: неудачное конструктивное решение сильфона модуля, не выполнявшего своих функций гашения термопульсаций трубного пучка длиной 12…14 м, и значительные тепловые удары при ускоренном режиме пуска (попадание в связи с этим влаги на верхнюю трубную доску вызывает температурный градиент ~ 250° С против 150° С, допускаемого за рубежом). Образование трещин в трубных досках происходило в результате значительных напряжений: термических и компенсационных. При этом коррозионные трещины имели вторичное происхождение и, как показал металлографический анализ, происходили под воздействием щелочи NaOH при разгерметизации узлов заделки труб.

Таким образом, основной причиной повреждаемости в начальный период эксплуатации (участок I на рисунке 1) является образование горячих технологических трещин при сварке конструкций энергоблока. Факторами, провоцирующими их, являются: неправильный выбор сварочных материалов, режимов термической обработки сварных соединений и технологии сварки.

Известны также результаты анализа повреждений, произошедших в результате эксплуатации теплообменника 5ПТО РУ БН-600 длительностью ~ 100 тыс. часов [3]. Исследовали 12 секторов конического перехода верхней трубной доски, на одном из которых на БАЭС при дефектоскопическом контроле были выявлены поверхностные трещины. Согласно приведенной выше схеме повреждаемости (рисунок 1), этот случай относится ко II участку – установившейся стадии временной зависимости.

Внешний осмотр (в том числе, при разрезке) показал, что трещины расположены со стороны I контура по всему периметру конического перехода трубной доски, шва и стыкуемой с трубной решеткой обечайки. При этом наибольшее количество трещин (с максимальной глубиной до 7,0 мм) обнаружено лишь в двух секторах, обращенных к горячей зоне, где температура составляла 550° С. Одиночные трещины (глубиной 3,0…4,0 мм) располагаются в остальных секторах, шве и стыкуемой с трубной доской обечайке.

На основании выполненных исследований с определением мест локализации трещин, анализом микроструктуры, оценкой механизмов разрушения и сопротивления развитию обнаруженных трещин было сделано предположение, что в районе двух секторов с максимальными глубиной (до 7,0 мм) и количеством трещин имело место смешение "холодного" и "горячего" натрия, т. е. специальные конструкции вокруг трубной решетки, которые должны были предотвратить попадание "холодного" натрия, не выполняли своего назначения и трубная доска, обращенная к активной зоне, испытывала высокоградиентное распределение термических напряжений. В результате, распределение напряжений по радиусу в азимутальном направлении имело затухающий характер, и трещины, являющиеся поверхностными, возникали под действием термических напряжений.

Одиночные малой протяженности трещины (до 3,0…4,0 мм) на остальной повер-

хности трубной доски возникали, очевидно, в связи с периодическим изменением уровня натрия первого контура, что привело к незначительным циклическим напряжениям из-за различной теплоотдачи наружной поверхности трубной доски в натрии и аргоне.

Исследование механических свойств в различных участках обечайки, в районе тройника, трубной доски по окружности, высоте и толщине после эксплуатации при температурах 518…550° С показало, что:

- прочностные характеристики ($\sigma_в$ и $\sigma_{0,2}$) металла исследованных узлов теплообменника не уменьшаются в процессе эксплуатации;

- пластичность (δ и ψ) металла уменьшается незначительно и превышает принятый в РД [8] уровень;

- старение в процессе эксплуатации приводит к снижению трещиностойкости, тем не менее, все исследованные материалы (основной и металл шва) имеют высокие значения этой характеристики.

Характерно, что лишь металл конического перехода в районе трещин имел пониженную пластичность ($\psi \sim 40\%$).

О стабильности свойств сварных соединений стали марки 10Х18Н9 после длительной эксплуатации в условиях ползучести свидетельствуют результаты исследования нитки трубопровода из стали марки 09Х18Н9 (врезанной в действующий трубопровод из стали марки 12Х18Н10Т ЧТЭЦ-1 с $Т_{эксп}$ 565° С и Р ~ 200 МПа). После эксплуатации в течение ~ 100 тыс. часов из сварных соединений опытного участка трубопровода были вырезаны образцы для испытания на кратковременную и длительную прочность, ползучесть, коррозионную стойкость и стойкость против локального разрушения в околошовной зоне (ЛРОЗ) [9].

Определение на стандартных образцах прочностных и пластических свойств основного металла, сварных соединений и металла шва, показало незначительные увеличение прочности и снижение пластичности (рисунок 2). Ударная вязкость металла шва, несмотря на снижение ее значений, находится на удовлетворительном уровне. Длительная прочность основного металла и сварных соединений после эксплуатации практически не претерпела изменений. Полоса разброса точек, характеризующих длительную прочность в исходном состоянии и после эксплуатации, находится в одной области и ее значения выше значений исследованной марки стали, определяемых ПНАЭ Г-7-002-86 (рисунок 3).

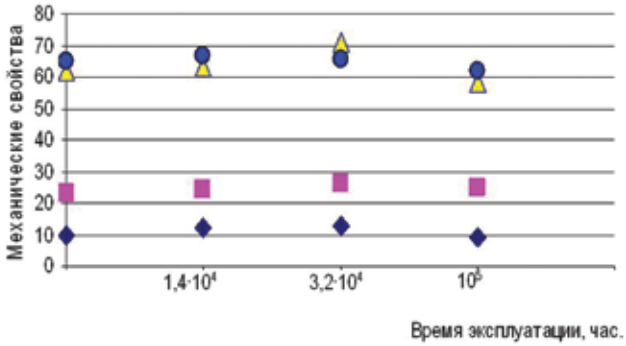


Рисунок 2 *Зависимость механических свойств стали 09Х18Н9 от времени эксплуатации: ▲ – $\sigma_в$•10⁻¹, МПа; ■ – $\sigma_{0,2}$•10⁻¹, МПа; ● – δ, %; ♦ - KCU•10, МДж/м²*

Рисунок 3 *Зависимость длительной прочности стали 09Х18Н9 от времени эксплуатации*

Отличие в свойствах металла до и после эксплуатации проявилось лишь в деформационной способности, определяющей хрупкую прочность узкого участка околошовной зоны. Значение δ в ОШЗ стали 09Х18Н9 снизилось с 8 до 3,5%, а в стали Х16Н11М3 – с 20 до 13%, при том, что в стали 12Х18Н10Т δ составляла 0…2%.

Однако если в сварных соединениях стали 10Х18Н9 после эксплуатации разница в деформационной способности узкой ОШЗ и далее отстоящего от зоны сплавления металла сохраняется, то после деформационного старения (эксплуатации) сварных соединений стали Х16Н11М3 она практически нивелируется, что объясняется различием структуры и механизма деформирования в ОШЗ рассматриваемых марок стали и, соответственно, их разной стойкостью против хрупких локальных разрушений.

Исследование микродеформирования на вакуумной металлографической установке «ИМАШ-5М» при температурах 500° С и выше показало увеличение неоднородности локальных деформаций в ОШЗ: в исходном состоянии (после сварки) коэффициент вариации более чем в 2 раза ниже этого показателя после эксплуатации (рисунок 4). Установлено также, что раскрытие трещин в ОШЗ стали 10Х18Н9 наблюдается при деформации 4% после эксплуатации и 14% – в исходном состоянии. При этом соответствующие показатели деформационной способности ОШЗ стали Х16Н11М3 составляли 13 и 20%. О большей стойкости ОШЗ стали Х16Н11М3 против ЛРОЗ свидетельствует и уменьшение различия в показателях деформации ОШЗ и основного металла рассматриваемой стали по сравнению со сталью 10Х18Н9.

Характер распределения деформации по микроучасткам металла ОШЗ сварных соединений стали 10Х18Н9 в исходном состоянии и после указанного выше режима эксплуатации, как и предполагалось, различен. Выявлено, что возникшая неод-

нородность деформаций по микроучасткам металла после эксплуатации в составе действующего энергоблока остается практически неизменной. При этом наблюдается постоянство и закрепление локально повышающейся и локально низкой деформации, в отличие от исходного металла, в котором характер неоднородности деформаций частично сохраняется, но в основном наблюдается разброс значений пластичности.

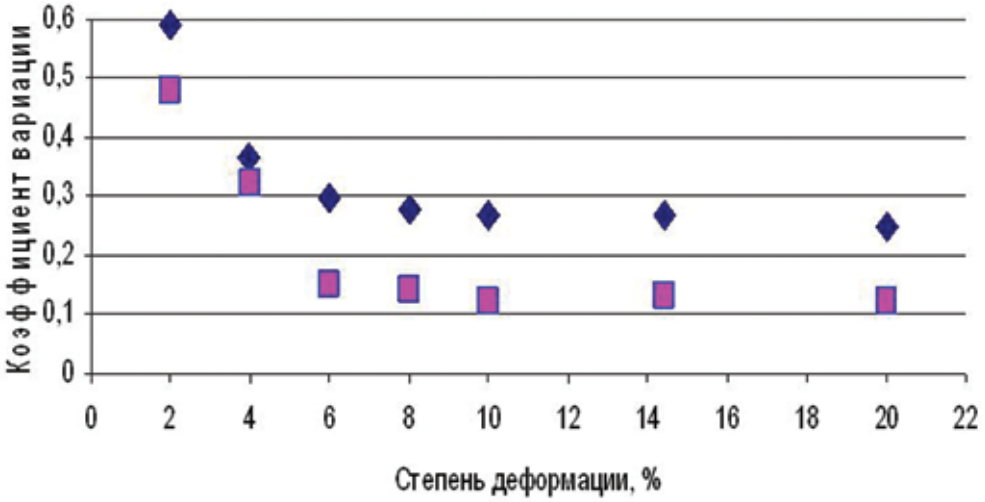
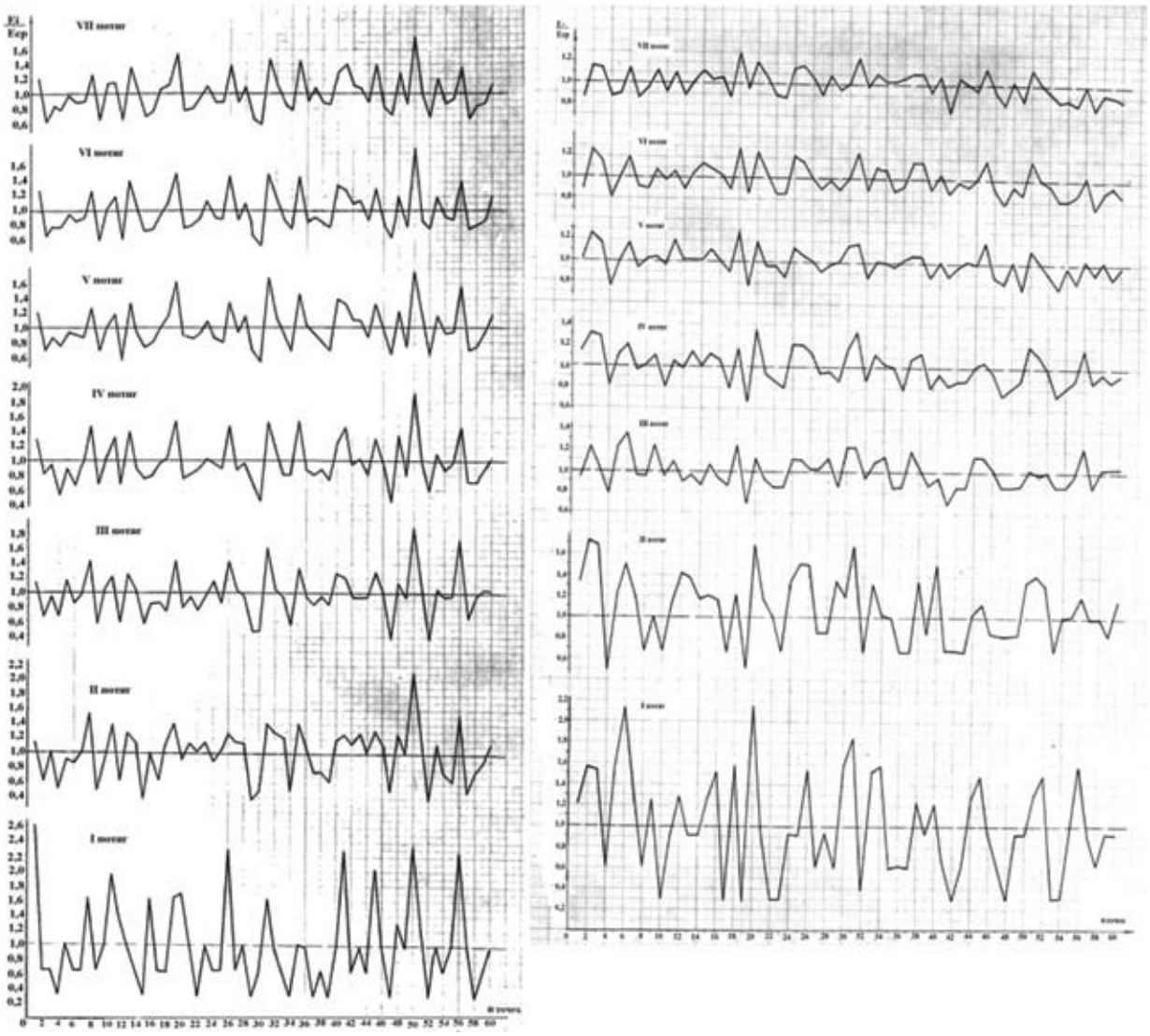


Рисунок 4 *Изменение коэффициента вариации от степени деформации металла ОШЗ стали 10Х18Н9 в исходном состоянии (■) и после эксплуатации (♦)*

Результаты замеров деформации на микроучастках с числом замеров "n" (рисунки 5.1 и 5.2) подтвердили общую закономерность, заключающуюся в "закреплении" микроочагов пониженной и повышенной деформации, определяющей начало локального разрушения в результате достижения на отдельном микроучастке предельной пластической деформации равной относительному удлинению основного металла. Таким образом, анализ характера повреждений сварных соединений энергоблоков после эксплуатации, соответствующей по длительности II участку кривой повреждаемости (рисунок 1), показывает, что основной причиной образования трещин в этом случае являются локальные разрушения в околошовной зоне, возникающие вследствие отсутствия термической обработки.

Как следует из имеющихся экспериментальных данных [3], повреждаемость сварных соединений при увеличении длительности эксплуатации энергоблоков более 100 000 ч. связана с хрупкими разрушениями материала, реализующимися при ползучести (участок II на рисунке 1). Так при исследовании в 1999 г. сварных соединений трубопроводов острого пара и горячего промперегрева (Тэксп 505° С), отработавших 19 лет в составе 3-го блока Белоярской АЭС, трещины были выявлены в околошовной зоне стали 12Х1МФ разнородных стыков (сталь марок 10Х18Н9 и 12Х1МФ). Трещины имели протяженность 75…620 мм, глубина выборок составляла 3…18 мм. В связи с этим в течение 1999-2001 гг. были вырезаны все композитные стыки и взамен дефектных установлены новые путем вварки катушек с наплавкой

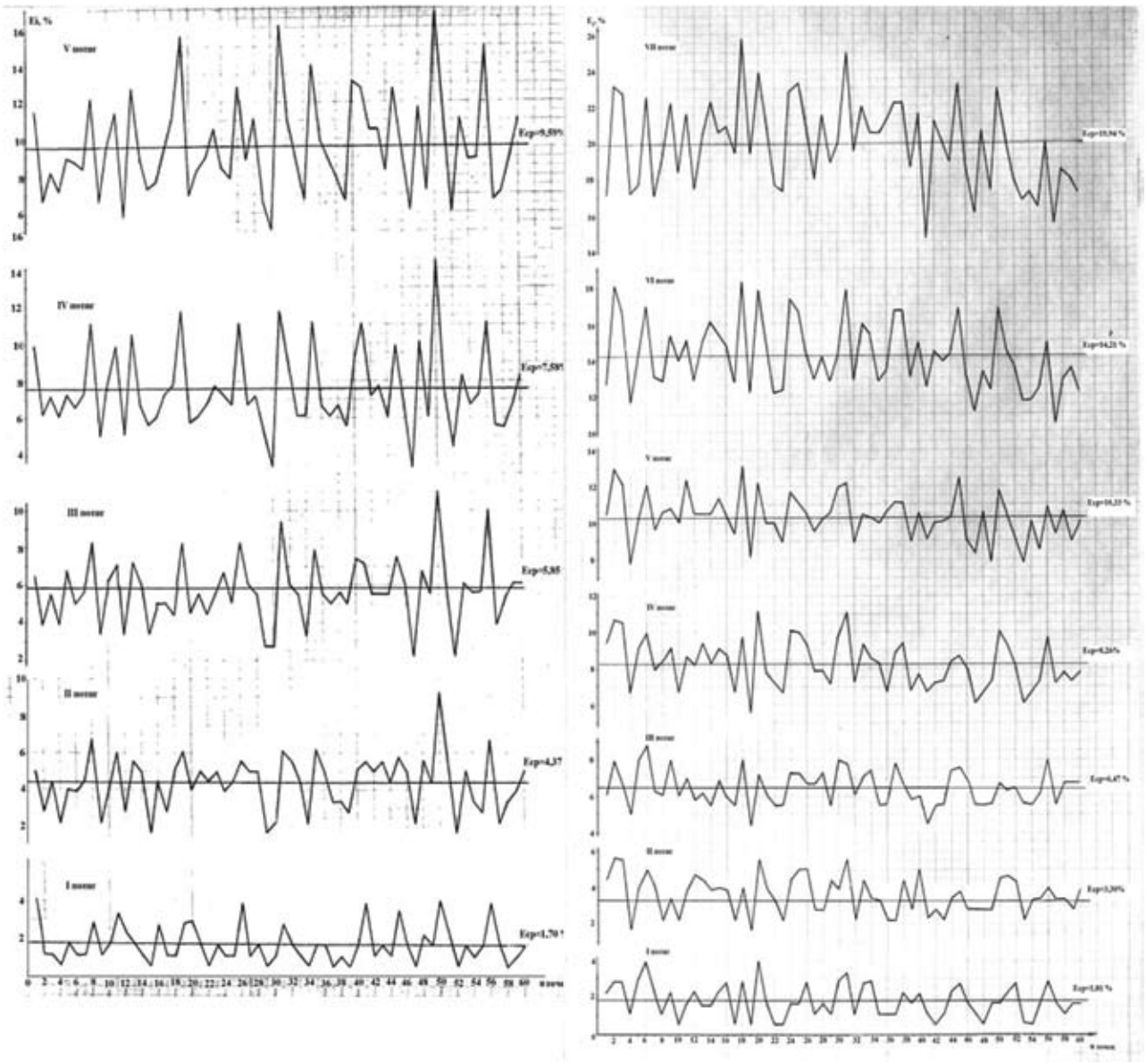
электродами марки ЭА 395/9 в качестве 1-го слоя и 48А-2 – последующих слоев. В 2007 г. был выполнен контроль 48 новых композитных стыков трубопроводов острого пара и промперегрева, подвергнутых ремонту в 1999-2001 гг. В результате контроля на 21 стыке выявлены трещины в ОШЗ со стороны стали 12Х1МФ.



а) *б)*

Рисунок 5 *Изменение коэффициента деформации* $E_i/E_{ср}$ *на микроучастках для образца стали Х18Н9: а) после отработанного ресурса при температуре 550°С, б) в исходном состоянии при температуре 550° С*

Образование трещин после 6 лет эксплуатации катушек следует признать весьма скоротечным, поскольку обычно трещины обнаруживаются после 10…15 лет работы реакторных установок.



а) *б)*

Рисунок 6 *Распределение локальных деформаций по микроучасткам относительно средней деформации для образца стали Х18Н9:*
а) после отработанного ресурса при температуре 550°С,
б) в исходном состоянии при температуре 550°С.

Из наиболее вероятных причин образования трещин были рассмотрены:

- наличие у линии сплавления со сталью 12Х1МФ свойственных разнородным соединениям кристаллизационных (со стороны аустенита) и диффузионных прослоек (обезуглероженных) в перлите;
- разница в скоростях ползучести аустенитной и перлитной составляющих сварного соединения;
- склонность сварных соединений к хрупким разрушениям в ОШЗ.

В результате проведенных исследований было установлено следующее:

- трещины располагаются с наружной стороны стыка и носят кольцевой характер;

- трещины располагаются в ОШЗ стали 12ХIМФ на расстоянии одного - двух зерен от линии сплавления;

- разрушение, реализуемое при ползучести, носит локальный межзеренный характер и по морфологии соответствует ЛРОЗ;

- разрушение развивалось длительное время (~ 12 тыс. ч) при температуре 505° С, о чем свидетельствует толщина окисной пленки по берегам трещины;

- характерных изменений структуры разнородных стыков в виде мартенситных прослоек со стороны аустенита и диффузионных ("мягких") прослоек со стороны перлита не выявлено;

- отклонений по химическому составу и механическим свойствам, связанных с нарушением нормативно-технической документации и технологии изготовления, не выявлено.

Следовательно, основными причинами разрушения сварного соединения в этом случае являлись разные скорости ползучести аустенитной и перлитной составляющей (такие разрушения наблюдались при заварке перлитных материалов аустенитными сварочными материалами) и склонность к хрупким локальным разрушениям в околошовной зоне [10].

Необходимо учитывать, что в сварных соединениях композиционных стыков реализуются дополнительные напряжения, вызванные неоднородностью химического состава, механических свойств и разностью скоростей ползучести аустенитной и перлитной составляющих сварного соединения. Кроме того в ОШЗ стали 12Х1МФ имеется зона крупного зерна. В связи с этим в сварном соединении из разнородных материалов, работающих при высокой температуре, реализуется сложное напряженное состояние [2], характеризуемое коэффициентом интенсивности напряжений. Расчетное эквивалентное напряжение определяется по формуле [8]:

$$\sigma_э^{max} = \sigma_э \cdot K_\sigma \qquad (1),$$

где $\sigma_э^{max}$ - эквивалентное напряжение в разнородном сварном соединении;

$\sigma_э$ - эквивалентное напряжение в однородном сварном соединении;

K_σ - коэффициент, учитывающий повышение эквивалентных напряжений в зоне разнородного сварного соединения вследствие разных скоростей ползучести (для рассматриваемого случая $К_\sigma$ = 1,63 [3]).

Так, для труб из стали 12Х1МФ Ø 219х25 мм при давлении 14 МПа эквивалентное напряжение от давления составляет:

$$\sigma_э = \frac{P(D-S)}{2S\varphi} = 68 МПа \qquad (2),$$

где P – внешняя нагрузка (Н), D – наружный диаметр трубы (219 мм), S – толщина стенки трубы (16 мм), φ – коэффициент снижения прочности сварного соединения (0,8). С учетом того, что $К_{\sigma}$ = 1,63, напряжения в зоне разрушения составят:

$$\sigma_э^{max} = 111 МПа$$

Фактическая длительная прочность $\sigma_{д.п.}$ разнородного соединения была определена по результатам испытаний. Для температуры 505° С и длительности эксплуатации $1{,}6 \cdot 10^5$ ч значение $\sigma_{д.п.}$ составило 165 МПа.

Выполненный расчет и полученные результаты испытаний на длительную прочность разнородных сварных соединений показали, что наблюдаемое в композиционных сварных соединениях стали 12Х1МФ и 10Х18Н9 образование трещин при эксплуатации модуля промежуточного перегрева происходит не вследствие исчерпания длительной прочности этих соединений.

Учитывая, что морфология трещин, полученная при испытаниях на трещиностойкость, соответствовала характеру трещин ЛРОЗ, был проведен инженерный расчет оценки стойкости против ЛРОЗ по локальным критериям трещиностойкости при ползучести, так как в зоне сплавления реализуется высокая жесткость напряженного состояния, достигающая значений, характерных для зон вершины трещины [11]. Критерием начала разрушения при этом служит уровень напряженного состояния металла ОШЗ, при котором происходит рост трещины, инициированный предварительными испытаниями образцов с надрезом в ОШЗ.

Результаты проведенных испытаний на трещиностойкость сварных соединений из стали 12Х1МФ в зависимости от принятого параметра P приведены на рисунке 6 [11].

Коэффициент запаса по трещиностойкости n_k оценивали применительно к условиям эксплуатации трубопровода "острого" пара из стали 12Х1МФ ($Т_{эксп}$ = 505° С, $\tau_{эксп} = 1{,}6 \cdot 10^5$ ч) при $\sigma_э$ = 68 МПа. Коэффициент интенсивности напряжений К1 определяли из соотношения:

$$K_1 = 1{,}12 M_k \sigma_э \sqrt{\pi \theta_p} = 8 МПа\sqrt{м} \qquad (3),$$

где M_k – поправочный коэффициент запаса прочности, учитывающий влияние толщины стенки на напряжение [12]; θ_p = 3 мм – минимальный размер дефектов, обнаруженных при контроле стыков трубопровода. Условие прочности по критериям трещиностойкости [9, 13] имеет вид:

$$n_k = \frac{K_{1rth}}{K_1} \geq 1 \qquad (4),$$

где n_k – коэффициент запаса по сопротивлению хрупкому разрушению; $К_{1rth}$ – пороговое значение трещиностойкости при ползучести; $К_1$ – коэффициент интенсивности напряжений.

Использование данных параметрической зависимости и расчета $К_1$ позволило оп-

ределить коэффициент запаса – $n_k < 1$.

Так как в приведенных расчетах не приняты во внимание напряжение от изгиба и дополнительные напряжения, возникающие на границе раздела аустенит - перлит, вероятность локального разрушения околошовной зоны очевидна.

Из рассмотренного можно заключить, что основной причиной повреждаемости сварных соединений энергоблоков при длительной эксплуатации (более ~ 100 тыс. часов, участок III на рисунке 1) являются

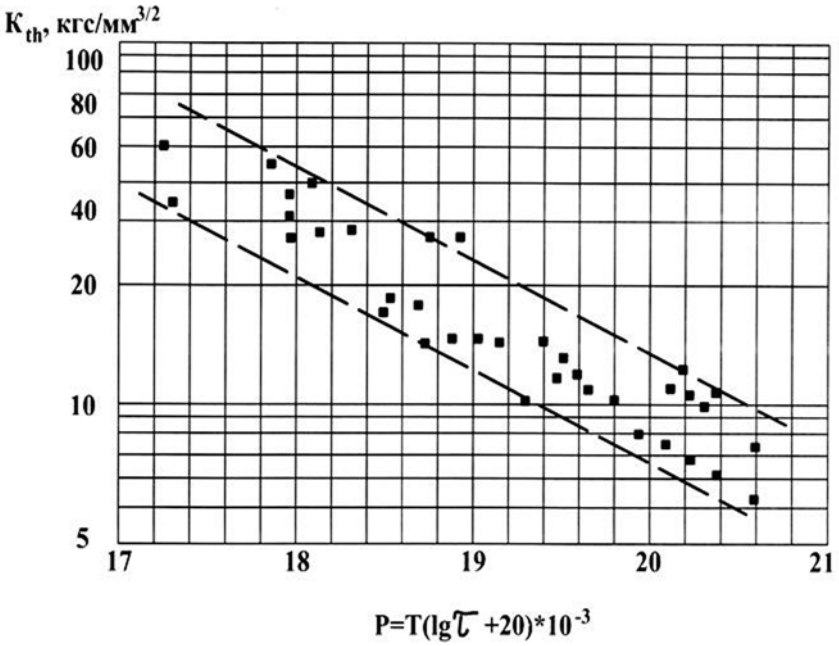


Рисунок 7 *Параметрическая зависимость пороговых значений вязкости разрушения по ОШЗ сварных соединений из стали 12Х1МФ*

локальные разрушения в околошовной зоне, а именно трещины, образовавшиеся в ОШЗ разнородных стыков, в том числе при использовании стали 12Х1МФ склонной к ЛРОЗ. При такой длительной эксплуатации необходимо также учитывать деградацию механических свойств металлических материалов, применяемых при изготовлении сварных узлов. Последний фактор значительно усиливается при нарушении допустимых пределов количества ферритной фазы в структуре наплавленного металла.

Таким образом, проведенный анализ известных данных о характере эксплуатационных повреждений сварных соединений оборудования реакторных установок (РУ) на быстрых нейтронах (БН) позволяет считать, что основными причинами разрушения сварных соединений в процессе эксплуатации являются:

– горячие технологические трещины (эксплуатация ~ 10000…30000 ч),
– локальные разрушения в околошовной зоне (~ 30000…100000 ч),
– деградация свойств металла (> ~ 100000 ч).

Выполненный анализ позволяет также выявить основные факторы, определяющие повреждаемость энергооборудования,:

- неправильный выбор основных и сварочных материалов для изготовления свар-

ных конструкций,

- изготовление сварных конструкций из разнородных материалов,
- назначение для изготовления конструкций материалов без учета их значений трещиностойкости,
- назначение технологии сварки без учета особенностей основных и сварочных материалов.

Следовательно для увеличения долговечности сварных соединений РУ типа БН необходимо определить, сформулировать и регламентировать требования к применяемым основным и сварочным материалам с учетом используемой технологии сварки. Соблюдение таких требований должно обеспечить устойчивость сварных соединений к локальным разрушениям в околошовной зоне и минимизировать деградацию свойств металла вследствие охрупчивания при длительной эксплуатации энергоблоков. Таким образом, на основании анализа литературы и опыта эксплуатации энергоблоков можно утверждать, что главным требованием должно быть обеспечение содержания феррита в структуре металла шва в строго определенных пределах, регламентированных с учетом применяемой технологии сварки за счет использования сварочной проволоки с исходным содержанием феррита, при наличии надежных экспериментальных данных по длительной прочности и склонности к тепловому охрупчиванию металла шва на длительной временной базе.

Литература

1. Земзин В.Н. Жаропрочность сварных соединений. – Л.: Машиностроение, 1972. – 272 с.

2. Земзин В.Н. О надёжности сварных соединений паропроводов энергоблоков 300 МВт. Ремонт и восстановление энергооборудования, обеспечивающие гарантированный ресурс. Материалы научно-технического семинара 14-17 марта 1995г. Часть 2 // Труды НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова. – 1995. – 134 с.

3. Экспериментальное исследование причин повреждения верхней трубной доски 5 ПТО РУ БН-600. Технический отчёт по этапам 1, 2, 3 договора № 381/623 от 11.01.2009г. СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей», 2009. – 62 с.

4. Konosu S., Hashimoto A.., Meshiba M., Takesyima M., Ohtsuki T. Greep Crack Growth of type 308 austenitic stainless steel weld metals // Welding Journal. – August 1998. – V. 77. – № 8. – P. 322-327.

5. Kusko C.S., Dupont J.N., Marder A.R. Influence of stress ratio on fatigue crack propagation behavior of stainless steel welds // Welding Journal. – Februar 2004. – V. 83. – № 2. – P. 59-64.

6. Tain H., Liaw P.K., Fielden D.E., Strizak S.P., Mansur L.K. Comparison of experimental measurements and a theoretical model for specimen self-heating during fatigue of type 316 LN stainless steel // Metallurgical. – October 2004. – V. 35A. – № 10. – P. 3334-3339.

7. Xue Q., Gray G.T., Henrie B.L., Maloy S.A., Chen S.P. Influence of shock prestraining on the formation of shear localization in 304 stainless steel // Metallurgical and Materials Transactions. – June 2005. – V. 36A. – № 6. – P. 1471-1486.

8. Методика расчёта прочности основных элементов реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. РД Э 01.1.1.09.0714-2007. М.: Энергоатомиздат, 2008. – 186 с.

9. Ланин А.А., Ананьева М.А., Галяткин С.Н., Зеленин Ю.В. Природа и методы определения стойкости против хрупких разрушений сварных соединений // Вопросы материаловедения. – 2007. – № 3 (51). – С. 320-326.

10. Ананьева М.А., Зеленин Ю.В., Карзов Г.П. и др. Локальные разрушения в околошовной зоне сварных соединений разнородных стыков трубопроводов АЭС // Вопросы материаловедения. – 2004. – № 3 (39). – С. 62-70.

11. Чижик А.А., Ланин А.А., Медведев А.В. Вопросы оценки ресурса высокотемпературных корпусных деталей по критериям трещиностойкости. В сб. статей «Вопросы долговременной прочности энергетического оборудования» // Труды НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова. – 1990. –Вып. 260. – С. 120-129.

12. Ананьева М.А., Ухабова З.Т. Изменение структуры и свойств околошовной зоны стали марок Х18Н9 и Х18Н10Т в процессе ползучести // Сб. статей «Сварка». – 1971. – № 14. – С. 74-80.

13. Нормы расчёта на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара горячей воды: РД 10-249-98. – СПб. – 2002. – 384 с.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СОВРЕМЕННЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ТИПА БН

Ю.В Зеленин.,
к.т.н.
ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»
г. Санкт-Петербург

Экспериментально-расчетная оценка длительной прочности металла шва сварных соединений современных реакторных установок типа БН, в том числе установок БН-800 и БН-1200, выполненных с использованием сварочной проволоки Св-04Х17Н10М2, позволяет обосновать жаропрочность металла шва при рабочих температурах на заданный ресурс длительностью 60 лет.

В работе прогнозирование длительной прочности металла шва осуществляли методом линейной экстраполяции по модели межзеренного разрушения и параметрическим методом по Ларсену-Миллеру-Холломону. При экстраполяции линейной зависимости жаропрочности (lgσ - lgt) для построения графиков использовали нормативные данные [1] средних значений условного предела длительной прочности $R^{T}_{m,t}$ применительно к металлу шва, выполненного ручной дуговой сваркой (РДС) электродами марки 48А-1 (А-1). Линейные зависимости жаропрочности построены для температур испытания 530 и 600° С (рисунок 1), что соответствует рабочей температуре второго контура установки БН-600 и максимально допустимой температуре применения исследуемых материалов. С целью оценки возможности прогнозирования значения $R^{T}_{m,t}$ для эксплуатации длительностью до 300…400 тысяч часов на построенные графики наносили экспериментально полученные результаты испытаний металла шва, выполненного проволокой Св-04Х17Н10М2 ручной аргонодуговой сваркой (РАДС), в исходном (после сварки) состоянии и после аустенизации при 1050° С.

Учитывая относительную непродолжительность проведенных испытаний (3000-5000 часов) в работе дополнительно была определена длительная прочность металла шва, выполненного с использованием сварочной проволоки Св-04Х17Н10М2, при температурах 530 и 600° С в исходном состоянии и после аустенизации. При этом исследование металла шва в аустенизированном состоянии проводили на сварных соединениях модуля промперегревателя парогенератора установки БН-600 после

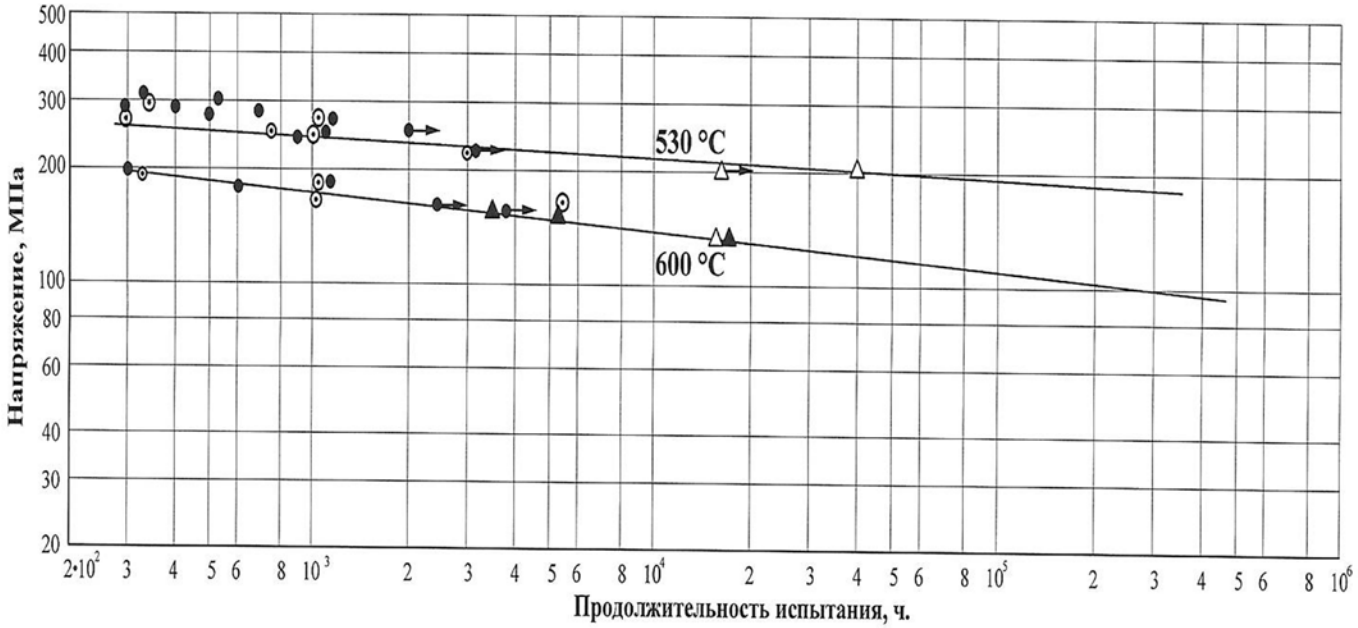


Рисунок 1 *Длительная прочность при температурах 530 (1) и 600° С (2) металла шва, РАДС проволокой Св-04Х17Н10М2, в исходном (▲, ●) и аустенизированном (Δ, ○) состояниях: Δ, ▲ – экспериментальные данные; ○, ● – литературные данные (значки со стрелкой – испытания досрочно прекращены или продолжаются)*

эксплуатации длительностью ~ 132 тысячи часов при максимальной (515° С) температуре входа натрия в корпус модуля и минимальной (447° С) температуре выхода натрия. Для испытаний задавали напряжения (σ), при которых обеспечивалось время до разрушения образцов более 10 тысяч часов.

Результаты испытаний металла шва Св-04Х17Н10М2 при температурах 530 и 600° С представлены в таблице 1. Продолжительность испытаний составила более 10 тысяч часов (большинство образцов – ~ 15 тысяч часов, один образец – > 40 тысяч часов). Это позволило обоснованно экстраполировать полученные результаты в соответствии с общепринятыми требованиями [1] до 300 тысяч часов (т. е. увеличить временную базу на один порядок). В результате экстраполяции установлено, что нормативные значения $R_{m,t}$ за 200 тысяч часов эксплуатации незначительно отличаются от прогнозируемых для 300 тысяч часов (таблица 2).

Таблица 1 *Результаты испытаний при температурах 530 и 600° С металла шва, выполненного с использованием сварочной проволоки Св-04Х17Н10М2, в исходном состоянии и после аустенизации при 1050° С*

Температура испытания, °С	Напряжение, МПа	Время до разрушения, час.	
		Исходное состояние металла шва	После аустенизации
530	200	39383	16 285
600	130	15261 15543* 15494*	15 600* 14 953
	150	3443 5241	–

*Примечание. * – образец при испытании не разрушился.*

Для оценки длительной прочности металла шва сварных соединений РУ типа БН при увеличении их ресурса в работе использовали также параметрический метод прогнозирования по Ларсену-Миллеру с принятой постоянной С = 20.

Построенная по этому методу с учетом результатов высокотемпературных (650, 700, 800 и 900° С) испытаний металла шва, выполненного сварочной проволокой Св-04Х17Н10М2, параметрическая зависимость $\lg\sigma - T \cdot (20 + \lg t) \cdot 10^3$ показана на рисунке 2.

Таблица 2 *Нормативная и расчетная длительная прочность металла шва, выполненного с использованием сварочной проволоки Св-04Х17Н10М2, при температурах 530 и 600° С*

Температура испытания,° С	Условный предел длительной прочности $R_{m,t}$	
	Нормативный (200 тысяч часов)	Расчетный (300 тысяч часов)
530	160	155
600	100	95

Полученные значения длительной прочности металла шва составляют: при температуре эксплуатации 530° С – σ = 160 МПа, при 600° С – σ = 90 МПа. Сравнение прогнозируемых значений длительной прочности, рассчитанных параметрическим методом (рисунок 2), с величинами, рассчитанными методом линейной экстраполяции (рисунок 1), свидетельствует о хорошей сопоставимости полученных результатов.

На основании проведенных исследований и расчетов, с учетом некоторого отличия уровня длительной прочности, полученного при прогнозировании двумя различными методами, можно принять следующие (более консервативные – минимальные) значения:

$$R^{530°C}_{m,3\cdot10^5} = 150 \text{ МПа},$$

$$R^{600°C}_{m,3\cdot10^5} = 90 \text{ МПа},$$

Полученные значения длительной прочности металла шва стали 04Х17Н10М2 были сопоставлены с известными данными для основного металла сталей 09Х18Н9 и 08Х16Н11М3. В таблице 3 приведены значения

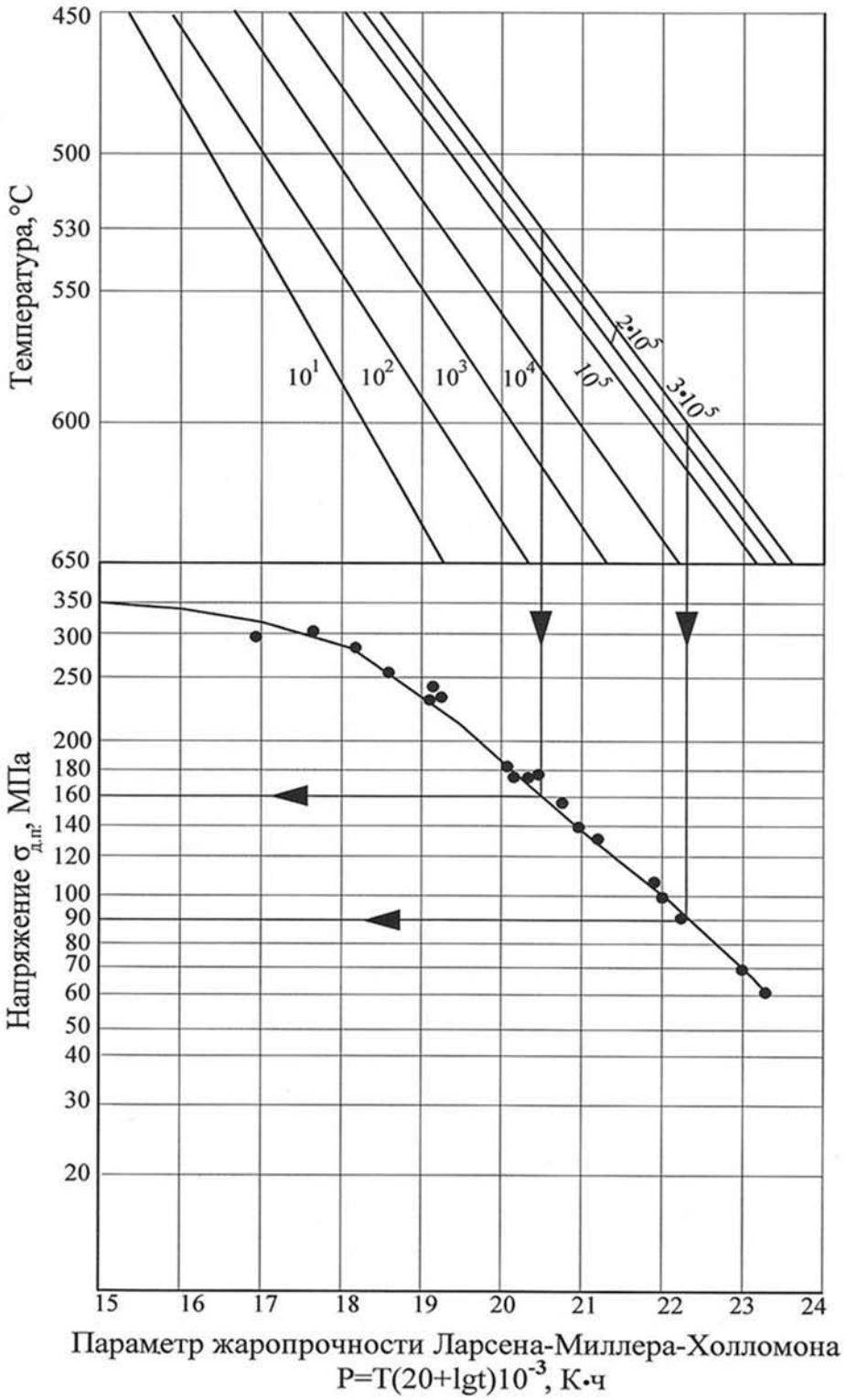


Рисунок 2 *Зависимость условного предела длительной прочности металла шва от параметра Ларсена-Миллера-Холломона в исходном состоянии:РАДС проволокой Св-04Х17Н10М2*

длительной прочности сталей марок 09Х18Н9 и 08Х16Н11М3 при температуре 600 ºС [2]. Сопоставление этих данных показывает, что значения условного предела длительной прочности металла шва стали 04Х17Н10М2 несколько выше, чем стали 09Х18Н9, и находятся на уровне жаропрочности стали 08Х16Н11М3, т. е. обеспечивают равнопрочность сварного соединения.

Таблица 3 *Длительная прочность свариваемых сталей при температуре 600° С*

Марка материала	Условный предел длительной прочности $R_{m,t}$ (МПа) при испытаниях длительностью:	
	200 тысяч часов	300 тысяч часов
09Х18Н9	78…93	85
08Х16Н11М3	100	92

Таким образом, выполненная в данной работе экспериментально-расчетная оценка длительной прочности металла шва сварных соединений современных реакторных установок типа БН, в том числе установок БН-800 и БН-1200, выполненных с использованием сварочной проволоки Св-04Х17Н10М2, позволяет обосновать жаропрочность металла шва при рабочих температурах на заданный ресурс длительностью 60 лет.

Литература

1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок: ПН АЭ Г-7-002-86. – М.: Энергоатомиздат, 1989, 527 с.

2. Жаропрочные металлы и сплавы. Справочные материалы. Сер. «Вопросы энергетики» / Под ред. Ланина А.А., Балина В.С. М.: Энерготех, 2006,Вып. 8, 224 с.

СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СВАРОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ СВАРКИ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ИЗ СТАЛИ ТИПА 2,25CR-1MO-0,25V

Т.И. Титова,
д.т.н.,
mail: tc-omz-iz@omzglobal.com
Н.А. Шульган,
к.т.н.,
mail: Natalya.Shulgan@omzglobal.com
А.С. Боровской,
инж.,
Научно-исследовательский центр
ООО «ТК «ОМЗ-Ижора»
г. Санкт-Петербург,
Колпино, Ижорский завод

Рассматриваются методы и критерии оценки сварочных материалов для сварки сталей типа 2,25Cr-1Mo-0,25V: испытания на удар для определения температуры перехода металл шва в хрупкое состояние, определение запаса его отпускоустойчивости, определение содержание микропримесей Pb, Bi, Sb и диффузионно-подвижного водорода в металле шва, его испытания по методике «Gleeble test».

В российской нефтеперерабатывающей промышленности имеется тенденция к переходу на оборудование углубленной переработки нефти. Кроме того, значительное количество оборудования российских нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) требует обновления или коренной модернизации. Это подразумевает под собой производство большого количества сосудов давления для нефтехимических производств.

В последнее время все чаще для производства нефтехимических сосудов, особенно крупногабаритных и толстостенных, используют стали типа 2,25Cr-1Mo-0,25V, изготавливаемые по коду ASME (здесь и далее обозначение «типа 2,25Cr-1Mo-0-,25V» указывает на среднелегированную сталь, основными легирующими элементами которой является хром, молибден и ванадий, табл.1). Они обеспечивают весь комплекс необходимых при эксплуатации сосуда свойств. По сравнению со сталями предыдущего поколения (типа 2,25Cr-1Mo), сталь типа 2,25Cr-1Mo-0,25V, а, следовательно, и металл шва этой стали, обладает следующими преимуществами:

- большей расчетной прочностью, что позволяет значительно уменьшить толщину стенки сосуда;
- большей отпускоустойчивостью;

- большей стойкостью к тепловому и водородному охрупчиванию;
- повышенной стойкостью к отслаиванию антикоррозионной наплавки под действием водорода.

Вышеперечисленные преимущества проявляются при эксплуатации, изготовление же сосудов из стали типа 2,25Cr-1Mo-0,25V значительно усложняется вследствие особенностей легирования, что в большей степени проявляется во время сварки. Для нивелирования всех трудностей, возникающих при сварке, требуется не только оптимизация технологии изготовления, но и наличие качественных сварочных материалов.

Для выполнения сварных соединений нефтехимических сосудов используется, преимущественно, автоматическая сварка под флюсом, в меньшей степени применяют ручную дуговую сварку. Все перечисленные в статье требования относятся к сварочным материалам для обоих способов сварки, за исключением требований по чувствительности к трещинам повторного нагрева для металла, наплавленного ручным дуговым способом. Тип легирования металла шва за счет сварочных материалов согласно требованиям кода ASME должен соответствовать свариваемому металлу. Основные требования к наплавленному металлу, соответствующему стали типа 2,25Cr-1Mo-0,25V, приведены в таблицах 1 и 2.

Перед использованием сварочных материалов при сварке штатных швов производят оценку их свойств на сварных пробах. Для оценки качества металла шва после всех возможных послесварочных отпусков на пробах имитируют наибольшую и наименьшую по параметру отпуска термообработку швов готового сосуда:

- отпуск минимальной продолжительности (min PWHT) сварного соединения. как правило, выполняется в течение 8 часов при 705° С (один цикл окончательной послесварочной термообработки шва);
- отпуск максимальной продолжительности (max PWHT) сварного соединения – термообработка, представляющая сумму всех нагревов швов на случай проведения ремонта в процессе изготовления и на случай ремонта заказчиком в ходе эксплуатации. Обычно PWHT шва максимальной продолжительности состоит из отпуска при температуре около 660° С продолжительностью до 25 часов и отпуска при температуре 705° С продолжительностью 25 ÷ 33 часа.

Требования по прочности и работе удара металла шва, наплавленного сварочными материалами типа 2,25Cr-1Mo-0,25V, задаются исходя из необходимости получения свойств близких к свойствам основного металла. Получение необходимого сочетания прочности и работы удара достигается за счет применения особого легирования сварочных материалов хромом, молибденом, ванадием и получения структуры отпущенного бейнита после сварки и термообработки.

Нетипичное для отечественного машиностроения требование по испытанию на тепловое охрупчивание содержится во многих зарубежных стандартах [1,2,3]. Основной смысл его выполнения - оценка стойкости материалов против теплового охрупчивания, приводящего к сокращению срока безопасной эксплуатации сосуда.

Таблица 1 *Типичные требования зарубежных стандартов к химическому составу сталей и наплавленного металла типа 2,25Cr-1Mo-0,25V*

Тип материалов	Содержание элементов, %										
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Cu
Основной металл	0,11 - 0,15	0,30 - 0,60	≤ 0,015	≤ 0,012	≤ 0,010	≤ 0,25	2,00 - 2,50	0,9 - 1,10	0,25 - 0,35	≤ 0,07	≤ 0,20
Металл шва	0,05 - 0,15	0,50 - 1,30	≤ 0,015	≤ 0,015	0,05 - 0,35*	≤ 0,30	2,00 - 2,60	0,90 - 1,20	0,20 - 0,40	0,01 - 0,04	≤ 0,20
* - указанное значение относится к металлу, наплавленному способом автоматической сварки под флюсом. Металл, наплавленный ручным дуговым способом, должен содержать кремний в пределах 0,20 – 0,50 %.											

Таблица 2 *Типичные требования к металлу, наплавленному сварочными материалами типа 2,25Cr-1Mo-0,25V*

Тип легирования	t испытания	20° C				-18° C	Испытание на тепловое охрупчивание	455° C	Длительная прочность
	Характеристика	Предел прочности	Предел текучести	Относительное удлинение	Относительное сужение	Работа удара		Предел прочности	
	Ед. имерения	МПа		%		Дж	° C	МПа	час
	Режим термообработки	min PWHT, max PWHT				min PWHT		max PWHT	
2,25Cr - 1Mo	Типичные требования	515÷690	310÷620	≥ 18	≥ 45	≥ 55	< 10	≥ 407	≥ 650*
2,25Cr - 1Mo - 0,25V		585÷760	415÷620					≥ 460	≥ 900**
Параметры испытания: * - 210 МПа, 510°C; ** - 210 МПа, 540°C.									

Известно, что тепловое охрупчивание развивается по механизму межзеренного охрупчивания, основным фактором которого является повышенная концентрация вредных примесей по границам первичного аустенитного зерна. Это вызвано зернограничной сегрегацией примесных поверхностно-активных элементов, таких как фосфор, олово, сурьма и мышьяк [4].

Оценка стойкости материалов для сосудов, используемых при глубокой переработке нефти, против теплового охрупчивания производится путем определения прогнозируемого сдвига температуры вязко-хрупкого перехода ΔTr_{55}. При этом температура вязко-хрупкого перехода определяется по заданному критерию работы удара 55 Дж как в исходном состоянии, так и после имитации длительной высокотемпературной эксплуатации. Режим имитации теплового воздействия на корпус сосуда в процессе его эксплуатации, называемый «Step Cooling», следующий (рисунок1):

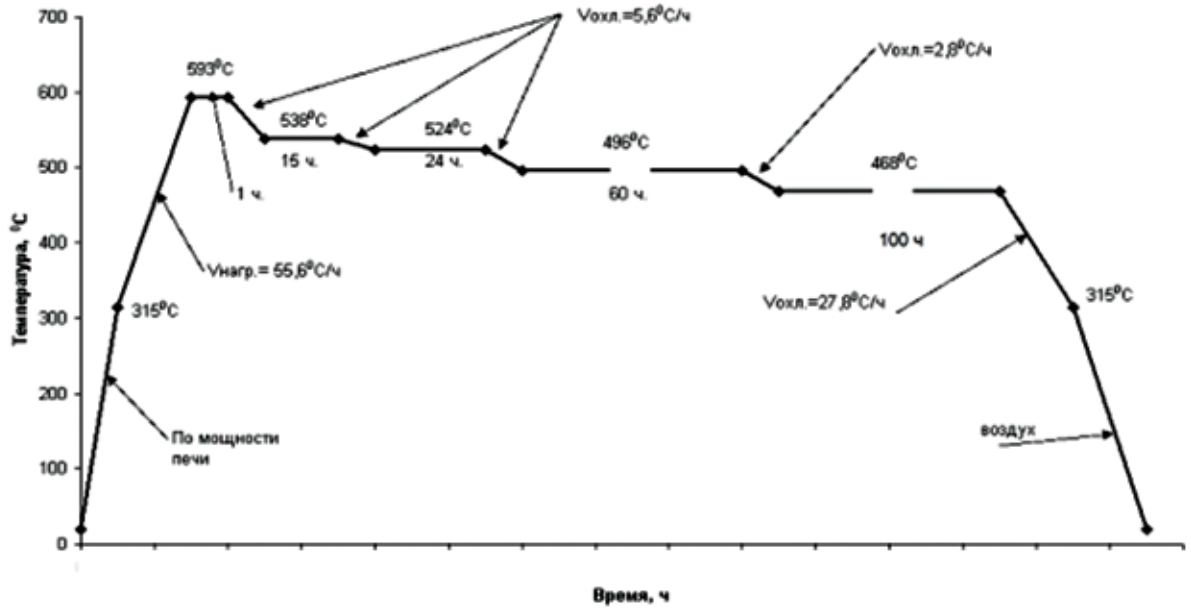


Рисунок 1 *Режим термообработки методом ступенчатого охлаждения "step cooling".*

- нагрев до Т = 315° С;
- нагрев от Т=315° С до Т=593° С со скоростью 55,6° С/ч;
- выдержка при Т = 593° С в течение 1 часа, охлаждение со скоростью 5,6° С/ч до Т = 538° С;
- выдержка при Т = 538° С 15 часов, охлаждение со скоростью 5,6° С/ч до Т = 524° С;
- выдержка при Т = 524° С 24 часа, охлаждение со скоростью 5,6° С/ч до температуры Т = 496° С;
- выдержка при Т= 496° С 60 часов, охлаждение со скоростью 2,8° С/ч до Т = 468° С;
- выдержка при Т = 468° С 100 часов, охлаждение со скоростью 27,8° С/ч до Т = 315° С, дальнейшее охлаждение на воздухе.

В результате испытаний определяется прогнозируемая переходная температура на конец срока эксплуатации сосуда - $Tr_{55финал}$ [5].

Оценка степени теплового охрупчивания в процессе эксплуатации и определение $Tr_{55финал}$ производится методом построения кривых вязко-хрупкого перехода с использованием формулы Брауна (рисунок 2).

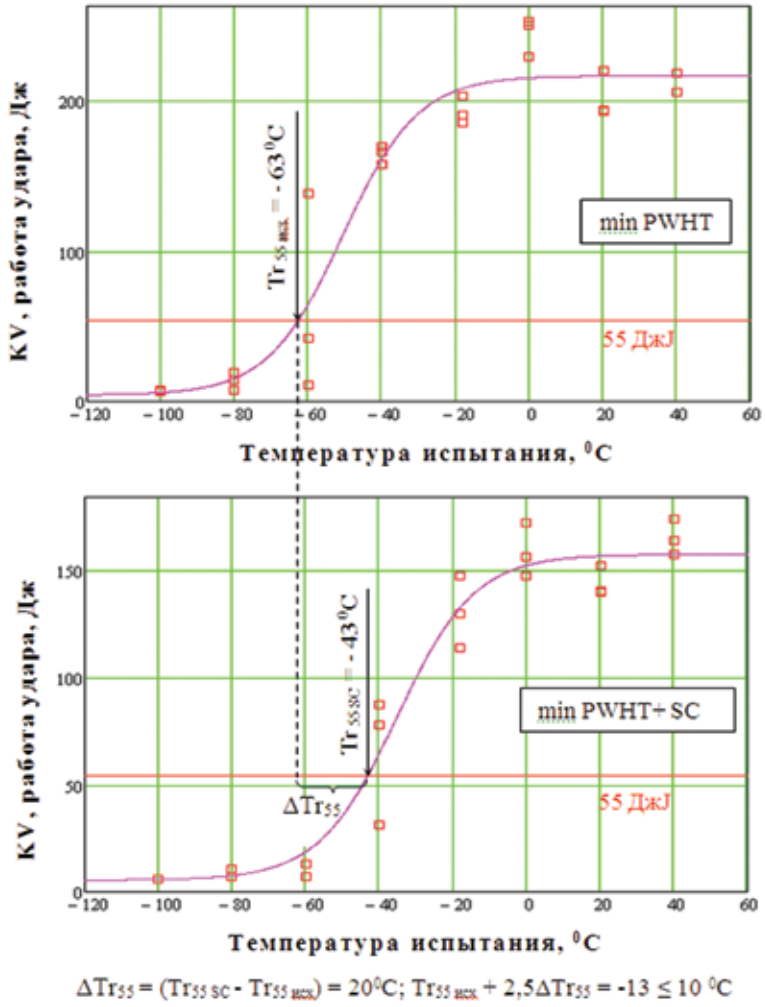


Рисунок 2 *Графические результаты испытаний по определению стойкости против теплового охрупчивания металла шва типа 2,25Cr-1Mo-0,25V*

В Коде ASME секция II часть А для материалов сосудов давления установлена формула Брауна следующего вида [5]:

$$Tr_{55\ исх} + 2{,}5\Delta Tr_{55} = Tr_{55\ финал} \leq 10^{\circ}\ C,$$

где $\Delta Tr_{55} = (Tr_{55\ SC} - Tr_{55\ исх})$ - сдвиг переходной температуры после термообработки по ускоренному режиму теплового охрупчивания - «step cooling»; $Tr_{55исх}$, $Tr_{55\ SC}$, Tr_{55} финал - температуры вязко-хрупкого перехода, определяемые по заданному критерию 55 Дж в следующих состояниях соответственно: в исходном для настоящего испытания, после исходного + термообработка по режиму «step cooling», прогнозируемая на конец срока эксплуатации. При соблюдении неравенства $Tr_{55\ финал} \leq 10^{\circ}$ C чувствительность металл шва к тепловому охрупчиванию считают относительно низкой.

Оценка свойств материалов с учетом теплового охрупчивания в процессе эксплуатации позволяет выявлять существенные факторы, влияющие на охрупчивание, и управлять исходным качеством материала. Так, в мировой практике для оценки чувствительности металла шва к тепловому охрупчиванию используется параметр, основанный на содержании примесных элементов - коэффициент Брускато , который определяется по формуле:

$$X= (10P+5Sb+4Sn+As)\times 102 \leq 15 \text{ ppm}$$

При соблюдении данного неравенства чувствительность металл шва к тепловому охрупчиванию считают относительно низкой.

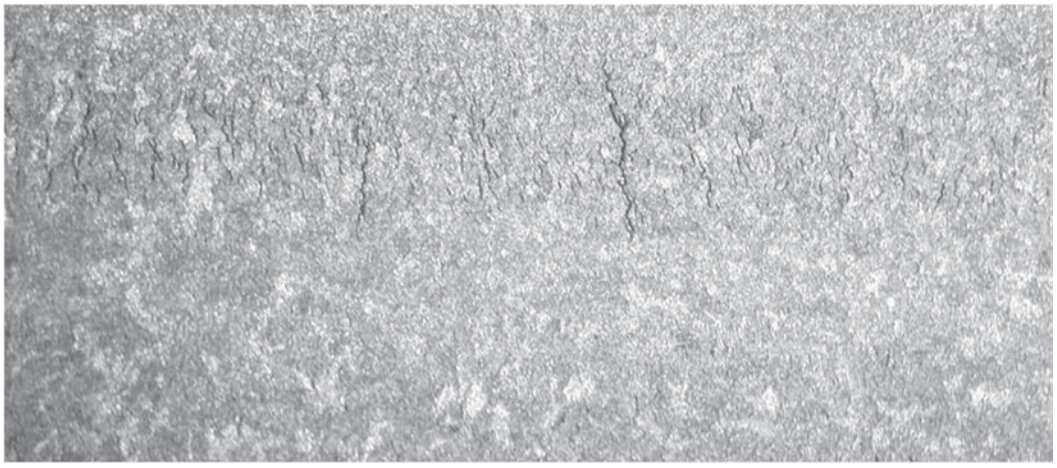
Определение длительной прочности производят с целью прогнозирования изменений прочностных свойств во время длительной эксплуатации. Зарубежные стандарты не предусматривают определение всех точек на кривой длительной прочности, требуется лишь подтверждение одной из точек. Для этого из металла шва в продольном направлении вырезают цилиндрические образцы и испытывают их при заданной неизменной температуре и постоянном напряжении. По коду ASME (секция 8-2) для материала типа 2,25Cr-1Mo-0,25V условия испытания на длительную прочность следующие: температура выдержки 540° С, напряжение 210 МПа. Металл считается выдержавшим испытание, если на момент разрушения образец отстоял не менее 900 ч.

Таким образом, металл шва должен обладать высоким комплексом механических свойств, частично взаимно противоречивых – высоким уровнем работы удара в состоянии после min PWHT и высокими прочностными характеристиками, включая длительную прочность в состоянии после max PWHT.

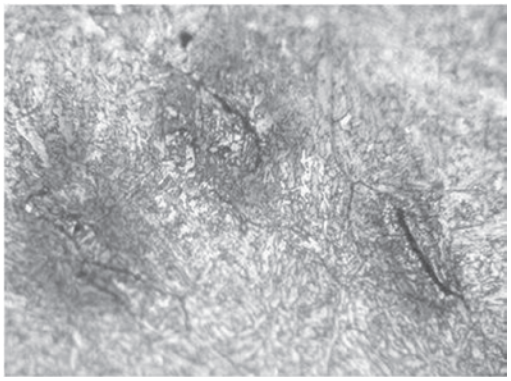
Приведенные в таблице 2 свойства присущи металлу шва в состоянии после окончательных отпусков. В состоянии после сварки металл шва имеет предел прочности более 1000 МПа и работу удара порядка 15 Дж. Такой металл имеет повышенную склонность к образованию трещин в процессе изготовления сосуда, особенно под действием напряжений, возникающих при сварке и последующей термообработке. Основными типами трещин, характерными для металла шва типа 2,25Cr-1Mo-0,25V, являются холодные трещины и трещины повторного нагрева (рисунок 3).

Как известно, снижение вероятности образования холодных трещин достигается за счет применения материалов с низким содержанием диффузионно-подвижного водорода. Типичные требования – не более 8 мл на 100 г, но рекомендуется ограничить содержание водорода до 5 мл на 100 г наплавленного металла. Необходимо также избегать его увеличения при прокалке и хранении сварочных материалов. Производители сварочных материалов добиваются низкого содержания водорода в наплавленном металле за счет снижения гигроскопичности материалов флюса и за счет металлургических реакций при сварке.

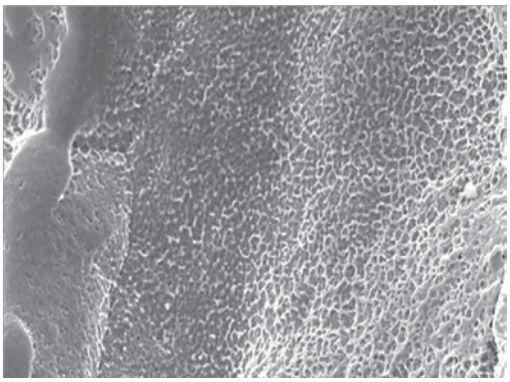
Известно [6,7,8], что металл, наплавленный сварочными материалами типа 2,25Cr-1Mo-0,25V, кроме склонности к образованию холодных трещин имеет склонность к трещинам повторного нагрева. Их характерной особенностью является то, что они



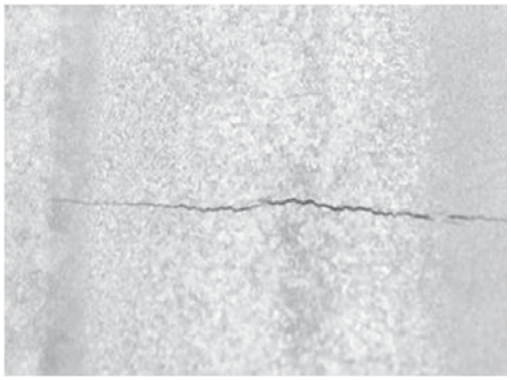
а (направление сварки →), 15×



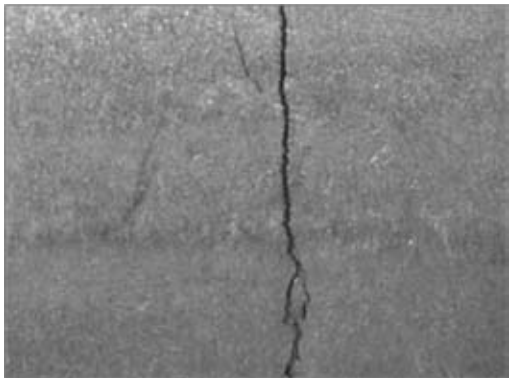
б (200×)



в (200×)



г (2,5×)



д (2,5×)

Рисунок 3 *Дефекты, характерные для сталей 2,25Cr-1Mo-0,25V:*
- трещины повторного нагрева
а - поверхность шва,
б - поперечное сечение шва,
в - фрактограмма поверхности разрушения излома (микронесплошности с частично испаренным ямочным рельефом на грани кристаллита и участок межкристаллитного разрушения с мелкоямочным рельефом)

- холодная поперечная трещина
г - поверхность шва,
д - продольное сечение шва.

возникают только после проведения высокого отпуска. Они имеют небольшие размеры порядка 1-10 мм в длину, малую ширину раскрытия - доли миллиметра, преимущественную ориентацию поперек сварного шва и глубину залегания до 30 мм от поверхности шва. Возникновение трещин повторного нагрева отмечено только в швах, выполненных автоматической сваркой под флюсом; для швов, выполненных ручной дуговой сваркой, данный вид трещин нехарактерен.

Согласно данным [9-10] растрескивание при повторном нагреве в стали типа 2,25Cr-1Mo-0,25V в основном связано с:

- межзеренными выделениями мелких карбидов (в основном V_4C и Mo_2C), упрочняющих зерна;
- межзеренными выделениями, которые вызывают обеднение легирующими элементами в зонах, примыкающих к границам зерен (эти зоны предпочтительны для концентрации напряжений).

Исследования [11] позволили связать чувствительность к растрескиванию при повторном нагреве с содержанием микропримесей (Pb, Bi и Sb): K-фактор = Pb+Bi+0.03×Sb < 1,5 ppm.

Ограничение данной оценки состоит в том, что определение микропримесей должно проводиться на оборудовании с высокой чувствительностью (порядка ppm-ppb), в противном случае оценочная трещиностойкость не будет совпадать с фактической.

В случае соблюдения неравенства металл шва можно считать нечувствительным к трещинам повторного нагрева. Так в металле шва, наплавленном материалами с повышенным содержанием микропримесей (К-фактор=5,4+6,0+1,3=6,9 ppm > 1,5 ppm), наблюдалось образование многочисленных трещин после отпуска при 660° С (рисунок 3 а), металл шва с К-фактором равным 0,8÷1,1 ppm и даже с К-фактором до 1,8 ppm не проявил признаков трещин повторного нагрева ни на пробах, ни на реальных изделиях. Определение содержания Pb, Bi и Sb производилось с помощью атомно-абсорбционного спектрометра AAnalist 600 Perkin Elmer.

Кроме метода, основанного на определении химического состава, существует метод физического моделирования. Испытание проводится на установке Gleeble, из-за чего оно в спецификациях на изготовление сосудов называется «Gleeble test». Сущность метода состоит в определении относительного сужения круглых образцов при растяжении после выдержки их при температуре дисперсионного твердения. В спецификации лицензиара Chevron PVM-SU-5004-G [2] приводится требование к относительному сужению, которое не должно быть ниже 25% для образцов с низкой склонностью к образованию трещин повторного нагрева. При испытании по методике «Gleeble test» металла шва, склонного к данному виду трещин, было получено относительное сужение 22,3%, не склонный к растрескиванию при повторном нагреве металл шва имел относительное сужение более 30%.

Таким образом, опыт НИЦ «ТК «ОМЗ-Ижора» и мировых производителей нефтехимического оборудования позволяет говорить о хорошей сходимости результатов испытаний сварочных материалов по методике «Gleeble test» и результатов опреде-

ления К-фактора с фактической склонностью металла шва к трещинам повторного нагрева, но величина К-фактора при которой происходит растрескивание требует уточнения.

Таким образом, для успешного изготовления нефтехимических сосудов при заказе сварочных материалов для сварки сталей типа 2,25Cr-1Mo-0,25V необходимо выставлять поставщикам следующие минимальные требования:

- металл шва должен обладать высоким комплексом свойств как прочностных, так и при ударном изгибе;
- металл шва должен иметь достаточный запас отпускоустойчивости;
- сварочные материалы должны успешно пройти испытания по методике «Gleeble test» и иметь низкое содержание микропримесей Pb, Bi и Sb, а так же P, Sn и As;
- содержание диффузионно-подвижного водорода не должно превышать 5 мл на 100 г наплавленного металла.

Литература

1. Международный стандарт Код ASME секция 8 раздел 2. Альтернативные правила строительства сосудов давления. NY, 2010.
2. Спецификация PVM-SU-5004-G. Hydroprocessing reactors and high pressure vessels manufactured from 2,25Cr-1Mo and 2,25Cr-1Mo-0,25V low alloy steels. Chevron USA, April 2009.
3. API Recommended Practice 934-A. Materials and Fabrication of 2 1/4Cr-1Mo, 2 1/4Cr-1Mo-1/4V, 3Cr-1Mo, and 3Cr-1Mo-1/4V Steel Heavy Wall Pressure Vessels for High-temperature, High-pressure Hydrogen Service. Second Edition, May 2008. Add.1, 2010.
4. Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов / Под ред. Брайента К.Л., Бенерджи С.К., М.: Металлургия, 1988. 552 с.
5. Международный стандарт Код ASME секция 2 часть А. Технические условия на черные металлы (Начиная с SA-450). Материалы. NY, 2010.
6. Stress Relief Cracking in Advanced Steel Material- Overview \ S.P. Ghiya, D.V. Bhatt, R.V. Rao. Proceedings of the World Congress on Engineering 2009 Vol II WCE 2009, July 1 - 3, London, U.K, 2009.

7. Influence of Vanadium Carbide on Reheat Cracking of Cr-Mo steels–Study of Reheat Cracking of Cr-Mo Steels, Koreaki Tamaki, Jippei Suzuki, Min-Long Li. Transaction of the Japan Welding Society, Vol.24, №2, October 1993.

8. The Stress-Relief Cracking Susceptibility of a New Ferritic Steel — Part 2: Multiple-Pass Heat-Affected Zone Simulations\ By J. G. Nawrocki, J. N. Dupont, C. V. Robino and A. R. Marder. Welding Research Supplement, January 2001.

9. Effect of Carbides on reheat cracking sensitivity \ Tamaki K. Transactions of Japan Welding Society, Vol 15, n°1, pp.8-16, April 1984.

10. Effect of Vanadium Carbides on reheat cracking of Cr-Mo steels\Tamaki K., Transactions of Japan Welding Society, Vol.24, №2, pp.87-93, October 1993.

11. Prevention of weld metal reheat cracking during Cr-Mo-V heavy reactors fabrication. PVP2009-78144 \ Cédric Chauvy, Sylvain Pillot. Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conference PVP2009 July 26-30, 2009, Prague, Czech Republic

О НЕОБХОДИМОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СТРУКТУР В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

Д.М. Шарапова,
инж.,
СРО «Национальное агентство предприятий-производителей сварной продукции»
г. Санкт-Петербург

Имитационное моделирование процессов в ЗТВ применительно к судостроительным сталям имеет особую важность в связи с активным процессом внедрения лазерных технологий сварки на судокорпусных конструкциях. С ростом прочности и толщины основного металла получение достоверных знаний о структурных преобразованиях в ЗТВ с применением современных методик и оборудования становится еще более актуальным.

Для изучения структуры в зоне термического влияния (ЗТВ) при многодуговой сварке под флюсом сталей для магистральных трубопроводов во ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» с участием автора успешно использовались методы имитации фазовых превращений и структурных изменений на основе изучения термокинетических диаграмм (ТКД).

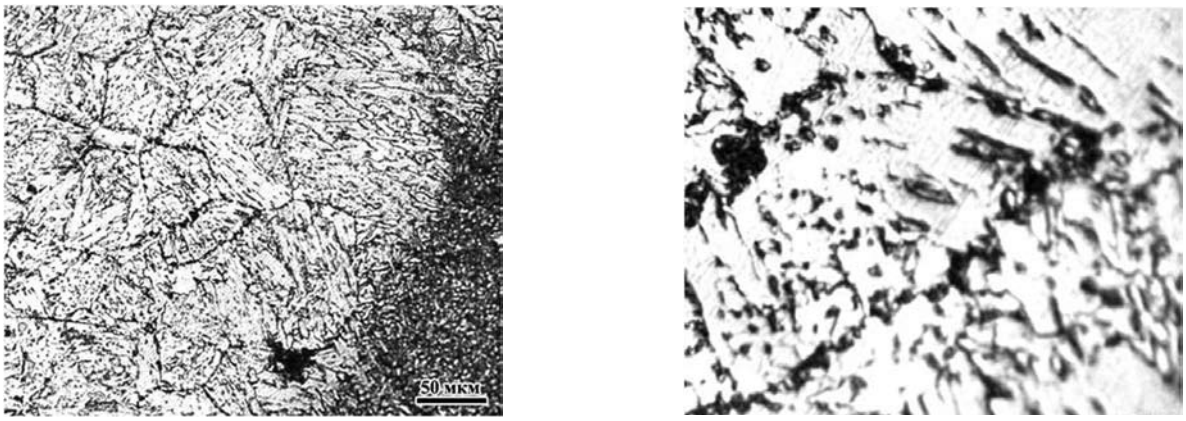
Высокую эффективность этой методики при изучении процессов в металле ЗТВ при сварке можно продемонстрировать на следующем примере. Имитация фазовых превращений и структурных изменений на основе изучения термокинетических диаграмм, позволили выявить некоторые важные особенности формирования структуры в зоне термического влияния (ЗТВ) при сварке под флюсом сталей для магистральных трубопроводов (работа выполнена под руководством к.т.н. А.А.Кругловой)[1, 2].

Исследования производились на стали с пределом текучести σ_{02} = 590…690 МПа, требования к химическому составу которой представлены в таблице 1. Анализ ЗТВ реальных сварных соединений показал (рисунок 1), что в структуре металла ЗТВ, подвергшегося термическому воздействию при сварке второго прохода, наблюдаются выделения в виде сплошных окантовок зерен, схожие с выделениями карбидов, которые по мере приближения к линии сплавления постепенно исчезают (при однопроходной сварке таких выделений нет).

Для более детального исследования проведен многократный нагрев образца по режиму, при котором наблюдается наиболее сильное образование новой структурной составляющей – нагрев до 750° С и охлаждение со скоростью 5° С/с. Из рисунка 2 видно, что образовавшаяся структурная составляющая состоит из чрезвычайно мелких кристаллов игольчатой формы. Во внутренних областях зерна, прилегаю-

Таблица 1 *Требования к химическому составу исследованной стали*

C	Si	Mn	Ni+Cu+Mo+Cr	Ti+Nb+V	S	P	Сэкв, %	Рсм,%
% масс								
0,06	0,28	≤ 2,0	<0,1	0,085	0,001	0,006	0,45	0,2



а) *б)*

Рисунок 1 *Микроструктура исследованной стали в ЗТВ у линии сплавления*

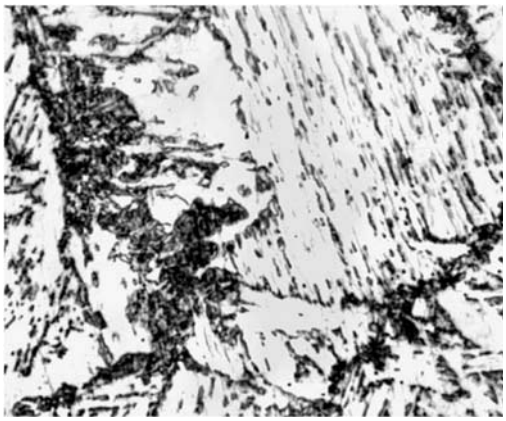


Рисунок 2 *Микроструктура образца-имитатора после 5-кратного нагрева до 750° С: имитационный режим 1350° С – 50° С/с и 750° С - 5° С/с (5раз)*

щих к ней, из-за обеднения легирующими элементами снижена отпускоустойчивость, что привело к исчезновению следов ориентированного превращения.

Измерения микротвердости образцов после имитационного повторного нагрева до 750° С показали повышенные значения твердости наблюдаемых выделений по границам (400…430 HV) по сравнению с металлом вблизи границ (360…370 HV) и телом зерна (340…350 HV). На реальных сварных соединениях получены аналогичные результаты.

Таким образом, в результате моделирования термических воздействий на металл ЗТВ при двухпроходной многодуговой сварке под флюсом для исследованной стали было установлено, что темная окантовка границ крупных зерен является участками мартенсито-бейнитной структуры, обогащенными углеродом и легирующими эле-

ментами. Появление таких участков связано с повторным нагревом в области температур несколько ниже точки A_{c1}. Понижение скорости охлаждения при первом термическом цикле (что соответствует повышенному значению погонной энергии) способствует укрупнению выделений по границам зерен. Каждый последующий нагрев до указанного интервала температур также способствует увеличению доли мартенситной составляющей. Поскольку высокоуглеродистый мартенсит имеет низкую сопротивляемость хрупким разрушениям, то полученные результаты исследований позволили предположить наличие взаимосвязи между снижением работы удара в ЗТВ при многодуговой двухпроходной сварке исследованной стали и образованием мартенситной или мартенсито-бейнитной составляющей по границам зерен.

Как показали измерения (рисунки 3, 4 и таблица 2), выполненные к.т.н. А.Ю. Ивановым на Ижорском трубном заводе, с увеличением погонной энергии с 4,50 до 5,73 кДж/мм общая протяженность ЗТВ увеличивается с 7 до 8 мм. При этом следует отметить, что ширина отдельных участков изменяется непропорционально. В частности, ширина участка крупного зерна при повышении погонной энергии до 5,73 кДж/мм увеличивается на 0,5 мм, наибольший вклад в это вносит увеличение ширины участка 1а с наиболее крупным зерном (таблица 2). Увеличение общей протяженности ЗТВ происходит также за счёт участков частичной перекристаллизации и отпуска. В отличии от рассмотренных выше, участок полной перекристаллизации с наиболее мелким зерном в результате сварки с высокой погонной энергией имеет меньшую протяжённость по сравнению с ЗТВ, полученную при сварке с пониженной погонной энергией.

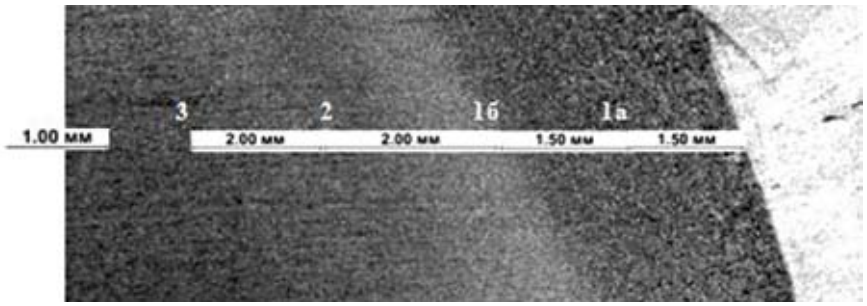


Рисунок 3 *Поперечное сечение сварного соединения: погонная энергия 5,73 кДж/мм (А.Ю. Иванов)*

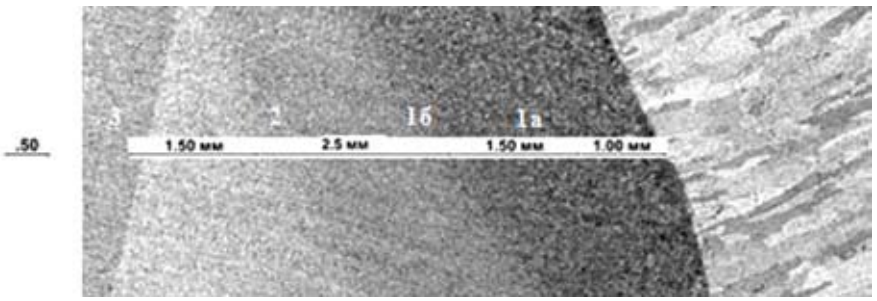


Рисунок 4 *Поперечное сечение сварного соединения: погонная энергия 4,5 кДж/мм (А.Ю.Иванов)*

Таблица 2 *Протяженность участков ЗТВ (мм) по данным А.Ю. Иванова*

Участок	Вариант технологии / погонная энергия, кДж/мм	
	1/5,73	2/4,5
Крупного зерна (а)	1.5	1.0
Крупного зерна (б)	1.5	1.5
Полной перекристаллизации	2.0	2.5
Частичной перекристаллизации	2.0	1.5
Отпуска	1.0	0.5
Общая протяженность ЗТВ	8.0	7.0

При однодуговой односторонней автоматической сварке на подкладке под флюсом стали марки 15ХСНД по ГОСТ 6713 промышленной поставки толщиной 14 мм в 2 прохода по режимам, указанным в регламенте, разработанном НПЦ « Мосты», размеры ЗТВ на 25…30% меньше чем при многодуговой сварке труб (рисунок 5 и таблица 3) [3]. Следует отметить, что при сварке под флюсом судостроительной стали марки 10ХСНД (той же толщины) на аналогичных режимах ЗТВ формируется таких же размеров.

Таблица 3 *Режимы сварки и средние размеры ЗТВ.*

Проход	Ток, А	Напряжение, В	Скорость сварки, м/час	Погонная энергия, кДж/мм	Протяженность ЗТВ, мм
1	670-730	36-38	19-21	1,50	6
2	500-550	38-40	19-21	1,13	5

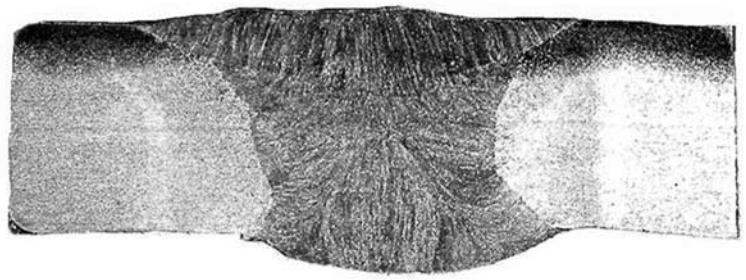


Рисунок 5 *Макрошлиф образца после автоматической сварки под флюсом на подкладке: сталь марки 15ХСНД*

В судостроении при изготовлении корпусных конструкций наблю-дается активный переход к новым способам получения неразъемных соединений, который основан на лазерных технологиях. К настоящему времени на ряде верфей (Meyer Werft и Blohm Voss в Германии, Aker Finn Yards в Финляндии, Monfalcone Fincantieri Shipyard в Италии, верфи Kawasaki в Японии и др.) в промышленном производстве корпусных конструкций из низколегированных сталей применение лазерной сварки (ЛС) занимает значительный процент среди всех используемых методов сварки. Появление в судостроении совершенно новой технологии стало возможным в связи с созданием надежных конструкций лазеров большой мощности. Замена дуговых

источников нагрева на лучевые существенно меняет характеристики термических циклов в околошовной зоне, что не может не сказаться на процессах при формировании структур и размерах ЗТВ. На рисунке 6 представлены шлиф и результаты измерения твердости сварного соединения (исследования ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» совместно с НТЦ ЛТиТ НИИЭФА), полученные при разработке принципиальной технологии лазерной сварки хладостойких сталей с пределом текучести 450МПа (толщина 15мм). При этой технологии общая ширина ЗТВ у поверхности составляет 1,8 мм, а в корне шва – 0,4 мм.

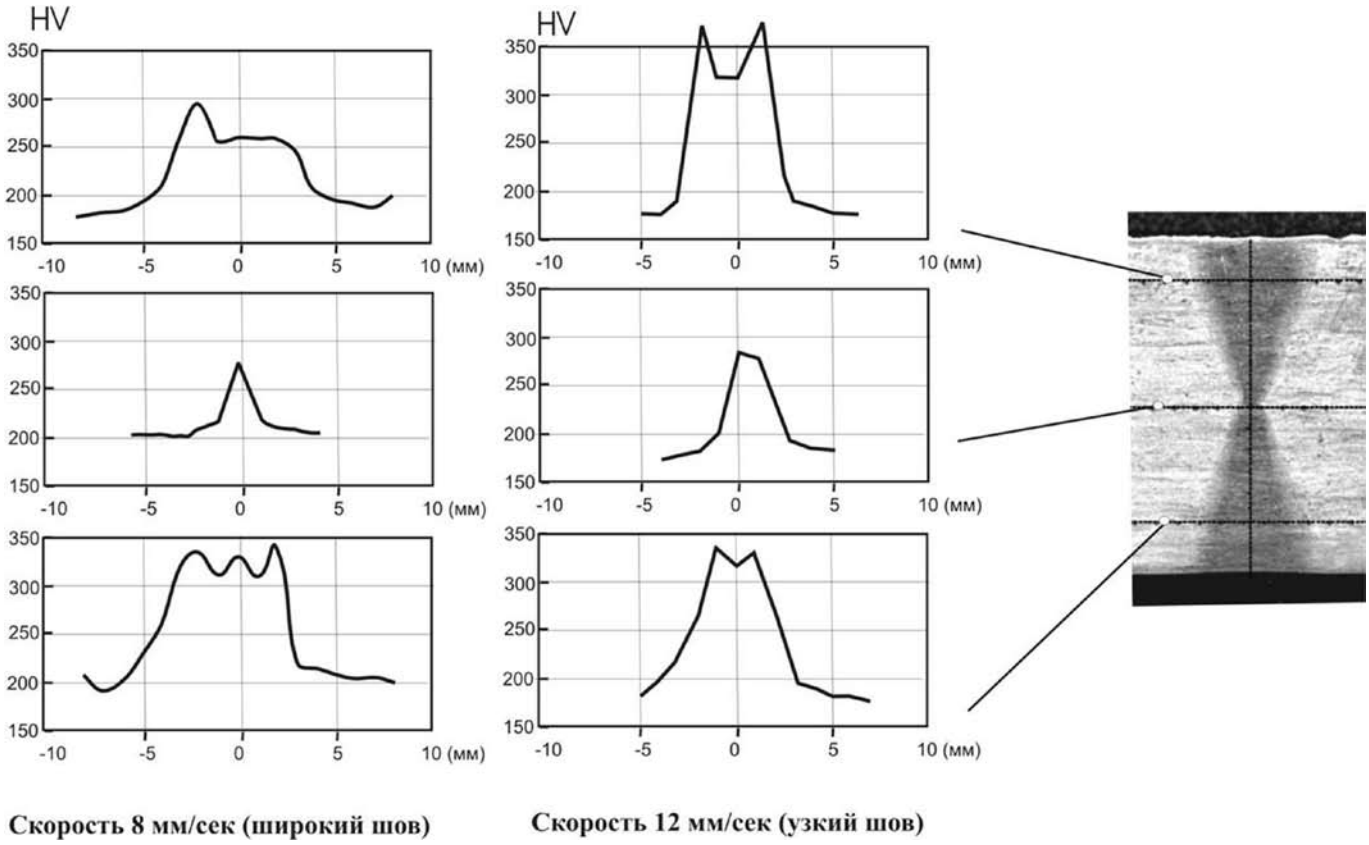


Рисунок 6 *Распределение твердости по сечению сварного соединения, полученного ЛС.*

Для сварки листов средней и большой толщины в зарубежном судостроении начала применяться гибридная сварка: «высокомощный лазер+дуга» за один проход и «лазер (средней и малой мощности)+дуга” - как многопроходный вариант.

Согласно исследованиям с ростом толщины листов полное проплавление шва осуществляется только за счет повышения мощности лазера. В 2004 г. в Германии с помощью гибридной сварки при применении лазера с выходной мощностью 20 кВт была достигнута глубины проплавления 15 мм за один проход [4]. Если рассматривать шлиф этого соединения (рисунок 7), то видимая в результате травления протяженность ЗТВ в корне шва составляет около 0,4 мм, а в верхней части соединения ее максимальные размеры достигают 1,5 мм.

Дюк Петрин (Dirk Petring) в 2008 г., изучая однопроходную гибридную сварку, при мощности лазера 19.8 кВт за один проход проварил лист высокопрочной стали толщиной 30 мм [5]. Для сварки средних и толстых листов применяется как гибридная сварка за один проход, так и многопроходный вариант.

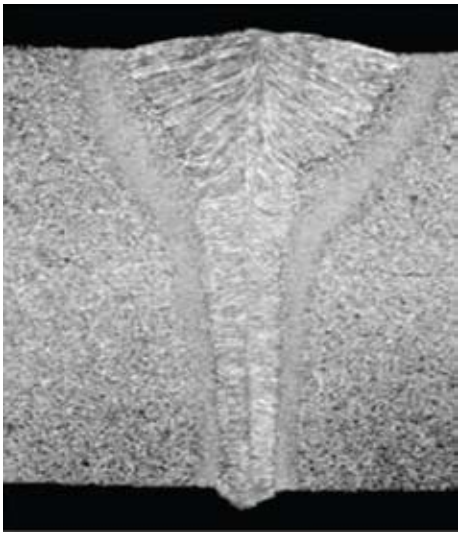


Рисунок 7 *Типичный шов после гибридной сварки лазер+MIG: сталь S355NL толщиной 15мм (Fraunhofer-Institute for Laser Tech-nology)*

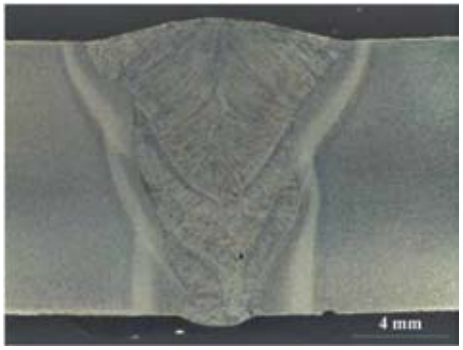


Рисунок 8 *Типичные очертания шва при многопроходной гибридной сварке (Джао Фучень)*

Джао Фучень в своей диссертации приводит шлифы соединений (рисунок 8), полученные многопроходной гибридной сваркой на стали толщиной 12 мм с ультранизким содержанием углерода [6]. При этой технологии наибольшая ширина ЗТВ в корне шва (около 2 мм), а самые узкие ее области наблюдаются в средней части соединения (менее 1 мм).

Таким образом, проведенный анализ показывает, что на судостроительных сталях применение новых лазерных технологий приводит к резкому уменьшению ширины ЗТВ. Сокращение ширины всех участков ЗТВ на порядок по величине при переходе от дуговой сварки под флюсом к лазерной и гибридной сварке создает большие проблемы в получении достоверных знаний о структурных преобразованиях в металле околошовной зоны классическими методами металлографии. Современный инструментарий, реализующий методы имитационного моделирования, позволяет изучить закономерности формирования структур в околошовной области и дать их адекватное описание.

Заключение

Ранее проведенные во ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» с участием автора исследования по моделированию термических воздействий на металл ЗТВ, направленные на изучение структуры в ЗТВ при многодуговой сварке под флюсом сталей для магистральных трубопроводов показали продуктивность использования современного инструментария для исследования фазовых превращений и структурных изменений применительно к тепловым процессам в ЗТВ.

Переход к новым технологиям сварки судостроительных корпусных конструкций ведет к значительным изменениям тепловой обстановки в зоне сварки (росту градиентов температур и существенному изменению действующих термических циклов), что влияет на структурные и геометрические характеристики ЗТВ сварных соединений. При наблюдаемом уменьшении в размерах ЗТВ (на порядок по величине при переходе от дуговой сварки под флюсом к ЛС и гибридной сварке) весьма проблематично отследить на реальных соединениях закономерности формирования структур в околошовной области и дать их адекватное описание без имитации фазовых превращений и структурных изменений в ЗТВ на модельных образцах. Имитационное моделирование процессов в ЗТВ применительно к судостроительным сталям имеет особую важность в связи с активным процессом внедрения лазерных технологий сварки на судокорпусных конструкциях, причем с ростом прочности и толщины основного металла получение достоверных знаний о структурных преобразованиях в ЗТВ с применением современных методик и оборудования становится еще более актуальным.

Литература

1. Иванов А.Ю., Орлов В.В., Круглова А.А., Шарапова Д.М. и др.. Исследование структуры зоны термического влияния сварного соединения из стали класса прочности Х80 после имитационного моделирования термических воздействий. - // Вопросы материаловедения, 2010, № 1 (61). С. 31-39.

2. Иванов А.Ю., Круглова А.А., Орлов В.В., Шарапова Д.М. и др. Прогнозирование структуры зоны термического влияния трубной стали класса прочности Х80. - // Сборник докладов XV международной научно-технической конференции «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций», Санкт-Петербург, 27-29 октября 2009г. СПб.: Изд. СПбГУНиПТ, 2009. С.243-248.

3. Сергеев Ю.Г., Шарапова Д.М. Исследование химического состава, твердости и структуры металла сварных соединений стали 15ХСНД применительно к пролетным кон-струкциям мостов. - // Вопросы материаловедения, 2009, № 4 (60). С.89-100.

4. http://www.ilt.fraunhofer.de/eng/. Performance and results: Annual report 2000-2004, Fraunhofer-Institute for Laser Technology ILT

5. Dirk Petring. Enhancement of laser welding capabilities by hybridization or combination of different processes. Proceedings of the 3st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics, Beijing, China. 2008: P.324-329

6. Чжао Фучэнь. Разработка технологий гибридной сварки CO2-лазер+GMAW бейнитных сталей с ультранизким содержанием углерода. Диссертация на соиск. уч. степ. к.т.н. СПб.: СПбГТУ. 2011

70
МАРОК ПРОВОЛОК
К 70-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ

Орлов Леонид Николаевич

В этом году крупному русскому ученому в области сварки, нашему выдающемуся современнику Леониду Николаевичу Орлову исполнилось со дня рождения 70 лет. Самый знаменательный подарок к своему юбилею Леонид Николаевич преподнес сам себе – разработав по заказу одного из предприятий 70-ю по счету марку порошковой проволоки, которая, как и все его разработки, тут же пошла в производство.

Чтобы научной общественности дать представление о вкладе Л.Н. Орлова в развитие сварочной науки, в сборнике опубликован доклад, подготовленный на основе рукописных материалов Леонида Николаевича, которые в процессе сотрудничества за два последних десятилетия скопились в моем письменном столе. Учитывая, что доклад собран подобно мозаике из отрывков рукописей, вышедших лично из-под руки моего друга, я, полагаю, справедливо поступил, поставив в качестве автора доклада Л.Н. Орлова. Пусть работа в части редактирования материалов доклада будет воспринята как мой небольшой голос в мощном хоре поздравлений участников форума, где среди присутствующих на конференции коллег много хороших знакомых, товарищей и личных друзей Леонида Николаевича.

Знаменательно, что юбилей приходиться на канун 20-летия фирмы «ТМ.ВЕЛТЕК», учрежденной с участием Л.Н. Орлова. На этом предприятии в полной мере раскрылся его талант как сварщика-металлурга и сварщика-технолога. И верно будет заметить, не умоляя роли других сотрудников ООО «ТМ.ВЕЛТЕК», существование фирмы напрямую все годы зависело и продолжает зависеть от та-

ланта, способностей, энергии и результатов работы выдающегося ученого Л.Н. Орлова. Обычно считается нескромным признавать крупный талант при жизни и редко вслух даже в дни юбилеев употребляют такие слова как великий, гениальный, выдающейся. Но разве не достоин человек самых высших эпитетов, если он лично разработал семь десятков сварочных порошковых проволок! И все материалы пошли на предприятия в производство сварных конструкций, применяются для поверхностной наплавки, заказываются потребителями с целью выполнения ремонтных и восстановительных работ на конструкциях и деталях из различных материалов, работающих в самых разнообразных условиях. Среди созданных Л.Н. Орловым сварочных материалов не только универсальные порошковые проволоки широкого назначения, но и масса специализированных материалов, а также ряд проволок, обеспечивающих уникальные свойства сварных швов и наплавок. Такая продуктивность одного человека кажется немыслимой, она по силам только крупным фирмам с мощным научно-исследовательским отделом.

Леонид Николаевич окончил Брянский институт транспортного машиностроения. Там, будучи студентом и подрабатывая на кафедре сварки лаборантом, я познакомился с ассистентом Л.Н. Орловым и проработал с ним почти два года под руководством доц. М.В. Дубровского по хоздоговорной тематике. Следует отметить гениальную прозорливость заведующего кафедрой проф. Г.И. Лескова, который отправил Леонида Николаевича в Киев с рекомендательным письмом к проф. И.К. Походне в аспирантуру ИЭС им. Е.О. Патона. Блестящие способности ученого и организатора Л.Н. Орлова не остались незамеченными научным руководителем, в отделе которого после защиты диссертации Леонид Николаевич - один из лучших учеников проф. И.К. Походни - занял достойное место начальника лаборатории. Изменения в стране, развал СССР, когда большинство граждан оказалось на грани нищеты и вынуждены были искать источники для существования, Л.Н. Орлов, при символической зарплате имея на содержании детей-школьников и жену, в 1993 г. с кровью на сердце покинул родной отдел и с такими же, горемыками-сотрудниками ИЭС им. Е.О.Патона основал собственную фирму. Никто из них не мог знать, что их ждет впереди. Сегодня мы знаем результат…

У Леонида Николаевича прекрасная семья, замечательная жена и два взрослых сына, внуки. Приходиться сожалеть, что ни один из его сыновей не пошел по стопам отца и не стал приемником его научного наследия, не продолжил его дело на пользу сварочной науке и сварочному производству. Высоко эрудированный с энциклопедическими знаниями в области металлургических процессов при сварке Леонид Николаевича удивительно приятный в общении и верный друг.

Поздравляем Леонида Николаевича со знаменательной датой! Желаем ему здоровья, крепости духа, энергии, творческого долголетия! Пусть его дом, его родных и близких минуют все несчастья.

М.Г. Шарапов

ПОРОШКОВЫЕ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ (К 20-ЛЕТИЮ ПРЕДПРИЯТИЯ ООО «ТМ. ВЕЛТЕК»)

Л.Н. Орлов,
к.т.н.,
ООО «ТМ. ВЕЛТЕК»
г. Киев,
Украина

Обзор и примеры применения порошковых проволок производства ООО «ТМ. ВЕЛТЕК» показывает их перспективность и преимущества по ряду технико-экономических показателей. Положительный эффект от применения порошковых проволок в значительной мере определяется квалифицированным информационным и инженерным сопровождением.

Фирма СП «ТМ. ВЕЛДТЕК» основана в 1993 г. в Киеве сотрудниками ИЭС им. Е.О.Патона, в 2000 г. с целью более эффективного развития производства и освоения рынка было создано предприятие ООО «ТМ. ВЕЛТЕК». Одной из предпосылок организации предприятия являлось сохранение и развитие производства порошковых проволок в условиях сформировавшегося системного разрушения существовавших производств порошковой проволоки. Для производственной деятельности на условиях аренды учредителями предпочтение было отдано ОАО «Днепрометиз» (г. Днепропетровск), как в большей степени сохранившему производство и квалифицированный персонал. Следует отметить, что по состоянию производства, мощности и структуре самым подходящим в то время был завод ДЭИЗСМ (г. Днепропетровск). Однако на ДЭИЗСМ к 1993 г начался безостановочный процесс уничтожения производства порошковой проволоки, и от идеи использования его базы пришлось отказаться. Знаменательной датой можно считать 1994 год, когда было установлено сотрудничество с предприятиями железной дороги, Херсонским судостроительным заводом, НКМЗ, ММК им. Ильича, ЧП «РЕММАШ» (г. Днепропетровск) и др. С этого времени начался постоянный рост производства и реализации порошковых проволок.

Анализ состояния рынка сварочных материалов в промышленно развитых странах говорит об устойчивом и динамичном росте объемов применения порошковых проволок различного назначения. Изучение существующих потребностей Украины, и стран СНГ (прежде всего - России, как наиболее крупного потребителя порошковых проволок) показало, что, несмотря на общий спад производства во всех отраслях промышленности, сохраняется спрос на порошковые проволоки различного назначения и весьма широкой номенклатуры, который частично компенсируется растущим импортом и действующими производствами в России, но, в принципе, последние не в состоянии удовлетворить существующий спрос. Потребность по

номенклатуре такова, что в ближайшее годы не смогут ее закрыть ни зарубежные производители, ни наше предприятие (хотя для этих целей на фирме разработано около 70 марок порошковых проволок). По нашим оценкам для удовлетворения основного спроса по номенклатуре рынок должен предлагать потребителям не менее 200 различных марок проволок.

В странах СНГ низкий объем потребления порошковых проволок связан с произошедшим спадом производства во всех отраслях промышленности. Для периода спада характерно закрытие производств, а на действующих предприятиях - ограничение оборотных средств, что создало основу для заинтересованности в увеличении ресурса производственного оборудования, в его ремонте и развитии реновационных технологий. В этих условиях не только сохранилась, но и повысилась потребность в порошковых проволоках для сварки, наплавки и напыления.

К побуждающим факторам применения порошковых проволок относятся высокая производительность работ, хороший внешний вид швов и упрочняющих слоев, хорошие сварочно-технологические характеристики, упрощение техники сварки и наплавки, легкая адаптация к различным технологическим процессам дуговой сварки и наплавки, гарантированное получение высоких механические свойства и качества сварных соединений и упрочняющих слоев.

К существенному преимуществу порошковых проволок относится возможность реализации и гарантированного воспроизводства любой системы легирования, что в ряде случаев не может быть реализовано на сплошных проволоках. По сравнению с покрытыми электродами и флюсами, в том числе керамическими у порошковых проволок более эффективное и экономное использование легирующих, прежде всего дорогостоящих элементов. Порошковая проволока позволяет реализовать сочетание газошлаковой защиты, с возможностью рафинирования и модифицирования металла сварочной ванны, с целью достижения требуемого комплекса механических свойств наплавленного металла. В сочетании с флюсами и защитой углекислым газом или смесями газов ($Ar+CO_2$ и др.) достигнуто уменьшение диаметра проволок до 1,2 мм, что существенно расширяет технологические возможности дуговой сварки и наплавки. В свою очередь, сочетание комплексной защиты и эффективного легирования расплавленного металла расширяют металлургические возможности композиций порошковых проволок. За последние годы на базе современных достижений в области металлургии дуговой сварки и наплавки реализуются новые технологические решения в производстве и применении порошковых проволок, обеспечивающих их высокое качество.

Несмотря на перечисленные преимущества порошковых проволок, характерно их ограниченное потребление действующими на постсоветском пространстве предприятиями. Среди большей части специалистов предприятий - потребителей сварочных материалов существует необоснованное недоверие к качеству порошковых проволок. В этом случае положительный опыт применения порошковых проволок за рубежом должен служить ориентиром для ведущих специалистов отечественных предприятий. Там где на первое место поставлено качество выпускаемой продукции применение порошковых проволок наиболее целесообразно.

В большинстве случаев в качестве сравнительных показателей берут только стоимость проволоки и производительность наплавки, без учета снижения вспомогательных затрат, повышения межремонтного ресурса оборудования, снижения затрат на ремонт оборудования или повышения ресурса деталей. Эффективность применения порошковых проволок необходимо оценивать не по отдельным этапам технологического процесса ремонта или изготовления оборудования, а по выходу годной продукции в ценовом и временном факторах.

Применение порошковых проволок давно стало самостоятельным технологическим направлением. Одним из технико-экономических показателей является коэффициент расхода материала $К_р$, позволяющий рассчитать потребность в сварочном материале на конкретное изделие. Применительно к сварке порошковой проволокой величина $К_р$ зависит от типа сердечника порошковой проволоки. Наиболее высокий выход годного металла достигается при сварке и наплавке порошковыми проволоками с металлопорошковым сердечником $К_р$=1,05-1,1. У самозащитных порошковых проволок этот показатель выше $К_р$=1,2-1,3, а у газозащитных порошковых проволок, содержащих шлакообразующие компоненты, он равен $К_р$=1,15-1,2. Следует помнить, что для покрытых электродов показатель расхода материала в среднем составляет $К_р$=1,7-1,8, а при наплавке под флюсом необходимо учитывать коэффициент расхода флюса $К_ф$=1,0-1,4.

Отсутствие необходимой информации у специалистов сварочного производства и ремонтных служб, а также известный существующий среди них консерватизм являются основными причинами недостаточного применения порошковых проволок.

В области разработки и производства порошковых проволок различного назначения несомненными лидерами являются ESAB (Швеция), Welding Alloys, Weldclad (Англия), Bohler (Австрия), Cobelco (Япония), Hunday (Корея), Costalin (Австрия) и др., которые выпускают большую номенклатуру проволок различного назначения. Развитая сеть дилеров этих компаний составляет существенную и возрастающую конкуренцию отечественным производителям порошковых проволок, несмотря на более высокую стоимость их продукции. Преимущества зарубежных компаний заключаются не только в широкой номенклатуре проволок по назначению, диаметрам видам защиты и видам поставки, но также и в большом опыте их применения. Они активно информируют рынок о своих достижениях и, как правило, полностью и в комплексе решают проблемы заказчика (проволока + оборудование + технология + инжиниринг). Это оказывает влияние на номенклатуру востребованных порошковых проволок, уровень их качества, вид и сроки поставки и сопровождения, уровень цен.

Однако, с другой стороны, опыт применения порошковых проволок зарубежных компаний инициировал интерес наших предприятий к применению и поиску отечественных аналогов. Это связано с необходимостью предоплаты, оплаты в валюте, достаточно длительных сроках поставок и высокой ценой зарубежных материалов. Кроме того, в последние годы имеют место случаи неудовлетворительного качества порошковых проволок зарубежных компаний, вплоть до сброса некондиционной

продукции на наш рынок после предварительной демонстрации высококачественных образцов.

Отечественные производители также обладают большой номенклатурой порошковых проволок различного назначения, которые близки зарубежным аналогам по техническим характеристикам, но существенно уступают по видам поставок и номенклатуре высоколегированных порошковых проволок Ø1,2 - 2,0 мм.

Одной из важных компонент деятельности ООО "ТМ. ВЕЛТЕК" в данных условиях является изучение потребностей и проблем каждого потребителя, состояния его производства, квалификации кадров, финансового состояния, проведение систематического контроля результатов применения продукции с целью быстрого решения возникающих проблем. По результатам этих работ осуществляется совершенствование существующих и созданы новые порошковые проволоки, формулируются задачи будущих разработок и план НИР на предприятии. При решении поставленных задач идет поиск не только технологических и металлургических решений, но и создание экономических предпосылок для реализации материалов.

Применительно к сварке малоуглеродистых и низколегированных сталей сегодня существует спрос на порошковую проволоку рутилового типа ПП-АН8, диаметром 2,0-2,5 мм для сварки в углекислом газе. Как замену данной проволоке «ТМ. ВЕЛДТЕК» предлагает новую порошковую проволоку рутилового типа с повышенной основностью сердечника ПП-ТМВ7, Æ1,2-2,5 мм. Проволока обладает улучшенными санитарно-гигиеническими характеристиками, позволяет выполнять сварку во всех пространственных положениях, обеспечивает более высокий комплекс механических свойств металла шва и сварного соединения и имеет признание Российского Морского Регистра Судоходства по категории 3Y для диаметра 1,2 мм.

Предлагается предприятиям порошковая проволока типа металкор марки ПП-ТМВ8. Данный тип порошковых проволок успешно применяется за рубежом и к сожалению пока не находит должного признания на Украине. Проволока успешно может заменить сварку сплошной проволокой в CO_2 или смеси ($Ar+CO_2$) малоуглеродистых и низколегированных сталей, обеспечивает высокий уровень механических свойств металла шва и сварного соединения, низкое содержание диффузионного водорода ($H_{диф} \leq 5$ см^3/100 г н.м.).

Для сварки ответственных металлоконструкций из малоуглеродистых и низколегированных, а также из высокопрочных низколегированных сталей выпускается порошковые проволоки рутил-флюоритного типа марок ПП-АН29 и ПП-АН57. Процесс сварки выполняется в CO_2 или ($Ar+CO_2$). Проволока ПП-АН29 выпускается в двух модификациях отличающихся критической температурой перехода к хрупкому разрушению от -30° С до -50° С.

Сохраняется потребность в самозащитных порошковых проволоках в небольших количествах. Несомненным лидером являются порошковые проволоки трубчатой конструкции фирмы Линкольн (США). Выпуск аналогов этих проволок осваивается в России, Украина их не производит, хотя у некоторых производителей аналоги разработаны. Тем не менее, вполне могут удовлетворить запросы рынка самозащитные порошковые проволоки ПП-АН7, ПП-АН3, разработанные ИЭС им. Е.О.Патона.

Стоимость этих проволок достаточно высока, что является одной из основных причин их ограниченного применения. С целью частичного удовлетворения потребности рынка «ТМ. ВЕЛТЕК» разработал и освоил выпуск самозащитной порошковой проволоки трубчатой конструкции ПП-ТМВ6 диаметром 1,6-2,4 мм, которая по ряду показателей все-таки уступает названным порошковым проволокам, но находит своего потребителя.

Для автоматической сварки с принудительным формированием монтажных стыков автодорожных мостов разработана и реализуется самозащитная порошковая проволока трубчатой конструкции ПП-АНТ, диаметром 3,0 мм, которая применяется и для ванной сварки арматуры класса А1 и А2. Для автоматической сварки с принудительным формированием с защитой углекислым газом производится порошковая проволока ПП-АН39, диаметром 2,4-3,0 мм, которая успешно применяется в судостроении и имеет признание Российского Морского Регистра Судоходства по категории 3Y

Для заварки дефектов литья из стали 110Г13Л выпускаем порошковые проволоки ПП-АН105 и ее модификации, а также ПП-ТМВ11. Проволока ПП-ТМВ11 по комплексу механических свойств наплавленного металла близка к порошковой проволоке ПП-АНВ2у. В настоящее время завершена разработка аналога известной порошковой проволоки фирмы Bohler (Австрия), которая вполне может конкурировать с проволокой ПП-АВ2у. Завершена разработка экономно-легированной и, соответственно, более дешевой порошковой проволоки, которая в ряде случаев может быть применена для сварки стали 110Г13 и комбинированной сварки сталей типа 30Г с 110Г13Л.

Наплавочные порошковые проволоки, как и сварочные, выпускаются по традиционной в Украине технологии их производства. Как указывалось выше, разработан и реализован комплекс технологических мероприятий по совершенствованию технологии производства. На основе этого проведено совершенствование некоторых стандартных порошковых проволок с целью повышения качества выпускаемой продукции и сварочно-технологических характеристик в части улучшения отделимости шлаковой корки, повышения стойкости против образования пористости и трещин в наплавленном металле. Некоторые марки проволок по требованию заказчиков адаптированы к флюсам Ан20,АН26, АН348 и АН60, расширен диапазон диаметров проволок в сторону из уменьшения. Освоено производство наплавочной порошковой проволоки Нп30ХГСА и самозащитной проволоки аналогичного назначения. Созданы и поставлены на производство новые порошковые проволоки для замены таких дорогостоящих проволок как ПП-АН125 и ПП-АН170, которые не только не уступают данным проволокам, но и превосходят их по работоспособности наплавленного металла и по технологичности в применении.

ООО "ТМ.ВЕЛТЕК" систематически проводит комплекс мероприятий по совершенствованию технологии изготовления и выпуску улучшенных модификаций стандартных порошковых проволок, не уступающих по техническим характеристикам зарубежным аналогам. Кроме освоения и выпуска проволок, разработанных ИЭС им. Е.О.Патона, на предприятии создана большая гамма новых марок про-

волок. Порошковые проволоки изготавливаются серийно согласно ГОСТ 26101-84 и действующей нормативно-технической документации ТУУ 19369185.018-97 и др. На рынке порошковых проволок в условиях действующей конкуренции отечественных и зарубежных производителей предприятию ООО "ТМ.ВЕЛТЕК" удалось стать ведущим и самым крупным производителем порошковых проволок на Украине. В настоящее время ООО "ТМ. ВЕЛТЕК" обеспечивает около 60% потребности предприятий Украины в порошковых проволоках для сварки, наплавки и напыления, а также через своих дилеров развивает экспорт продукции в Россию, страны Прибалтики, Белоруссию и дальнее зарубежье с общим объемом реализации до 1000 тонн в год.

Активная работа с торговыми домами и потребителями порошковых проволок позволила систематизировать их запросы. Освоено производство порошковых проволок диаметром от 1,2 до 6,0 мм. В нашем производстве реализован процессный подход в соответствии со стандартами серии ISO и УкрСЕПРО по системам управления качеством. Разработаны технические условия и сертифицированы все выпускаемые марки порошковых проволок.

Сотрудничество со специалистами различных предприятий позволило в краткие сроки создать и внедрить широкую номенклатуру порошковых проволок под индивидуальные заказы применительно к сварке и упрочняющей наплавке. Вот некоторые примеры успешного сотрудничества.

На Криворожском заводе горного оборудования выполняется большой объем сварочных и наплавочных работ. Номенклатура сварочных и наплавочных материалов широкая в связи с необходимостью сварки малоуглеродистых низколегированных, низколегированных высокопрочных, высокомарганцовистых и теплостойких сталей, выполнения сварных соединений разнородных сталей, сварки литых сталей и исправления дефектов литья. В большинстве случаев это крупногабаритные изделия, что предъявляет особые требования к сварочным материалом, технологии и технике сварки и наплавки.

Сварка деталей и узлов агломерационного и обогатительного оборудования, горнодобывающей техники, в том числе узлов экскаваторов из сталей Ст3пс, 09Г2С, а также заварка деталей литья из сталей 20Л, 35Л выполнялась газозащитными порошковыми проволоками марок ППс-ТМВ5, ПП-ТМВ8, ППс-ТМВ29 и ПП-ТМВ57 узлов из низколегированных высокопрочных сталей 12Х2НМСА, 12Х2НВСА.

Для заварки дефектов литья сталей 20Л и 35Л наиболее эффективно применение металлопорошковой проволоки марки ППс-ТМВ5. Малое количество шлака 4-5% не требует затрат на его удаления в процессе заварки глубоких разделок, высокий коэффициент использования проволоки $К_р$=1,06, высокая стойкость против образования пор и трещин определяют преимущество данной проволоки перед другими сварочными материалами.

Для сварки деталей и заварки дефектов литья из теплостойких Cr-Mo сталей 15ХМ, 12ХМ, 20ХМЛ, 35ХМЛ применяется газозащитная порошковая проволока с сердечником карбонатно-флюоритного типа марки ППс-ТМВ14, диаметром 1,6 мм.

Заварка дефектов литья высокомарганцовистых сталей 110Г13Л выполняется са-

мозащитной порошковой проволокой ВЕЛТЕК-Н220 диаметром 2,0 мм.

Наплавка упрочняющих слоев на засовах днищ, козырьках экскаваторов, ножах грейдеров, бульдозеров и др. выполняется самозащитной порошковой проволокой марки ВЕЛТЕК-Н620 диаметром 2,0 - 2,6 мм, взамен электродов Т590, Т620 и порошковой проволоки ПП-АН125. Работоспособность рабочих органов повышена на 30%. Расширены технологические возможности порошковых проволок ППР-АН125 и ПП-АН170 за счет снижения диаметра до 2,0 мм.

Для восстановительной наплавки плунжеров гидропрессов, защитных втулок грунтовых насосов по перекачке пульпы применяется порошковая проволока ВЕЛТЕК-Н410 и Н420, диаметром 2,0-4,0 мм, в сочетании с флюсами АН20 и АН26.

Аустенитные наплавочные материалы (Mn, Cr-Mn, Cr-Ni-Mn), ВЕЛТЕК-Н210, ВЕЛТЕК-Н215, ВЕЛТЕК-Н220С, ВЕЛТЕК-Н230 хорошо зарекомендовали себя для упрочнения плит дробилок, молотов, железнодорожных крестовин и концов рельсов, а также для сварки перлитных сталей со сталью 110Г13Л.

В течение последних лет Криворожским заводом горного оборудования и ООО «ТМ.ВЕЛТЕК» проведен комплекс совместных работ по увеличению объемов дуговой сварки и наплавки порошковой проволокой. В результате этих работ создан и внедрен ряд новых порошковых проволок различного назначения. В общем объеме применяемых материалов для сварки и наплавки доля порошковых проволок на заводе увеличилась с 15 до 85%. По сравнению с покрытыми электродами повысилась эффективность сварки и наплавки за счет повышения производительности и качества труда. Снизился объем работ по повторному контролю качества. В значительной мере снизилось традиционное недоверие к порошковым проволокам в части качества сварных соединений и упрочняющих покрытий.

Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича более 15 лет успешно применяет порошковую проволоку ВЕ:ЛТЕК-Н470 и ее модификации для наплавки роликов машин непрерывного литья заготовок.

Газозащитная порошковая проволока ВЕЛТЕК-Н472 диаметром 2,0 мм успешно применяется Новокрамоторском машиностроительном заводом для коррозионностойкой наплавки опорных поверхностей подшипниковых узлов сегментов МНЛЗ.

ЗАО «Спецуглемаш» (г. Горловка) успешно применяется для на-плавки элементов шахтной гидравлики крепей и проходческих комплексов порошковая проволока ВЕЛТЕК-Н425 диаметром 2,0 - 2,2 мм с системой легирования Cr-Ni-Mo в сочетании с флюсами АН20 и АН26. Отработана технология однослойной и двухслойной наплавки тел вращения Ø40 - 200 мм. Наплавленный металл может быть выполнен с твердостью в двух диапазонах 32-38HRC и 40-47 HRC.

Для наплавки шнеков прессов производства полиэтиленовой пленки разработана и внедрена на предприятии «Универсал Центр» (г. Днепропетровск) газозащитная проволока ВЕЛТЕК-Н540 диаметром 1,2 мм и на предприятии «Полипласт» (г. Луганск) - ВЕЛТЕК-Н565 диаметром 1,2 мм. Ресурс шнеков увеличен с 1 до 12 месяцев.

Успешно применяется совместным предприятием «КатМеталл» (Киев) газозащитная порошковая проволока ВЕЛТЕК-Н565 диаметром 1,2 мм для наплавки фрез, пос-

тавляемых этим предприятием в Германию.

Предприятие «Композит» (г. Нижний Тагил) применяет порошковую проволоку ВЕЛТЕК-Н620 диаметром 2,0 мм для наплавки лопаток роторов дымососов и других деталей, подверженных ударно-абразивным нагрузкам.

На предприятии «Александрияуголь» применяют для наплавки матриц прессования угольных брикетов порошковую проволоку ВЕЛТЕК-Н600.

Обзор и примеры применения порошковых проволок производства ООО «ТМ. ВЕЛТЕК» показывает их перспективность и преимущества по ряду технико-экономических показателей. Положительный эффект от применения порошковых проволок в значительной мере определяется квалифицированным информационным и инженерным сопровождением.

Образцы порошковых проволок для промышленного опробования ООО «ТМ. ВЕЛТЕК» поставляет бесплатно. По вопросам технических характеристик новых порошковых проволок, их апробации специалисты фирмы всегда готовы дать потребителям полную информацию.

ПОРОШКОВЫЕ ПРОВОЛОКИ - ТЕНДЕНЦИИ, РАЗВИТИЕ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Reinhard Rosert,
доктор-инженер
Drahtzug Stein wire & welding
Altleiningen, Германия,

М.В. Карасев,
д.т.н.
ЗАО НПФ «ИТС»
г. Санкт-Петербург, Россия

Приведены составы порошковых проволок различного типа с герметичной оболочкой, которые широко применяются в судостроении, мостостроении, производстве морских платформ, нефтегазовом секторе, включая производство труб и монтаж трубопроводов.

Для новых проектов в энергетике, в судо- и трубостроении, в нефте- и газодобыче, а также в области строения мостов требуется большое количество стали. При изготовлении новых металлоконструкций важное место занимает сварка.

Развитие сварочной техники взаимосвязано с разработкой новых сварочных материалов. Главными целями при их создании являются:

- повышение производительности сварочного процесса;
- возможность сварки в разных пространственных положениях;
- высокие значения работы удара при низких температурах (-60° С);
- в специальных случаях повышение предела прочности (выше 1100 Н/мм^2) и предела текучести наплавленного металла.

1. Классификация порошковых проволок.

Порошковые проволоки относятся к высокопроизводительным сварочным материалам. Преимущество по производительности перед проволоками сплошного сечения заключается в том, что при равных токах дуги порошковая проволока имеет скорость подачи более высокую (примерно на 20-40%), чем проволоки сплошного сечения. По конструкции порошковые проволоки делятся на вальцованные и бесшовные. Рисунок 1 показывает поперечное сечение самых распространенных порошковых проволок.

Преимущества порошковых проволок состоит в:

- стабильном формировании сварного шва (на ряде марок – с формированием обратного валика);
- отсутствии разбрызгивания при правильно выбранных режимах сварки;

- использовании микролегирующих элементов, придающих специальные свойства металлу шва, особенно в области отрицательных температур;
- повышении производительности не менее чем в 1,2 раза в нижнем пространственном положении, не менее чем 3 раза в вертикальном и потолочном положении.

Рисунок 1 *Виды порошковых проволок*

Порошковые проволоки разделяются по использованию флюса в наполнителе на типы:

- основные,
- рутиловые,
- металлопорошковые (без флюса).

Сварка плавящимся электродом в защитных газах занимает ведущее место реди дуговых процессов. В ряде отраслей, таких как судостроение или нефтегазовый сектор, до 80% механизированной сварки плавящимся электродом выполняется с применением порошковой проволоками. Менее распространены другие способы сварки, такие как дуговая под флюсом, дуговая или электрошлаковая. В рамках международной стандартизации существуют 4 основных стандарта на сварку порошковыми проволоками (рисунок 2).

Особенность этих стандартов состоит в том, что каждый из них учитывает особенности европейского и общемирового рынков в одном станд. Часть А относится к европейскому стандарту с критерием выбора материала по пределу текучести, а часть В к международному ISO-стандарту с критерием выбора по пределу прочности. Эти стандарты помогают сравнивать и выбирать проволоку по общим критериям независимо от изготовителя и марки порошковой проволоки.

Рисунок 2 *Международные стандарты на порошковую прововолоку*

Например:

DIN EN ISO 17632-A--T46 6 1Ni B M 1 H5

расшифровывается таким образом:
T - порошковая проволока от английского слова «TUBULAR»,
46 - предел текучести выше 460 Н/мм^2,
6 - работа удара при -60° С выше 47 Дж,
1Ni - химический состав наплавленного металла,
B - тип заполнения, т.е. основной тип,
M - защитный газ: смесь из 82% аргона и 18% углекислого газа,
1 - сварка во всех пространственных положениях возможно
H5 - содержание водорода в 100г наплавленном металле ниже 5мл.

Формы провара при сварке плавящимся электродом в смеси газов сплошной и порошковой проволоках отличаются друг от друга (рисунок 3).

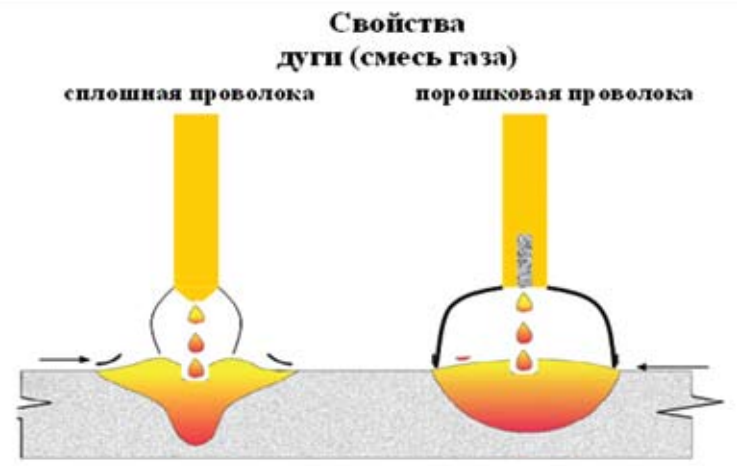


Рисунок 3 *Формы провара при сварке плавящимся электродом в смеси газа*

Использование порошковых проволок приводит к более плавному переходу между валиками при многослойной сварке. При правильном использовании сварочной технологии практически не имеется таких дефектов, как несплошности перекрытия между валиками, шлаковые включения или поры (рисунок 4).

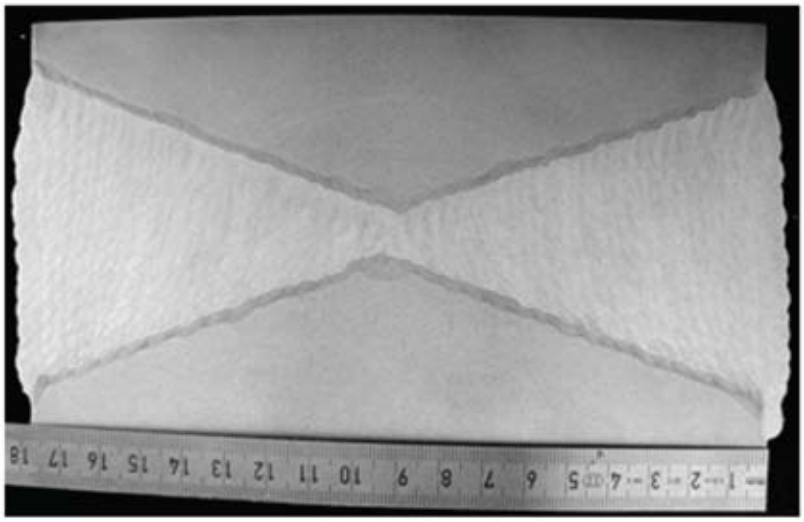


Рисунок 4 *Макрошлиф образца, изготовлен из сварного соединения с порошковой проволокой класса Т69*

Рутиловые порошковые проволоки нашли самое большое распространение. Это связано с их следующими свойствами, главным из которых является высокая технологичность:

- возможностью сварки в тяжёлых условиях без высокого требования к навыкам сварщика;
- замечательным формированием сварного шва во всех пространственных положениях, благодаря быстро застывающему рутиловому шлаку;
- высоким коэффициентом наплавки во всех пространственных положениях, особенно в вертикальном при направлении сварки снизу вверх (при токе дуги до 280 А);
- оптимальным микролегированием, улучшающим вязкость сварного шва и его механические свойства при минимальном содержании легирующих элементов;
- возможностью сварки в CO_2 с очень небольшим количеством брызг;
- практическим отсутствием разбрызгивания при сварке в смеси газа (82% Ar+18%CO_2);
- Возможность сварки корневого слоя шва на керамической подкладке.
- возможностью автоматической орбитальной сварки во всех пространственных положениях.
- лёгкой отделимостью шлаковой корки.

- техникой сварки наклоном горелки вперёд аналогично сварке штучным электродом.

Учитывая высокий коэффициент наплавки в вертикальном положении в направлении снизу вверх, разработаны новые рутиловые порошковые проволоки для сварки различных, в том числе толстостенных, конструкции.

2. Примеры применения порошковых проволок.

А. Стальные конструкции

На рисунке 5 показан стадион футбольного клуба Шахтер в Донецке на Украине. Заливка фундамента была выполнена в 2006г. В июне 2012 г. стадион был одним из тех, на которых проводился чемпионат Европы по футболу. Идея архитектора состояла в том, чтобы построить гармоничную крышу без опор. Высота сооружения составляет 54 м. Сегменты крыши разработаны таким образом, чтобы можно было компенсировать определенные смещения почвы, вызванные последствиями добычи угля. Строительство стоило примерно 180 млн. евро. Все 12 сегментов крыши имеют разные размеры. Каждый из 12 сегментов полностью виден.

Рисунок 5 *Стадион футбольного клуба Шахтер (г. Донецк)*

При изготовлении применяли следующие способы сварки:

- полуавтоматическую сварку порошковой проволокой в защитном газе;

- сварку под флюсом порошковой проволокой;
- ручную дуговую сварку (при сборке) и контактную сварку шпилек;

Для изготовления было использовано 4300 тонны стали. Общая площадь стадиона - 46.780 м². Стадион вмещает 50000 зрителей.

Б. Мостостроение

Новое направление в применении сварочных материалов для механизированной сварки - отказ от проволоки сплошного сечения марки Св-08Г2С и переход на новое поколение сварочных проволок для этого способа механизированной сварки («МП») - бесшовных металлопорошковых проволок, специально созданных для стального мостостроения.

В создана и применяется с 2006 г. металлопорошковая проволока марки «POWER BRIDGE» Ø 1,2–1,6 мм. Данная бесшовная металлопорошковая проволока создана совместно фирмой «Драхтцуг Штайн» (Германия) и ЗАО «НПФ ИТС» (г. Санкт-Петербург). Совместно с ЦНИИС (Москва) были разработаны Технические Условия на эту сварочную проволоку (специально для мостостроения). Её производство осуществляется на ОАО «ЭСВА», г. Калининград, где действует совместное с фирмой «Драхтцуг Штайн» (Германия) и ЗАО НПФ «ИТС» производство.

В качестве яркого примера применяемых современных технологий монтажной сварки в конструкциях пролётных строений стальных мостов можно привести уникальный стальной мост вантово-балочной системы с арочным пилоном через Москву-реку в районе Серебряного Бора (г. Москва) (рисунок 6), у которого ортотроп-

Рисунок 6 *Строительства арки с рестораном мостового перехода в р-не Серебряного Бора, г. Москва*

ная проезжая часть имеет трапециевидные продольные рёбра. Главные коробчатые балки объединены поперечными балками с шагом 5,25 м и ортотропными плитами между коробчатыми балками. Каждая ортотропная плита конструктивно решена с трапециевидными продольными ребрами жесткости и имеет ширину ≈ 2,5 м; общая ширина моста более 40 м.

С использованием металлопорошковой проволоки POWER BRIDGE 60M были изготовлены и смонтированы такие мостовые сооружения, как мост через бухту Золотой Рог во Владивостоке, мост на острове Русский, все мостовые металлоконструкции в Сочи на Олимпийских объектах.

Общий объем использования этой проволоки в мостостроении России составляет более 200 т/год.

В. Плавучие платформы

Плавучие буровые платформы полупогружного типа используют для бурения скважин в основном при глубине моря 100-300 м и представляют собой понтон с производственным оборудованием, поднятый над поверхностью моря (на высоту до 15 м) с помощью четырех и более стабилизирующих колонн, которые опираются на подводные корпуса (не менее двух). Буровые платформы транспортируют к точке бурения на нижних корпусах при осадке 4 - 6 м. Плавучая буровая платформа погружается на 18-20 м путём приёма водяного балласта в нижний корпус. Для удержания полупогруженных буровых платформ используется восьмиточечная якорная система, обеспечивающая ограничение перемещения установки от устья скважины на расстояние не более 4% от глубины моря [1]. Разработка и сертификация сварочных материалов для сварки морских конструкций должны учитывать множество критериев. В этой области типичны большие и толстостенные конструкции, для производства которых необходима многопроходная сварка. При изготовлении таких конструкций важно соблюдать заданные технологические требования. Надо принимать все возможные меры, чтобы содержание водорода в наплавленном металле было на низком уровне (мене 5 мл/100г наплавленного металла).

Проводить термическую обработку больших конструкций сложно и не экономично. При сварке таких конструкций используются бесшовные порошковые проволоки, так как бесшовная оболочка защищает от попадания влаги окружающего воздуха внутрь шихты. Опасность такого попадания существует при использовании вальцованных порошковых проволок, где проникновение влаги возможно через продольное соединение оболочки. Повышенное содержание водорода в наплавленном металле, вследствие проникновения влаги внутрь вальцованных проволок, чрезвычайно опасно при появлении закалочных структур в околошовной зоне и в металле шва. Скорость охлаждения низколегированных сталей при сварке составляет около 80° С/сек, а критическая скорость охлаждения, при которой возникают закалочные структуры составляет более 100° С/сек. То есть небольшое отклонение режима сварки при нарушении её технологии может вызвать непоправимые последствия. Далее надо учитывать следующее:

- большие конструкции часто требуют длинных швов,
- возможность выполнения сварки во всех пространственных положениях,
- необходимость обеспечения высокой ударной вязкости при отрицательных температурах до -60° С.
- прочностные свойства сварного соединения должны соответствовать основному металлу.

Порошковые проволоки с быстро затвердевающим рутиловым флюсом пригодны для сварки во всех пространственных положениях. Сварка возможна почти без брызг. Наплавленный металл не течет за счёт его удерживания затвердевшим шлаком при сварке снизу вверх на больших токах. Таблицы 1 и 2 показывают химсостав и механические свойства бесшовных порошковых проволок, которые применяют при изготовлении морских платформ и сопутствующего оборудования.

Таблица 1 *Классификация порошковых проволок по механическим свойствам*

Тип проволоки	Применение	M21	CO_2	Пространственное положение шва
T 46 6 M M 1 H5	Корень шва	до -60° С	до -40° С	все
T 46 4 P M 1 H5	Заполняющие и облицовочные	до -60° С	до -40° С	все
T 50 6 1 Ni M M1 H5	Корень шва	до -60° С	до -40° С	все
T 50 6 1 Ni P M 1 H5	Заполняющие и облиицовочные	до -60° С	до -40° С	все
T 69 6 Z P M 1 H5	Корень шва и заполняющие	до -60° С	до -40° С	все

Таблица 2 *Классификация порошковых проволок по химическому составу*

Класс прочности, МПа	Тип порошковой проволоки	Классификация	C%	Si%	Mn%	Cr%	Ni%	Mo%	Ti,B
460	Металлопорошок	T 46 6 M M 1 H5	00,05	00,7	0,6	-	- -	-	-
	Рутил	T 46 4 P M 1 H5	0,05	0,5	0,4	-	- -	-	+
500	Металлопорошок	T 50 6 1Ni M M 1 H5	0,05	00,5	0,4	-	0,9	-	- -
	Рутил	T 50 6 1Ni P M 1H5	0,05	00,5	,0,4	-	0,9	-	+ +
690	Рутил	T 69 6 Z P M 1 H5	0,05	, 0,4	0,7	+	2,0	+	+ +
1100	Металлопорошок	T 89 4 Z M M 1 H5	0,06	0 0,4	0,7	0,6	2,5	0,5	--

Примечание: За счёт универсальных сварочно-технологических свойств металлопорошковые проволоки могут применяться для сварки корня и облицовочных слоев швов. Существуют режимы сварки с короткой дугой (процесс короткого замыкания) и режимы сварки с длинной дугой - со струйным капельным переносом. Сварка почти без брызг.

В России для такого производства используются порошковые проволоки типа MEGAFILL – 821R , которые также производятся на ОАО «ЭСВА», г. Калининград по соглашению с ЗАО НПФ «ИТС», г. С-Петербург. Общий объем производства составляет более 100 т/год.

Для аттестации процессов сварки толстостенных изделий производится отра-

ботка технологии их сварки. На рисунке 7 показан процесс аттестации технологии сварки толстостенной конструкции толщиной 177 мм и пределом текучести выше 690МПа порошковой проволокой рутилового типа. Такая технология используется при сварке корпуса судна, предназначенного для подъема платформ морского базирования (рисунок 8).

Рисунок 7 *Образец для аттестации технологии сварки стали толщиной 177 мм с пределом текучести 690 МПа порошковой проволокой рутилового типа STEIN-MEGAFIL 690 R.*

Рисунок 8 *Судно для подъема морских платформ [1]:*
- размеры: длина 147,50 м, ширина 42,00 м, высота 11.00м,
- глубина залегания нижней части платформы до 50,00 м,
- скорость ветра – до 18 м /с ,
- экипаж до 100 человек, в том числе персонал платформы,
- имеется вертолетная площадка D = 22,80 м,
- максимальная скорость судна 12 узлов,
- грузоподъемность до 8000 т

Выводы

- Использование порошковых проволок находит все более широкое применение для сварки ответственных металлоконструкций во всех отраслях промышленности. Широко применяются порошковые проволоки в судостроении, мостостроении, производстве морских платформ различного назначения, нефтегазовом секторе, включая производство труб и монтаж трубопроводов.

- Наиболее широко применяются порошковые проволоки рутилового типа, которые обеспечивают максимальную технологичность сварочных работ. Второе место по масштабам применения занимают металлопорошковые проволоки, которые менее технологичны, но обеспечивают более высокое качество металла шва. Третье место по масштабам применения занимают порошковые проволоки со шлаком основного типа, которые обеспечивают самое высокое качество металла шва, но при этом имеют низкую технологичность.

- Существует конкуренция между порошковыми проволоками вальцованного типа и бесшовными порошковыми проволоками. Первые обеспечивают низкую стоимость, но допускают попадание влаги в порошковый сердечник, что приводит к увеличению содержания диффузионно-подвижного водорода в металле шва. Второй тип проволок – бесшовные - не допускает увеличения диффузионно-подвижного водорода в металле шва, но имеют более высокую стоимость. Поэтому второй тип проволок доминирует при сварке высокопрочных сталей, где требуется гарантированно высокое качество сварного соединения.

- В настоящее время проводятся интенсивные работы по отработке технологии производства высоколегированных бесшовных проволок для использования в энергетике и в судостроении.

- В России производство бесшовных порошковых проволок осуществляется на ОАО «ЭСВА», г. Калининград по соглашению между «Драхтцуг Штайн», Германия и ЗАО НПФ «ИТС». Производятся рутиловые порошковые проволоки бесшовного типа POWER PIPE 60R, POWER PIPE 90R для использования в нефтегазовом секторе (завершающая часть газопровода «Северный поток» строилась с использованием в основном этих порошковых проволок), металлопорошковые проволоки типа POWER BRIDGE 60M и порошковые проволоки рутилового типа POWER ARC 60R - для использования в мостостроении, порошковые проволоки рутилового типа ПП-СВП1 и ПП-СВП2, MEGAFIL 821R и MEGAFIL 690R - для использования в судостроении. В стадии аттестации находится металлопорошковая проволока ПП-СК для использования в строительстве и производстве металлоконструкций и металлопорошковые проволоки ПП-ХГСМФА и ПП-ХМФА для использования в энергетике. Общий объем производства составляет более 300 т/год, включая порошковые проволоки рутилового типа и металлопорошковые проволоки. Возможности производства ОАО «ЭСВА» (Калининград) составляют до 700 т герметичной порошковой

проволоки в год. Работы производятся в тесном взаимодействии с ведущими отраслевыми институтами, такими как ООО «ВНИИГАЗ», ООО «НИИ ТНН», ОАО «ЦНИИС», ОАО «ЦНИИТМАШ».

Литература

1. http://www.mining-enc.ru/b/burovaya-platforma/ 25.07.2012

НАПЛАВКА ВАЛКОВ ЦЕНТРИФУГ ЛИНИЙ ПРОИЗВОДСТВА МИНЕРАЛЬНОГО УТЕПЛИТЕЛЯ

Л.Н. Орлов,
д.т.н.,
А.А. Голякевич,
инж.,
А.В. Хилько,
инж.
ООО «ТМ.Велтек»
г. Киев, Украина

А.А. Кузубов,
инж.
ЗАО «ИЗОВОЛ»
г. Белгород

Разработана порошковая проволока марки ППс-ТМВ11С для наплавки под флюсом валков центрифуг линий производства минерального утеплителя.

Изделия из минеральной ваты предназначены для тепловой и звуковой изоляции, без которой невозможно гражданское и промышленное строительство любого объекта. Основным сырьем для ее производства являются горные породы типа базальта, диабаза, доломита, известняка и, в случае необходимости, доменный шлак, который используется в качестве примеси. Минеральная вата производится путем вытяжки тонких волокон из расплава смеси горных пород.

Оборудование для производства минеральной ваты и базальтового утеплителя включает в себя стандартный набор, в состав которого входи центрифуга (рисунок 1). В массивной конструкции центрифуги установлены высокооборотные шпиндельные головки с валками, которые охлаждаются водой. В зависимости от типа линии валки вращаются со скоростью 6000 или 9000 об/мин. Расплавленный базальт с температурой 1450-1500° С подается из печи на валки центрифуги. Под воздействием центробежных сил происходит образование тонких волокон минерального утеплителя. Наиболее интенсивно подвергается износу третий валок. При оптимальной температуре и очистке воды охлаждения валка его поверхность подвергается равномерному износу с формированием грибообразного подъема металла в зоне контакта с базальтом. При превышении температуры воды более оптимального значения и формирования слоя накипи на внутренней поверхности валка в зоне контакта с базальтом формируется интенсивный износ металла в виде канавки в сочетании с крупной сетки трещин разгара (рисунок 2). Из анализа процес-

са износа валков следует, что характер износа зависит от режима их охлаждения, химического состава минерального расплава, химического состава охлаждающей воды и химического состава упрочняющего слоя, наплавленного на рабочую поверхность валка. Ресурс валков на различных предприятиях находится в пределах

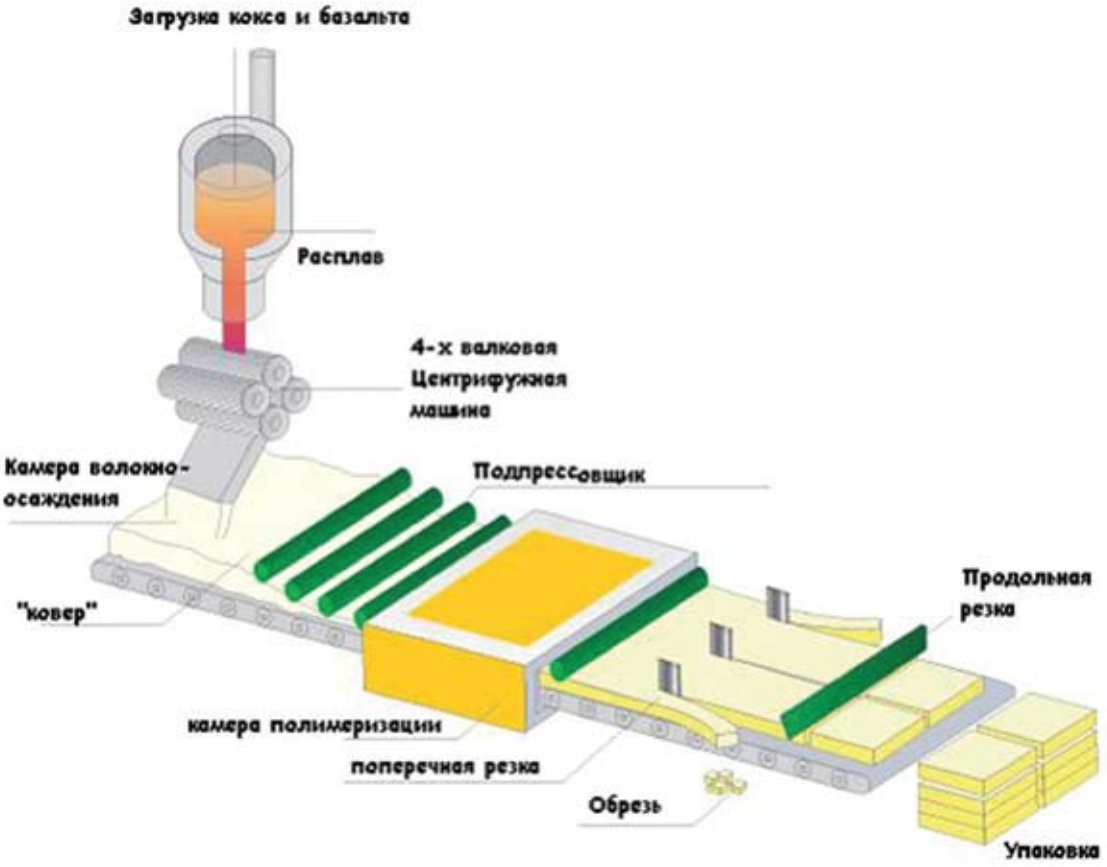


Рисунок 1 *Линия производства минеральной ваты*

Рисунок 2 *Характерный износ поверхности третьего валка*

40-100 часов. Для упрочнения валков при последующем ремонте в мировой практике рекомендуется применять аустенитный аплавочный материал с системой легирования типа Нп-06Х20Н10Г7. В Украине и России применяются преимущественно дорогостоящие импортные сплошные проволоки различных производителей.

В период 2007 года ООО «ТМ.Велтек» и ЗАО «Изовол» (г. Белгород) проведен комплекс совестных работ по разработке порошковой проволоки и технологии наплавки под флюсом АН26 взамен процесса наплавки импортной сплошной проволокой. В наплавленном металле не допускается присутствие дефектов в виде зашлаковок, пор и трещин. Применение сплошной проволоки Нп-06Х20Н10Г7 в сочетании с флюсом АН26 приводит к ухудшению отделимости шлаковой корки и образованию на поверхности наплавленного металла шпинелей, возникновение которых интенсифицируется по мере увеличения температуры валка вследствие автоподогрева. Образование шпинелей способствует образованию межваликовых шлаковых включение и требует последующего ремонта дефектных мест механической обработкой. Образование шпинелей при сварке и наплавке аустенитных материалов связано с развитием обменных реакций между минеральным расплавом и металлом валка. Флюс АН26 содержит много SiO_2, что приводит к развитию обменных реакций, приводящих к окислению хрома и марганца и последующему образованию хромомарганцовистых шпинелей на поверхности наплавленного металла, а также к восстановлению кремния. Содержание кремния в наплавленном металле находится в пределах 1,2 - 1,5%. Металлографическими исследованиями установлено формирование в аустенитной структуре по границам зерен прослоек SiO, что приводит к образованию горячих трещин и их развитию в процессе работы валка.

В процессе проведения работ создана порошковая проволока ППс-ТМВ11С. При этом было достигнуто существенное снижение окисления хрома и марганца и снижение восстановления кремния, содержание которого в наплавленном металле со-

Рисунок 3 *Установка для наплавки валков центрифуг*

ставило 0,6-0,8%. Типичный химический состав наплавленного металла: 0,07% C, 0,7% Si, 6,8% Mn, 19,0% Cr, 9,5% Ni, 0,01% S, ≤ 0,003% P.

Автоматическая наплавка выполняется по винтовой линии с перекрытием 50% проволокой ППс-ТМВ11С диаметром 3,0 мм на режиме: I = 280 -300 А, U = 30 В, $V_н$ = 24 м/ч (рисунок 3).

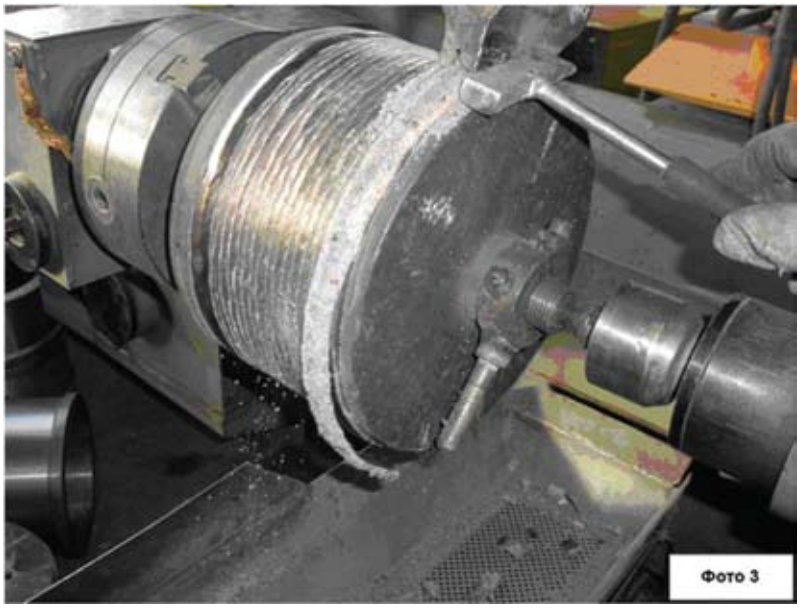


Рисунок 4 *Рабочий момент наплавки валка*

При изготовлении новых валков трубная заготовка протачивается на заданный размер под последующую наплавку двух – трех слоев. В дальнейшем валок ремонтируется до 10 раз (для центрифуг с 6000 об/мин) с предварительной механической обработкой под наплавку. Для центрифуг с 9000 об/мин валки используются один раз. Межремонтный цикл валков на центрифугах с 6000 об/мин составляет 200 -240 часов, а на центрифугах с 9000 об/мин ограничен 100 часами в связи с существенным изменением структуры металла тела валка в зоне контакта с расплавом базальта. В целом ограничение ресурса валков связано с началом проявления нарушения процесса формирования волокон заданной толщины и образованием «корольков», что является показателем брака продукции.

В процессе наплавки наблюдается самопроизвольное отделение шлаковой корки, малая волнистость гладкой поверхности наплавленного металла, отсутствие дефектов в виде пор, зашлаковок и трещин (рисунок 4). После завершения отработки проволоки с 2007 года и по настоящее время со стороны завода претензий к качеству проволоки и наплавленных валков не было.

MAG-СВАРКА СТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ*

С.Г. Паршин,
д.т.н.,
Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет,
кафедра «Сварки и лазерных технологий»
г. Санкт-Петербург

Разработана технология форсированной MAG-сварки сталей, которая основана на применении сварочных материалов в виде наноструктурированных электродных проволок с нанокомпозиционным покрытием, состоящим из ультра- и нанодисперсных частиц галоидов в металлической матрице.

Введение

Стремительное развитие нанотехнологий и рынка нанопорошков создает перспективу для разработки сварочных материалов нового поколения. При MAG-сварке применяют порошковые проволоки, которые способствуют увеличению производительности, улучшают формирование сварного шва [1]. Однако порошковые проволоки имеют высокую стоимость, небольшой коэффициент наплавки и неравномерность объема шихты по длине проволоки.

Для повышения производительности MAG-сварки применяют сварку сдвоенным или расщепленным электродом, импульсное управление капельным переходом, гибридные способы сварки. Однако указанные способы увеличивают экономические затраты и часто вызывают перегрев зоны термического влияния. Увеличение производительности MAG-сварки возможно достичь за счет создания наноструктурированных и композиционных сварочных материалов [2]. Разработка электродных материалов принципиально нового типа с экстремально высокой эмиссионной способностью поверхности является сложной научной задачей, решение которой можно достичь на основе применения ультра- и нанодисперсных частиц галоидных солей при формировании на проволоках микрокомпозиционного покрытия на медной матрице [3].

Целью настоящей работы являлась разработка технологии форсированной MAG-сварки на основе применения наноструктурированных электродных материалов с нанокомпозиционным покрытием.

** – исследования выполнены за счет средств Российского фонда фундаментальных исследований по проекту 08-08-99014-р_офи*

Методы исследований

В качестве основы для изготовления использовали сварочную проволоку G4Si1 по DIN EN 440 диаметром 1,2 мм. Обработку поверхности проволок производили по специальной технологии в электролитах с ультра- и нанодисперсными частицами размером 10^{-6}–10^{-9} м.

Для исследований изготовили 5 типов наноструктурированных проволок (Н-проволок) с покрытиями: (Cu+KF+KBF_4) толщиной 2 мкм; (Cu+NaF) толщиной 25 мкм; (Cu+NaCl+$MgCl_2$) толщиной 20 мкм; (Cu+KCl+$BaCl_2$) толщиной 15 мкм; (Cu+CaF_2+BaF_2) толщиной 25 мкм. Капельный переход исследовали с помощью видеокамеры «PCI 8000S Motion Scope» с объективом «Lens–18-108» с частотой съемки 2000 кадров в секунду. Напряжение дуги и силу тока измеряли с помощью программы «Diadem 10.1» с частотой 2×10^5 точек измерений в секунду. Формирование сварных швов исследовали при сварке пластин размером 300х100 мм толщиной 6–8 мм из стали S235JR по DIN EN 10025 с применением робота «Romat-310» и источника питания «Cloos-503».

Исследование процесса плавления электродного металла

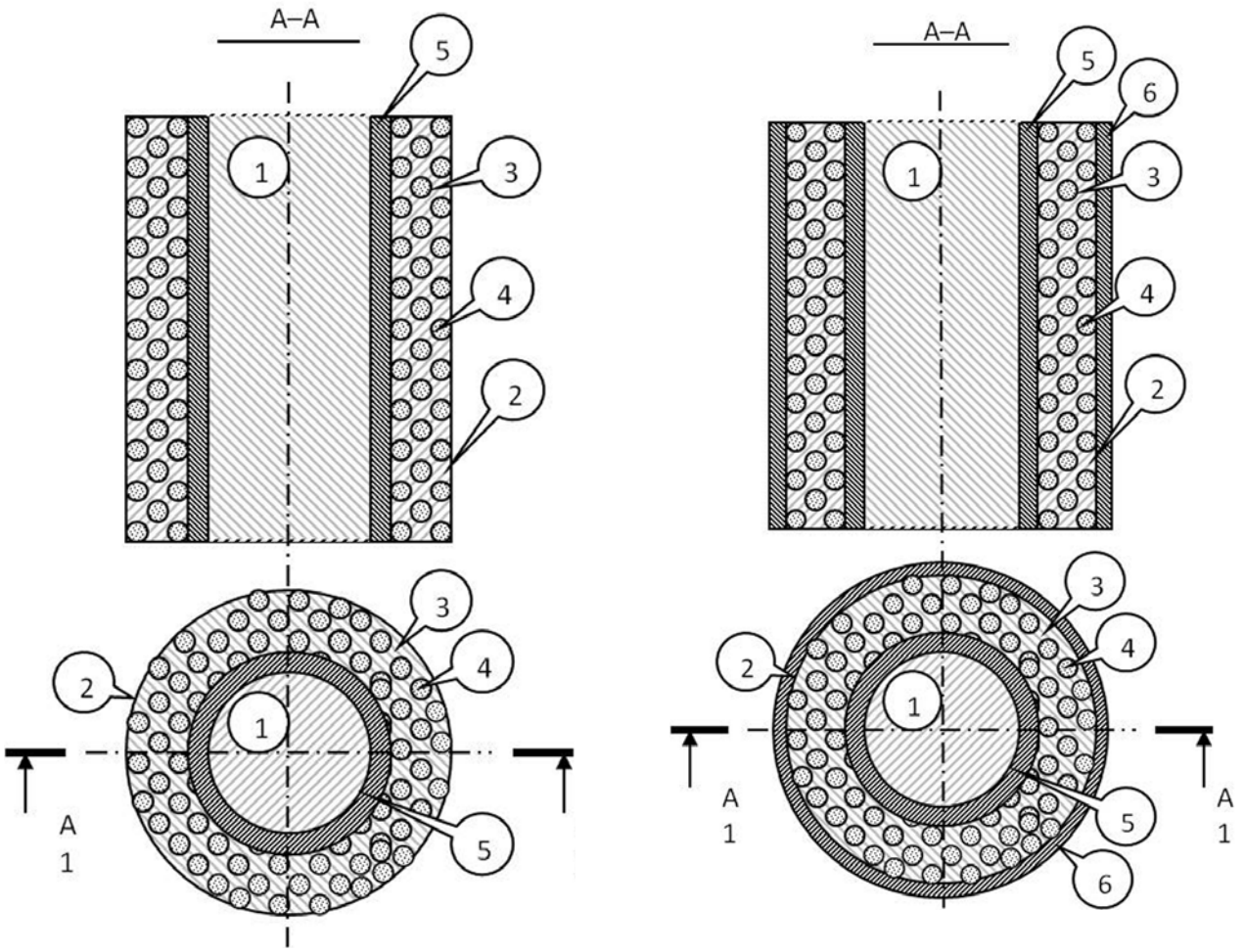
При сварке проволокой без покрытия образовывались капли диаметром 3–4 мм с короткими замыканиями (КЗ). При увеличении скорости подачи проволоки (Vпп) от 3 м/мин до 7–8 м/мин диаметр капель уменьшался до 1,8–3,3 мм. При этом увеличивалась частота образования капель и частота коротких замыканий, а длительность коротких замыканий и величина паузы между короткими замыканиями уменьшалась (таблица 1).

При сварке с Н-проволоками (Cu+KCl+$BaCl_2$) на 15 режимах возникали капли диаметром 1,2–2 мм и диаметром 2,2–3 мм. При этом частота образования капель увеличилась в диапазоне Uy=30–55 В (Uy – напряжение по источнику питания) и Vпп=3–11 м/мин в 1,3–5,7 раз. При сварке с Н-проволоками (Cu+KF+KBF_4) возникали капли диаметром 2,1–3,3 мм и диаметром 1,2–2 мм. При 20 режимах сварки частота образования капель увеличилась в диапазоне Uy=30–55 V и Vпп=3–12 м/мин в 1,1–3,8 раза.

При сварке с Н-проволоками (Cu+NaCl+$MgCl_2$) при 14 режимах возникали капли диаметром 2,1–3,3 мм и диаметром 1,5–1,8 мм. При четырех режимах сварки возникали прерывистые короткие струи диаметром 0,5–1 мм. Частота образования капель увеличилась в диапазоне Uy=30–55 V и Vпп=3–12 м/мин в 1,25–4 раза. При сварке с Н-проволоками (Cu+NaF) при 13 режимах возникали капли диаметром 2–3,3 мм и диаметром 0,8–1,9 мм. При двух режимах сварки возникали прерывистые короткие струи диаметром 0,7–1 мм. Частота образования капель увеличилась в диапазоне Uy=30–55 V и Vпп=3–10 м/мин в 1,14–2,75 раза. Изменение характера плавления Н-проволок привело к переходу мелких капель по центру дуги, которая охватывала полностью торец проволоки, рисунки 1 и 2.

Таблица 1 *Характеристики капельного перехода при MAG-сварке с Н-проволоками*

Вид проволоки	Uу, В / Vпп , м/мин.	Количество капель за секунду	Диаметр капель, мм	Длительность коротких замыканий, 10^{-4}×с	Время паузы между короткими замыканиями, с
Без покрытия	35 / 5	30–35	1,5–2	31–93	0,0125–0,03
Cu+KF+KBF_4	35 / 5	90–100	1,7–1,9	9,6–38	0,0038–0,017
Cu+NaF	35 / 5	40–42	0,8–1,2	8,5–62	0,0045–0,0137
Cu+NaCl+$MgCl_2$	35 / 5	120–140	0,5–0,8	16–42	0,0032–0,005
Без покрытия	40 / 6	9–10	2,3–2,8	50–625	0,05–0,13
Cu+KCl+$BaCl_2$	40 / 6	12–13	2–2,5	0, 9–25	0,05–0,12
Cu+KF+KBF_4	40 / 6	30–40	2,5–2,8	8,9–62	0,019–0,036
Cu+NaF	40 / 6	10–12	2,5–2,7	2,5–3,3	0,056–0,01
Cu+NaCl+$MgCl_2$	40 / 6	16–18	2,5–2,8	7–28	0,034–0,09
Без покрытия	45 / 7	8–9	2,4–2,7	20–30	0,09–0,17
Cu+KCl+$BaCl_2$	45 / 7	20–22	1,8–2	9,6–11	0,02–0,06
Cu+NaF	45 / 7	9–12	2,5–3	0,3–25	0,062–0,12
Cu+NaCl+$MgCl_2$	45 / 7	12–14	2,8–3	2,5–26	0,051–0,1
Без покрытия	50 / 8	7–8	2,3–3,3	6,25–20	0,07–0,17
Cu+KCl+$BaCl_2$	50 / 8	28–32	2–2,2	1,8–16	0,02–0,05
Cu+NaF	50 / 8	12–14	3–3,2	2,2–15	0,051–0,1
Cu+NaCl+$MgCl_2$	50 / 8	12–15	2,8–3,0	1,2–4,5	0,062–0,08
Без покрытия	55 / 10	10–11	2,2–2,9	5,5–16	0,08–0,14
Cu+KCl+$BaCl_2$	55 / 10	47–50	1,6–1,8	1,5–14	0,006–0,023
Cu+KF+KBF_4	55 / 10	18–20	2,2–2,5	0,7–2,5	0,034–0,051
Cu+NaF	55 / 10	17–19	2,5–2,7	0,2–1	0,039–0,074
Cu+NaCl+$MgCl_2$	55 / 10	23–25	2–2,2	0,66–3,7	0,039–0,068



а) *б)*

Рисунок 1 *Наноструктурированная проволока с микрокомпозиционным покрытием:*
а – с внутренним металлическим слоем;
б – с внутренним и внешним металлическим слоем;
1 – проволока; 2 – композиционное покрытие; 3 – металлическая матрица;
4 – наночастицы активирующего флюса; 5,6 – металлическое покрытие

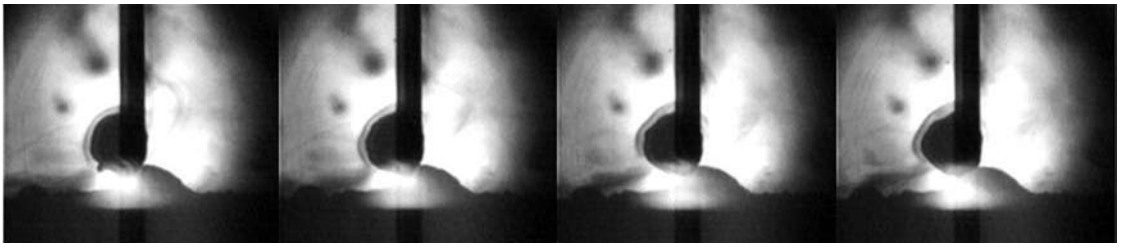
Исследование изменения напряжения дуги и силы сварочного тока

Изменение напряжения дуги (Uд) и сварочного тока (Iсв) при сварке с проволокой без покрытия изучали на 18 режимах сварки в диапазоне Uу=30–55 В и Vпп=3–11 м/мин. При MAG-сварке с Н-проволоками величина Uд резко уменьшилась (рисунок 3) и увеличилась сила сварочного тока (рисунки 4 и 5).

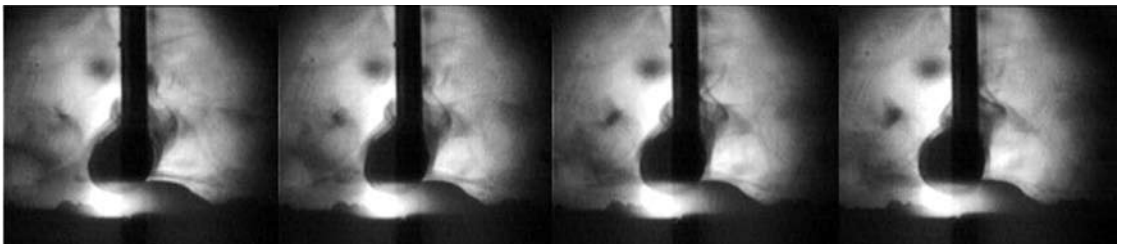
В исследуемом диапазоне отклонения средней величины напряжения дуги составили: ΔUд= ±(1–3) В, а средней величины сварочного тока

ΔIсв= ±(15–50) А (таблица 2). При MAG-сварке с Н-проволоками отклонения ΔUд и ΔIсв существенно уменьшились (рисунок 5).

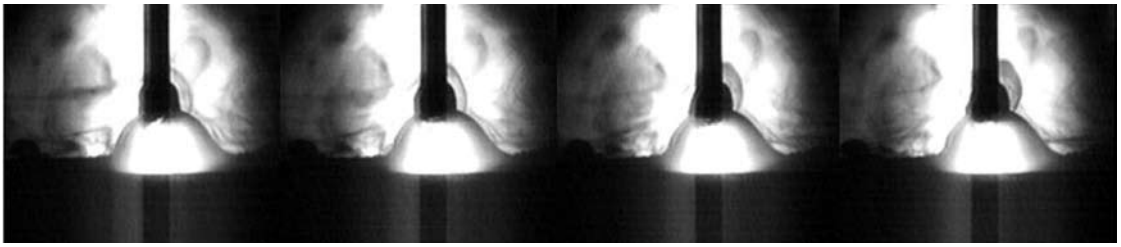
При сварке с Н-проволоками (Cu+NaF) величина Uд уменьшилась на 0,5–5,5 В, а Iсв увеличилась на 12–48,8%. При этом отклонения составили: ΔUд= ±(0,75–2) В; ΔIсв= ±(10–35) А. При использовании Н-проволок (Cu+KF+KBF_4) Uд уменьшилось на 0,5–2,5 В, а Iсв увеличилась на 4,3–20,5%. При этом отклонения составили:



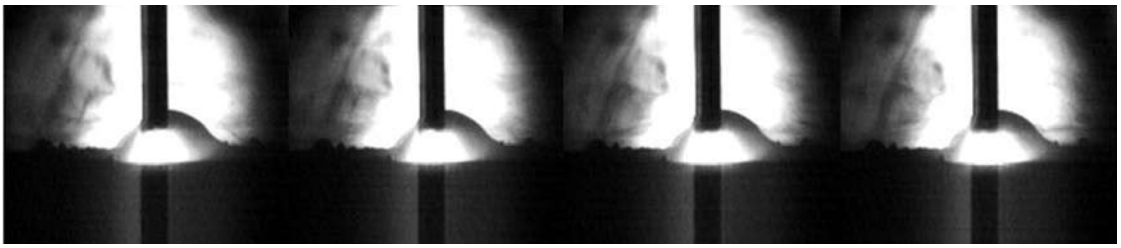
а) Напряжение источника питания 40 V, скорость подачи проволоки 6 м/мин



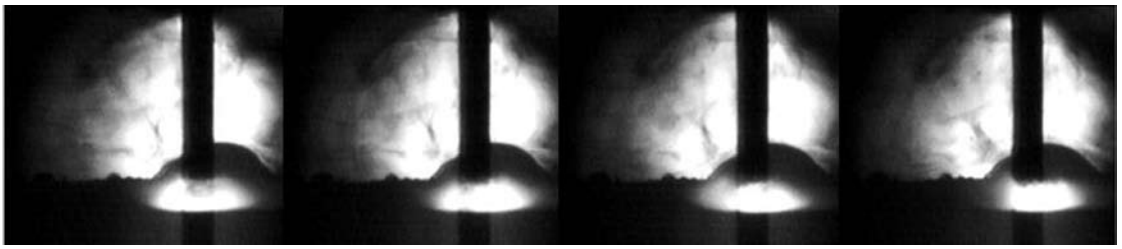
б) Напряжение источника питания 40 V, скорость подачи проволоки 7 м/мин



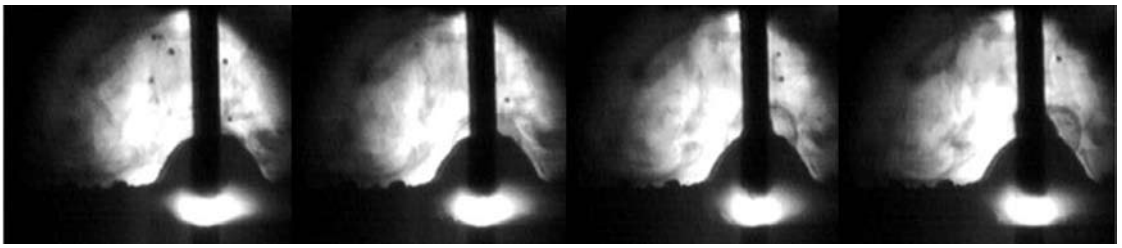
в) Напряжение источника питания 40 V, скорость подачи проволоки 6 м/мин



г) Напряжение источника питания 40 V, скорость подачи проволоки 7 м/мин



д) Напряжение источника питания 40 V, скорость подачи проволоки 6 м/мин



е) Напряжение источника питания 40 V, скорость подачи проволоки 7 м/мин

Рисунок 2 *Плавление проволок при MAG-сварке: а, б – обычная проволока; в,г – проволока с композиционным покрытием Cu+KF+KBF4; д, е – проволока с композиционным покрытием Cu+NaF*

Таблица 2 *Напряжение и сила тока при MAG-сварке с Н-проволоками*

Вид проволок	Uу, В / Vпп м/мин	Uд, В	Iс, А	ΔIсв, %
Без покрытия	35 / 5	24–27 / 25,5	140–170 / 155	–
Cu+KF+KBF_4	35 / 5	25–27 / 26	150–180 / 165	+6,4
Cu+NaF	35 / 5	23–25 / 24	170–210 / 190	+22,5
Cu+NaCl+$MgCl_2$	35 / 5	25,6–27 / 26,3	155–185 / 170	+9,6
Без покрытия	40 / 6	26–30 / 28	150–210 / 180	–
Cu+KCl+$BaCl_2$	40 / 6	24–29 / 26,5	180–240 / 210	+16,6
Cu+NaF+KBF_4	40 / 6	23,5–25,5 / 24,5	245–275 / 260	+44,4
Cu+NaCl+$MgCl_2$	40 / 6	25–28 / 26,5	180–250 / 215	+19,4
Без покрытия	45 / 7	30–35 / 32,5	140–240 / 190	–
Cu+KCl+$BaCl_2$	45 / 7	26–29 / 27,5	260–280 / 270	+42,1
Cu+KF+KBF_4	45 / 7	30–33 / 31,5	180–250 / 215	+13,1
Cu+NaF	45 / 7	26,5–29,5 / 28	220–300 / 260	+36,8
Cu+NaCl+$MgCl_2$	45 / 7	27–29 / 28	280–305 / 292,5	+53,9
Без покрытия	50 / 8	33–37 / 35	170–280 / 225	–
Cu+KCl+$BaCl_2$	50 / 8	29–32 / 30,5	300–340 / 320	+42,2
Cu+KF+KBF_4	50 / 8	34–36 / 35	230–270 / 250	+11,1
Cu+NaF	50 / 8	29,5–32,5 / 31	310–360 / 335	+48,8
Cu+NaCl+$MgCl_2$	50 / 8	30–32 / 31	290–330 / 310	+37,7
Без покрытия	55 / 10	36–40 / 38	250–310 / 280	–
Cu+KCl+$BaCl_2$	55 / 10	31–37 / 34	310–380 / 345	+23,2
Cu+NaF	55 / 10	32–36 / 34	340–390 / 365	+30,3
Cu+NaCl+$MgCl_2$	55 / 10	32–36 / 34	320–380 / 350	+25

ΔUд= ±(1–1,5) В; ΔIср= ±(10–30) А. При сварке с Н-проволоками (Cu+KCl+$BaCl_2$) Uд уменьшилось на 1–5 В, а Iсв увеличилась на 4,4–42,2%. При этом отклонения составили: ΔUд= ±(1–2,5) В, а сварочного тока ΔIд= ±(10–35) А. При сварке с Н-проволоками (Cu+NaCl+$MgCl_2$) Uд уменьшилось на 1–5,5 В, а Iсв увеличилась на 9,6–53,9%. При этом отклонения составили: ΔUд= ±(0,5–1,5) В; ΔIсв= ±(12,5–30) А.

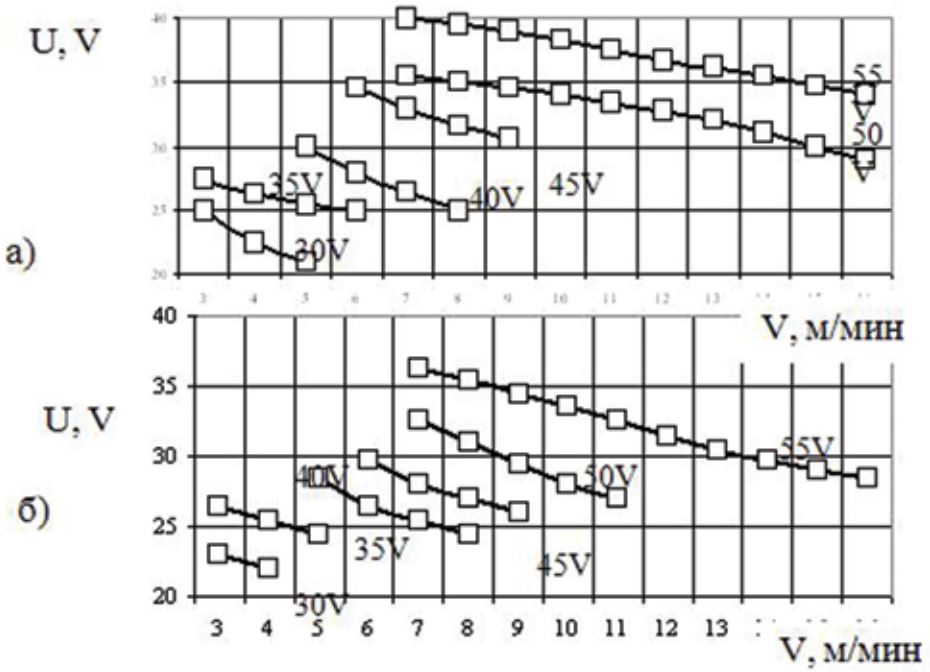


Рисунок 3 *Изменение среднего напряжения дуги U от скорости подачи проволоки V при различном напряжении источника питания при MAG-сварке: а – с обычной проволокой; б – с проволокой с композиционным покрытием Cu+NaCl+$MgCl_2$*

Исследование изменения размеров сварных швов

При MAG-сварке с обыкновенной проволокой ширина шва увеличивалась с ростом Uу в пределах 35–50 В и с уменьшением Vпп. Однако, при Uу=50–55 В ширина шва увеличивалась с ростом Vпп>12–13 м/мин (рисунок 6) Этот нежелательный эффект связан с удлинением дуги и увеличением амплитуды отклонений движения капель от оси дуги. При этом сохраняется нежелательный характер крупнокапельного перехода. Глубина проплавления металла увеличивалась с ростом Vпп и Uу, таблица 3. При MAG-сварке с Н-проволоками происходил прирост глубины проплавления (рисунок 7, таблица 3).

При MAG-сварке с Н-проволоками ширина шва уменьшилась до 64,9%, а глубина проплавления стали увеличилась до 62,7%. Изменения размеров шва происходили во всем диапазоне Uу=35–55 В и Vпп=4–16 м/мин, с максимальным эффектом при Uу>50–55 В, при Vпп>10–12 м/мин. При этом происходит формирование узких сварных швов с большой глубиной проплавления рисунок 8.

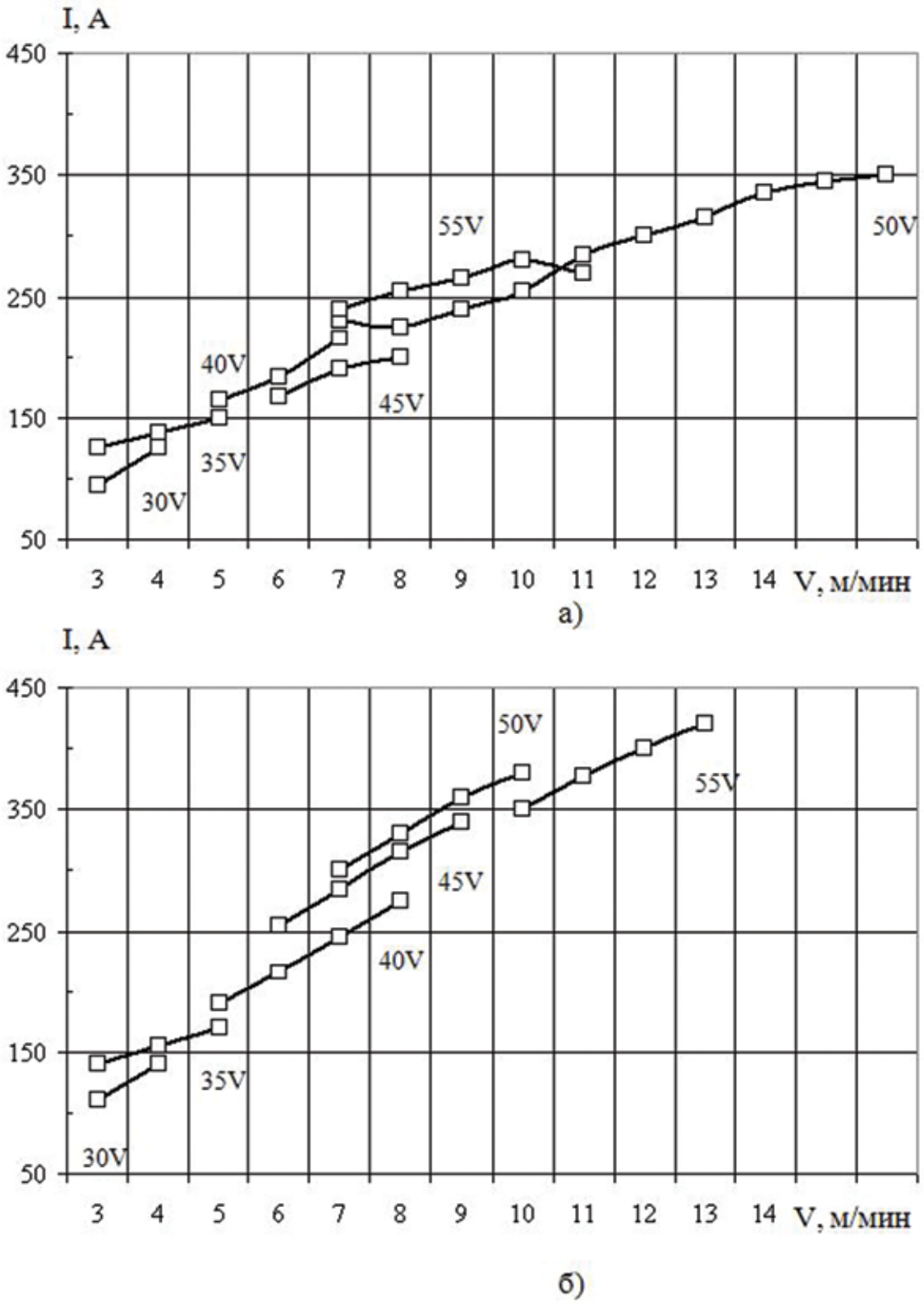


Рисунок 4 *Изменение среднего сварочного тока I от скорости подачи проволоки V при различном напряжении источника питания при MAG-сварке: а – с обычной проволокой; б – с проволокой с композиционным покрытием Cu+NaCl+$MgCl_2$*

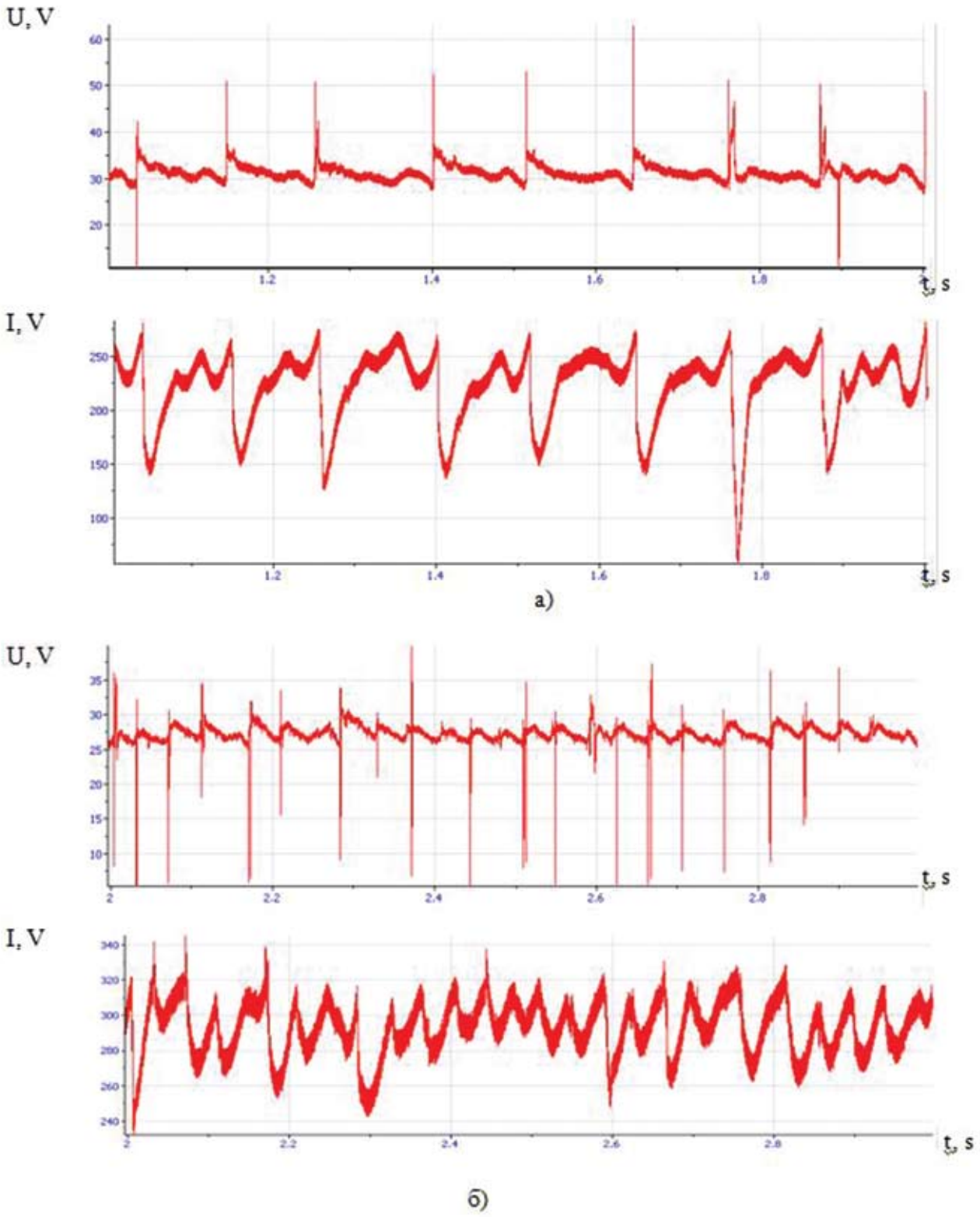


Рисунок 5 *Изменение напряжения дуги и силы сварочного тока при MAG-сварке: а – с обычной проволокой; б – с проволокой с покрытием Cu+NaCl+$MgCl_2$. Напряжение по источнику 45 В, скорость подачи проволоки 8 м/мин*

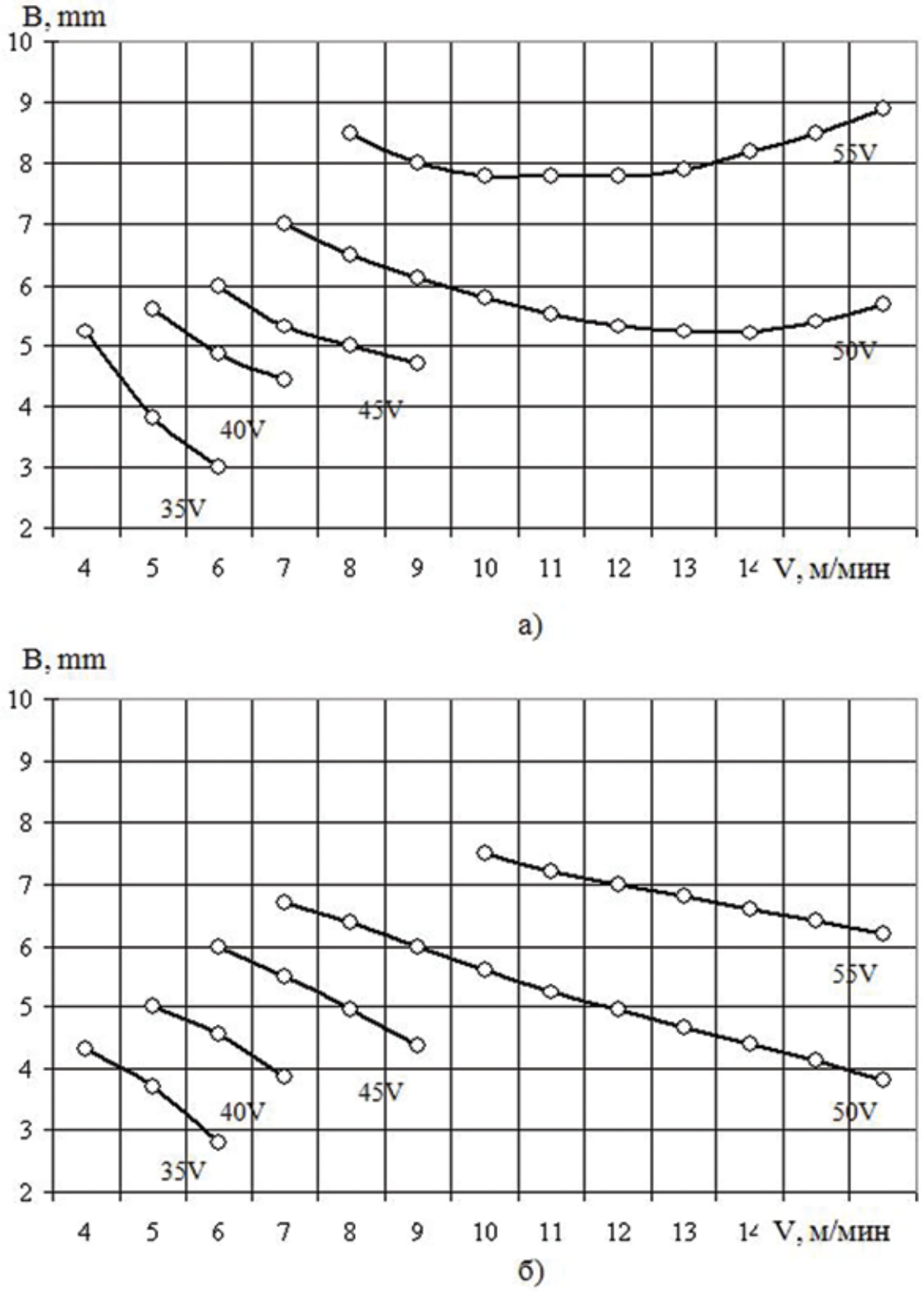


Рисунок 6 *Изменение ширины шва B от скорости подачи проволоки V при различном напряжении источника питания при MAG-сварке: а – с обычной проволокой; б – с проволокой с композиционным покрытием Cu-KF-KBF_4*

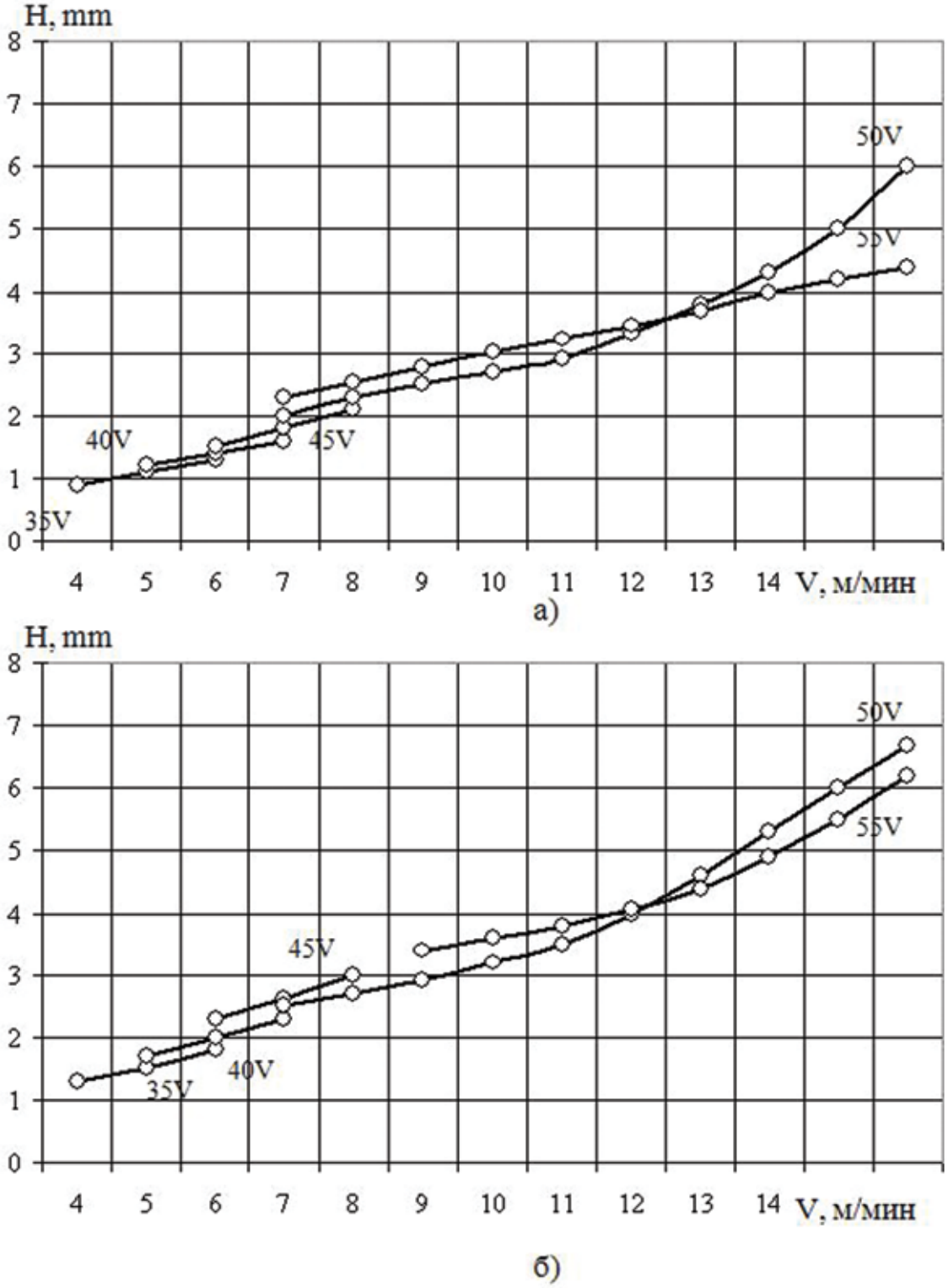


Рисунок 7 *Изменение глубины проплавления H от скорости подачи проволоки V при различном напряжении источника питания при MAG-сварке: а – с обычной проволокой; б – с проволокой с покрытием Cu+KF+KBF_4. Скорость сварки 120 см/мин*

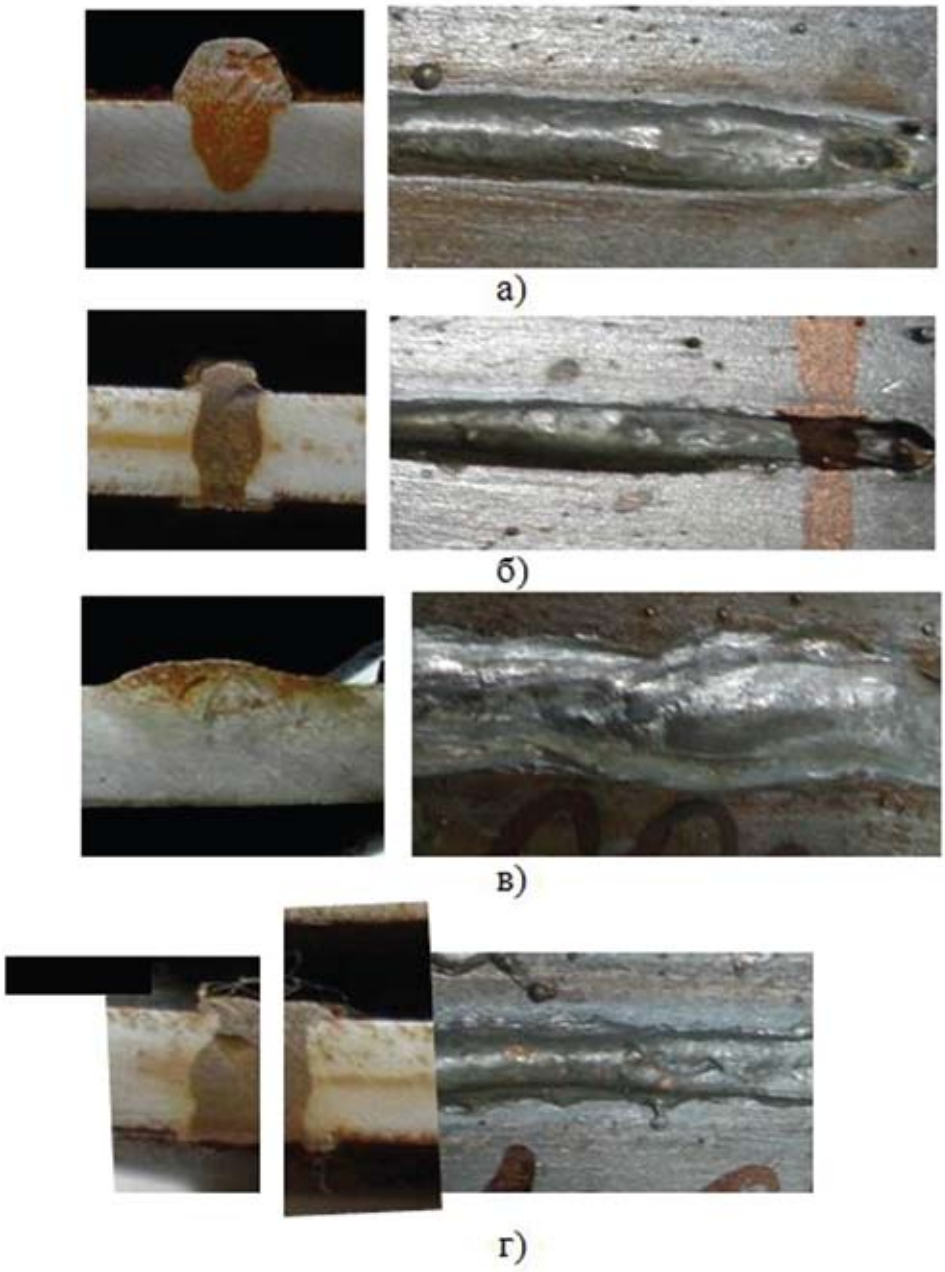


Рисунок 8 *Вид сварных швов при MAG-сварке:*
а – обычная проволока, напряжение источника питания 50 В, скорость подачи проволоки 14 м/мин;
б – проволока с композиционным покрытием, напряжение источника питания 50 В, скорость подачи проволоки 14 м/мин;
в – обычная проволока, напряжение источника питания 55 В, скорость подачи проволоки 16 м/мин;
г – проволока с композиционным покрытием, напряжение источника питания 55 В, скорость подачи проволоки 16 м/мин

Таблица 3 *Изменение размеров сварных швов при MAG-сварке с проволоками*

Вид Н-проволоки	Uу, В	Диапазон Vпп, м/мин	Уменьшение средней ширины сварного шва, %	Увеличение средней глубины проплавления, %
Cu+NaCl+$MgCl_2$	35	4–6	7,7–26,6	33,3–25
Cu+NaCl+$MgCl_2$	40	5–8	7,6–8,3	33,3–25
Cu+NaCl+$MgCl_2$	45	6–10	5–11	26,6–4,7
Cu+NaCl+$MgCl_2$	50	10–16	13,4–64,9	30,4–33,3
Cu+NaCl+$MgCl_2$	55	8–16	5,8–53,3	25–62,7
Cu+CaF_2+BaF_2	35	4–6	13,5–7,9	66,6–52
Cu+CaF_2+BaF_2	40	5–8	5,2–7	50–31
Cu+CaF_2+BaF_2	45	6–10	6,3–13	33,3–19
Cu+CaF_2+BaF_2	50	10–16	9,1–34,4	7,4–8,3
Cu+CaF_2+BaF_2	55	9–16	3,9–43,3	0–59
Cu+KF+KBF_4	35	4–6	7,4–7	38,8–46,1
Cu+KF+KBF_4	40	5–7	12,3–11,4	41,6–33,3
Cu+KF+KBF_4	45	6–9	0–12,5	46,6–15,3
Cu+KF+KBF_4	50	7–16	2,9–32,7	25–13,3
Cu+KF+KBF_4	55	10–16	5,1–32,2	17,2–41,8
Cu+NaF	35	4–6	0–2,5	33–41,6
Cu+NaF	40	5–7	8,8–0	33–25
Cu+NaF	45	6–9	0–4,3	25–33
Cu+NaF	50	7–16	11,1–6,8	20–16,6
Cu+NaF	55	10–16	0–15	20,6–39,5

Выводы

Разработана технология форсированной MAG-сварки сталей, которая основана на применении сварочных материалов в виде наноструктурированных электродных проволок с нанокомпозиционным покрытием, состоящим из ультра- и нанодисперсных частиц галоидов в металлической матрице. Новая технология MAG-сварки позволила в широком диапазоне параметров режима изменить энергетические свойства сварочной дуги и процесс плавления электродных материалов. В результате уменьшилась ширина сварного шва до 64%, увеличилась глубина проплавления до 66% и производительность процесса сварки до 62,7%.

Литература

1. Ленивкин В.А. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах/ В.А. Ленивкин, Н.Г Дюргеров, Х. Н. Сагиров. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.

2. Паршин С.Г. Электродуговая сварка с применением активирующих флюсов / С.Г. Паршин. – Самара.: Научный центр Российской академии наук, 2006. – 380 с.

3. Паршин С.Г. Сварочная активированная проволока. МПК7 В23К 35/365, В23К 35/04. Патент Р.Ф. № 2294272 от 01.11.2005 г. Бюл. № 6 от 27.02.2007 г.

АРГОНОДУГОВАЯ СВАРКА КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛИ И АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОГО СПЛАВА С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ АКТИВИРУЮЩИХ ФЛЮСОВ

С.Г. Паршин,
д.т.н.,
Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет,
кафедра «Сварки и лазерных технологий»
г. Санкт-Петербург

В статье рассмотрены вопросы повышения производительности аргонодуговой сварки сталей и алюминиевых сплавов и улучшения качества сварных соединений листовых конструкций путем применения ультрадисперсных активирующих флюсов.

Введение

Основой создания новой технологии аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом (WIG-сварка) является применение галоидных активирующих флюсов, которые изменяют теплофизические свойства электрической дуги, увеличивают глубину проплавления металла и улучшают качество сварных соединений. Газообразные активирующие флюсы вводят в зону горения дуги вместе с защитным газом [1]. Кристаллические флюсы наносят на поверхность деталей в виде микропорошков, спиртовых и водяных суспензий [2]. При сварке сталей суспензию активирующих флюсов вручную наносят на внешнюю поверхность деталей и после сушки производят сварку по слою флюса толщиной 0,05–0,3 мм [2]. При сварке алюминиевых сплавов активирующие флюсы применяют для улучшения формирования корневого шва, модифицирования и улучшения качества сварных соединений. Однако ранее суспензию активирующих флюсов вручную наносили на обратную поверхность деталей, а после сушки производили сварку по слою флюса толщиной 0,01–0,1 мм [3].

Решение технологических проблем и увеличение эффективности активирующих флюсов при сварке сталей и алюминиевых сплавов возможно достичь за счет применения ультрадисперсных и нанодисперсных порошков флюса и их нанесения одновременно на внешнюю, внутреннюю и обратную стороны свариваемых деталей [4].

Целью настоящей работы являлось создание новой технологии аргонодуговой сварки сталей и алюминиевых сплавов с высокой производительностью и качеством на основе исследования быстротекущих процессов влияния ультрадисперсных

активирующих флюсов на свойства сварочной дуги и формирование сварных соединений.

Методы исследований

Для сварки применяли пластины размером 300х100 мм из стали 10 и алюминиевого сплава АМг5. В качестве электрода применяли лантанированный вольфрам диаметром 3 мм с углом заточки 30 градусов, который располагали вертикально к поверхности свариваемых пластин. Изменения строения дуги записывали видеокамерой «PCI 8000S Motion Scope» с объективом «Lens–18-108» с частотой съемки 2000 кадров в секунду. Напряжение дуги и силу сварочного тока измеряли с помощью компьютерного комплекса и программы «Diadem 10.1» с частотой 5000 точек измерений в секунду. Среднеарифметические величины механических характеристик каждого сварного соединения определяли по результатам испытаний 9 образцов с поперечным швом на машине «Zwick SM ZO50/TH3S».

Исследование напряжения на дуге и силы сварочного тока

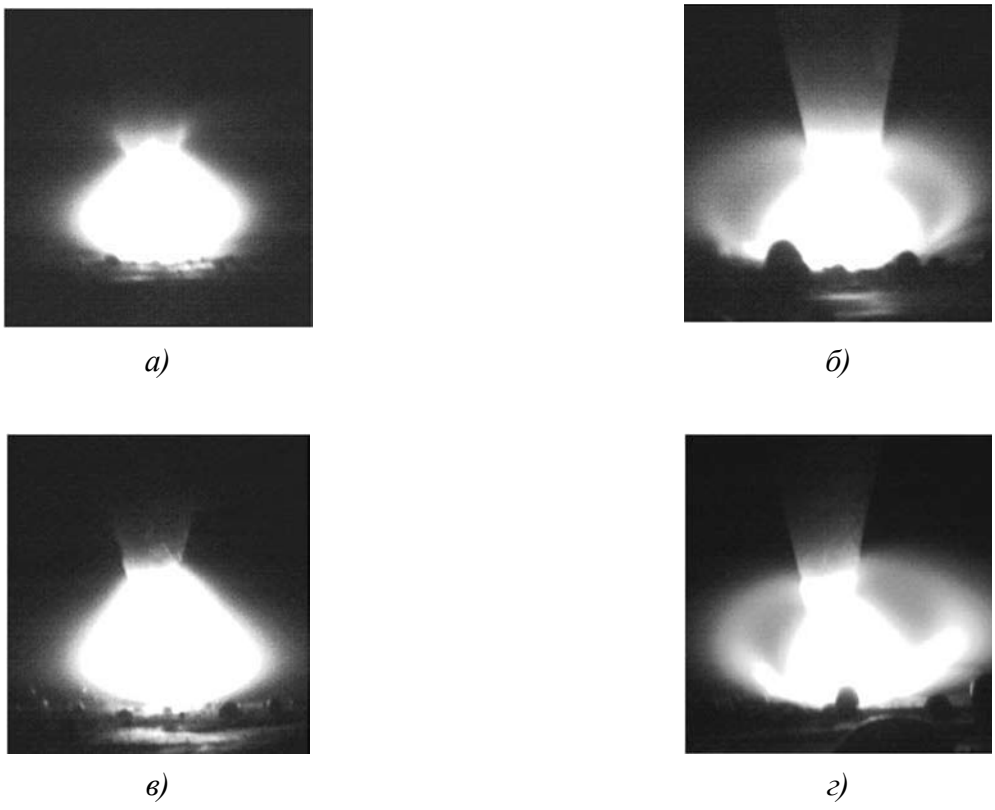
Сварочная дуга является сложной термодинамической системой, которая в обычном состоянии находится в равновесии и характеризуется теплоёмкостью, энтальпией, энтропией и энергией Гиббса. При насыщении дуги молекулами активирующего флюса в результате двухполярной диффузии, частицы флюса распределяются по объему сварочной дуги, что вызывает выход системы из состояния равновесия. Этот процесс сопровождается передачей теплоты от дуги молекулам активирующего флюса, что приводит к уменьшению энтальпии дуги, которая, согласно принципам Ле-Шателье и Штейнбека, может компенсироваться за счет увеличения тока, напряжения и мощности дуги.

При сварке по слою флюса сварочная дуга погружается в сварочную ванну, что способствует увеличению эффективной мощности источника теплоты и глубины проплавления металла. Погружение дуги в сварочную ванну подтверждается видеосъемкой и образованием углублений: например, глубина углубления при наплавке по флюсу на пластину из сплава АМг5 толщиной 8 мм составляет: при токе 100 А – 1 мм; 150 А – 2 мм; 200А – 3 мм. Погружение дуги увеличивается с ростом газодинамической силы дуги, реактивной силы испарения, с уменьшением силы гидростатического давления и силы поверхностного межфазного натяжения.

Исследование быстротекущих процессов, показало, что при входе дуги постоянного тока в слой флюса, происходит образование вокруг контура дуги яркого молекулярного слоя активирующего флюса, который движется вдоль контура сварочной дуги, в виде кольцеобразного продольного потока (рисунок 1). При образовании молекулярного слоя флюса вокруг дуги уменьшился диаметр центральной части столба дуги. При сварке на переменном токе вокруг дуги также образуется молекулярный слой флюса, однако движение частиц флюса вдоль контура дуги имело более сложную траекторию (рисунок 2). При испарении флюса и образовании молекулярного слоя вокруг столба дуги вначале происходил выход дуги из состояния термодинамического равновесия, который сопровождался кратковременным (около 2–3 с) уменьшением напряжения дуги и силы сварочного тока. Затем, после нагре-

ва частиц флюса, их диссоциации, ионизации и распределения по объему дуги по механизму двуполярной диффузии, происходил возврат дуги в состояние нового термодинамического равновесия, который сопровождался увеличением энтальпии, напряжения дуги и силы сварочного тока. Время переходного процесса зависело от силы тока и скорости сварки и составило около 5–12 с.

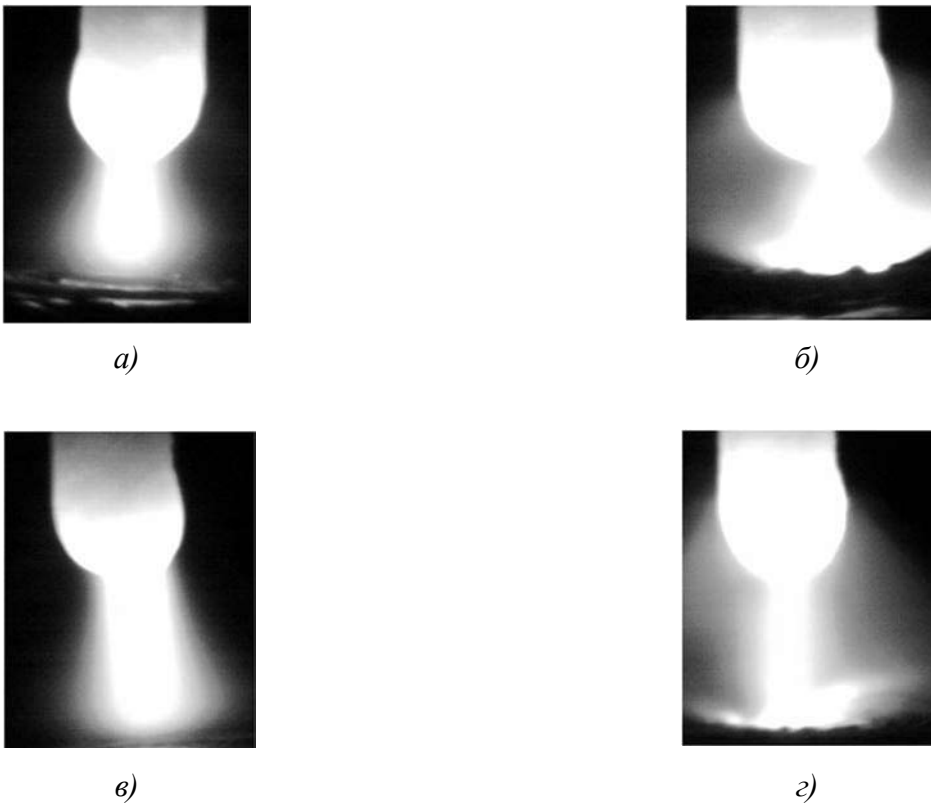
При входе дуги в слой флюса уменьшение напряжения дуги составило 0,1–0,9 В в зависимости от силы тока, длины дуги и скорости сварки. Одновременно с уменьшением напряжения дуги происходило уменьшение сварочного тока: например, при скорости сварки 2 мм/с и силе тока 100 А величина уменьшения составила 0,9–3 А; при 3 мм/с: 0,9–2 А; при 4 мм/с: 0,4–0,7 А. При силе тока 150 А его уменьшение при входе дуги в слой флюса составило в зависимости от скорости сварки: 0,8–4,1 А, а при силе тока 200 А - 1–4,4 А. Уменьшение напряжения дуги наблюдали в течение 2–3 с,



а) *б)*

в) *г)*

Рисунок 1 *Изменение строения сварочной дуги при аргонодуговой сварке пластин из стали 10 толщиной 8 мм:*
а, в – без флюса; б, г – по флюсу Li_3AlF_3–TiO_2–SiO_2.
Сила постоянного тока прямой полярности – 100 А. Длина дуги 1... 2 мм. Скорость сварки 4 мм/с



а) *б)*

в) *г)*

Рисунок 2 *Изменение строения сварочной дуги при аргонодуговой сварке алюминиевых сплавов толщиной 8 мм: а, в – без флюса; б, г – по флюсу CaF_2–BaF_2–SrF_2. Сила переменного тока 100 А. Длина дуги 3; 4 мм. Скорость сварки 4 мм/с*

после чего в течение 5–12 с напряжение дуги возрастало на 0,6–3,5 В (от первоначального напряжения дуги без флюса). Одновременно с увеличением напряжения дуги происходило увеличение силы тока, например, при силе тока 100 А и скорости сварки 2 мм/с, ее увеличение составило 1,4–2,7 А; при 3 мм/с: 1,4–1,8 А; при 4 мм/с: 0,2–1,5 А. При силе тока 150 А ее увеличение после полного насыщения молекулами флюса составило 1,2–4 А; при силе тока 200 А – 1,5–4,3 А.

Исследование формирования и свойств сварных соединений

Пластины из стали 10 и из сплава АМг5 толщиной 4; 6; 8 мм очищали, обезжиривали и наносили активирующий флюс. Затем пластины без скоса кромок собирали с зазором 0–1,5 мм в приспособлении и производили автоматическую сварку в нижнем положении. Определение ширины сварного шва и глубины проплавления металла производили по поперечным макрошлифам, вырезанных из сварных соединений и наплавок после травления в азотной и ортофосфорной кислоте.

Увеличение мощности дуги, уменьшение размеров её центральной части и погружение дуги в сварочную ванну привело к уменьшению ширины сварного шва пластин из стали 10 на 10–20% и увеличению глубины проплавления стали на 38–56% при длине дуги 3 мм и скорости сварки 2 мм/с (рисунок 3). При сварке пластин из сплава АМг5 происходило увеличение ширины шва на 10,7–80%, а глубины про-

плавления металла на 48–78% (рисунок 4).

Применение активирующих флюсов позволило получить узкие сварные швы пластин толщиной 4, 6, 8 мм без скоса кромок за один проход, рисунок 5, 6. Сварные швы имели благоприятную мелкозернистую микроструктуру с хорошим формированием корневого шва. Ширина зоны термического влияния при сварке алюминиевых сплавов уменьшилась на 30–40%, а при сварке сталей на 25–50%.

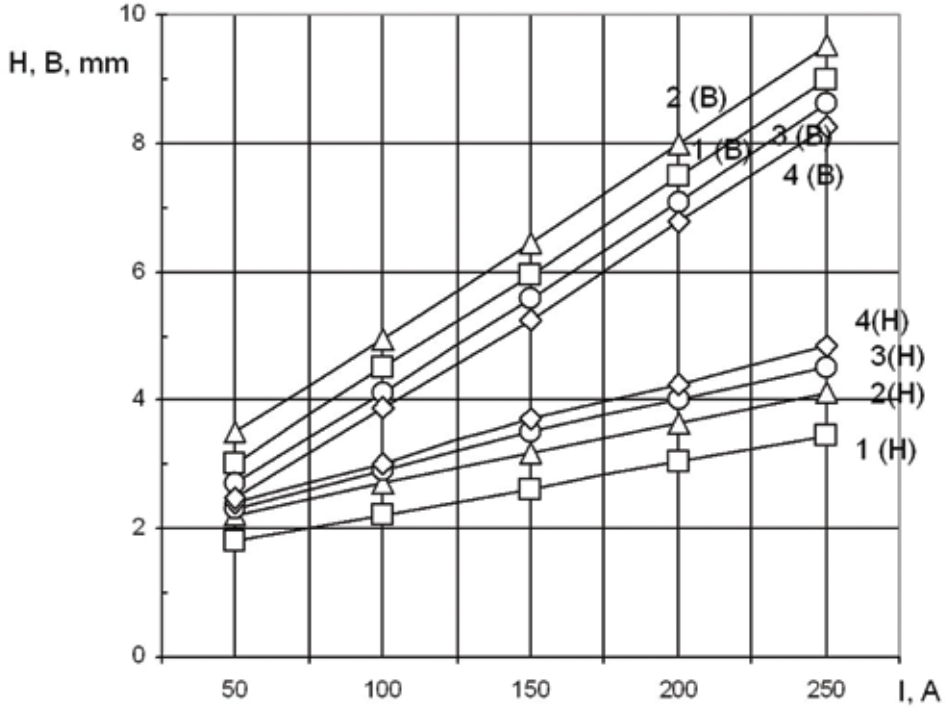


Рисунок 3 *Изменение ширины валика B и глубины проплавления H при аргонодуговой сварке пластин из стали 10 толщиной 8 мм: 1 – без флюса; 2 – по флюсу CaF_2–BaF_2–SrF_2; 3 – по флюсу Li_3AlF_3–TiO_2–SiO_2; 4 – по флюсу Li_3AlF_3–Al_2O_3–$CaCl_2$. Длина дуги 3 мм. Скорость сварки 2 мм/с. Постоянный ток прямой полярности*

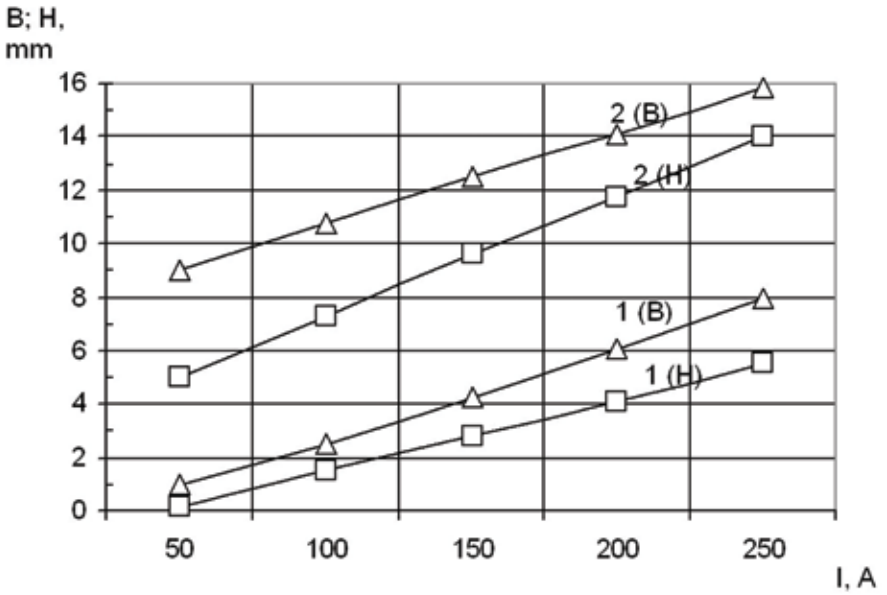


Рисунок 4 *Изменение ширины валика B и глубины проплавления металла H от силы переменного тока I при аргонодуговой сварке пластин из сплава АМг5 толщиной 8 мм: 1 – без флюса; 2 – по флюсу CaF_2–BaF_2–SrF_2. Длина дуги 2 мм. Скорость сварки 54 см/мин*

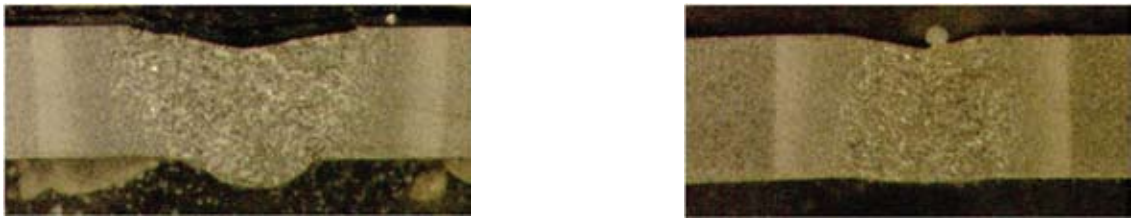
Сварные соединения, выполненные с активирующим флюсом имели высокую пластичность и прочность, табл. 1. Средний предел текучести и прочности сварных соединений изменился незначительно. Средняя пластичность сварных соединений алюминиевого сплава увеличилась на 100%, а стали на 32,4%.

Таблица 1 *Среднеарифметические величины механических характеристик сварных соединений пластин при WIG-сварке*

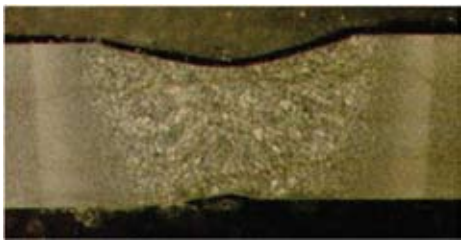
Марка и толщина свариваемого сплава	Состав флюса	$\sigma_{0,2}$, Н/мм^2	$\sigma_в$, Н/мм^2	δ_5, %
Сплав АМг5 (основной металл), 4 мм	–	197–225 213,6	301,1–306,5 304,5	16,6–21,9 19,5
Сплав АМг5, 4 мм	без флюса	213–218 215,22	216–224,4 221,16	1,2–2,53 1,83
Сплав АМг5, 4 мм	CaF_2–BaF_2–SrF_2	216–220,6 218,3	237,5–240,4 238,9	2,3–4,7 3,66
Сталь 10 (основной металл), 4 мм	–	289–302 295,5	397,6–400 398,8	30–35 32
Сталь 10, 4 мм	без флюса	317,6–321,6 319,7	398,8–406,2 403,4	23,4–24 23,6
Сталь 10, 4 мм	CaF_2–BaF_2–SrF_2	321,3–324,3 322,8	396,2–403,1 399,7	22,96–23,2 23,08
Сталь 10, (основной металл), 6 мм	–	257–300 278,5	369,9–377,6 373,7	35–35,9 35,4
Сталь 10, 6 мм	без флюса	285–302 293,5	381,4–386,4 383,9	19,8–21,3 20,55
Сталь 10, 6 мм	CaF_2–BaF_2–SrF_2	299–305 302	383,2–384 383,6	26,5–27,9 27,2

а) *б)*

Рисунок 5 *Макроструктура сварных швов пластин из сплава АМг5: а – сварка без флюса; б – сварка по флюсу CaF_2–BaF_2–SrF_2. Сила тока 210 А, длина дуги 2 мм, скорость сварки 9 мм/с. Толщина пластин 4 мм. Переменный ток*



а) *б)*



в) *г)*

Рисунок 6 *Макроструктура сварных швов пластин из стали 10: а – сварка без флюса, толщина 4 мм, I=150 А, V=2 мм/с; б – сварка по флюсу CaF_2–BaF_2–SrF_2, толщина 4 мм, I=150 А, V=3 мм/с; в – сварка без флюса, толщина 6 мм, I=230 А, V=2 мм/с; г – сварка по флюсу CaF_2–BaF_2–SrF_2, толщина 6 мм, I=230 А, V=3 мм/с. Постоянный ток прямой полярности. Длина дуги 2 мм*

Заключение:

1. В результате выполнения работы создана новая технология аргонодуговой сварки сталей и алюминиевых сплавов, которая основана на применении ультрадисперсных и нанодисперсных активирующих флюсов. Применение новой технологии в производственных условиях позволило значительно улучшить механические свойства и макроструктуру сварных соединений. При этом средняя величина пластичности шва сплава АМг5 увеличилась на 100%. Скорость и производительность процесса аргонодуговой сварки стали 10 увеличилась на 40–60%, а сплава АМг5 на 50–80%.

2. При сварке с активирующими флюсами вокруг дуги образуется кольцеобразный продольный поток, состоящий из многокомпонентной смеси активирующего флюса и продуктов его взаимодействия со свариваемым металлом. При насыщении сварочной дуги молекулами активирующего флюса образуется зона теплового и диффузионного обмена частицами между дугой и продольным потоком газообразного флюса. Протекание эндотермических реакций диссоциации, ионизации и рекомбинации приводит к увеличению напряжения дуги и силы сварочного тока.

Литература:

1. Бадьянов Б.Н. Физико-химические процессы при сварке изделий специальной техники. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: МИЭМ, 1978. – 418 с.

2. Паршин С.Г. Электродуговая сварка с применением активирующих флюсов/ С.Г. Паршин. – Самара.: Самарский научный центр РАН, 2006. – 380 с.

3. Абралов М.А. Аргонодуговая сварка алюминиевых сплавов/ М.А. Абралов, Р. У. Абдурахманов. – Ташкент.: Фан, 1989. – 232 с.

4. Паршин С.Г. Способ электродуговой сварки. МКИ7 В23К 9/235. Патент РФ № 2187415 от 01.10.2001 г. Бюл. № 23 от 20.08.2002 г.

К ВОПРОСУ О ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ АГЛОМЕРИРОВАННОГО ФЛЮСА ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА *

В.В. Гежа,
инж.,
А.В. Пименов,
инж.,
Е.Г. Чистякова,
инж.
ФГУП «ЦНИИ «КМ «Прометей»
г. Санкт-Петербург

Результаты исследований показали четкую зависимость прочности гранул агломерированных флюсов от температуры прокалки. Пылевидные фракции флюса обеднены некоторыми оксидами, входящими в его состав.

Работа выполнена в связи с отмечаемой высокой неравномерностью гранулометрического состава отечественных агломерированных флюсов марок ПФК- 56С, 48АФ-59 и др.. Для исследования на экспериментальной базе ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» была изготовлена (на шлаковой основе флюса марки 48АФ-59 системы $SiO_2 – CaF_2 – TiO_2 – Al2O_3 – CaO – MnO$) опытная партия флюса, которую разделили примерно на две пробы. Первую пробу (№ 591) прокалили при температуре 400º С в течение 2 часов, а вторую пробу (№ 592) – при температуре 600º С также в течение 2 часов.

Для исследования из разных мест были отобраны гранулы размером 1,8…2,2 мм. Прочность гранул измеряли на специальном настольном прессе, фиксируя максимальную нагрузку, при которой наступало разрушение гранулы. Показатель прочности гранулы определяли в кгс/ мм^2 путем деления нагрузки на площадь поперечного сечения гранулы, условно полагая, что она имеет форму шара. Испытания проводили сериями (по 25 гранул в серии) и вычисляли математическое ожидание условного показателя прочности гранул, как в каждой серии, так и для каждой из проб (таблица 1).

Анализируя полученные результаты, которые показывают четкую зависимость прочности гранул от температуры прокалки, приходим к заключению, что условный показатель прочности гранул исследованного состава агломерированнго флюса после прокалки при температуре 400º С в течение 2 часов на 30% выше, чем при высокотемпературной прокалке (600º С = 2 часа). Возможно, установленный факт снижения прочности гранул связан с разложением жидкого стекла при высоких температурах, так как известно, что при высоких температурах из жидкого стекла выделяются растворяющийся в воде дисиликат натрия $Na_2Si_2O_5$ и остающийся в

Таблица 1 *Прочность гранул агломерированного флюса типа 48АФ*

Проба серия	Температура прокалки, ° С	Время прокалки, час	Предельные размеры гранул, мм	Прочность гранул в серии (мат.ожидание) кгс/мм^2	Прочность гранул в пробе (мат.ожидание) кгс/мм^2
591 1 2 3 4	400	2	1,8…2,2	 13,03 16,21 16,24 16,80	15,62
592 1 2 3 4	600	2	1,8…2,2	 11,51 11,54 17,23 8,33	12,14

осадке (нерастворимый в воде) метасиликат натрия Na_2SiO_3. Кроме того при снижении прочности гранул в результате их истираемости с образованием значительных объемов пылевидной фракции может иметь место перераспределение компонентов и частичная потеря последних с пылью в случае неравномерного распределения составляющих шихты по объему гранул в процессе изготовления. Предварительные исследования содержания основных соединений в самой мелкой пылевидной фракции изучаемого флюса представлены в табл. 2

Таблица 2 *Прочность гранул агломерированного флюса типа 48АФ*

Химическое соединение	Содержание соединений, %		
	Флюс в исходном состоянии	Фракция с размером гранул до 1,6 мм	Фракция с размером гранул менее 0,315 мм
SiO_2	20,8	20,4	17,2
CaF_2	21,3	21,3	22,9
TiO_2	15,0	14,5	10,0
Al_2O_3	16,3	13,3	12,3
CaO	14,5	15,2	13,8
MnO	6,4	6,4	10,0
MgO	1,0	1,0	0,5

В настоящее время проводятся исследования по определению содержания вышеуказанных соединений в промежуточных фракциях. Учитывая неполноту полученных результатов о кинетике перераспределения этих соединений в зависимости от изменения гранулометрического состава флюса судить трудно. Однако наблюдаемый рост потерь при образовании пылевидных фракцией таких соединений, как MnO (56%) и CaF_2 (8%) оставлять без внимания нельзя. Кроме того, учитывая перераспределение соединений и возможную его взаимосвязь с прочностью гранул, актуальным является исследование флюса на истираемость, которое также в настоящее время ведется в институте. В ближайшее время результаты этого исследования будут представлены научной общественности на обсуждение.

*)Работа выполнена под руководством д.т.н. М.Г. Шарапова

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО АГЛОМЕРИРОВАННОГО ФЛЮСА МАРКИ ПФК-56С ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОИЗВОДСТВУ МОСТОВЫХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.В. Пименов,
инж.
ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»
г. Санкт-Петербург,

А.В. Тарантаев,
инж.
ООО «Ленмонтаж»
г. Санкт-Петербург

В связи с высокой конкурентоспособностью флюс марки ПФК-56С после аттестации в НАКСе был включен в перечень рекомендуемых к применению материалов в производстве конструкций 2-х технических групп промышленно опасных объектов (конструкции стальных мостов и строительные конструкции).

Работа выполнена на заводе металлоконструкций ООО «Ленмонтаж», где сварочные работы проводятся в соответствии с действующей НТД применительно к 2-м техническим группам промышленно опасных объектов по классификации НАКС, а именно: КСМ (конструкции стальных мостов) и СК (строительные конструкции). При изготовлении металлических конструкций основным нормативным документом является: для стальных мостов − СТО-ГК «Трансстрой» 012-2007; для строительных конструкций − ГОСТ 23518-99 и СП 53-101-98.

При производстве сварочных работ в сборочно-сварочных цехах применяются:

- автоматическая сварка под слоем флюса;
- механизированная сварка в среде защитных газов.

Для изготовления строительных металлических конструкций используются следующие полуфабрикаты: листовой и профильный прокат по ГОСТ 19282 из низкоуглеродистой Ст3 и низколегированной стали 09Г2С в толщинах 6…60 мм.

Основной тип конструкций представляют собой балки (таврового и двутаврового типа, а также коробчатого сечения), колонны, решетчатые конструкции, различные закладные изделия.

Габаритные размеры конструкций: по высоте − 150…4000 мм; по длине – 100…24000 мм; по ширине −100…4000 мм;

Вес конструкций колеблется в пределах – 10…1000 кг.

Для изготовления конструкций стальных мостов применяется листовой прокат по ГОСТ 6713 и ТУ 14-1-5120-92 из низкоуглеродистой стали 10 и низколегированной стали 15ХСНД в толщинах 10…40 мм.

Изготавливаемые конструкции представляют собой балки (таврового, двутаврового типа и коробчатого сечения), фермы, ортотропные плиты.

Габаритные размеры конструкций: по высоте – 300…3500 мм; по длине – 1000…25000 мм; по ширине – 300…3500 мм.

Вес конструкций − 100…50000 кг.

Требование к механическим свойствам сварных соединений:

- минимальные значения предела текучести и предела прочности не должны быть ниже соответствующих значений для основного металла;
- максимальные значения твердости металла шва и околошовной зоны должны быть не более 350 HV;
- минимальное значение относительного удлинения металла шва стыковых соединений на пятикратных образцах $\delta_5 \leq 16$ %;
- угол статического изгиба сварного соединения с поперечным швом должен быть не менее 120°;
- минимальные значения ударной вязкости KCU (на образцах Менаже) при температурах испытаний минус 40° С, минус 50° С и минус 60° С для КСМ должны быть не менее 29 Дж/см^2. По техническим требования проекта необходимо для СК из стали марки 09Г2С получить ударную вязкость KCV (на образцах Шарпи) при температуре минус 60° С не менее 27 Дж/см^2.

На заводе, например, для сварки стыковых швов по ГОСТ 8713-79 безальтернативно применялись сварочные материалы в следующем сочетании: проволока сплошного сечения Ø 4мм марки Autrod 12.32 и флюс фирмы ESAB марки ОК10.71 по ТУ 5929-00255224353-2005. В связи с появлением на рынке сварочных материалов более дешевого агломерированного флюса марки ПФК-56С необходимо было провести сравнительные сварочные испытания в производственных условиях отечественного и зарубежного флюсов с целью определения возможности замещения импортного материала отечественным.

Исследуемые марки сварочных флюсов приведены в таблице1, а химический состав применявшихся марок проволоки – в таблице 2.

Таблица 1 *Исследуемые марки сварочных флюсов*

Марка	Индекс основности
ОК 10.71	1.6
ПФК 56С	2,0
ОР 132	1.5
Flux 888	2.6
ОК 10.62	3.2
ОР 121 ТТ	3

Таблица 2 *Химический состав сварочных проволок, % масс.*

Марка	C	Si	Mn	Ni	Al	S	P	Mo	Cu	Cr
Св-08ГА	0.08	0.48	1.01	0.07	0.014	0.007	0.016	0.01	0.10	0.05
Св-10НМА	0.09	0.22	0.49	1.14	-	0.009	0.01	0.44	0.16	0.08
OE-S2	0.09	0.11	1,00	0.05	-	0.020	0.008	0.01	0.12	0.05
L-61	0.12	0.21	1,00	0.02	0.01	0.010	0.01	0.01	0.01	0.03
Autrod 12.32	0.12	0.29	1.74	0.01	-	0.007	0.013	0.01	0.04	0.04
OE-SD31 Ni1/4 Mo	0.09	0.23	1.34	0.87	0.001	0.008	0.004	0.17	0.05	0.03

При подготовке материалов, сварке проб и опытных стыков применительно к КСМ учитывались требования СТО-ГК «Трансстрой» 012-2007 и технологические возможности производства. Пробы вырезали из стали марки 15ХСНД.

Изучались следующие сварочные материалы:

- проволоки марок Св-08ГА и Autrod 12.32;
- сварочные флюсы марок ОК 10.71 и ПФК-56С.

Сварку стыкового соединения выполняли в соответствии с ГОСТ 8713-79 на флюсовой подушке. Сварка производили на режимах:

$$I = 500…750\ А,\ U_д = 28…34\ В,\ V_{св} = 20…40 м/ч.$$

Все сварные швы прошли визуально-измерительный и ультразвуковой контроль (100%).

В процессе испытаний проводился анализ сварочно-технологических свойств материалов и определение механических свойств (таблица 3). Следует признать конкурентоспособность отечественного флюса, что видно из результатов испытаний. Однако флюс ОК 10.71 по гранулометрическому составу визуально состоит из фракции примерно одного размера, а флюс ПФК-56С неоднороден по размеру зерен

Таблица 3 *Результаты испытаний металла сварного шва на стали марки 15ХСНД*

Наименование	Внешний вид шва	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	KCU при -40° С, Дж/см^2
Св-08ГА+ ОК 10.71	хороший	479	607	104
Autrod 12.32+ОК 10.71	хороший	511	633	98
Св-08ГА+ ПФК-56С	хороший	505	653	100

(содержит совершенно разные фракции от мелкой пыли до крупинок 5-6 мм).

При подготовке материалов и сварке проб и опытных стыков применительно к СК учитывались требования стандартов ГОСТ 23118-99, СП 53-101-98 и требования проекта.

В качестве основного материала была выбрана сталь марки 09Г2С.

В основном сварка строительных конструкций не отличается по требованиям к сварочно-технологическим свойствам и прочностным характеристикам от требо-

ваний, предъявляемым к мостовым металлическим конструкциям, за исключением норматива на ударную вязкость, как это отмечено выше. Поэтому применительно

Таблица 4 *Результаты испытаний сварных соединений стали марки 09Г2С*

Проволока	Флюс	Погонная энергия, Дж/мм	KCV при -60° С (надрез по оси шва), Дж/см^2	KCV при -60° С (надрез по линии сплавления), Дж/см^2
Св-10НМА	ОК 10.71	436	27	53
Св-10НМА	ПФК 56С	533	28	42
OE S2	ОР 132	800	17	20
L 61	Flux 888	800	15	49
Св-08ГА	ОК 10.71	832	25	26
Autrod 12.32	ОК 10.62	711	10	12
Св-08ГА/Св-10НМА	Flux 888	533	47	43
OE-SD31 Ni1/4 Mo+ Св-10НМА	ОР 132	484	51	49
Св-10НМА	МХП+ ОР121ТТ	678	63	42
Св-10НМА	ОР121ТТ	484	51	27

Примечание: МХП – металлохимическая присадка (вводиться в сварочный зазор: металлическая рубленая на крупку проволока диаметром 2 мм марки Св-10НМА плюс 5%TiO_2)

к СК изучалось влияние различных сочетаний сварочных материалов на вязкость металла шва (таблица 4).

Экспериментально было установлено, что для получения требуемых свойств необходимо обеспечить минимальную погонную энергию (не более 533 Дж/мм), выдерживая между проходами температуру 200…250° С.

Таким образом, эксперименты показали, что отечественный флюс марки ПФК 56С применительно к изготовлению СК обеспечивает требуемый уровень вязкости металла сварных соединений.

Кроме того по результатам исследования проб применительно к СК подходят также следующие комбинации сварочных материалов:

- Св-08ГА/Св-10НМА + Flux 888;
- OE-SD31 Ni1/4 Mo + Св-10НМА + ОР 132;
- Св-10НМА + МХП + ОР121ТТ;
- Св-10НМА + ПФК-56С.

Прекрасные результаты двух первых из указанных сочетаний сложно реализовать из-за частого отсутствия на российских складах флюса марки Flux 888, а так же сварочной проволоки OE-SD31 Ni1/4 Mo.

Следует отметить комбинацию Св-10НМА+МХП+ОР121ТТ, которая показала наибольшую производительность, т.к. для этого сочетания возможно применение интенсивных сварочных режимов при сохранении высоких показателей вязкости.

Заключение

Показано, что отечественный флюс марки ПФК-56С применительно к изготовлению СК и КСМ обеспечивает требуемый уровень свойств сварных соединений.

В связи с высокой конкурентоспособностью флюс марки ПФК-56С после аттестации в НАКСе был включен в перечень рекомендуемых к применению материалов в производстве конструкций 2-х технических групп промышленно опасных объектов (КСМ и СК).

НОВЫЙ СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ФЛЮСОВ

В.В. Гежа,
инж.,
М.М. Пронин-Валсамаки,
инж.,
А.В. Шаталов,
инж.,
С.И. Шекин
к.т.н.
ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»
г. Санкт-Петербург

Разработана принципиально новая технология изготовления сварочного флюса лазерным оплавлением, позволяющая легировать, микролегировать и модифицировать сварной шов через флюс, а также обеспечить содержание диффузионного водорода в наплавленном металле на достаточно низком уровне. Эффективность производства флюсов методом лазерного оплавления может быть повышена в несколько раз при использовании в качестве источников диодных лазеров большой мощности.

Существуют три принципиальные технологии изготовления сварочных флюсов: плавлением в электродуговых печах (плавленые флюсы), агломерацией или экструзией, где в качестве связующего применяется жидкое стекло (керамические флюсы), спеканием компонентов на связующем, как правило полевом шпате, при температурах 1000-1100º С (синтетические флюсы).

У представленных технологий имеются свои преимущества и недостатки. Плавленые флюсы обеспечивают низкое содержание диффузионного водорода в наплавленном металле, имеют высокие прочностные характеристики гранул, обеспечивают высокие сварочно-технологические свойства, но при этом отсутствует возможность введения через флюс легирующих, микролегирующих и модифицирующих компонентов. Плавленые флюсы не позволяют получить уровень ударной вязкости металла шва при отрицательных температурах, предъявляемый в настоящее время к сварным швам [1].

Керамические флюсы позволяют получить высокий уровень механических характеристик металла шва, но при этом имеют низкую прочность гранул и высокую степень истираемости. Керамические флюсы не позволяют обеспечить низкий уровень содержания диффузионного водорода в наплавленном металле, что существенно усложняет применение данных флюсов для сварки высокопрочных сталей, так как требуется высокотемпературный предварительный подогрев и замедленное охлаждение конструкции.

Синтетические флюсы позволяют вводить легирующие элементы, но при этом значительная часть ферросплавов окисляется до 90%. Кроме того, технология изготовления синтетических флюсов является низко производительной и дорогостоящей.

Целью настоящего исследования явилась разработка принципиально новой технологии, позволяющей изготавливать сварочный флюс, обладающий преимуществами керамического и плавленого при отсутствии указанных выше недостатков.

Принципиально новый способ изготовления сварочных флюсов основан на свойствах поверхностного натяжения шлаков [2]. Смесь порошков из различных компонентов кратковременно обрабатывается лучом лазера. Расплавленные компоненты, имеющие наименьшую температуру плавления, за счет своего поверхностного натяжения формируются в гранулы флюса, при этом в гранулы втягиваются нерасплавившиеся компоненты (рисунок 1).

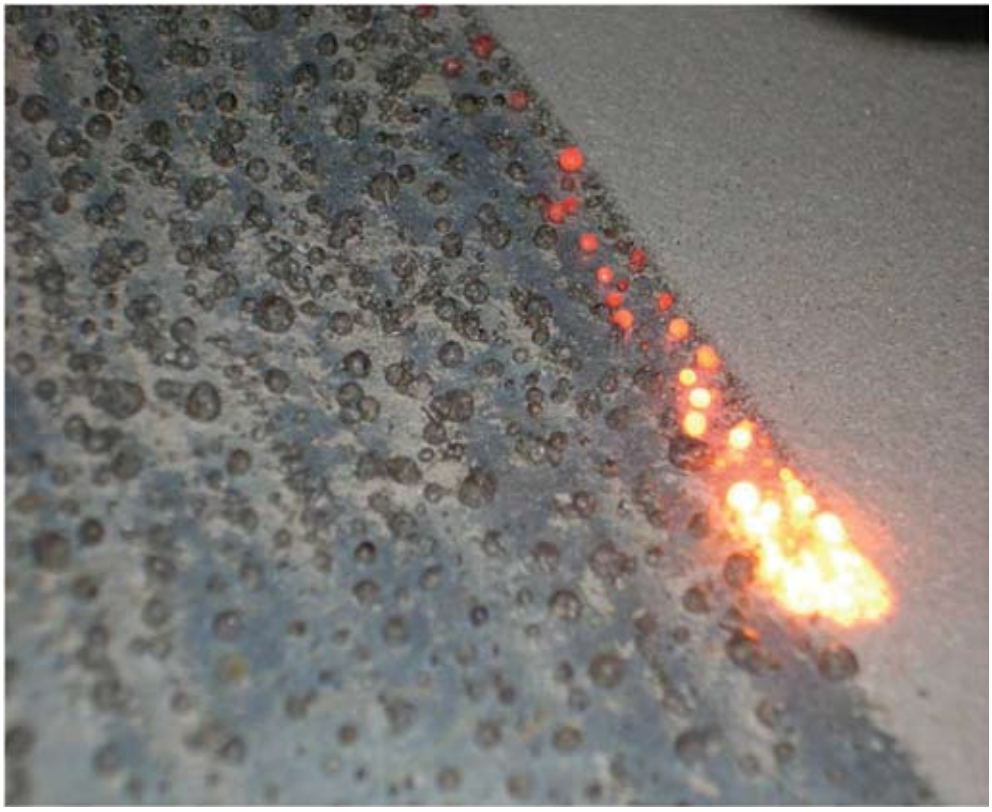


Рисунок 1 *Гранулирование флюса лазерным излучением.*

В ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» разработана принципиальная схема изготовления флюса лазерным оплавлением (рисунок 2) [3] , а также изготовлена опытная установка для изготовления флюса (рисунок 3).

Флюс изготавливается по следующей технологии:

- предварительная прокалка компонентов шихты и просеивание по фракциям (рудо-минеральные компоненты используется во фракции до 0,315 мм, ферросплавы и металлические порошки – во фракции до 0,2 мм);

- навеска компонентов согласно рецептуре с последующим сухим смешиванием шихты;
- загрузка шихты на установку гранулирования в бункер-дозатор;
- равномерное нанесение шихты на вращающийся диск;
- гранулирование флюса при помощи лазерного излучения;
- просев флюса через сетку 0,315 мм и упаковка;
- возврат отсева в бункер-накопитель с использованием установки регенерации.

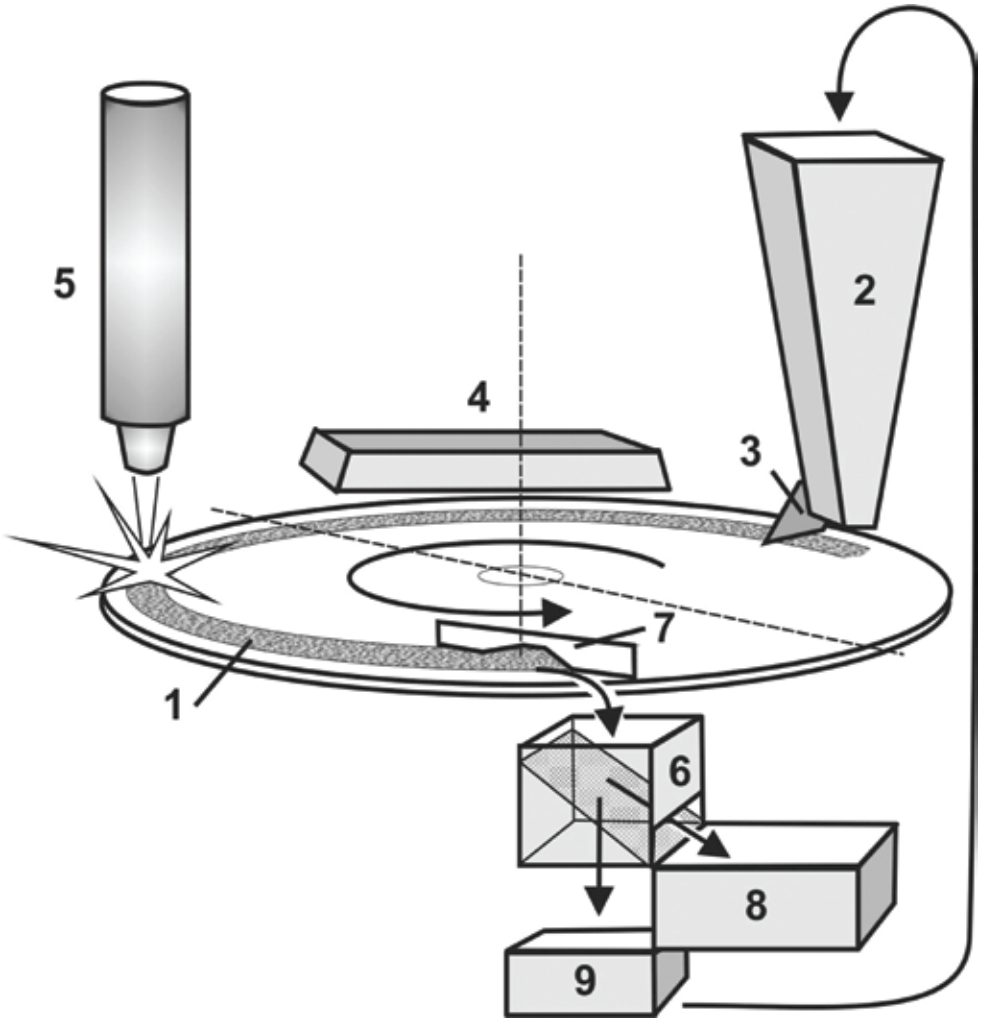


Рисунок 2 *Схема установки лазерного гранулирования флюса:*
1 - слой шихты на поверхности вращающегося диска,
2 - бункер – дозатор,
3 - ограничитель толщины слоя шихты,
4 - подогреватель,
5 - лазер,
6 – вибросито,
7 - скребок,
8 - бункер с готовым флюсом,
9 - бункер-накопитель отсева для регенерации.

Изготовленный при помощи лазерного гранулирования флюс можно использовать для сварки без дополнительной термообработки. Производительность установки составляет 2 кг флюса в час.

В качестве базового состава для исследования был выбран флюс марки ФИМС- 20П, применяющийся для сварки высокопрочных сталей низколегированными проволоками. Для сравнительных испытаний флюс был изготовлен в плавленом и керамическом виде, а также при помощи лазерного оплавления.

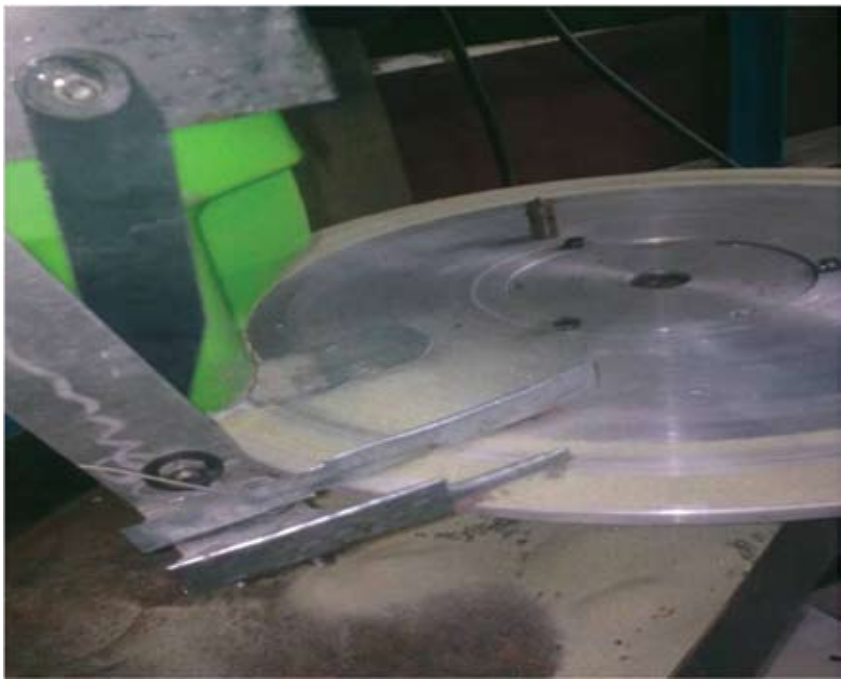


Рисунок 3 *Опытная модель для гранулирования флюса лазером*

В большинстве экспериментов для лазерного гранулирования использовался углекислотный лазер «Комета-2», генерирующий излучение с длиной волны 10,6 мкм мощностью до 1,3 кВт. Обработка лазерным лучом проводилась на описанной выше опытной установке. Толщина слоя материала составляла от 0,5 до 3 мм. Скорость обработки варьировалась в пределах от 20 до 70 мм/с, мощность излучения – от 1,0 до 1,3 кВт, эффективный диаметр пятна фокусировки, обеспечивающий оплавление порошка с формированием гранул, составлял от 7 до 15 мм. Плотность энергии падающего излучения снижается осесимметрично от центра пятна по закону Гаусса.

Были проведены также сравнительные эксперименты по оплавлению компонентов излучением волоконного лазера ЛС-2, генерирующего излучение с длиной волны 1,07 мкм мощностью до 0,7 кВт. Установлено, что производительность процесса получения гранул с применением волоконного лазера в 1,3-1,5 раза выше, чем для углекислотного лазера при одинаковом уровне погонной энергии излучения.

Исследовалась прочность гранул, переход легирующих элементов, технологические свойства при сварке, содержание диффузионного водорода в наплавленном металле и механические свойства металла шва.

Нагрев металлической части шихты флюса лазерным лучом происхо-дит за короткий период времени. В результате плавления шлаковой части и формирования

гранул происходит защита от окисления ферросплавов и металлических компонентов. При этом керамическая жидкая фаза вовлекает нерасплавленные компоненты шихты. Микроскопические исследования частиц, образованных при лазерном оплавлении, подтвердили, что часть компонентов не оплавляется (рисунок 4). На фотографии отчетливо видны не оплавленные границы крупных (более 100 мкм) и мелких частиц (менее 50 мкм).

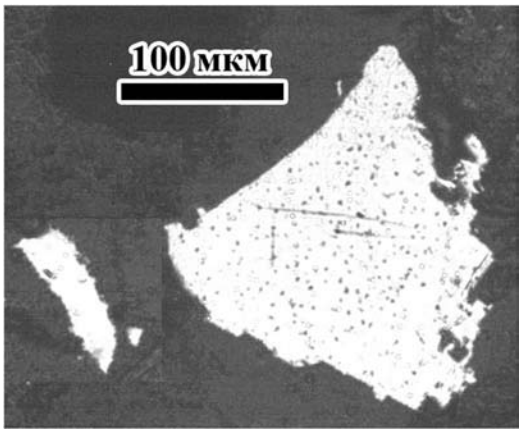


Рисунок 4 *Неоплавившиеся частицы металлических компонентов в грануле флюса.*

Переход легирующих элементов из флюса исследовался посредствам определения химического состава металла шва, выполненного под плавленым, керамическим или лазерным флюсом. Флюс изготавливался из расчета образования шлака с химическим составом, приведенным в таблице 1. В керамический и оплавленный лазером флюсы было введено по 1% марганца металлического.

Таблица 1 *Расчетный химический состав шлака, образованного опытными флюсами, % масс.*

SiO_2	MnO	CaO	CaF_2	TiO_2	FeO
22-26	н.б. 2,0	14-15	20-25	15-18	н.б. 1,0

В качестве сварочной проволоки использовалась проволока марки Св-04Н3ГМТА с фактическим химическим составом, приведенным в таблице 2.

Таблица 2 *Химический состав проволоки, % масс.*

C	Si	Mn	Ni	Mo	Ti	S	P
0,04	0,15	1,1	2,6	0,3	0,05	0,009	0,012

Керамический и плавленый флюс были изготовлены по штатным технологиям, разработанным в ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей».

Результаты определения химического анализа металла сварных швов, выполненных под опытными флюсами, представлены в таблице 3.

Таблица 3 *Химический состав металла шва, выполненного под опытными флюсами в сочетании с проволокой марки Св-04Н3ГМТА*

Тип флюса	Содержание элементов, % масс.							
	Mo	C	Si	Ni	P	Mn	Ti	S
Оплавленный лазером	0,28	0,05	0,40	2,62	0,010	1,44	0,020	0,006
Керамический	0,29	0,04	0,28	2,60	0,009	1,02	0,016	0,007
Плавленый	0,28	0,05	0,25	2,61	0,011	0,72	≤0,01	0,006

Данные по химическому анализу металла сварного шва показывают, что обработанный лазером флюс обеспечивает значительно более высокую эффективность перехода легирующих и микролегирующих элементов, чем флюсы, полученные другими способами.

Для обеспечения необходимого легирования металла сварного шва во флюсе, получаемом лазерным оплавлением, пришлось снизить количество ферротитана до 0,5%, а марганец металлический исключить из состава флюса.

Измерения содержания диффузионного водорода в наплавленном ме-талле производилось спиртовым методом в соответствии с РД5.УЕИА.3417-2005. Керамический и плавленый флюсы перед определением содержания диффузионного водорода прокаливались при температуре 650º С 3 часа. Флюс, полученный лазерным оплавлением, хранился после изготовления в герметичной таре и перед изготовлением проб не прокаливался. Результаты испытаний (средние значения по 3 образцам) приведены в таблице 4. Из таблицы видно, что содержание водорода в металле, наплавленном под лазерным флюсом, находится на низком уровне, сопоставимом с количеством водорода, получаемым под плавленым флюсом.

Таблица 4 *Содержание диффузионного водорода в наплавленном металле*

Исследуемые флюсы	Содержание водорода, $см^3$/на 100 г наплавленного металла
Керамический	3,3
Оплавленный лазером	1,2
Плавленый	0,9

Прочность гранул оценивалась по нагрузке, затраченной на их разрушение. При помощи гирь производилось постепенное нагружение гранул до момента их разрушения. Результаты определения прочности гранул представлены в таблице 5.

Таблица 5 *Сравнительная прочность гранул*

Исследуемые флюсы	Прочность гранул, кг
Керамический	1,16
Оплавленный лазером	2,25
Плавленый	2,47

В таблице представлены средние значения нагрузки, затрачиваемой на разрушение 10 гранул флюса размером 1±0,3 мм.

Как видно из приведенных в таблице значений, прочность оплавленного лазером

флюса значительно выше прочности гранул керамического флюса и незначительно уступает прочности гранул стекловидного плавленого флюса.

Определение технологичности полученного лазерным оплавлением флюса показало, что формирование сварного шва и отделимость шлаковой корки находится на уровне, полученном при сварке под плавленым флюсом. Сварной шов имел благоприятную форму, с отсутствием подрезов. Шлаковая корка отделялась самопроизвольно. Валики, наплавленные под плавленым флюсом и флюсом, полученным при помощи лазерного оплавления, представлены на рисунке 5

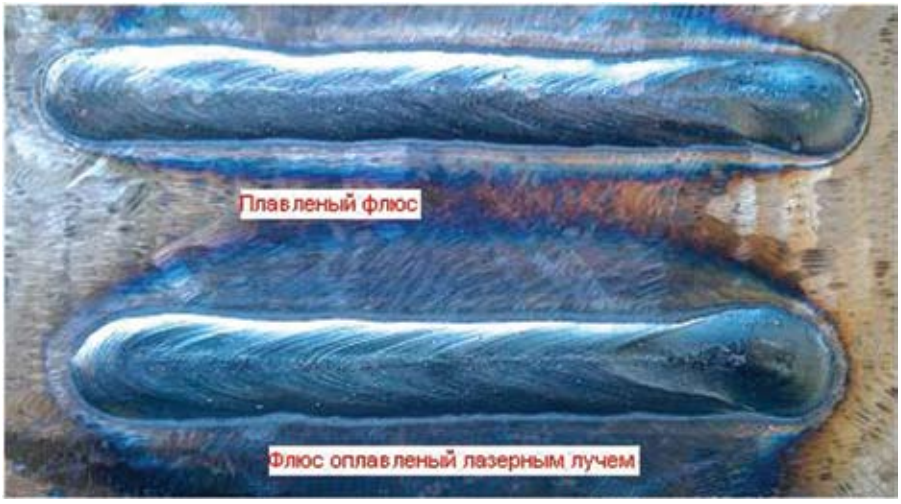


Рисунок 5 *Формирование валика на стали АБ2-1 толщиной 20 мм при сварке под флюсом марки ФИМС-20П и флюсом, изготовленным при помощи лазерного оплавления.*

Режимы сварки: ток сварки – 450А, напряжение дуги – 33В, скорость сварки – 25 м/ч. Разделка кромок V- образная с углом раскрытия 30° на сторону. Механические свойства металла шва представлены в таблице 6.

Таблица 6 *Механические свойства металла шва*

Сварочный флюс	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	Ударный изгиб KV, Дж	
					+20° С	-40° С
Плавленый	660, 673	557, 564	21, 20	60, 63	94, 102, 97	35, 29, 41
Оплавленный лазером	684, 678	583, 576	22, 20	67, 62	104, 92, 100	47, 43, 54

Прочностные и пластические свойства металла сварного шва, выполненного под плавленым и оплавленным лазером флюсом, на одном уровне. Работа удара металла сварного шва выполненного под флюсом, оплавленным лазером, при отрицательных температурах несколько выше, чем у сварного шва, выполненного под плавленым флюсом. Данный факт, по-видимому, объясняется более полным переходом легирующих и микролегирующих элементов при сварке под флюсом, оплавленным лазером.

Выводы

На основании проведенных исследований была разработана принципиально новая технология изготовления сварочного флюса, позволяющая легировать, микролегировать и модифицировать сварной шов через флюс, а также обеспечить содержание диффузионного водорода в наплавленном металле на достаточно низком уровне. Новая технология позволяет использовать флюсы, изготовленные при помощи лазерного оплавления, для сварки хладостойких высокопрочных сталей, применяемых при изготовлении ответственных конструкций.

Ограничивающим фактором для внедрения данного способа изготовления флюсов в промышленных масштабах, а также для выпуска опытных партий флюсов с экспериментальным составом компонентов является относительно низкая производительность процесса производства.

Эффективность и экономическая целесообразность производства флюсов методом лазерного оплавления может быть повышена в несколько раз при использовании в качестве источников излучения не углекислотных, а диодных лазеров большой мощности. Как показали эксперименты, излучение с длиной волны 1,07 мкм, характерное для диодных лазеров, лучше поглощается материалами, входящими в состав шихты, что приводит к 1,5-кратному увеличению производительности. Кроме того, коэффициент полезного действия при преобразовании электроэнергии в энергию излучения для диодных лазеров составляет 30%, что в 5-6 раз превышает этот показатель для большинства других типов лазеров. И, наконец, малые габариты диодных лазеров и возможность применения гибких световодов для транспортировки излучения позволяют в более широких пределах использовать средства автоматизации для управления процессом производства флюсов.

Литература

1. Подгаецкий В.В., Люборец Н.Н. - Сварочные флюсы. - Киев: Техніка, 1984, 167 с.
2. Способ гранулирования флюса./Горынин И.В., Малышевский В.А., Бишоков Р.В., Гежа В.В., Попов В.О., Пронин-Валсамаки М.М., Шекин С.И., Шаталов А.В.// Патент №2387521 – 27.04.2010 (РФ).
3. Установка для гранулирования порошкового материала./ Горынин В.И., Попов В.О., Попова И.П., Шаталов А.В.//№2008148859-12.08. 2010.(РФ)

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МОКРОЙ ПОДВОДНОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ

С.Ю. Максимов,
д.т.н.,
В.А. Лебедев,
д.т.н.
ИЭС им.Е.О.Патона НАН Украины
г.Киев

Разработан автомат для сварки на больших глубинах, а также в других опасных условиях, в том числе при ремонте и демонтаже ядерных реакторов в воздушной и водной среде.

При проведении работ под водой могут возникнуть ситуации, когда присутствие человека ограничено или даже невозможно. В этом случае очень важна возможность автоматизации процесса сварки или резки. Целью нашей работы было создание такого оборудования. Как правило, основными компонентами оборудования являются источник питания дуги и механизм подачи проволоки. Результаты экспериментов по их выбору позволили получить универсальный комплект для мокрой подводной сварки и резки порошковой проволокой.

Источник питания.

Источник питания представляет собой автоматически управляемый преобразователь электрической энергии со звеном повышенной частоты, т. е. инвертор, разработанный компанией Rosweld, Россия, рис.1.

Рисунок 1 *Источники питания компании Rosweld с разным количеством модулей*

Источник питания разработан по функционально-модульному принципу, т.е. состоит из нескольких взаимно заменяемых узлов и деталей ограниченной номенклатуры. Его мощность определяется количеством используемых элементов питания (модулей). Сварочные свойства и алгоритм функционирования и управления определяются программным обеспечением, установленным и хранящимся в источнике.

Каждый модуль является высокочастотным преобразователем инверторного типа с высоким КПД (рисунок 2). Модули могут быть соединены последовательно или параллельно, и, кроме того, они имеют внутренние системы контроля функционирования и защиты. Их главное отличие от обычных источников питания инверторного типа состоит в том, что вольт-амперные характеристики (ВАХ) и динамические свойства модулей задаются программами и есть возможность их быстрой замены во время работы источника.

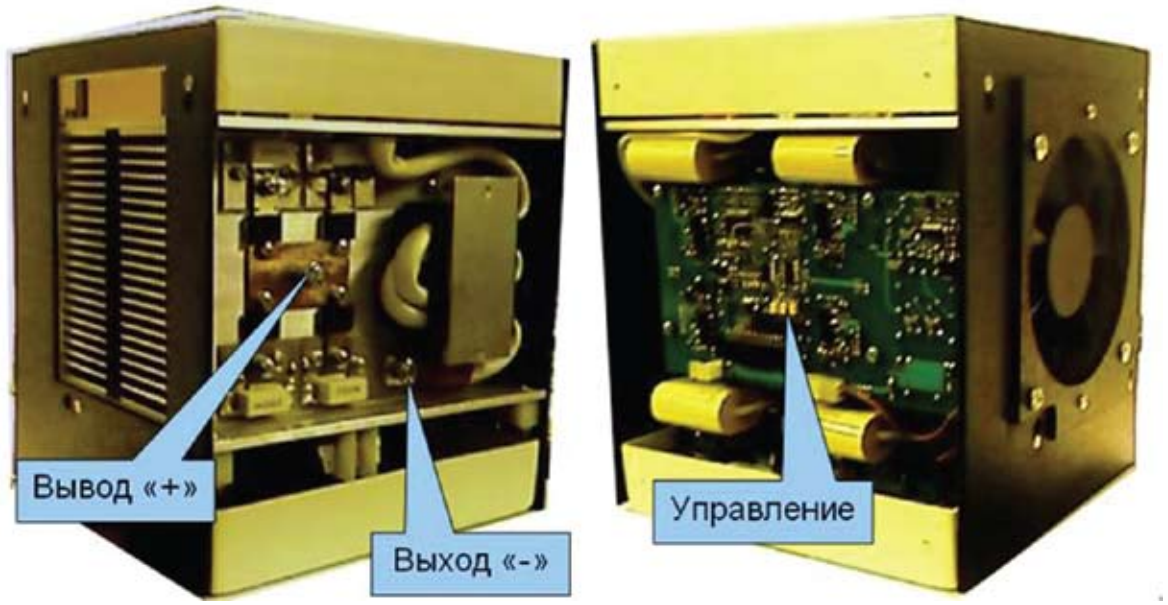


Рисунок 2 *Унифицированный силовой блок (модуль)*

Источники питания могут иметь четыре вида внешних характеристик: крутопадающую, пологопадающую, жесткую и возрастающую. Возможны также комбинированные характеристики.

Специально разработанный графический редактор позволяет быстро нарисовать на экране компьютера требуемую ВАХ и передать её на исполнение в аппарат. На рисунке 3 представлен снимок экрана редактора вольт-амперной характеристики. Редактор может четко определить не только типы ВАХ, но и наиболее важные характеристики источника (напряжение холостого хода, короткого замыкания, динамические характеристики и т.д.).

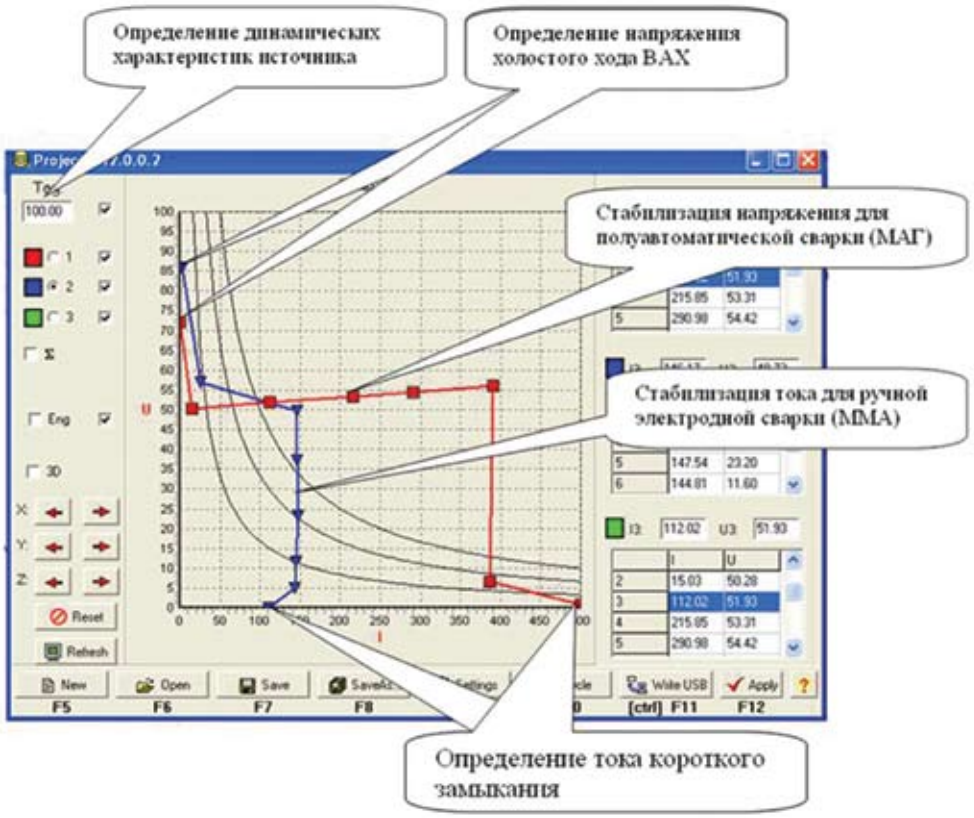


Рисунок 3 *Снимок экрана с редактором вольт-амперной характеристики источника питания*

Основные преимущества источника

1 Источник работает все время на оптимальной вольт-амперной характеристике, которая предварительно записана в его память. Оптимальная вольт-амперная характеристика для каждого диапазона тока и вида процесса (сварки или резки) выбираются в лабораторных условиях специалистами ИЭС им.Е.О. Патона. Также возможна работа источника на нескольких вольт-амперных характеристиках.

2 Для обеспечения высокой надежности сервиса и защиты от пыли, силовые модули имеют конструкцию, в которой охлаждающий воздух, проходящий вдоль ребер радиаторов, не имеет контакта с электроникой.

3 Гарантия рационального расхода материалов, электроэнергии, потребляемой при сварке (резке), и электродных материалов достигается за счет:

- системы разработанных вольт-амперных характеристик;
- параметрических циклограмм процессов сварки, состоящих, как правило, из 5 этапов и обеспечивающих безопасное зажигание дуги, быстрое формирование сварочной ванны, стабильное формирование сварного шва, заварку кратера и «заострение» электрода к следующей сварке.

4 Высокий КПД модулей (95%), что снижает потери электроэнергии более чем в 2-3 раз по сравнению с существующими источниками питания.

5 Значительное снижение разбрызгивания электродного материала.

6 Гарантированные минимальная стоимость оборудования и затраты на его тех-

ническое обслуживание обеспечиваются модульной структурой и высоким уровнем унификации. Стоимость одного ампера (стоимость источника, деленная на значение номинального тока) находится в диапазоне 6 ... 8 долларов и не зависит от мощности, рисунок 4.

Рисунок 4 *Цена одного ампера сварочного тока*

Механизм подачи порошковой проволоки.

Коллекторный узел электродвигателя постоянного тока является одним из наиболее проблемных элементов при эксплуатации под водой. В новом поколении оборудования используется специализированный электропривод на базе вентильного электродвигателя с микропроцессорной системой управления и настройки. Вариант дизайна этого электропривода при экспериментальной проверке его работы в водной среде показан на рисунке 5.

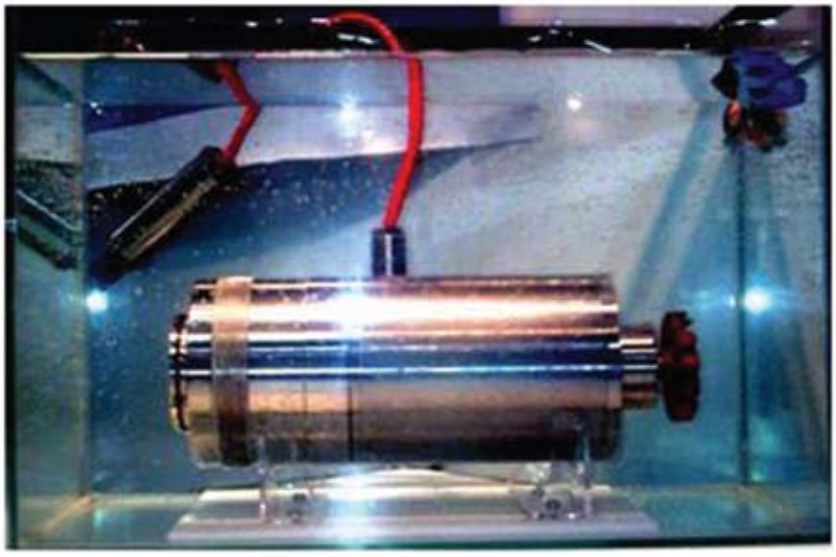


Рисунок 5 *Испытания вентильного электропривода в водной среде после заполнения диэлектрической жидкостью*

Электропривод обеспечивает управление с изменением параметров вращения в соответствии с заданным алгоритмом. Электродвигатель имеет достаточно высокий крутящий момент на валу, что позволяет установить подающий ролик непосредственно на нем, избегая применения понижающих редукторов. Разработанный специализированный вентильный электропривод обладает высокой быстротой реагирования, что позволяет реализовать достаточно сложные алгоритмы подачи электродной проволоки, обеспечивая модулированные и импульсные режимы работы. В результате мы получили значительное улучшение качества и энергетических характеристик подводной сварки и резки порошковой проволокой.

Указанная конструкция электропривода на основе вентильного электродвигателя с микропроцессорным цифровым управлением позволила разработать автомат для дуговой подводной сварки с контурным управлением траекторией движения сварочного инструмента, задаваемой программно. Это дало возможность отказаться от специальных датчиков, установка и обслуживание которых в подводных условиях довольно сложны. Траектория движения программно описывается путём подсчёта количества импульсов датчиков обратной связи по частоте вращения вала приводного электродвигателя. В качестве таких датчиков применены цифровые инкрементальные датчики – энкодеры. Такие датчики выполняют две функции: являются элементами стабилизации частоты вращения вала вентильного электродвигателя и выполняют роль датчиков пути. Для плоского перемещения используются два электропривода, перемещающих сварочный инструмент с регулируемыми и установочными скоростями по координатам “x” и “y”. Для реализации перемещения по указанным координатам разработан программный инструментарий, реализуемый с помощью компьютера. При этом на дисплее отображаются заданная траектория движения инструмента, его текущее положение, параметры сварочного процесса, рисунок 6.

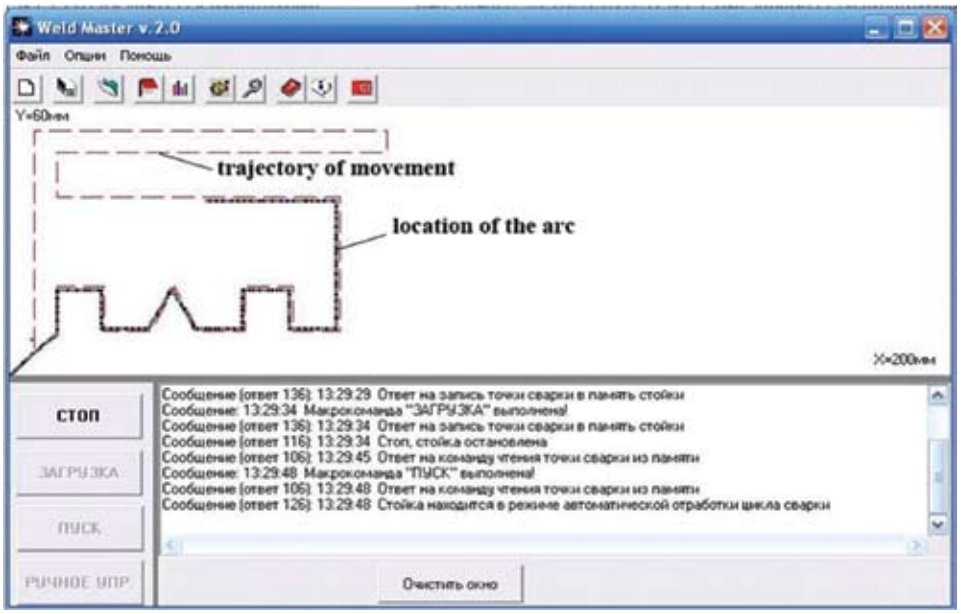


Рисунок 6 *Траектория движения дуги и ее текущее положение*

Макетный образец сварочного автомата представлен на рисунке 7 в положении, предваряющем его погружение в испытательную барокамеру. Блок управления автоматом с целью снижения числа коммуникаций и повышения помехозащищённости конструктивно размещается в герметичной камере непосредственно на сварочном автомате. Все использованные вентильные электродвигатели однотипные и герметизированы. Ещё одной особенностью автомата является применение специальных герметичных разъёмов, рассчитанных на надёжную работу на глубинах до 600 м, что собственно и определяет возможности разработанной концепции автоматов для подводной сварки мокрым способом.

Широкие возможности программирования двухкоординатного движения сварочного инструмента показаны на примере надписи, выполненной в виде наплавленных валиков на глубине 200 м, рис.8.

Двухкоординатная система автомата может быть без особых сложностей преобразованы в трёхкоординатную (дополнительная координата ”z”) с возможностью выполнения пространственной сварки и резки.

Сфера применения разработанного оборудования достаточно широка и может быть распространена в условиях, где работа сварщика – водолаза затруднена или невозможна, например, большие глубины, опасные условия, в том числе ремонт и демонтаж ядерных реакторов в воздушной и водной среде и др. Рассмотрим некоторые примеры его использования.

1 Сварка и резка на большой глубине. Внешний вид стыкового соединения, выполненного с использованием импульсной сварки порошковой проволокой показан на рисунке 9. Видно, что в этом случае наплавленный валик мелкочешуйчатый, равномерный по ширине, с плавным переходом к основному металлу.

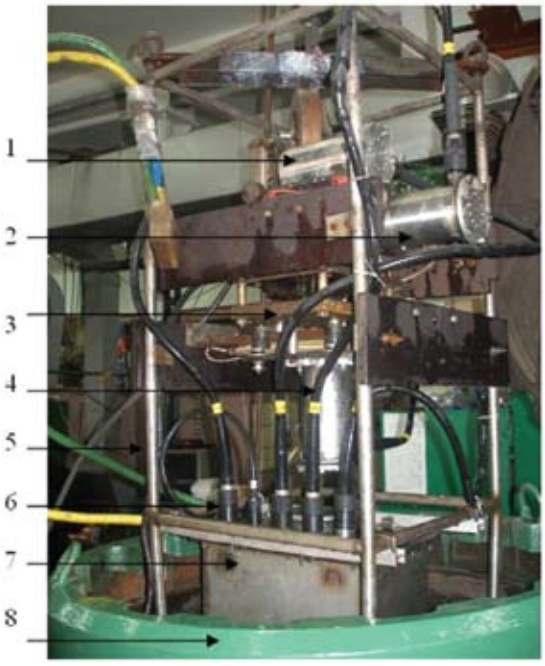


Рисунок 7 *Конструкция автомата для подводной сварки: 1-электродвигатель механизма подачи; 2- электродвигатель перемещения по координате “y”; 3- сварочный стол; 4 - электродвигатель перемещения по координате “x”; 5- Стойка конструктива автомата; 6 – герметичные разъёмы; 7 – погружной блок управления; 8 - барокамера*

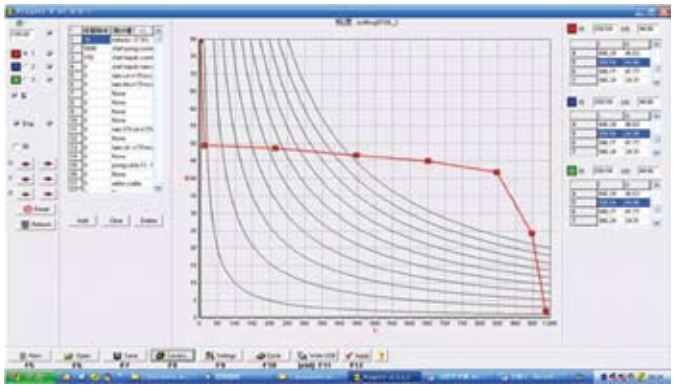
Рисунок 8 *Возможности программирования траектории перемещения сварочного движения в виде наплавленных валиков, полученных на глубине 200 м.*

Рисунок 9 *Стыковое соединение, выполненное с помощью импульсного источника сварочного тока на глубине 200 м*

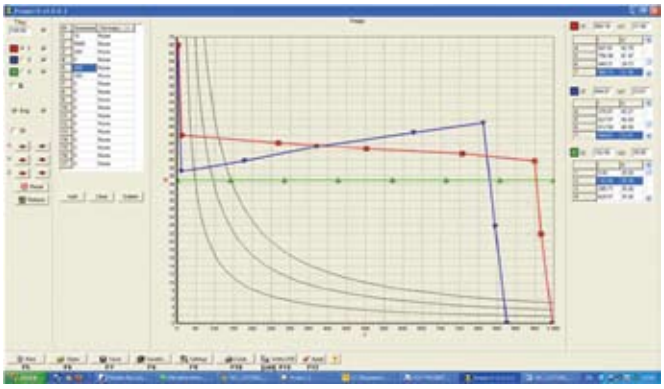
На рисунке 10 показан внешний вид разреза, выполненного порошковой проволокой на глубине 300 м

Рисунок 10 *Разрез, выполненный порошковой проволокой на глубине 300 м*

Эффективность резки может быть улучшена с помощью использования внешней вольтамперной характеристики специальной формы, рисунок 11.



а)



в)

б)

г)

Рисунок 11 *Влияние внешней вольт-амперной характеристики на качество резки: а - обычная характеристика, б - внешний вид разреза с использованием обычной характеристики, в – специальная характеристика, г - вид разреза с помощью специальной характеристики*

Сварка с внешним электромагнитным полем

Применение внешнего электромагнитного поля позволяет в 2,5 раза уменьшить общее содержание водорода в сварных швах, то есть с 36 см^3/100 г до 14,4 см^3/100 г, рисунок 12.

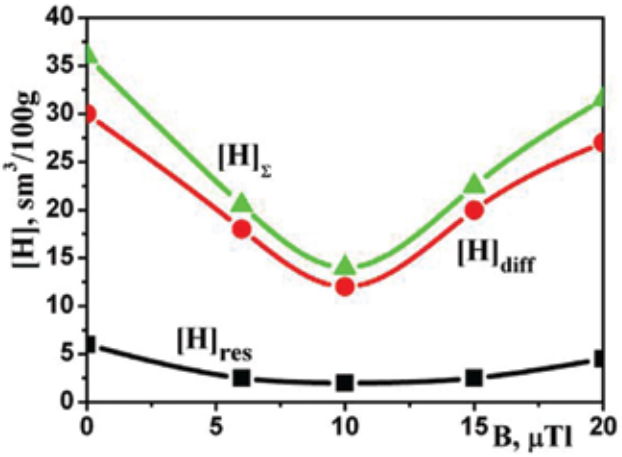


Рисунок 12 *Влияние напряженности внешнего электромагнитного поля на содержание водорода в металле шва (обратная полярность)*

Комплексное воздействие внешнего электромагнитного поля на сварочную ванну привело также к снижению размеров и количества пор и повышению механических свойств металла шва, в первую очередь пластичности (более 60%), рисунок 13.

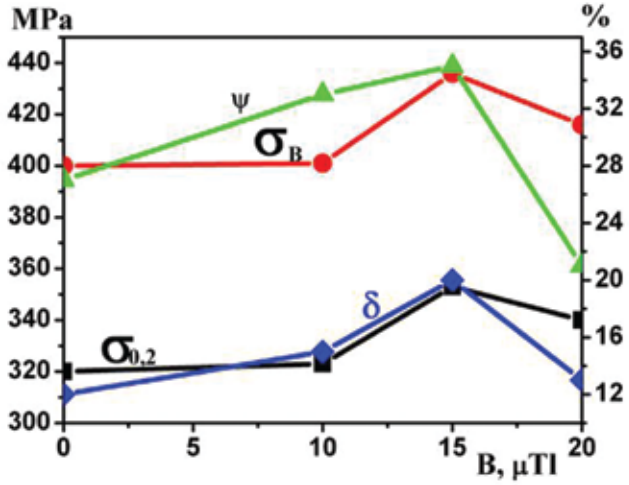


Рисунок 13 *Влияние индукции на механические свойства металла шва*

Ремонт элементов конструкций атомных электростанций

Для мокрой сварки нержавеющих сталей разработана самозащитная порошковая проволока. Она позволяет выполнять сварку в нижнем и вертикальном положении стыковых, угловых и нахлесточных швов высоколегированных коррозионно-стойких сталей типа AISI 304L, 308L, 347 и 321. Механические свойства металла шва отвечают требованиям, предъявляемым к сварным швам, выполненным на воздухе (Таблица 1) Применение порошковой проволоки открывает перспективу автоматизации процесса сварки и исключения участия человека в работах в особо опасных условиях.

Таблица 1 *Механические свойства металла шва при температуре испытания 20° С*

$\sigma_{0.2}$, MPa	σ_B, MPa	δ, %	ψ, %	KCV, Дж/см^2	Угол загиба, град. R = t
≥ 350	≥ 620	≥ 26	29	≥ 90	68…103

Полученные значения механических свойств превосходят механические свойства металла шва, сваренного на воздухе с помощью электродов типа E-08Cr20Ni9Mn2B. Применение порошковой проволоки позволит сократить время нахождения водолаза-сварщика рядом с источником излучения, а в будущем - полностью автоматизировать процесс сварки.

Ещё одним перспективным направлением в совершенствовании оборудования для механизированной и автоматической сварки под водой следует считать одновременное использование источника сварочного тока и механизма подачи электродной проволоки, работающих по определённым связанным алгоритмам функционирования. Такая работа с привлечением ряда фирм-разработчиков Украины и России выполняется в настоящее время.

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

С.Ю. Максимов,
д.т.н.,
В.А. Лебедев
д.т.н.
ИЭС им.Е.О.Патона НАН Украины
г.Киев

Целенаправленное введение колебаний сварочной ванны, кроме управления параметрами сварного соединения (валика наплавленного металла) позволяет изменить, структуру металла шва и околошовной зоны, существенно улучшив её. Дальнейшим развитием этих работ является объединение в одном процессе нескольких видов механических колебаний: импульсная подача электродной проволоки и колебания сварочной ванны, за счёт различных способов колебаний свариваемого или наплавляемого изделия, объединённых единым заданным алгоритмом управления.

Механизированная и автоматическая сварка и наплавка плавящимся электродом постоянно совершенствуются путем использования различных технологических приёмов, применения новых сварочных материалов, активирующих паст, а также в связи с достижениями в конструировании источников сварочного тока, механизмов подачи, систем сварочного и вспомогательного перемещения и т.д.

Источники с импульсными алгоритмами работы, позволяющие управлять переносом электродного металла, уже получили большое распространение и описаны в технической литературе. Использование возможностей механических перемещений подачи электродной проволоки и перемещения электрода и изделия ещё недостаточно широко представлено в технической литературе, хотя, несомненно, такое воздействие может и должно оказывать существенное влияние на дуговой процесс, формирование сварного соединения и наплавленного слоя, расход энергетических и материальных ресурсов, эксплуатационные характеристики узлов и деталей [1, 2].

Известно, что прочность сварного соединения, в том числе и технологическая прочность, в значительной мере определяется структурой шва и участков зоны термического влияния, их протяженностью. Решающее воздействие на размеры этих зон оказывает скорость охлаждения шва. Поэтому изыскание новых возможностей регулирования и контроля скорости охлаждения структур в околошовной зоне представляет определенный теоретический и практический интерес. Кроме этого возможность управлять геометрическими параметрами сварочного шва, в частности шириной и глубиной проплавления, остается немаловажной задачей при проведении наплавочных работ, что позволяет, в том числе, управлять соотношением долей основного и наплавленного металла.

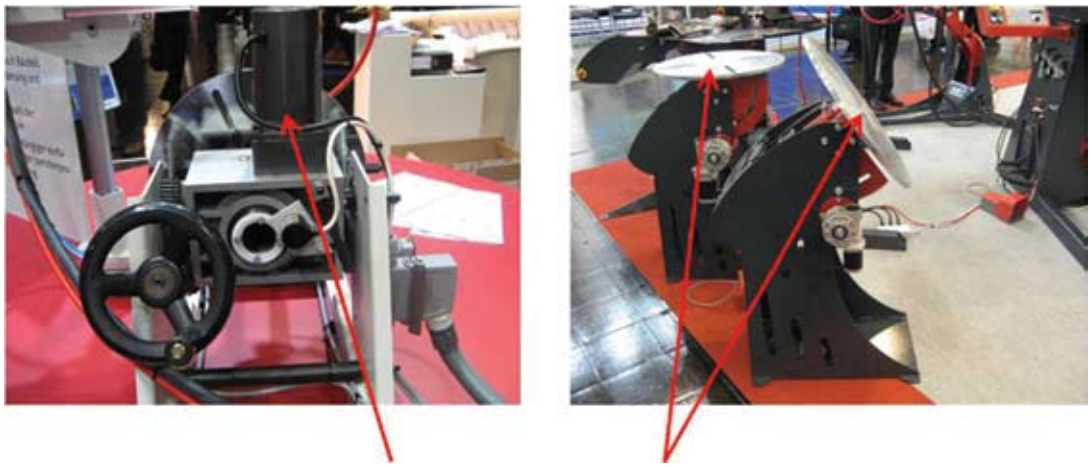
Одним из возможных способов, позволяющих одновременно управлять геометрическими параметрами шва, структурой шва и металла

околошовной зоны, является сварка с введением колебаний низкой частоты в свариваемое изделие в процессе его нагрева и охлаждения. Это дает возможность изменять как направление роста кристаллических структур, так и их величину, что в свою очередь определяет характеристики работоспособности сварного соединения [3].

До недавнего времени решить технически такую задачу было сложно. Придание колебательных движений изделию требовало использования приводов сложной конструкции и высокой себестоимости. С появлением компьютеризованных быстродействующих приводов на базе вентильных электродвигателей специальной разработки, в том числе и безредукторных, и их использование в манипуляторах (рисунок 1) значительно расширило возможности по управлению колебательным движением изделия и, соответственно, сварочной ванны.

На современных манипуляторах можно организовать следующие типы колебаний сварочной ванны:

- в плоскости ведения процесса;
- в плоскости перпендикулярно ведению процесса;
- вдоль плоскости ведения процесса;
- комбинированное воздействие.



1) *2)*

Рисунок 1 *Вентильный электродвигатель привода вращения (1) и наклона (2) планшайбы*

Все эти виды колебаний осуществляются при помощи двух безредукторных вентильных компьютеризованных электроприводов с управляемыми параметрами колебаний.

При колебаниях в плоскости ведения процесса на металл сварочной ванны дополнительно будут воздействовать сила инерции и центробежная сила. Сила инерции будет работать на увеличение ширины валика, влияя на движение расплавленного металла, переходящего с головной части сварочной ванны в хвостовую. С одной стороны, центробежная сила, действуя на расплавленный металл сварочной ванны,

будет увеличивать скорость жидкой прослойки под дугой, что, в свою очередь, увеличит её перемещение в хвостовую часть. Перемещение жидкого металла прослойки в хвостовую часть сварочной ванны приведет к ее утончению, что увеличит глубину проплавления. С другой стороны, центробежная сила будет препятствовать перемещению жидкого металла с головной части ванны в хвостовую, уменьшая его скорость, что в конечном результате приведет к уменьшению глубины проплавления.

При колебаниях в плоскости перпендикулярной ведению процесса (рисунок 2) вылет электрода остается постоянным. Колебания и образовавшиеся от такого рода движения сила инерции и центробежная сила воздействуют на расплавленный металл следующим образом. Если сила инерции будет работать на увеличение ширины валика, то центробежная будет уменьшать вес прослойки жидкого металла и, следовательно, уменьшать силу трения на границе твердой и жидкой фаз, что в конечном результате приводит к незначительному увеличению глубины про-плавления.

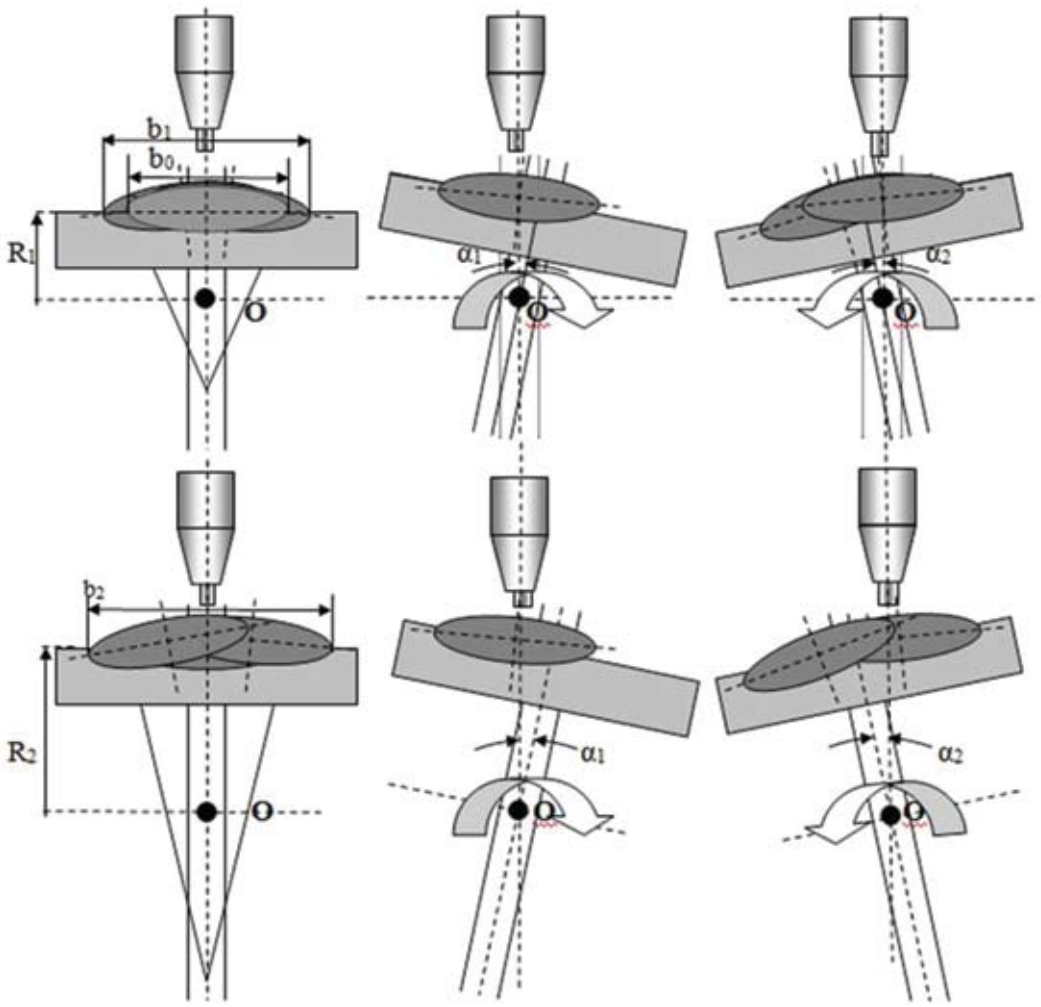


Рисунок 2 *Колебания изделия в плоскости перпендикулярно ведению процесса*

При сварке (наплавке) на спуск (колебание в другую сторону на угол β_2) жидкий металл под действием собственного веса, силы инерции и центробежной силы вытекает в переднюю часть ванны под дугу, вследствие чего глубина провара уменьшается, а ширина шва увеличивается. Чем больше наклон изделия, тем толще жидкая прослойка металла под дугой и тем меньше провар и шире шов.

Совместное использование радиальных колебаний и колебаний план-шайбы, а также осевых (продольных) колебаний и колебаний планшайбы дает возможность усилить действие инерционной и центробежной сил, а также, существенно влиять на геометрические параметры сварного (наплавочного) шва.

Целенаправленное введение колебаний сварочной ванны, кроме управления параметрами сварного соединения (валика наплавленного металла) позволяет изменить, структуру металла шва и околошовной зоны, существенно улучшив её.

Дальнейшим развитием этих работ является объединение в одном процессе нескольких видов механических колебаний: импульсная подача электродной проволоки и колебания сварочной ванны, за счёт различных способов колебаний свариваемого или наплавляемого изделия, объединённых единым заданным алгоритмом управления.

Литература

1. Б.Е. Патон, В.А.,Лебедев, В.Г. Пичак, С.Ю. Полосков. Эволюция систем импульсной подачи проволоки для сварки и наплавки. Сварка и діагностика. 2009. №3, С.46-51.

2. V.A.Lebedev, S.YU. Maksimov Reduction in power consumption and weld quality control in welding using a controllable pulsed feed of electrode wire /International Congress on Advances in Welding Science and Technology for Con-struction, Energy and ansportation Systems (AWST - 2011) 24-25 October 2011, Antalya, Turkey. 371… 373 p.

3. В.А. Лебедев, В.И.. Лендел, И. В. Лендел, В.Г. Пичак Направления совершенствования вспомогательного оборудования для сварочного производства. «Автоматическая сварка» 2010, №11, С.40-43.

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОРПУСОВ МОДУЛЕЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ

И.С. Каширский,
инж.,
В.Е. Баукин,
к.т.н.,
ООО «КРИОТЕРМ»
г. Санкт-Петербург

Для герметизации корпусов теплоэлектрогенераторов из нержавеющей стали с толщиной стенки 0,2 мм разработана технология микроплазменной сварки с применением смеси аргона с водородом (95% Ar +5% H_2).

Теплоэлектрогенераторы производства ООО «Криотерм» используется для различных целей. Их основное назначение:

- утилизации тепла и превращение его в электрическую энергию,
- обеспечение электроэнергией маломощных электрических устройств и электронных блоков,
- катодная защита газопроводных труб,
- преобразование тепла природных источников, например, геотермальной воды в электрическую энергию и др.

Они имеют конструкцию модульного типа, состоящую из генераторных термоэлектрических модулей «Марс», внешний вид одного из которых показан на рисунке 1.

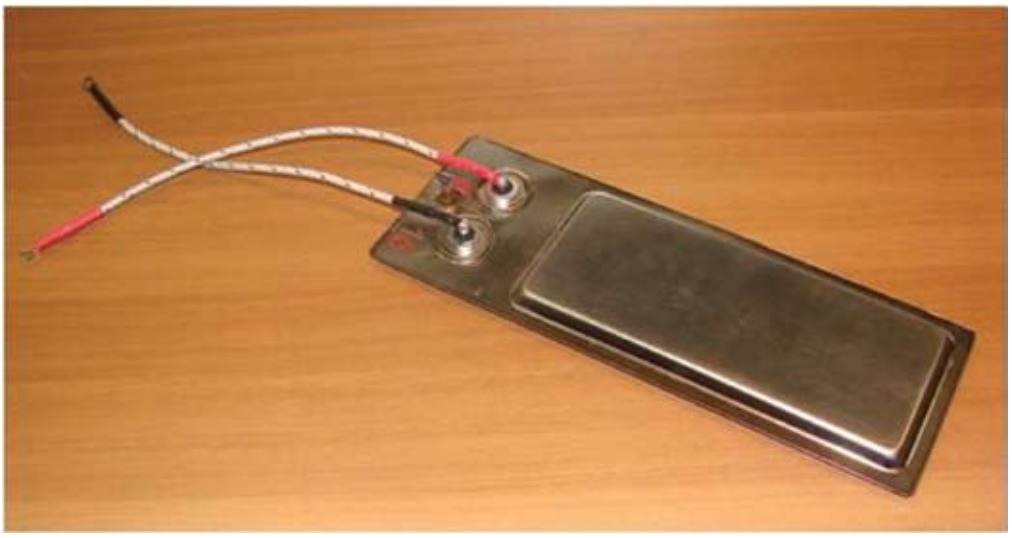


Рисунок 1 *Изделие ГТМ Марс (генераторный термоэлектрический модуль)*

Среднетемпературный генераторный модуль серии Mars вырабатывает более 40 Ватт электрической мощности на разности температур в 425 градусов и предназначен для применения совместно с источником тепла, обеспечивающим температуру нагрева 500º С. Учитывая условия работы, в качестве материала корпуса модуля конструкторами выбрана сталь марки 12Х18Н10Т толщиной 0,2 мм.

До весны текущего года изготовление корпусов производилась на договорной основе сторонним предприятием способом контактной роликовой сварки, что увеличивало себестоимость изготовления модулей, примерно на 20%. Предварительный технико-экономический анализ показал целесообразность организации на предприятии участка для сварки корпусов модулей неплавящимся электродом. Было показано, что в связи с большой серийностью производства модулей, окупаемость затрат обеспечивается в течение года даже в случае приобретения новой сварочной установки. Учитывая наличие на предприятии незадействованной установки для микроплазменной сварки, выгодность перехода на новую технологии была очевидна. Под руководством доцента кафедры сварки СПбГПУ к.т.н. Ермакова С.А. было проверено рабочее состояние установки и выполнены технологические исследования по отработке режимов соединения свариваемых листов внахлест на опытных образцах основного металла. Основные проблемы состояли в обеспечении стабильности формирования соединения на тонком металле, в первую очередь, исключение дефектов типа прожогов и непроваров. Путем создания специализированной оснастки для надежной сборки корпусов, обеспечивающей плотность сжатия деталей в месте сварки, поддержание на заданном уровне рас-стояния от плазмотрона до основного металла и постоянство скорости перемещения плазматрона относительно соединения, удалось достигнуть высокой стабильности режимов сварки, которые представлены в таблице 1. Создание такого приспособления облегчалось небольшим весом модуля (0,9 кг) и удачной конструкцией изделия (шов по периметру изделия в одной плоскости прямоугольной формы с небольшими закруглениями по углам). Причем приспособление сделано так, что исключается необходимость предварительной сборки и постановка прихваток.

Таблица 1 *Режимы сварки*

Материал, свариваемые толщины, мм	Ток, А	Напряжение, В	Скорость сварки, мм/мин	Расход плазмообразующего газа (95% Ar +5% H_2), л/мин	Расход защитного газа (Ar) л/мин
12Х18Н10Т 0,2 + 0,2	3,5	32	25	1,5	3,8

Примечания: диаметр плазмообразующего сопла – 1,0мм;
диаметр защитного сопла – 10мм;
расстояние от плазматрона до изделия – 1мм

Преимущество применения микроплазменной сварки для данной конструкции состоит в том, что на выходе из плазмотрона, выдуваемый факел независимой малоамперной дуги имеет иглоподобную форму, малочувствительную к небольшим колебаниям расстояния до изделия. Этот факел обеспечивает получение узкого шва

и чрезвычайно малые размеры зоны термического влияния. Зажигание и гашение дуги на расстоянии от изделия снимают проблемы при начале и окончании сварки, которые существуют при использовании дуги прямого действия. Появление темного налета на швах при сварке в чистом аргоне было устранено путем выбора в качестве плазмообразующего газа смеси аргона с водородом (95% Ar +5% H_2). Учитывая небольшой расход плазмообразующего газа, переход на смесь практически не сказался на себестоимости изделия. Контроль герметичности соединения производиться гелиевым течеискателем. С первого предъявления сдается не менее 97% изделий. Дефектные корпуса обычно дают течь в месте замыкания шва и легко ремонтируются повторной сваркой.

РОЛЬ САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ В ОБЕСПЕЧЕНИИ КАЧЕСТВА ПРОИЗВОДИМОЙ СВАРНОЙ ПРОДУКЦИИ В РФ

А.В. Кондрон,
Генеральный директор
mail: sro_np@napsp.ru
НП «Национальное Агентство предприятий производителей сварной продукции»
г. Санкт-Петербург

Саморегулируемая организация (СРО) не является только контрольно-надзорным органом для своих членов. Функции контроля и дисциплинарного воздействия на членов, не исполняющих требования стандартов, заложены в самом ФЗ-315 от 01.12.2007 г. (Законе о саморегулируемых организациях). СРО, прежде всего, это импульс к экономическому и техническому развитию предприятий членов СРО, гарант качества произведенной ими продукции перед потребителем и помощник в совершенствовании их профессиональной деятельности.

В последние годы в Российской Федерации вопросы качества произво-димой предприятиями продукции постоянно тревожат ее потребителей и контролирующих организаций. Нарушение технологий, отсутствие квалифицированных кадров, несовершенное техническое регулирование и неисполнение уже действующих законов на местах, сегодня заставляет всех задуматься: «К чему все это приведет?»

Все те же проблемы касаются сварочных производств. Качество производимой сварной продукции просто катастрофично. Эксперты нашей организации (СРО НП «НАПСП») постоянно выезжают на объекты строительства, на заводы-изготовители сварной продукции (к членам нашей организации), как по приглашению генеральных заказчиков, генеральных подрядчиков, так и в, соответствии со стандартами и правилами СРО. При этом они постоянно сталкиваются с фактами несоблюдения предприятиями норм, стандартов, а также со случаями нарушения, или чаще отсутствием технологий на местах. В результате обнаруживается огромное количество различных дефектов, даже критических.

«Минами замедленного действия» называем мы дефекты, допущенные в конструкциях, которые уже сданы в эксплуатацию. Когда «взорвутся» эти мины, при желании можно просчитать. Проблема другая: нам удается предотвращать только малую часть брака. Силами одной СРО, даже при поддержке государственных федеральных органов надзора, охватить все предприятия и все строящиеся объекты довольно сложно. Необходима консолидация всего сварочного сообщества, а главное – необходимо создать единую системы технического регулирования в сварке.

СРО НП «НАПСП» - отличный механизм технического регулирования уровня качества производимой сварной продукции, но это касается уже конечного продукта, т.е. самой сварной продукции. Чтобы ее произвести качественно, необходимо

привести в соответствие все элементы сварочного производства. Это и качество проводимой аттестации, а теперь уже, после принятых изменений в закон о техническом регулировании в РФ, качество сертификации производств, качество основных и вспомогательных материалов для сварки, качество производимого сварочного оборудования.

Все вышеперечисленное должно быть урегулировано поэлементно в тесной связи друг с другом. Это означает, что в сварочном сообществе давно уже назрел вопрос необходимости создания единого Союза, где посредством единой стандартизации, единой системы технического регулирования, обеспечивается качество готовой продукции, а через единые программы развития формируется прогрессивное развитие всего сварочного сообщества. СРО НП «НАПСП» готово вступить в такой Союз, если он будет кем-то создаваться, так как в нашу организацию входят предприятия производители сварной продукции - конечные потребители продукции всех остальных участников сварочного сообщества.

Через технические программы СРО может решаться множество проблем:

- обеспечение предприятий кадрами, повышение уровня их квалификации;
- техническое оснащение сварочных производств необходимым оборудованием;
- обеспечение дополнительными производственными заказами, поступающими от государственных корпораций, предприятий других отраслей промышленности;
- решение социальных проблем, через блок программ – забота о самих людях.

Сварщик – это вредная профессия и, по нашему мнению, необходимо вводить дополнительное социальное и медицинское обеспечение. Для людей, занятых этой ответственной профессией, необходимо создать условия, при которых сама профессия обретет прежде утерянный престиж. К этим условиям относятся: гарантированные рабочие места, достойная зарплата, возможность профессионального роста (обучение, повышение квалификации, учеба в аспирантуре и защита диссертаций), дополнительное медицинское обслуживание (профилактическое лечение, лечение и предотвращение профессиональных заболеваний, санаторно-курортное лечение за счет дополнительного бюджетного финансирования, фондов СРО и работодателей). СРО НП «НАПСП» уже приступило к реализации своих программ. Основной пик их развития нацелен на 2013-2014 годы.

Главной задачей перехода от государственного регулирования к саморегулированию профессиональной деятельности является соблюдение всех правовых норм и самих принципов саморегулирования теми, кто создает СРО. В связи со вступлением России в ВТО, переход на саморегулирование происходит в кратчайшие сроки. И то, что происходило естественным путем во всем мировом профессиональном сообществе, имеется в виду сам процесс перехода, у нас свершается в течение пяти лет. Саморегулирование это наша ценность, которая уже есть, плохая или хорошая, рассудит время, но она уже есть. Задача всех – ее сохранить и приумножить. Поэтому нет смысла ругать тех, у кого не получилось, хвалить тех, кому повезло. Нужно

просто работать, стараться понимать друг друга, оказывать взаимную помощь.

Как уже говорилось, сварочное сообщество – это целый мир, со своими институтами, заводами, стройками, со своими стандартами и правилами. Впрочем, как и другие профессиональные сообщества. Жить в этом мире нужно дружно, в союзе друг с другом, потому что результат труда одного участника сообщества является входящим сырьевым продуктом для другого, и так по цепочке, пока не дойдет до конечного готового продукта сварки. Качество сварки зависит от качества работы всех, кто принимал участия в создании конечного продукта, т.е. от всех участников данной цепи: производители оборудования, материалов и аксессуаров для сварки работают для сварочных производств, органы стандартизации осуществляют свою работу для производителей оборудования, материалов и самих сварочных производств, НИИ разрабатывают новые технологии для всех, выше названных участников сообщества. Это машина, или сложный механизм с обратными связями, в котором все элементы должны быть увязаны друг с другом.

Важно понимать, что СРО не является только контрольно-надзорным органом для своих членов. Функции контроля и дисциплинарного воздействия на членов, не исполняющих требования стандартов, заложены в самом ФЗ-315 от 01.12.2007 г. (Законе о саморегулируемых организациях). СРО, прежде всего, это импульс к экономическому и техническому развитию предприятий членов СРО, гарант качества произведенной ими продукции перед потребителем и помощник в совершенствовании их профессиональной деятельности.

В настоящий момент времени, государственные корпорации вступили с нами в переговоры о создании системы дополнительного контроля качества сварной продукции в той части деятельности, в которой они работают. И нам сейчас, как никогда, потребуется помощь всех членов профессионального сварочного сообщества, в особенности помощь отраслевых институтов.

В конференции присутствуют представители зарубежных сварочных сообществ. Им не безразличны вопросы сотрудничества с российскими профессиональными организациями, вопросы гармонизации стандартов, выполнения совместных научных и промышленных проектов. Мы готовы к такому сотрудничеству. И если предприятия наших зарубежных друзей захотят вступить к нам в СРО НП «НАПСП», то мы готовы к положительному рассмотрению их заявок.

КРАТКИЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

А.В. Малиновский,
технический директор,
НП «Национальное Агентство предприятий производителей сварной продукции
г. Санкт-Петербург
mail: sro_np@napsp.ru

Объединение производителей сварной продукции в СРО по профессиональному признаку через единую систему технического регулирования, целевые программы технической поддержки, через исключение коррупционной составляющей, через бесплатное проведение тендеров среди организаций-членов СРО позволит обеспечить устранение многочисленных недостатков и нарушений при выполнении сварочных работ в строительстве и заводском производстве металлоконструкций.

В связи со сложившейся ситуацией в Российской Федерации при производстве сварочных работ на объектах строительства, монтажа, ремонта и реконструкции независимо от отраслевой принадлежности, а также в связи с отменой лицензий на заводское изготовление металлических конструкций и оборудования отсутствие специалистов сварочного производства, распад института профессионально- технического обучения привлечение к контролю процессов сварки неквалифицированных работников привело к тому, что незнание элементарных требований нормативных и регламентирующих документов, некачественное оформление конструкторской документации и отсутствие требований к сварке в конструкторской документации, некачественное проведение экспертизы проектов, несвоевременное оформление разрешительной и исполнительной документации, некачественная аттестация или отсутствие таковой у производителей сварочных работ вызывает в результате резкое падение качества выполнения сварочных работ, нарушение или незнание требований технологических регламентов.

Нарушение технологии производства сварочных работ и отсутствие знаний сварочных материалов, а зачастую и подмена основных и сварочных материалов в целях экономии из-за недостаточного финансирования конкретных организаций - исполнителей, гонка за снижением себестоимости, отсутствие должного контроля при выполнением процедур, прописанных в нормативных документах, несвоевременная оплата ведут к браку, срывам сроков изготовления продукции с применением сварки и родственных процессов.

Вследствие этого страна встала на грань техногенной катастрофы.

Реальное исправление критической ситуации может быть связано с созданием института саморегулирования . В соответствии с требованиями 315ФЗ исправить ситуацию можно через коллективную ответственность профессиональных СРО перед потребителем.

Институт СРО поможет вывести страну на новый более высокий качественный уровень, но для этого необходимо четкое понимание системы построения института саморегулирования. К сожалению, многие руководители независимо от ранга видят в этом только новый механизм законного выманивания денег.

Основным вопросом саморегулирования является получение высококачественной продукции и повышение ответственности производителя перед потребителем.

Как показала практика, наиболее эффективным, является осуществление освидетельствования сварочного производства при проверке разрешительной документации, представленной организацией - соискателем на соответствие требованиям проекта в момент подготовки к тендеру. Соответственно это позволит наиболее качественно проводить тендеры и исключить из участия в них неподготовленные организации .

Наши эксперты постоянно сталкиваются при проведении процедуры освидетельствования (независимо от отраслевой принадлежности изготавливаемой продукции или строительства объекта) с отсутствием готовности к выполнению работ при получении Заказа. Оформление разрешительной документации производится вдогонку или что хуже всего формально (без проведения необходимых процедур).

Вторым этапом должно быть регулярное освидетельствование самого процесса изготовления той или иной продукции с применением сварки и родственных процессов. Эксперты наших нотифицированных организаций. на ранней стадии изготовления сварной продукции помогают своевременно исправить брак или не допустить его.

Заключительным этапом изготовления (строительства, монтажа, ремонта, реконструкции) является освидетельствование готовой продукции и выдача организации заключения о соответствии сварной продукции (объекта) требованиям проекта и нормативной документации.

Производить процедуры освидетельствования, по нашему убеждению, обязаны только нотифицированные экспертные организации, входящие в состав организаций членов СРО так, как требования 315 ФЗ обусловливают несение СРО имущественной ответственности перед потребителем.

Наиболее часто встречающиеся нарушения, выявленные в процессе освидетельствования сварочных производств:

- низкое качество сварных швов (как заводского, так и монтажного изготовления);
- формальное проведение или отсутствие входного контроля и некачественное (несвоевременное оформление) соответствующей документации;
- отсутствие в проекте требований к сварке или родственным процессам;
- отсутствие разрешительной документации;

- отсутствие Актов передачи строительной площадки от одной организации к другой;
- отсутствие или несоответствие требованиям проекта и нормативной документации необходимой аттестации персонала, технологий, материалов, оборудования;
- отсутствие или неправильное оформление журналов;
- отсутствие приказов об ответственности персонала;
- отсутствие необходимых инструкций и, как следствие, их несоблюдение;
- отсутствие технологий сварки, ППСР (план проведения сварочных работ), КТС (с привязкой к конкретному оборудованию и режимов сварки) и, как следствие, нарушение режимов сварки;
- отсутствие Актов освидетельствования скрытых работ;
- отсутствие проведения процедур контроля качества или неправильное оформление Актов и Заключений о качестве сварных соединений;
- .нарушения требований промышленной безопасности;

Несоблюдение выше перечисленных требований ведет к резкому ухудшению качества, а чаще всего к браку. Именно поэтому объединение организаций в СРО по профессиональному признаку т.е, занимающихся изготовлением продукции с применением сварки и родственных процессов, через единую систему технического регулирования, целевые программы технической поддержки, через исключение коррупционной составляющей, через бесплатное проведение тендеров среди организаций-членов СРО позволит обеспечить устранение выше перечисленных недостатков и нарушений при выполнении сварочных работ в строительстве и заводском производстве металлоконструкций.

Распределение заказов по принципу готовности той или иной организации к качественному выполнению работ поможет вывести страну из сложившейся ситуации.

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ СООТВЕТСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА, КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА, НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ

В.Н. Панин,
Генеральный директор
ОАО ИТЦ «Прометей»
г. Санкт-Петербург,
Вице-президент РНТСО
mail: VNPanin@prometey.ru

Применение на Российских предприятиях стандарта ISO 3834 и сертификационной схемы, разработанной РНТСО, позволит, во-первых, повысить уровень качества, а следовательно, надежность и безопасность конструкций и оборудования за счет применения современных требований в области менеджмента качества, во-вторых, обеспечит международное признание результатов сертификации, а следовательно повысит как имиджевую, так и экономическую составляющую предприятий на Российском и Международных рынках, и, наконец, в-третьих, обеспечит более плавное адаптирование российских предприятий к международным требованиям, это особенно актуально в связи с вступлением России в ВТО.

Надежность и безопасность сварных конструкций и оборудования определяется большой совокупностью факторов [1]. Это: качество основных и сварочных материалов, конструктивные решения сварных соединений, методы расчетов, технологические параметры изготовления и эксплуатации, методы поэтапного и финишного контроля и т.д. (рисунок 1). Каждый из этих факторов может при определенном стечении обстоятельств привести к резкому снижению ресурса конструкции или оборудования, а в ряде случаев, к их катастрофическому разрушению. Одним из основных направлений повышения качества и надежности сварных конструкций и оборудования в мировой практике является подтверждение соответствия (сертификация) этого продукта требованиям современных стандартов, а также применение соответствующих схем подтверждений (сертификации), учитывающих сварочный процесс как «специальный» процесс. [2÷5].

Что касается преодоления таможенных барьеров на пути продвижения товаров и услуг на международные рынки, то при решении этого вопроса мировая практика также базируется на применении единых международных норм (стандартов) и соответствующих признанных мировым сообществом схем подтверждения (сертификации) соответствия этим стандартам.

В соответствии с Законом «О техническом регулировании» подтверждение соответствия осуществляется в целях:

- хранения, перевозки, реализации и утилизации, работ, услуг или иных объектов техническим регламентам, стандартам, сводам правил, условиям договора;

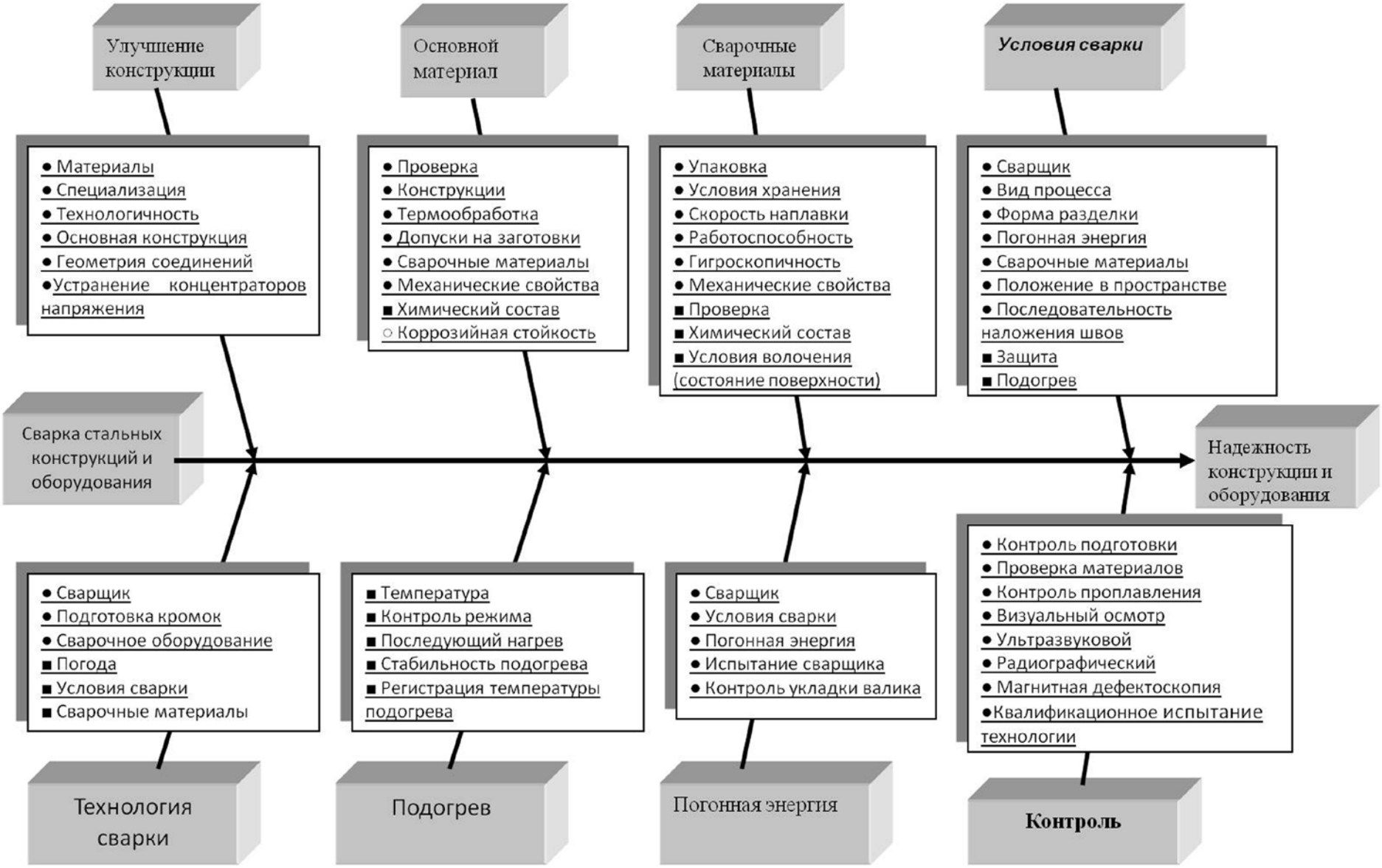


Рисунок 1 *Схема обеспечения надежности сварных конструкций и оборудования*

- содействия приобретателям в компетентном выборе продукции, работ, услуг;
- повышения конкурентоспособности продукции, работ, услуг на российском и международном рынках;
- создания условий для обеспечения свободного перемещения товаров по территории Российской Федерации, а также для осуществления международного экономического, научно-технического сотрудничества и международной торговли.

Указанный выше Закон разделяет подтверждение соответствия на обязательное и добровольное. Первое – посредством обязательной сертификации, либо декларирования, второе - посредством добровольной сертификации. При этом обязательной сертификации подлежит только конечная продукция, и все требования к ней, а также требования к процедурам обязательной сертификации или декларированию, прописываются в техническом регламенте. Добровольной сертификации подлежат, кроме продукции, процессы эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации, работы и услуги и иные объекты, в отношении которых стандартами, системами добровольной сертификации и договорами устанавливаются требования.

Применяемые в настоящее время добровольные системы сертификации сварочных производств (Речной и Морской Регистры, НАКС и др.) являются в основном корпоративными, отражают интересы отдельных ведомств и являются для них, по существу, обязательными. Отмеченные выше сертификационные системы не охватывают всего перечня объектов сертификации сварочного производства (исходя из требований ISO 3834) [6], а базируются только на его отдельных элементах, например, Морской и Речной Регистры охватывают только сварочные материалы и персонал; У НАКСа полностью отсутствует такой объект сертификации как «Менеджмент качества» в соответствии с ISO 3834, что в целом снижает надежность оценки качества готовой продукции.

Что касается зарубежных систем сертификации, таких как: Lloyd’s Register, Veritas, DNV и других, то они, также как и отечественные системы, производят оценку соответствия только отдельных объектов сварочного производства. Наиболее распространенной системой оценки соответствия как в отечественной, так и в зарубежной практике является система, базирующаяся на требованиях стандарта ISO 9001 (или ГОСТ Р ISO 9001). Однако требования этого стандарта относятся, во-первых, только к одному объекту (хотя и очень важному), а именно, системе менеджмента качества, и, во-вторых, они не учитывают специфику сварочного процесса как «специального».

Гарантированная надежность и работоспособность сварной конструкции и оборудования может быть обеспечена только поэтапным контролем по всему жизненному циклу создания продукта. Данная задача решается путем выполнения требований ISO 3834 «Требования к системе качества при сварке металлов плавлением» в соответствии с выбранным уровнем системы качества и внедрения системы менеджмента качества.

Учитывая изложенное, и во исполнение Закона «О техническом регулировании», Российским научно-техническим сварочным обществом (РНТСО) разработана система добровольной сертификации объектов сварочного производства

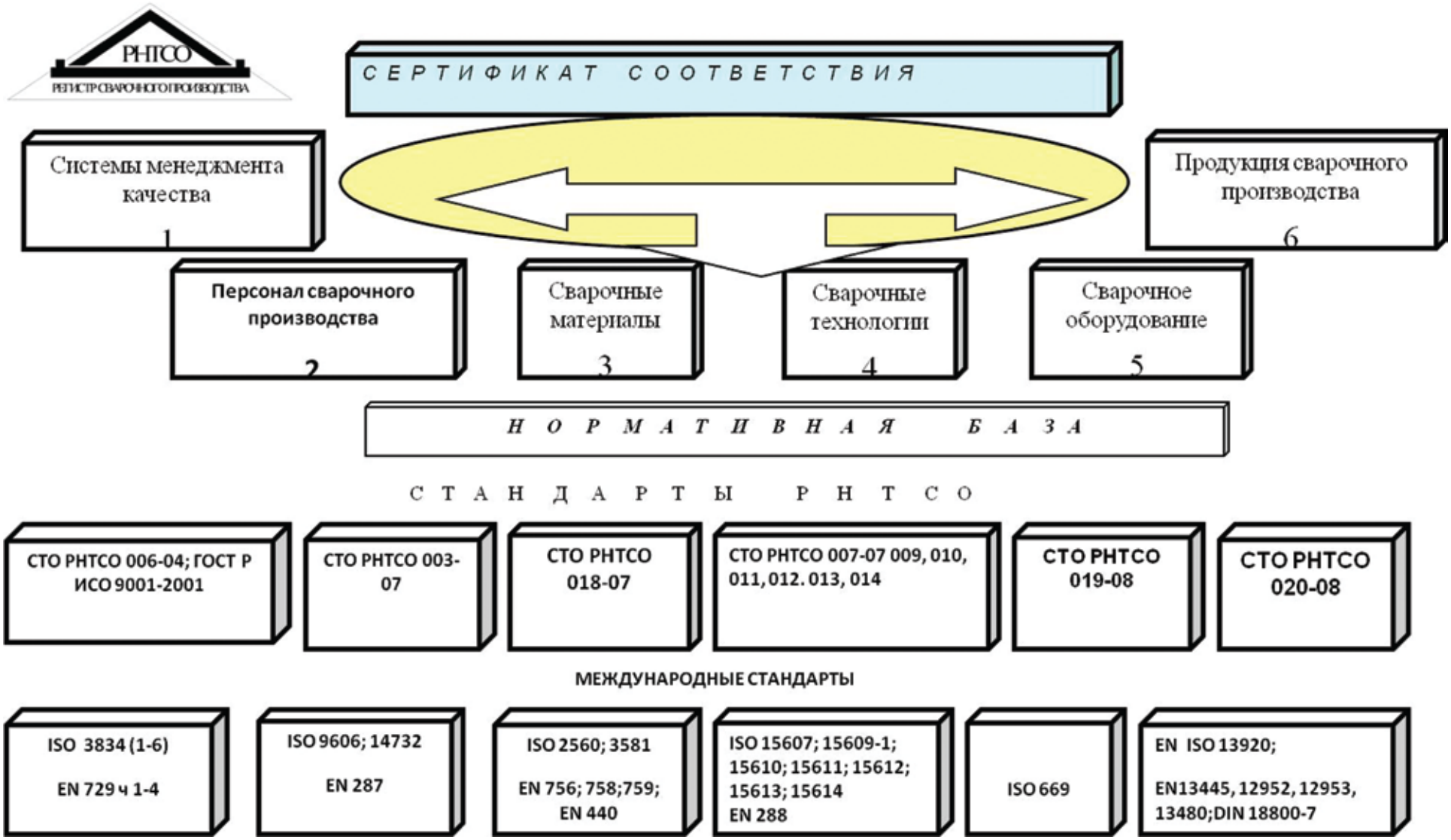


Рисунок 2 *Система добровольной сертификации сварочных производств (Регистр СП РНТСО)*

(Регистр СП РНТСО) (рисунок 2). Она зарегистрирована в Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии, регистрационный номер РОСС. RU.3383.04EA00 от 15.12.2006 г. В основу этой сертификационной системы положены критерии, приведенные на рисунке 3.

Учитывая, что в соответствии со стандартом ISO 9001 сварка относится к «специальным процессам», разработчики распространили действие системы на сертификацию всех основных элементов сварочного процесса - систем менеджмента качества, персонала, материалов, технологий, оборудования, конечной продукции сварочного производства.

Нормативная база системы представлена современными национальными стандартами и стандартами РНТСО, гармонизированными с международными

Рисунок 3 *Основные критерии Регистра СП РНТСО*

и европейскими аналогами и содержащими технические требования к перечисленным объектам сертификации.

Предлагаемая система добровольной сертификации органически встраивается в общую схему исполнения Закона «О техническом регулировании» при подтверждении соответствия продукции, безопасность которой определяется процессами сварки, как по духу (добровольная), так и по содержанию (в соответствии с требованиями международных стандартов).

С появлением этой системы у отечественного производителя появляется воз-

можность сравнения (в том числе с учетом зарубежного опыта) и выбора наиболее приемлемой системы сертификации для оценки соответствия своей продукции и других объектов требованиям современных стандартов.

Международным институтом сварки (IIW) и Европейской федерацией по сварке (EWS) разработана международная система сертификации сварочных производств (MCS IIW ISO 3834), учитывающая сварочный процесс как «специальный» процесс.

Выбор уровня качества сварного изделия (Часть 1 ISO 3834) и применение соответствующих требований к качеству, т.е. частей 2, 3 или 4 стандарта ISO 3834, зависит, во-первых, от условий, указанных в контракте на конкретное изделие, и, во-вторых, от степени надежности и безопасности этого изделия.

Международная система сертификации MCS IIW ISO 3834 имеет существенные преимущества: во-первых, единые правила, базирующиеся на современных европейских и международных стандартах, и, во-вторых, взаимное признание результатов сертификации, в какой бы стране она не проходила.

Последнее достигается путем назначения одной организации, действующей от имени IIW, в каждой стране. Эта организация известна как Уполномоченный национальный орган сертификации предприятий (ANBCC). Компетенция ANBCC подтверждается регулярными аудитами с привлечением ведущих экспертов IIW.

Роль ANBCC состоит в том, чтобы действовать от имени IIW в отношении сертификации компании, включая: проведение сертификации компании (либо напрямую, либо через национальные аккредитованные сертификационные органы); квалификацию аудиторов ANBCC; выдачу сертификатов IIW; запись всей необходимой информации во время процесса сертификации.

Руководство ANBCC как полномочного представителя IIW на территории страны осуществляет Менеджер схемы, являясь одновременно представителем РФ в рабочей группе Международного авторизованного органа МИСа (IAB IIW).

В марте 2011 года успешно завершен финишный этап международного аудита, а в июле, во время заседания Генеральной Ассамблеи и Международного конгресса МИСа в Чиннаи (Индия), осуществлено утверждение Российского уполномоченного национального органа сертификации компаний (ANBCC) с полномочиями IIW. Структура этого органа приведена на рис. 4.

Применение стандарта ISO 3834 и указанной выше сертификационной схемы на Российских предприятиях позволит, во-первых, повысить уровень качества, а следовательно, надежность и безопасность конструкций и оборудования за счет применения современных требований в области менеджмента качества, во-вторых, обеспечит международное признание результатов сертификации, а следовательно повысит как имиджевую, так и экономическую составляющую предприятий на Российском и Международных рынках, и, наконец, в-третьих, обеспечит более плавное адаптирование российских предприятий к международным требованиям, это особенно актуально в связи с вступлением России в ВТО.

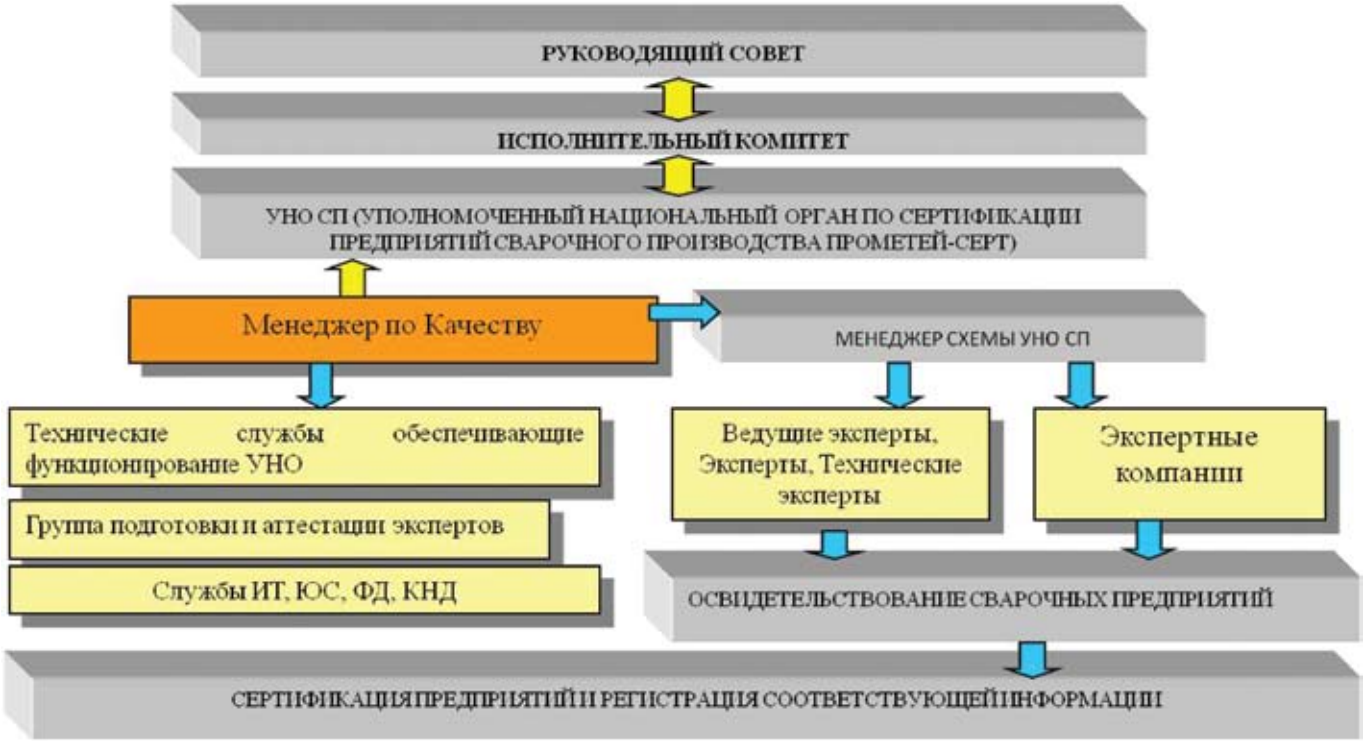


Рисунок 4 *Структура Российского Уполномоченного органа сертификации компаний (ANBCC)*

Литература

1. Прохоров Н.Н. Состояние и перспективы развития теории прочности сварных конструкций как основы повышения их качества. «Сварочное производство», № 2, 1977г.
2. ISO 9001:2008 Система качества – модель обеспечения качества при проектировании, разработке, производстве, испытании и обслуживании.
3. Панин В.Н. Обеспечение надежности сварных конструкций и оборудования – европейские подходы. «Вестник военного регистра», № 2, 2006г.
4. Панин В.Н. Сертификация сварочного производства как гарантия качества конечной продукции. «Вестник качества», № 10, 2006г.
5. Панин В.Н. Сертификация сварочного производства. «Сварочное производство», №3, 2012г.
6. ISO 3834 (Часть 1÷6) «Требования к качеству сварки – сварке металлических изделий плавлением».

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСОВ СТАНДАРТИЗАЦИИ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

К.А. Ганусов,
к.т.н.,
НП «НАЦПРОМСВАР»
г. Москва

И.Е. Сабуров,
к.т.н.,
П.Е. Звездин,
инж.
ООО АЦ «Сплав»,
г. Иваново

Приведен анализ работ по стандартизации сварочных материалов, показаны новые возможности и конкретные меры по совершенствованию этих работ

1. Состояние вопроса

Существует настоятельная необходимость в реорганизации и систематизации деятельности по стандартизации сварочных материалов и оборудования, т.к. в текущий период времени отсутствуют отлаженные механизмы взаимодействия всех участников стандартизации в области сварочного производства, позволяющие действовать достаточно профессионально и при этом максимально эффективно, как того требует состояние экономики РФ и уровень задач стоящих перед сварочным сообществом.

В данной статье раскрываются основные недостатки работ по международной стандартизации и обозначаются пути по налаживанию взаимодействия всех участников стандартизации в области сварочного производства, позволяющие действовать достаточно профессионально и при этом максимально эффективно, как того требует состояние экономики РФ и уровень задач, стоящих перед сварочным сообществом.

По линии Росстандарта в рамках технического комитета ТК-364 «Сварка и родственные процессы», работу которого координирует НАКС, проводился существенный и постоянно нарастающий объем работ, связанных с национальной и международной стандартизацией. К этим работам в основном относятся:

- переводы международных стандартов ИСО, ЕН, МЭК и создание на их основе национальных стандартов (идентичных или модифицированных);
- участие в обсуждении и утверждении путем голосования вновь создаваемых или пересматриваемых стандартов в рамках комитетов и подкомитетов международных организаций по стандартизации ИСО и МЭК.
- пересмотр действующих и создание новых национальных стандартов.

Естественно, что эта деятельность направлена не только на решение задач самого

НАКС, но и в немалой степени способствует решению важнейшей проблемы развития промышленного сектора экономики РФ, в котором сварка занимает одно из ведущих мест. Все понимают, что эту деятельность в обязательном порядке необходимо и в дальнейшем поддерживать и развивать.

Однако нынешние экономические условия требуют добиваться наиболее эффективного использования ресурсов (кадровых, финансовых и др.), имеющихся в сварочном сообществе или выделяемых со стороны государственных органов для этих целей. Это, пожалуй, единственный путь, как сохранить эту деятельность на фоне того, что ряд организаций, традиционно участвовавших в работах по стандартизации, в настоящее время по объективным причинам испытывают финансовые трудности.

При этом предварительный анализ работ, проводимых за последние годы по указанным направлениям, показывает, что только за счет организационных мер можно существенно повысить отдачу и эффективность этих работ и сократить время на воплощение в жизнь многих важных проектов.

В настоящее время существует настоятельная необходимость в реорганизации и систематизации данной деятельности, т.к. еще не отлажены механизмы взаимодействия всех участников стандартизации в области сварочного производства, позволяющие действовать достаточно профессионально и при этом максимально эффективно, как того требует состояние экономики РФ и уровень задач, стоящих перед сварочным сообществом.

Особенно много проблем возникает при переводе международных стандартов ИСО, МЭК и ЕН и создание на их основе национальных стандартов.

2. Основные недостатки работ по стандартизации

Практика работы с международными стандартами показала, что они имеют свой стиль изложения и свою, давно сложившуюся среди специалистов различных стран входящих в комитеты ИСО, систему понятий, терминов, определений, которые имеют неоднозначную трактовку при попытке переложить их на терминологию, сложившуюся как в целом в Российской системе стандартизации, так и, в частности, в сварочном производстве среди инженеров и ученых сварщиков.

При этом переводы стандартов в настоящее время выполняются разрозненными и изолированными друг от друга группами специалистов, что приводит к ряду негативных последствий.

К недостаткам работ выполняемых в этом направлениям можно отнести следующее:

- отсутствует единый методологический подход к созданию гармонизированных стандартов, т.е. при создании стандартов не проводится адаптация изложенных в них положений к существующей в РФ системе стандартов, охватывающей производство сварных конструкций, сварочных материалов, оборудования и неразрывно связанных с этим производством процессов контроля, испытаний, исследований свойств и характеристик производимой продукции;

- при переводе стандартов отсутствует комплексный подход, т.е., например, при

переводе серии стандартов на сварочные материалы остаются в стороне стандарты на методы и методики проведения контроля испытаний их параметров, свойств и характеристик;

- отсутствует система обучения, стажировки, повышения квалификации специалистов, участвующих в переводах стандартов, что не позволяет добиться необходимого для выполнения таких задач профессионального уровня исполнителей, что может привести к дискредитации всей деятельности по международной стандартизации.

Как следствие, часть переводов международных стандартов, выполненных различными организациями по заказу Росстандарта, не соответствуют установленным требованиям, как по качеству самих переводов, так и по технической сути излагаемых вопросов.

Другим важным вопросом, по которому пока нет решения, является достижение максимальной отдачи от деятельности по стандартизации для ее участников.

Работа по международной стандартизации должна быть построена таким образом, чтобы предпринимаемые усилия имели инвестиционный характер, т.е. результаты этой деятельности должны не только способствовать решению общих проблем развития сварочного производства, но и должны быть нацелены на получение экономического эффекта для организаций участвующих в стандартизации и, в конечном итоге, должны окупаться.

Как показала практика, данный вопрос достаточно сложен и требует выработки ряда системных мер. Однако в настоящее время деятельности по международной стандартизации не формализована в виде реального бизнес-плана действий и не подкреплена соответствующим администрированием. Недостаточная координация действий в этом направлении имеет ряд негативных последствий и уже сейчас приводит к упущенной выгоде по многим направлениям.

В частности, отсутствие комплексного подхода при переводе стандартов не позволяет использовать уже переведенные и утвержденные стандарты на сварочные материалы и оборудование для проведения их оценки соответствия.

Работа небольшой группы экспертов НАКС и других организаций в качестве членов подкомитетов международных организаций ИСО и МЭК показала, что здесь требуется срочное подключение более широкого круга специалистов - представителей отраслевых сообществ, действующих в области сварочного производства с введением соответствующих координирующих действий.

3. Новые возможности в развитии отраслевой стандартизации

Современное законодательство РФ позволяет любым субъектам предпринимательской деятельности, объединенным в саморегулируемую организацию, эффективно использовать установленную государством нормативно-правовую базу для создания механизма самостоятельного отраслевого регулирования и надзора своей деятельности путем гармоничного взаимодействия систем технического регулирования и саморегулирования в соответствии с Федеральными законами «О саморегулируемых организациях» и «О техническом регулировании».

В соответствии с этим законом «О саморегулируемых организациях» разработка стандартов в пределах своей области деятельности должна быть основной задачей СРО.

В частности, в статье 2. п.1. данного закона сказано, что «Под саморегулированием понимается самостоятельная и инициативная деятельность, которая осуществляется субъектами предпринимательской или профессиональной деятельности и содержанием которой являются разработка и установление стандартов и правил указанной деятельности, а также контроль за соблюдением требований указанных стандартов и правил».

В действующем законодательстве определено, что некоммерческая организация, имеющая специфический статус саморегулируемой организации, должна осуществлять свою деятельность не только в интересах своих членов, но и в интересах гораздо более широкого круга лиц (клиентов, инвесторов, потребителей), и наделяется правом на отраслевое нормотворчество (техническое регулирование через стандартизацию) в отношении своих участников и под их материальную ответственность за результаты своей деятельности.

При осуществлении своей деятельности по стандартизации организация, имеющая статус саморегулируемой организации, является, с одной стороны, представителем и выразителем интересов своих членов перед государством, с другой – квалифицированным агентом государственно-общественных интересов в среде профессиональных участников определенного рынка товаров (работ, услуг).

В частности, в СРО НП «НАЦПРОМСВАР» имеются организационные структуры ответственные за техническое регулирование всех вопросов, относящихся к предмету деятельности членов организации, в том числе, связанных с процессами международной стандартизации и созданием собственных стандартов и правил. К этим организационным структурам относятся: Президиум НП, Технический Комитет по сварочным материалам (ТК-СМ), Технический Комитет по сварочному оборудованию (ТК-СО), информационно-аналитический отдел при Исполнительной дирекции. На данные структурные подразделения, в части ведения деятельности по стандартизации, возлагаются следующие функции:

- координация деятельности членов НП по переводам международных стандартов ИСО, ЕН, МЭК и создание на их основе идентичных или модифицированных национальных стандартов на продукцию членов НП;

- участие в создании единых терминологических словарей (глоссариев), позволяющих оптимизировать и унифицировать процесс выполнения переводов стандартов и их редактирование для всех групп специалистов, занимающихся техническими переводами стандартов;

- участие в разработке и модернизации национальных стандартов и сводов правил, применяемых всеми субъектами предпринимательской деятельности в сфере сварочного производства, направленных на выполнение требований технических регламентов;

- создание унифицированных процедур оценки (подтверждения) соответствия продукции за счет гармонизации национальных и отраслевых нормативных доку-

ментов в области оценки соответствия с международными стандартами;

- участие в разработке и совершенствовании системы собственных стандартов и правил.

Дальнейшая деятельность СРО НП «НАЦПРОМСВАР» по стандартизации нацелена на обеспечение максимально эффективного использования творческого и профессионального потенциала лиц, осуществляющих предпринимательскую деятельность в сфере производства сварочных материалов и оборудования для создания комплекса базовых, документально оформленных требований к этому производству.

Стандарты, разрабатываемые силами данной организации, помимо решения важных задач развития отрасли и создания собственной нормативно-правовой базы документов, необходимых для выполнения функций саморегулирования в заданной области, должны быть направлены также и на эффективное развитие системы сертификации и аттестации сварочного производства.

Работу по международной стандартизации необходимо вести в таком ключе, чтобы принятие в качестве национальных стандартов документов других стран, регионов и т.п. проходило преимущественно по линии адаптации к условиям РФ с учетом имеющихся наработок и достижений системы стандартизации в области сварочного производства.

ОПТИМИЗАЦИЯ ОТРАСЛЕВЫХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДСТВА СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

К.А. Ганусов,
к.т.н.,
НП «НАЦПРОМСВАР»
г. Москва

С.В. Кузьмин,
инж.,
П.Е. Звездин,
инж.,
ООО АЦ «Сплав»,
г. Иваново

Приведены результаты анализа отраслевых нормативных документов, устанавливающих требования к сварочным материалам, и пути оптимизации отраслевых систем технического регулирования

1 Состояние базы нормативных документов

В соответствии с Федеральным законом «О техническом регулировании» под техническим регулированием, осуществляемым уполномоченными федеральными органами исполнительной власти, понимается «правовое регулирование отношений в области установления, применения и исполнения обязательных требований к продукции», а также «правовое регулирование отношений в области оценки соответствия».

Как указано в этом же законе, эти требования может устанавливать только технический регламент - «документ, который … устанавливает обязательные для применения и исполнения требования к объектам технического регулирования (продукции или к продукции и связанным с требованиями к продукции процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации».

Однако в РФ до настоящего времени действуют, сложившиеся еще в советское время, достаточно жесткие отраслевые системы технического регулирования. В рамках каждой из этих систем существует большое количество отраслевых нормативных документов, устанавливающих детальные требования к качественным показателям и техническим параметрам сварочных материалов. Эти требования разрабатывались множеством отраслевых или ведомственных организаций (ведущими, научно-исследовательскими, материаловедческими др.), исходя из каких-либо особенностей эксплуатации конкретных сварных конструкций.

В результате образовалось множество отдельных сводов нормативных документов (НД), в частности, по следующим направлениям деятельности:

- технические устройства, применяемые на опасных производственных объектах, подконтрольных Ростехнадзору (восемь разных групп технических устройств);
- объекты использования атомной энергии;
- магистральные трубопроводы для транспортировки газа (объекты ОАО Газпром);
- магистральные трубопроводы для транспортировки нефти и нефтепродуктов (объекты ОАО «АК «Транснефть»);
- мостовые конструкции;
- морской и речной регистр;
- строительные объекты.

Основными пользователями этих сводов НД в настоящее время являются:

- организации, выполняющие работы по проектированию, изготовлению, монтажу различных технических устройств, а также строительству, реконструкции или ремонту различных сооружений,
- органы по оценке соответствия (ООС), действующие в области сварочного производства;
- предприятия-производители сварочных материалов.

Первый круг пользователей НД является наиболее широким и для них эти документы являются непосредственным руководством к действию при выполнении соответствующих работ.

Предприятия - производители сварочных материалов обязаны использовать эти документы при разработке технических условий и стандартов организаций (ТУ и СТО) на выпускаемую ими продукцию, в случае если эта продукция используется для изготовления соответствующих технических устройств. Эти же документы используются для процедур оценки соответствия, проводимых различными ООС, действующими в соответствующих системах сертификации или аттестации.

По каждому из указанных направлений деятельности существует свои обязательные к исполнению требования к сварке и контролю, которые не гармонизированы между собой и требуют проведения оценки соответствия по отдельным группам документов или даже по отдельным, не признаваемым друг другом, системам оценки соответствия. Причем, по данным зарубежных производителей, такая степень дробления частных требований и внутригосударственных систем оценки соответствия существует только в РФ.

Для производителей сварочных материалов и потребителей их продукции это означает многократное дублирование испытаний и исследований продукции со стороны разных органов оценки соответствия и неоправданно большая доля затрат на эти цели в себестоимости продукции.

При этом существующее состояние базы НД, действующих в этих сферах, вызывает много нареканий и вопросов среди ее пользователей, т.е. среди специалистов различных отраслей промышленности причастных к сварке и изготовлению продукции для сварочного производства.

Все они практически ежедневно сталкиваются с проблемами идентификации (общепризнанной для всех участников этих работ), как самих НД, так и содержащихся

в них норм и методов оценки (подтверждения) качества, на соответствие которым необходимо проводить оценку соответствия всех элементов сварочного производства.

Многолетний опыт применения НД и их анализ с точки зрения полноты содержащихся в них сведений, легитимности (правомерности) их применения для определенных технических устройств, однозначности в определении области их применения, сложившегося порядка замены и/или отмены определенных документов и по ряду других критериев, выявил ряд серьезных проблем, которые нельзя оставлять без внимания.

К основным проблемам относятся:

- большинство НД содержат явно устаревшие сведения о применяемых технологических процессах сварки, основных и сварочных материалах, способах сварки и т.д., что неизбежно тормозит развитие промышленного производства, либо вынуждает предприятия на выход за рамки, обозначенные в НД, что является, по сути, нарушением действующего отраслевого законодательства;
- существующие системы введения новых сварочных материалов в отраслевые НД изобилуют избыточными и дублирующими процедурами и откровенно нацелены на извлечение дополнительной прибыли для определенных отраслевых структур;
- отсутствует системный подход в обновлении базы НД, т.к. этим вопросам неконтролируемо и хаотично занимаются отдельные отрасли, ведомства или даже предприятия, что неизбежно приводит к потере некоторых важных данных, дублированию информации, появлению противоречивых данных о нормах оценки качества сварных соединений;
- нормы оценки качества и соответствующие им методики проведения контроля, испытаний и исследований продукции сварочного производства, содержащиеся в различных НД, не систематизированы с точки зрения унификации процедур проведения оценки соответствия;
- отсутствует координация действий между различными организациями, ответственными за введение изменений в действующие или издание новых НД, что приводит к явному отставанию нормативной базы от современного уровня развития мировой науки и техники, относящейся к сварке и другим родственным технологиям.

Естественным выходом из этой ситуации является перенесение всех отраслевых требований (в обобщенном виде) в соответствующие технические регламенты, и тогда они станут едиными обязательными требованиями федерального уровня. Однако этот путь потребует достаточно много времени. Поэтому для скорейшего налаживания нормальной работы в переходный период (до введения в действия всех запланированных технических регламентов) необходимо систематизировать отраслевые базы НД, выделить общие критерии оценки соответствия и ввести по этим критериям взаимное признание документов, подтверждающих соответствие продукции, между всеми отраслевыми системами технического регулирования.

2 Новые возможности в развитии системы нормативных документов

Определенные надежды на положительный сдвиг в указанных выше проблемах, связаны с изменением действующего законодательства РФ в области саморегулирования предпринимательской деятельности в различных областях и отраслях национальной экономики. В частности, в области сварочного производства действуют уже три саморегулируемые организации (СРО) – НП НАКС (органы оценки соответствия в области сварочного производства), НП НАПСП (производители сварной продукции) и НП «НАЦПРОМСВАР» (производители продукции для сварки). Именно эти организации максимально заинтересованы в оптимизации отраслевых систем технического регулирования и имеют возможность выполнить эту работу, так как в них сконцентрированы все необходимые кадровые и организационные ресурсы.

Назначение этих СРО состоит в координации деятельности своих членов на основе добровольно принятой ими системы обязательств, базирующихся на соблюдении принципов саморегулирования установленных Федеральным законом № 315-ФЗ «О саморегулируемых организациях».

В частности внутренними документами НП «НАЦПРОМСВАР» установлено, что, при осуществлении деятельности в данном качестве, эта организация должна:

- иметь собственную нормативную базу для создания механизма передачи прав на самостоятельное регулирование и надзор своей деятельности (в т. ч. передачу властных функций в области регулирования) на основе взаимодействия систем технического регулирования и саморегулирования;
- организовывать и вести деятельность по отраслевому нормотворчеству (техническому регулированию) в отношении своих участников и под материальную ответственность за результаты их деятельности;
- иметь комплекс базовых, документально оформленных требований к производству товаров (работ, услуг), используемых в сварочном производстве, которые в совокупности должны обеспечивать уровень качества и надежности продукции, соответствующий требованиям потребителей и законодательно установленным критериям безопасности.

Таким образом, прямой обязанностью НП «НАЦПРОМСВАР» является разработка для своих членов максимально унифицированной системы нормативных документов, содержащих обязательные требования к изготовлению, контролю, испытаниям и проведению оценки соответствия продукции для любых областей деятельности и секторов экономики, в т. ч. имеющих собственную обязательную систему оценки соответствия и в сфере добровольной сертификации.

3 Деятельность по систематизации нормативных документов

Для организации конкретных работ в данном направлении в НП «НАЦПРОМСВАР» в начале 2012 г. создано специальное структурное подразделение – «информационно-аналитический отдел», одной из функций которого является систематизация всей доступной документации, относящейся ко всем отраслевым системам технического регулирования, в том числе к объектам, подконтрольным

Ростехнадзору, и на основании которой создается производственно-технологическая документация (ТУ, СТО и др.) на изготовление и контроль сварочных материалов.

Задача данного подразделения состоит в постоянном мониторинге базы данных НД, заключающемся в сопровождении, обновлении, актуализации, выдаче технических отчетов по запросам заинтересованных организаций, а также выполнении других функций, касающихся НД.

На первом этапе работ организован постоянный мониторинг отраслевых баз НД, заключающийся в их сопровождении, обновлении и актуализации, выдаче технических отчетов по запросам членов НП и других заинтересованных организаций.

На втором этапе планируется систематизировать имеющуюся информацию и разработать собственные базы специальных данных по следующим направлениям:

- нормы оценки качества сварных соединений и наплавок для всех технических устройств и видов контроля;
- методики проведения контроля, испытаний, исследований сварочных материалов и оборудования, а также выполняемых при их оценке соответствия контрольных швов и наплавок, применительно ко всем видам свариваемых металлов и сплавов;
- методики проведения контроля и испытаний сварочного оборудования;
- применяемость всех видов сварочных материалов в технологических процессах сварки при изготовлении различных технических устройств.

Указанная база данных, в дальнейшем может быть предложена в качестве основы или составной части единой базы данных для всех участников сварочного производства.

Далее на третьем этапе работ, на основе систематизированной базы данных, будет проведена работа по следующим направлениям:

- координация действий по нормативному обеспечению процедур оценки соответствия сварочных материалов и оборудования с учетом обеспечения максимального единства методик и норм оценки качества, используемых для этих процедур;
- разработка предложений по совершенствованию и оптимизации существующих в РФ систем оценки соответствия сварочных материалов и оборудования на основе имеющегося опыта работы и с учетом требований международных стандартов и систем сертификации;
- разработка единой политики по взаимодействию членов НП «НАЦПРОМСВАР» с отраслевыми и ведущими научно-исследовательскими организациями по вопросам установления ими специальных отраслевых требований к сварочным материалам и оборудованию, а также установления адекватных механизмов и способов подтверждения соответствия этим требованиям.

Данная работа крайне необходима для производителей сварочных материалов и, скорее всего, будет востребована всеми участниками сварочного производства.

Со стороны НП «НАЦПРОМСВАР» по данному направлению планируется активизация действий в доведении своих требований и пожеланий до других участников сварочного производства за счет организации конструктивного диалога и учета интересов всех сторон.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ***С.А. Болкисев***
ОБРАЩЕНИЕ ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА ОАО «ЦНИИМ» К УЧАСТНИКАМ КОНФЕРЕНЦИИ «СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ - 2012» 3

2. ***В.Б. Вихман***
СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ УОНИ-13 - ВЫДАЮЩЕЕСЯ СОБЫТИЕ В ИСТОРИИ РАЗРАБОТКИ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ 4

3. ***И.В. Горынин, В.А. Малышевский, Ю.Д.Брусницын, В.Т. Калинников, А.И. Николаев, Ю.В. Аввакумов, А.Н. Быков,***
ГИДРОКСИДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ПОКРЫТИЯХ СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ 59

4. ***З.А. Сидлин***
ОТДЕЛИМОСТЬ ШЛАКА ОТ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ШВА ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ. 74

5. ***Ю.Д. Брусницын, Д.А. Кащенко,***
К КОНЦЕПЦИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ 82

6. ***И.М. Ливший***
О ПРОБЛЕМАХ ПРОИЗВОДСТВА СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ 94

7. ***А.М. Левченко, Ю.Н. Кручинин***
ПОРЯДОК АТТЕСТАЦИИ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМЕ САСВ РОСТЕХНАДЗОРА 100

8. ***З.А. Сидлин***
ВЫБОР ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ СПЛАВА ЭП 937 ВИ (ХН40МДБ) 108

9. ***Ю.М. Белов, Ю.Б. Семендяев, С.Н. Фролов,***
ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА ЮРИЯ МИХАЙЛОВИЧА БЕЛОВА 115
ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЙ БЕСКОБАЛЬТОВЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ И СКОЛЬЗЯЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАПОРНОЙ И РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АРМАТУРЫ, РАБОТАЮЩЕЙ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ДО 650°С 118

10. ***Л.Б. Тихонова***
ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА ЮРИЯ МИХАЙЛОВИЧА БЕЛОВА 123

11. ***Н.В. Александров, С.Н. Курта, Н.В. Вовченко, С.И. Шекин, А.А. Круглова***
ОТРАБОТКА РЕЖИМОВ ЭЛС ВЫСОКОПРОЧНЫХ И ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ СО СКВОЗНЫМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ И ПО ЗАЗОРУ С ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКОЙ 124

12. ***С.В. Юркинский***
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВВОДИМЫХ В ЭЛЕКТРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА СОДЕРЖАНИЕ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛЕ ШВОВ 132

13. ***В.В. Гежа, С.И. Шекин***
НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ СТАЛЕЙ КАТЕГОРИЙ Х90-Х100 ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ 135

14. ***А.Е. Вайнерман, С.А. Пичужкин, С.П. Чернобаев, М.М. Веретенников, А.А.Вайнерман***
НОВЫЕ СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ И НАПЛАВКИ ИМИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ И РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ. 141

15. ***В.Н. Старцев***
ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ В МЕТАЛЛЕ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ НА ОСНОВЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА 148

16. ***А.М. Левченко, О.В. Панченко***
ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДИФФУЗИОННОГО ВОДОРОДА В НАПЛАВЛЕННОМ МЕТАЛЛЕ 156

17. ***К.В. Гулаков, М.Г. Шарапов, В.А. Лебедев, И.В. Лендел,***
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ С ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧЕЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕЙ 160

18. ***Ю.Б. Семендяев, М.И. Кучерова, Д.В. Арсюков, В.В. Майоров***
СОВРЕМЕННАЯ ВЕСОВАЯ ЛИНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ И КЕРАМИЧЕСКИХ ФЛЮСОВ 166

19. ***Ю.В. Зеленин,***
ХАРАКТЕР ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ 174

20. ***Ю.В. Зеленин,***
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СОВРЕМЕННЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ТИПА БН 187

21. ***Т.И. Титова, Н.А. Шульган, А.С. Боровской***
СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СВАРОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ СВАРКИ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ИЗ СТАЛИ ТИПА 2,25CR-1MO-0,25V 192

22. ***Д.М. Шарапова***
О НЕОБХОДИМОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СТРУКТУР В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ 202

23. ***М.Г. Шарапов***
70 МАРОК ПРОВОЛОК К 70-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ 210

24. ***Л.Н. Орлов,***
ПОРОШКОВЫЕ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ (К 20-ЛЕТИЮ ПРЕДПРИЯТИЯ ООО «ТМ. ВЕЛТЕК») 212

25. ***Reinhard Rosert, М.В. Карасев***
ПОРОШКОВЫЕ ПРОВОЛОКИ - ТЕНДЕНЦИИ, РАЗВИТИЕ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ 220

26. ***Л.Н. Орлов, А.А. Голякевич, А.В. Хилько, А.А. Кузубов***
НАПЛАВКА ВАЛКОВ ЦЕНТРИФУГ ЛИНИЙ ПРОИЗВОДСТВА МИНЕРАЛЬНОГО УТЕПЛИТЕЛЯ . 231

27. ***С.Г. Паршин,***
MAG-СВАРКА СТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ* 235

28. ***С.Г. Паршин,***
АРГОНОДУГОВАЯ СВАРКА КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛИ И АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОГО СПЛАВА С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ АКТИВИРУЮЩИХ ФЛЮСОВ 248

29. ***В.В. Гежа, А.В. Пименов, Е.Г. Чистякова***
К ВОПРОСУ О ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ АГЛОМЕРИРОВАННОГО ФЛЮСА ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА * 255

30. ***А.В. Пименов, А.В. Тарантаев***
СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО АГЛОМЕРИРОВАННОГО ФЛЮСА МАРКИ ПФК-56С ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОИЗВОДСТВУ МОСТОВЫХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ 257

31. ***В.В. Гежа, М.М. Пронин-Валсамаки, А.В. Шаталов, С.И. Шекин***
НОВЫЙ СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ФЛЮСОВ 262

32. ***С.Ю. Максимов, В.А. Лебедев***
НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МОКРОЙ ПОДВОДНОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ 270

33. ***С.Ю. Максимов, В.А. Лебедев***
ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ 279

34. ***И.С. Каширский, В.Е. Баукин***
РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОРПУСОВ МОДУЛЕЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ 283

35. ***А.В. Кондрон***
РОЛЬ САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ В ОБЕСПЕЧЕНИИ КАЧЕСТВА ПРОИЗВОДИМОЙ СВАРНОЙ ПРОДУКЦИИ В РФ 287

36. ***А.В. Малиновский***
КРАТКИЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ 290

37. ***В.Н. Панин***
ПОДТВЕРЖДЕНИЕ СООТВЕТСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА, КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА, НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ 293

38. ***К.А. Ганусов, И.Е. Сабуров, П.Е. Звездин***
СОСТОЯНИЕ ВОПРОСОВ СТАНДАРТИЗАЦИИ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ 300

39. ***К.А. Ганусов, С.В. Кузьмин, П.Е. Звездин***
ОПТИМИЗАЦИЯ ОТРАСЛЕВЫХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДСТВА СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ 305

ПЕТРАНЬЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ, СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ - 2012

Доклады Санкт-Петербургской Международной научно-технической конференции, 16 -18 октября 2012 года

Под редакцией В.Б. Вихмана
Ответственная за подготовку Л.Б. Тихонова

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Издательство Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Подписано в печать XX.XX.2012. Формат XXXXX/X.
Усл. печ. л. 39,25. Тираж XXX. Заказ XXXX.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии
(юридический адрес.???)