

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.791 : 621.039.5

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ПОСРЕДСТВОМ  
ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
И ТЕХНОЛОГИЙ**

© 2017 Е.И. Колоколов<sup>\*</sup>, С.А. Томилин<sup>\*\*</sup>, В.В. Шишов<sup>\*\*\*</sup>

*\* Общество с ограниченной ответственностью Отдельное конструкторско-технологическое бюро «Энергомаш», Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

*\*\* Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

*\*\*\* Публичное акционерное общество «Машиностроительный завод «ЗиО-Подольск», Подольск, Московская обл., Россия*

В работе показано, что существующие технологии, предназначенные для сварки сталей традиционных способов выплавки, не обеспечивают получения характеристик сварных соединений, адекватных уровню конструктивной прочности и технологичности сталей нового поколения. Выявлены причины снижения конструктивной прочности сварных соединений и намечены пути их устранения. Показано, что необходимо разрабатывать сварочные материалы с пониженным содержанием вредных примесей и технологии их применения для сварки изделий особо ответственного назначения с использованием современных инверторных установок с синергетическим управлением. Предложено внесение ряда изменений и дополнений в нормативную документацию.

*Ключевые слова:* конструктивная прочность, корпусные стали реакторных установок нового поколения, охрупчивание металла шва, сварочные материалы и технологии, инверторные технологии с синергетическим управлением.

Поступила в редакцию: 05.09.2017

Разработанные в нашей стране конструкции реакторов нового поколения (ВВЭР поколения 3+, перспективный реактор ВВЭР-ТОИ) являются естественным развитием предшествующих проектов. В них сохранены преимущества и учтены имевшиеся недоработки в отношении предшествующих реакторов типа ВВЭР, соблюдена преемственность в применяемых материалах и технологиях. В качестве основных конструкционных материалов применены усовершенствованные варианты использованных в предыдущих проектах корпусных сталей, кардинально очищенные от вредных примесей и обладающие значительно улучшенными технологическими и эксплуатационными свойствами [1,2]. Это позволило предложить конструкции корпуса и крышки реактора с уменьшенным количеством кольцевых сварных швов и укрупненными заготовками, что обеспечило снижение материалоемкости и плановых сроков изготовления изделия, а также повышение показателей его надежности и долговечности [3].

Корпусные стали, используемые для реакторных установок нового поколения, обладают значительно более узким интервалом разброса легирующих элементов, низким и нормированным (в пределах тысячных долей процента) содержанием вредных примесей. Технологии выплавки сталей и получение из них заготовок принципиально отличаются от традиционных, поскольку основаны на прямом

получении стали из сверхчистой шихты, минуя доменный процесс, и применение внепечной металлургии. Разработанная технология укрупнения и разливки слитков позволяет получать крупногабаритные поковки для изготовления обечаек и днищ с различными параметрами. Внедрены в производство, основанные на использовании эффекта повышения пластичности при горячей деформации материалов нового поколения, технологииковки и штамповки по всей номенклатуре заготовок корпусов реакторов, парогенераторов и ряда других изделий [3].

Технология основной термической обработки заготовок корпусных изделий из сталей нового поколения позволяет получать требуемые конструкционные свойства. Так, например, материал длинномерных заготовок обечаек из стали 15X2НМФА (класс 1), расположенных напротив активной зоны корпуса реактора, после термообработки позволяет получить величину критической температуры хрупкости ( $T_{ко}$ ) в пределах от  $-90$  до  $-70^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, после проведения послесварочных отпусков обеспечиваются все требуемые в эксплуатации свойства основного металла [1].

Слабым местом в повышении надежности и ресурса корпусного оборудования реакторных установок нового поколения являются используемые в настоящее время сварочные материалы и технологии [4], которые уже не позволяют получать сварные соединения, адекватные основному металлу по конструктивной прочности. В связи с этим, особую значимость приобретают вопросы разработки и совершенствования технологических процессов сварки на основе применения новых сварочных материалов при производстве реакторного оборудования, направленные на обеспечение конструктивной прочности сварных соединений.

Ведущей материаловедческой организацией АО «НПО «ЦНИИТМАШ» (далее – ЦНИИТМАШ), входящей в состав машиностроительного дивизиона ГК «Росатом», уже разработана программа реализации технологических и организационных мер, направленных на модернизацию производства плавящихся флюсов. Необходимо отметить, что оборудование и технологии их изготовления в нашей стране до сих пор находятся на уровне 1980-х годов. Предлагается также переход на производство отечественных керамических флюсов [3]. Важность данной модернизации и требования ее оперативной реализации обусловлены еще и тем, что предприятия ГК «Росатом» не могут без проведения исследовательской аттестации и оформления соответствующего решения использовать для изготовления атомных энергетических установок сварочные материалы иностранного производства, поскольку согласно требованиям нормативной документации [4, 5] они не входят в перечень материалов, допущенных к применению. При этом проведение указанных мероприятий требует значительных материальных и временных затрат.

В настоящее время согласно требованиям ПНАЭ Г-7-009-89 [4] при автоматической сварке под слоем флюса (АСФ) сталей 15X2НМФА и 15X2НМФАА допускается сварка проволокой св-12X2Н2МА, св-12X2Н2МАА, св-12X2Н2МАА-ВИ под флюсом ФЦ-16 (ФЦ-16А, НФ-18М, КФ-30) в различных сочетаниях или проволокой св-09ХГНМТА, св-09ХГНМТАА-ВИ под флюсом НФ-18М. Следует обратить внимание на большой разброс вариантов применения сварочных материалов. Это означает, что единства точек зрения специалистов в отношении сварки этих сталей до сих пор не достигнуто. Для стали 10ГН2МФА тем же документом допускается применение только проволоки св-10ГНМА (или св-10ГН1МА) в сочетании с флюсом ФЦ-16.

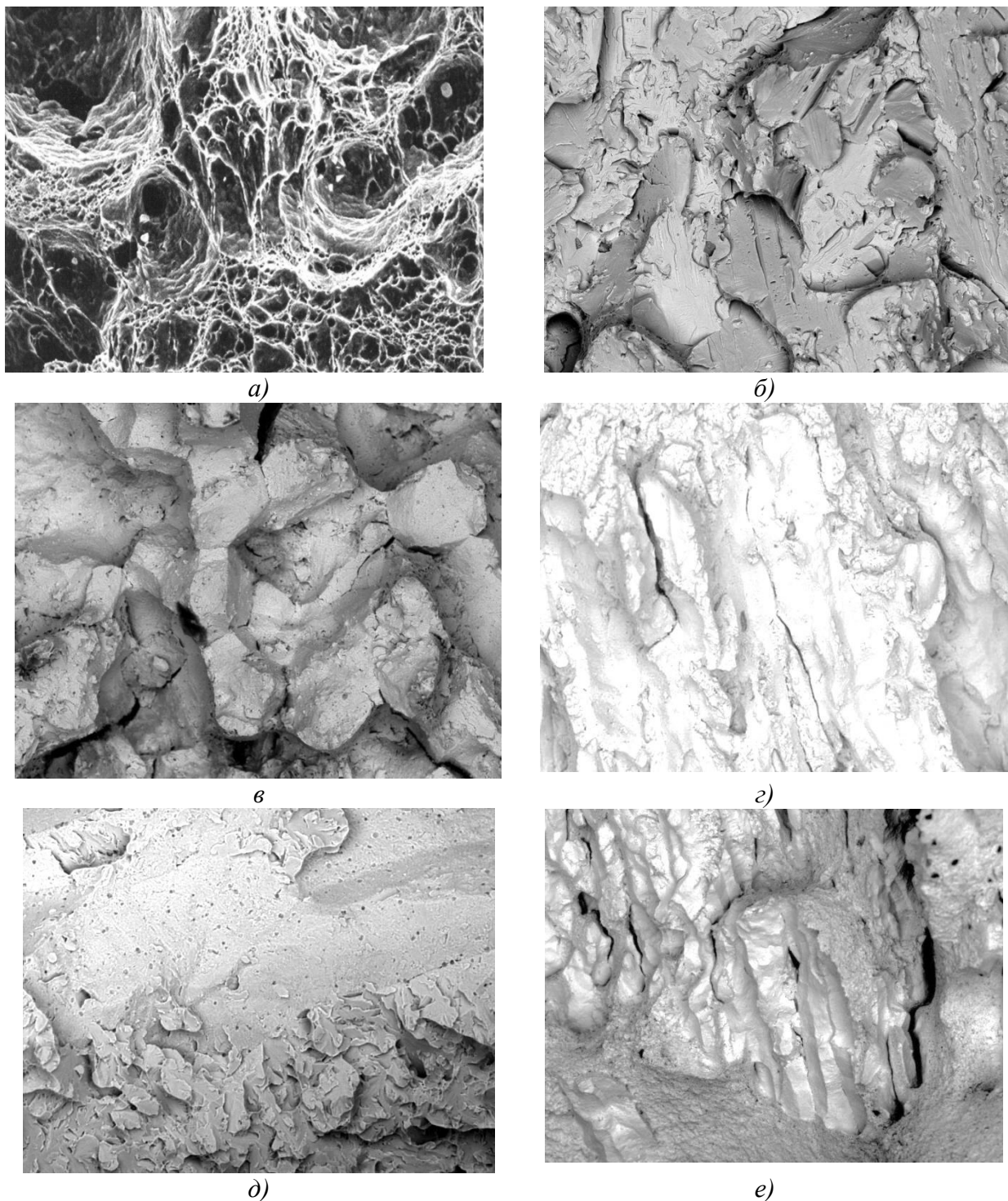
Работы по совершенствованию сварочных материалов и технологий ведутся. Так, специалистами ЦНИИТМАШ реализованы мероприятия по ограничению содержания кремния, марганца и азота для проволок типа 12X2Н2МА-А, позволяющие корректировать значения  $T_{ко}$  в пределах от  $-10$  до  $-50^{\circ}\text{C}$ , путем регулирования

совместной равновесной концентрации этих элементов при сварке под плавным флюсом [3]. Требования к содержанию указанных элементов в этой проволоке установлены в ТУ 2730.09.033-2012. Новые сварочные материалы и технологии для сварки корпусных материалов разрабатываются и специалистами НИЦ «Курчатовский институт – ЦНИИ КМ «Прометей» (далее – ЦНИИ КМ «Прометей») [6] на базе титаносодержащей проволоки типа св-09ХГНМТА и флюса НФ-18М. Тем не менее, несмотря на принимаемые меры, стабильность характеристик конструктивной прочности сварных соединений, отражаемая результатами испытаний на ударную вязкость, которые необходимы для оценки  $T_{ко}$ , пока не достигнута.

Рассмотрим более подробно, что происходит при испытаниях на ударную вязкость в интервале вязко-хрупкого перехода. Обычно при таких испытаниях, характеризующих способность основного металла и сварных соединений сопротивляться хрупкому разрушению при понижении температуры, фрактографические признаки разрушения закономерно меняются от вязкого ямочного излома (рис. 1, *а*) к сколу (квазисколу) по плоскостям спайности (рис. 1, *б*), а величина ударной вязкости (KCV) снижается (рис. 2). Однако, при испытаниях некоторых проб, сваренных в заводских условиях, выявляются отклонения в строении излома и характере снижения KCV. Наряду со сколом в верхней части интервала вязко-хрупкого перехода в зоне макроскопически хрупкого излома появляются участки межзеренного (рис. 1, *в*) и междендритного (рис. 1, *г*) хрупкого разрушения. На рисунке 1, *д* представлен характерный вид смешанного разрушения в зоне макроскопически хрупкого излома (квазискол и междендритное разрушение). Происходит расширение интервала вязко-хрупкого перехода в сторону положительных температур за счет появления участков междендритного разрушения в зоне вязкого излома (рис. 1, *е*), сопровождающееся снижением общего уровня ударной вязкости [7,8].

Известно, что хрупкое межзеренное разрушение улучшенных сталей связано с сегрегациями фосфора на границах предшествующего аустенитного зерна [9] и скоплениями на границах первичных зерен примесей меди, кобальта и тяжелых легкоплавких металлов, не удаляемых при выплавке (олово, сурьма, мышьяк, висмут, свинец) [3,8]. Указанные закономерности распространяются в полной мере и на металл сварных соединений [9,10]. При сварке в заводских условиях не всегда обеспечивается очистка металла сварных швов от содержания вредных примесей, что приводит к появлению в изломе при испытаниях участков хрупкого межзеренного и междендритного разрушения. Это резко усиливает эффект охрупчивания швов в процессе эксплуатации при радиационном, тепловом или коррозионном воздействии, а также склонность к проявлению обратимой отпускной хрупкости, которые характеризуются разрушением по границам предшествующего аустенитного зерна [8,9]. Такое разрушение появляется в металле в процессе эксплуатации даже в тех случаях, когда при испытаниях после изготовления оно отсутствует [10]. Таким образом, появление в изломах сварных соединений при заводских испытаниях участков хрупкого межзеренного или междендритного разрушения означает, что полученный металл шва уже обладает повышенной склонностью к вышеуказанным видам эксплуатационной повреждаемости. Предупреждение и устранение этих неблагоприятных факторов является важной и непростой задачей.

Рассмотрим три возможных решения, направленных на повышение конструктивной прочности путем уменьшения неблагоприятного влияния межзеренного разрушения:



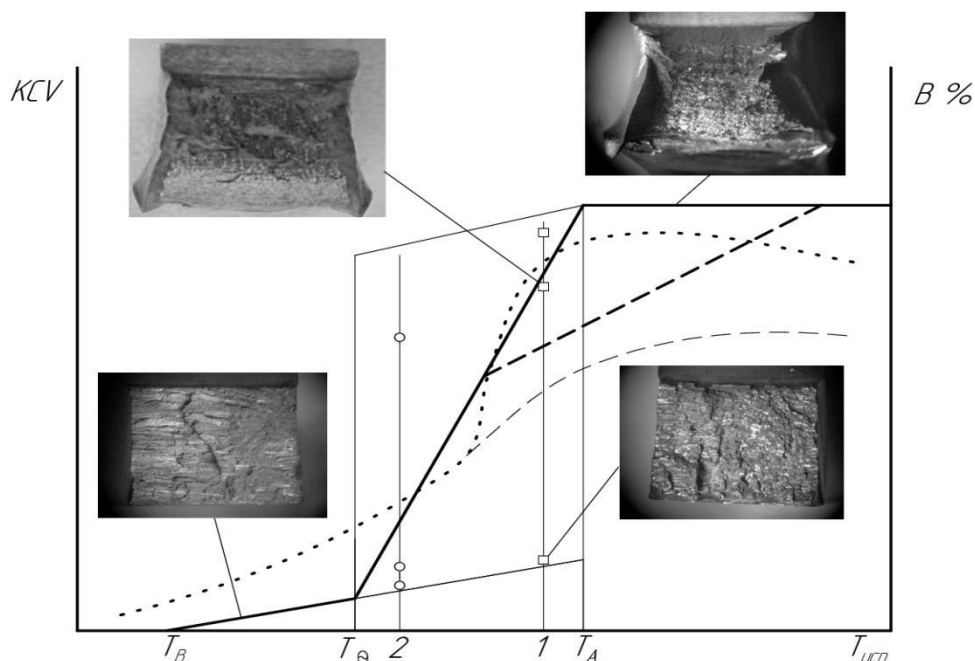
**Рис. 1.** – Микрофрактография (РЭМ) разрушения контрольных проб сварных швов стали 15X2НМФА: *a* – вязкое ямочное разрушение (x1200); *б* – квазискл в зоне макроскопически хрупкого разрушения (x200); *в* – межзеренное хрупкое разрушение в зоне макроскопически хрупкого разрушения (участок перекристаллизации) (x400); *г* – междендритное разрушение в зоне макроскопически хрупкого разрушения (x120); *д* – смешанное разрушение в зоне макроскопически хрупкого разрушения (междендритное вверху, квазискл – внизу) (x400); *е* – смешанное разрушение в зоне вязкого разрушения (междендритное слева и в центре, ямочное – внизу и справа) (x40).

1. Селективный отбор сварочных материалов – самое очевидное, на первый взгляд, решение – нереализуемо из-за отсутствия широкого выбора нужных плавок, сертификатных данных по чистоте примесей, а также фактическим отсутствием на заводах оборудования, обеспечивающего проведение надежного контроля содержания

примесей (метод атомно-абсорбционной спектроскопии). Последнее обусловлено отсутствием нормативных требований по их контролю в заводских условиях [11].

2. Использование сверхчистой сварочной проволоки, полученной по технологии, применяемой при выплавке сталей нового поколения, и чистого керамического флюса, а также разработка соответствующей технологии сварки – это решение сегодня не реализуемо из-за отсутствия в настоящее время таких материалов и технологий. Следует отметить, что эти технологии должны обеспечить не только получение бездефектного сварного соединения, но и исключить загрязнение металла шва, вызывающие появление междендритного разрушения.

3. Получение мелкозернистой первичной микроструктуры металла шва. В этом случае вредные примеси более равномерно распределяются по границам первичных зерен, снижая, таким образом, склонность к хрупкому разрушению. Уменьшить размеры столбчатых дендритов можно модифицированием, например, путем введения в сварочную ванну наночастиц оксидов титана или циркония [12,13], а также регулированием процесса кристаллизации, осуществляемом при малом тепловложении. Последнее можно реализовать, если использовать в полной мере возможности инверторных источников питания с синергетическим управлением [14].



**Рис. 2.** – Схема вязко-хрупкого перехода металла сварных швов при испытаниях на ударную вязкость: *KCV* – ударная вязкость; *B* – доля вязкой составляющей в изломе ( $T_A$  и  $T_B$  – верхняя и нижняя границы интервала вязко-хрупкого перехода);  $T_\theta - T_B$  – температурный интервал полосы разброса значений *KCV* и *B* [7]. Толстые сплошные линии – изменение значений *B* при переходе от разрушения сколом (квазисколом) к вязкому ямочному; толстая прерывистая линия – расширение области изменения значений *B* в сторону положительных температур при появлении межзеренного и междендритного излома. Пунктирная линия – температурное изменение значений *KCV* при переходе от разрушения сколом к вязкому ямочному; тонкая штриховая линия – изменение значений *KCV* при появлении межзеренного и междендритного излома. Нижнее фото слева – полностью хрупкий излом в районе температуры  $T_B$ ; верхнее фото справа – полностью вязкий излом выше температуры  $T_A$ ; фото справа внизу – характер излома при 10% вязкой составляющей (температура (1)); фото слева вверху – характер излома при 80% вязкой составляющей (температура (1)). Для сталей традиционных способов выплавки величины *KCV* и *B* в верхней части полосы разброса (температура (1)) группируются в области высоких значений (обозначены квадратиками), а в нижней части полосы разброса (температура (2)) они группируются в области низких значений (обозначены кружочками). Для чистых по примесям сталей и сварных швов полоса разброса отсутствует; в них значения *KCV* и *B* резко увеличиваются до максимума в районе температуры  $T_\theta$ .

Существует еще одна проблема, связанная с неожиданным хрупким разрушением, когда из трех образцов, испытанных при одной и той же температуре, два показывают высокую ударную вязкость, а третий – нулевую (рис. 2), без каких-либо признаков пластической деформации или наличия дефекта в области надреза. Такое явление, обуславливающее широкую полосу разброса значений ударной вязкости в конструкционных сталях, известно давно [15]. Для металла шва, по мнению авторов настоящей работы, такой «выпад» связан с появлением свободного азота в ферритной матрице при понижении температуры ниже  $A_{c1}$ . Известно [16], что в металле низколегированных сталей это приводит к твердорастворному упрочнению ферритной матрицы и ее дисперсионному твердению. В обоих случаях происходит локальное повышение уровня внутренних напряжений. При испытаниях на ударную вязкость это приводит к неожиданному возникновению хрупкого разрушения сколом по плоскостям спайности (рис. 1, б).

Азот появляется в закристаллизованном металле при недостаточной защите шва от атмосферы воздуха. При этом его количество при дуговом процессе заметно выше, чем при лазерной, электронно-лучевой или электрошлаковой сварке вследствие наличия в дуге ионов азота, поглощаемых сварочной проволокой [17]. При использовании проволоки св-12Х2Н2МА (в которой нет сильных нитридообразователей) нитриды, которые могли бы связать растворенный азот при полиморфном превращении вследствие того, что в аустените его растворимость значительно выше, чем в феррите [16,17], не образуются. При кристаллизации материала сварочной ванны у линии сплавления вклад основного металла – стали 15Х2НМФА – также не обеспечивает образования нитридов, так как ванадий по расчету связан углеродом и его недостаточно для связывания азота.

Устранения охрупчивания металла шва, связанного с появлением свободного азота, можно достичь, регулируя при сварке содержание таких сильных нитридообразователей, как алюминий и титан, которые в настоящее время применяются, в основном, для раскисления металла шва [17,18]. От возможности связывания этих элементов с азотом, в основном и зависит степень охрупчивания сварных соединений [16,19,20]. ЦНИИ КМ «Прометей» рекомендует для АСФ титаносодержащую проволоку типа св-09ХГНМТА в сочетании с флюсом НФ-18М [6], что в принципе, может выправить ситуацию. Тем не менее, методы, с помощью которых можно решить проблему охрупчивания, связанную с наличием в металле шва азота, до сих пор не разработаны. Согласно нормативной документации содержание азота в сварных швах вообще не контролируется, алюминия и титана – не всегда. При таком подходе говорить о стабильных показателях по сопротивлению хрупкому разрушению металла сварных швов, равноценному имеющемуся у соответствующих сталей нового поколения, не приходится. По мнению авторов настоящей работы, решать эту проблему необходимо в комплексе [21]:

а) для сварки особо ответственных изделий использовать только сверхчистую сварочную проволоку, полученную с использованием технологий внепечной металлургии;

б) при сварке наиболее ответственных швов использовать не плавленный, а только керамический флюс контролируемого состава, чистый от вредных примесей;

в) в полной мере использовать технологические возможности современных сварочных установок на основе источников питания с синергетическим управлением, которые позволяют изменять характер металлургических процессов при сварке регулированием тепловложения при мелкокапельном переносе.

Сущность синергетического управления, осуществляемого на основе цифровых процессоров, заключается в организации импульсного режима переноса капли через

дугу. Основная проблема, связанная с этим процессом, – инициировать один импульс тока для расплавления одной капли. При разных материалах, толщинах заготовок, диаметрах проволоки и т.д. величина импульса должна быть различной. Поэтому, необходимо тщательно просчитывать режимы по уравнениям ввода тепла при сварке [14,22]. Изменяя тепловложение с помощью синергетического управления, можно организовать мелкокапельный, крупнокапельный и струйный перенос металла в сварочную ванну через дугу. Регулированием тепловложения можно изменить и характер металлургических реакций при сварке, которые влияют на содержание химических элементов, в том числе азота, алюминия и титана в металле сварочной ванны и шва.

Так как все параметры процесса сварки, определяющие величину тепловложения при использовании инверторных источников, являются управляемыми, режимы сварки можно регулировать, изменяя всего лишь один параметр [22,23]. При этом остальные – немедленно отреагируют на это изменение, в результате чего вся совокупность характеристик обеспечивает переход на новый режим. Современные инверторные аппараты с синергетическим управлением позволяют осуществлять сварку ответственных изделий со стабильными и высокими требованиями к качеству при высочайшей производительности и меньшей зависимости от квалификации сварщика. Наиболее широко синергетические инверторные аппараты используются для сварки штучным электродом, методами аргонно-дуговой и полуавтоматической сварки. В последнее время появилось инверторное оборудование и для АСФ.

Специалистами Fronius International возможности синергетического управления расширены еще более. Ими предложен метод СМТ (Cold Metal Transfer – холодный перенос металла), согласно которому регулируется процесс движения проволоки с помощью цифровой автоматики [23,24]. Пока дуга горит, проволока движется вперед, но система мгновенно реагирует на короткое замыкание, вызывая быстрое отведение проволоки и сокращая время подвода тепла в сварной шов. Такой процесс действует автоматически до 70 раз в секунду. В результате средняя температура процесса становится более низкой, чем при обычной сварке. Таким образом, имеет место сварка с пониженным тепловложением, контролируемые процессами короткого замыкания, отделения металла от электрода и его передачи в ванну по капле. Процесс переноса металла отличается полным отсутствием брызг и стабильным горением дуги даже для трудносвариваемых материалов. Возможно также сочетание процесса СМТ со сваркой импульсной дугой, что объединяет их преимущества.

Еще одна важная область применения СМТ процесса – возможность его использования при нанесении антикоррозионных покрытий. При наплавке существует очень существенное ограничение по содержанию  $\delta$ -феррита, которое не должно быть выше 8% согласно требованиям правил контроля сварных соединений ПНАЭ Г-7-010-89 [11]. Это требование обусловлено резким снижением пластичности и охрупчиванием наплавленного слоя в результате «сигматизации»  $\delta$ -феррита. Так как при СМТ-процессе тепловложение понижено, снижается и степень перемешивания наплавляемого металла с основным, а следовательно, и содержание  $\delta$ -феррита, что позволяет резко сократить объем наплавленного слоя [24]. Сходный эффект дает и применение электрошлакового процесса, внедряемого специалистами ЦНИИТМАШ [3].

Широкие перспективы в развитии технологий сварки связаны с использованием порошковой сварочной проволоки, особенно при сварке с помощью инверторных аппаратов с синергетическим управлением. На современном этапе эту технологию активно используют и при многопроходной сварке. Основное ее преимущество – возможность дополнительного регулирования металлургических процессов

изменением формы и соотношения металлической основы и наполнителя, а также состава последнего [25]. По этой же причине порошковую проволоку применяют даже при АСФ [14]. Через порошковую проволоку удобно осуществлять модифицирование металла шва наночастицами оксидов тугоплавких металлов для измельчения первичного зерна [13], что особенно актуально именно при АСФ, для которой характерно повышенное тепловложение, а соответственно и больший размер дендритов. Для сварки корневых валиков, в которых наиболее часто возникают проблемы с качеством, можно внедрять автоматическую сварку в среде защитных газов порошковой проволокой.

Еще более расширяет возможности сварки применение гибридных технологий, позволяющих дополнять дуговой процесс лазерным источником теплоты, непосредственно вводимой в металлическую ванну, что в отличие от АСФ дает возможность регулировать в широких пределах ее температуру (а, следовательно, и характер металлургических процессов), объем и глубину проплавления [26,27]. Такая гибридная технология позволяет создать конкуренцию (а в ряде случаев и преимущество) АСФ. Синергетический эффект гибридной сварки связан с изменением теплового режима сварки, в результате чего растет объем переплавленного металла, глубина проплавления и скорость сварки при пониженном тепловложении. Пятно дуги «привязывается» к месту действия лазерного излучения, дуга сжимается в пределах факела лазерной плазмы, устраняя эффект блуждания анодного пятна [27]. Использование при гибридной сварке порошковой проволоки еще более расширяет возможности ее влияния на металлургические процессы [28].

Следует иметь в виду, что внедрение новых технологий ограничено требованиями ПНАЭ Г-7-009-89 [4], согласно которым вышеуказанные сварочные материалы, технологии и оборудование не предусмотрены к применению в процессе изготовления элементов атомных энергетических установок. Вместе с тем, в новой редакции правил устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок – НП-089-15 [5] сохранилась процедура внедрения новых материалов и технологий, предусматривающая проведение аттестационных исследований, согласованных с головной материаловедческой организацией, что позволяет решить данное затруднение. В разрабатываемой в настоящее время новой редакции основных положений по сварке и наплавке (взамен [4]), по мнению авторов работы, целесообразно предусмотреть пункт о возможности использования порошковых проволок и гибридных технологий после проведения соответствующих аттестационных исследований. Это позволит решить вышеуказанную проблему и обеспечить применение рассмотренных в данной работе предложений в практику работ по изготовлению оборудования атомных энергетических установок. Также в разрабатываемой в настоящее время новой редакции правил контроля сварных соединений (вместо [11]) целесообразно включить пункт о контроле содержания алюминия, титана и азота в сварных швах наиболее ответственных изделий. Это существенным образом повысит как технологическую дисциплину при сварке, так и уровень качества сварных соединений. Желательно осуществление и факультативного контроля вида излома при испытаниях на ударный изгиб для выявления случаев появления межзеренного и междендритного хрупкого разрушения, влияющих на степень охрупчивания швов в процессе эксплуатации. Инициатором во всех вышеперечисленных инновационных процессах должны выступать головные материаловедческие организации (ЦНИИТМАШ, ЦНИИ КМ «Прометей», АО «НИКИМТ-Атомстрой» и др.) с возможностью расширения справочника примененных материалов и способов сварки (наплавки) при изготовлении оборудования атомных энергетических установок.



Ведущим предприятием ГК «Росатом» по изготовлению оборудования атомных энергетических установок является Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск (далее – завод «Атоммаш»). На этом предприятии с 1980-х годов существовал свой цех флюсов и электродов, который совместно с технологическими службами завода позволял оперативно осуществлять мероприятия по обеспечению требований к качеству. Попытки возродить это производство уже предпринимались, но пока не привели к успеху. По мнению авторов работы, необходимо вернуться к данному вопросу и более тщательно рассмотреть целесообразность создания такого производства в соответствии с современными требованиями в области сварочных технологий. Локализация такого производства именно в г. Волгодонске обусловлена:

- накоплением на его производственных предприятиях большого опыта изготовления сварочных материалов (здесь, в частности, имеются несколько предприятий по изготовлению сварочных электродов);
- широким использованием современных сварочных технологий как на заводе «Атоммаш», так и других машиностроительных предприятиях города, осуществляющих выпуск продукции для атомной отрасли;
- наличием научного и образовательного центра (Волгодонского инженерно-технического института – филиала НИЯУ МИФИ), осуществляющего исследования и разработки в рассматриваемом направлении, а также подготовку бакалавров и магистров в области оборудования и технологии сварочного производства в энергетическом машиностроении.

Создание в г. Волгодонске при участии ведущей материаловедческой организации ЦНИИТМАШ современного производства сварочных материалов, на базе малой металлургии с использованием внепечных технологий и прокатки, позволило бы получать сверхчистые металлическую и порошковую сварочные проволоки, а также чистый керамический флюс. Это во многом способствовало бы решению как обозначенных в данной работе, так и других, сопутствующих задач, в том числе такую актуальную для атомной отрасли, как импортозамещение (а в определенной степени и импортоопережение) в области сварочных материалов. Именно в рамках ГК «Росатом» осуществление такой программы видится реальным, эффективным и своевременным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанные в последние годы стали нового поколения, чистые по содержанию вредных примесей (в пределах тысячных долей процента) и обладающие улучшенными технологическими свойствами и конструктивной прочностью, но в то же время, высокой стоимостью и специальными требованиями при выполнении сварочных работ, следует применять для особо ответственных изделий, работающих при повышенных или низких температурах, требующих стабильности свойств, сопротивления радиационному и коррозионному воздействию.

2. Для сварки сталей нового поколения необходима разработка новых сварочных материалов (металлической и порошковой сварочных проволок, керамического флюса), очищенных от вредных примесей в соответствии с технологиями, адекватными уровню, применяемому при производстве этих сталей.

3. Технологии сварки сталей нового поколения должны обеспечивать стабильность свойств сварных соединений и отсутствие загрязнения металла швов азотом и другими вредными примесями, влияющими на степень его охрупчивания. Для обеспечения этого требования необходимо применение лабораторного оборудования для прецизионного контроля содержания примесей в металле.

4. Для обеспечения стабильности и высокого уровня технологичности сварных

соединений и повышения уровня их эксплуатационных свойств необходимо дооснащение предприятий современным сварочным оборудованием на основе инверторных и гибридных технологий с синергетическим управлением, а также использование в полной мере его технических возможностей, что требует соответствующей технической переподготовки персонала.

5. Необходимо рассмотреть возможность создания в г. Волгодонске в рамках ГК «Росатом» с участием в этом проекте ведущей материаловедческой организации ЦНИИТМАШ производства современных сварочных материалов с использованием чистой шихты на базе технологий внепечной металлургии и возможностью использования технологий прокатки. Это позволит получать сверхчистую сварочную проволоку, чистый керамический флюс и чистую порошковую проволоку для выполнения производственных программ подразделений корпорации и решения проблем импортозамещения.

6. Для реализации высказанных в работе предложений необходимо проведение научно-исследовательских работ с аттестацией внедряемых в производство оборудования атомных энергетических установок материалов и технологий в соответствии с требованиями НП-089-15 и других нормативных документов, а в дальнейшем – внесение поправок и предложений в разрабатываемую нормативную документацию по сварке и наплавке, в том числе правила контроля сварных соединений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков, С.И., и др. Сталь марок 15X2НМФА, 15X2НМФА-А и 15X2НМФА (класс 1) для корпуса реактора проекта ВВЭР-ТОИ [Текст] / С.И. Марков, В.А. Дурьнин, В.А. Мохов // Тяжелое машиностроение. – 2013. – №3. – С. 2–6.
2. Дуб, А.В. Развитие основных конструкционных материалов для изготовления реакторов ВВЭР [Электронный ресурс] / А.В. Дуб // Материалы Восьмой международной НТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». ОКБ Гидропресс, 28-31 мая 2013 г. – Режим доступа: URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/.../49pdf> – 25.08.2017.
3. Дуб, А.В. Прогресс на поле технологий. Комплексный компетентный подход и своевременная смена приоритетов в развитии материаловедения [Текст] / А.В. Дуб // РЭА. – 2012. – №1. – С. 22–27.
4. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения. ПНАЭ Г 7-009-89. Нормативный документ [Текст]. – М.: НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России, 2000. – 189 с.
5. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (НП-089-15) [Текст]. – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2016. – 71 с.
6. Разработка и усовершенствование сварочных материалов для сварки и наплавки корпусов оборудования АЭУ [Электронный ресурс]. ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2009. – Режим доступа: URL: <http://www.crism-prometey.ru> – 25.08.2017.
7. Колоколов, Е.И. Исследование особенностей разрушения конструкционных сталей в интервале вязко-хрупкого перехода при различных условиях разрушения: автореф. дисс. ... канд. техн. наук [Текст] / Е.И. Колоколов, 1979. – 26 с.
8. Чернобаева, А.А. и др. Вклад зернограничного разрушения в изменение критической температуры хрупкости стали 15X2НМФА и ее сварных соединений [Текст] / А.А. Чернобаева, С.В. Скородумов и др. // МиТОМ. – 2011. – №8. – С. 27–34.
9. Утевский, Л.М. и др. Обратимая отпускная хрупкость стали и сплавов железа [Текст] / Л.М. Утевский, Е.Э. Гликман, Г.С. Карк. – М.: Металлургия, 1987. – 222 с.
10. Юрченко, Е.В. Исследование и прогнозирование радиационного и теплового охрупчивания материалов эксплуатируемых и перспективных корпусов реакторов ВВЭР: автореф. дисс. ... канд. техн. наук [Текст] / Е.В. Юрченко, 2015. – 28 с.
11. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавка. Правила контроля. ПНАЭ Г7-010-89. Нормативный документ [Текст]. – М.: НТЦ ЯРБ, 2000. – 164 с.

12. Кузнецов, В.Д. и др. Влияние нанодобавок на структуру и свойства металла швов при сварке высокопрочных низколегированных сталей [Текст] / В.Д. Кузнецов, И.В. Смирнов, К.П. Шаповалов // Прогресивні технології і системи машинобудування. – 2013. – Вып. 1,2(46). – С. 143–150.
13. Костин, В.А. и др. Модифицирование структуры сварных швов высокопрочных низколегированных сталей наночастицами тугоплавких металлов [Текст] / В.А. Костин, Г.М. Григоренко, В.В. Жуков // Строительство, материаловедение, машиностроение: Стародубовские чтения. – 2016. – С. 93–98.
14. Лебедев, В.А. Тенденции развития механизированной сварки с управляемым переносом электродного металла [Текст] / В.А. Лебедев // Автоматическая сварка. – 2010. – №10. – С. 45–53.
15. Мешков, Ю.Я. и др. Структура металла и хрупкость стальных изделий. [Текст] / Ю.Я. Мешков, Г.А. Пахаренко. – Киев: Наукова думка, 1985. – 268 с.
16. Гривняк, И. Свариваемость сталей [Текст] / И. Гривняк. Пер. со словац. Л.С. Гончаренко; Под ред. Э.Л. Макарова. – М.: Машиностроение, 1984. – 216 с.
17. Кошкарев, Б.Т. Теория сварочных процессов [Текст] / Б.Т. Кошкарев. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2003. – 217 с.
18. Петров, Г.Л. и др. Теория сварочных процессов [Текст] / Г.Л. Петров, А.С. Тумарев. – М.: Высшая школа, 1977. – 392 с.
19. Узлов, И.Г. и др. Новые научные положения и технологические решения по созданию высокопрочных конструкционных микролегированных сталей широкого применения [Текст] / И.Г. Узлов и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2008. – Вып. 18. – С. 164–174.
20. Взаимодействие металла с газами. Азот в металле сварных швов [Электронный ресурс]. [Б.м., б.г.]. – Режим доступа: URL: <http://www.tehnoarticles.ru/svarkaporoshok/index.html> – 25.09.2017.
21. Колоколов, Е.И. и др. Задачи совершенствования сварочных материалов и технологий при производстве реакторов нового поколения / Е.И. Колоколов, С.А. Томилин, В.В. Шишов // Безопасность ядерной энергетики [Электронный ресурс] : тез. докл. XIII Междунар. науч.-практ. конф., 31 мая – 2 июня 2017 г. – Волгодонск: [Б.и.], 2017.
22. Мальков, С. Современные сварочные инверторы [Электронный ресурс] / С. Мальков // Силовая электроника. – 2011. – №2. – С. 76–77. – Режим доступа: URL: [http://www.power-e.ru/2011\\_2\\_76.php](http://www.power-e.ru/2011_2_76.php) – 25.09.2017.
23. STT-перенос металла (перенос металла поверхностным натяжением) [Электронный ресурс]. [Б.м., б.г.]. – Режим доступа: URL: <http://svarka-24.info/stt-perenos-metalla-perenos-metalla-ponerxnos.../> – 25.09.2017.
24. Процесс холодной сварки-СМТ. [Электронный ресурс]. [Б.м., б.г.]. – Режим доступа: URL: <http://www.rtkom-electro.ro/process-xolodnoj-svarki-smt/>
25. Сварка плавящимся металлическим электродом в защитных газах (MIG/MAG) и сварка порошковой проволокой. [Электронный ресурс]. [Б.м., б.г.]. – Режим доступа: URL: <http://weldering.com/svarka-plavyashchimsya-metallicheskim-elektrodom-zashchitnyh-gazah-migmag-svarka-poroshkovoy> – 25.09.2017.
26. Туричин, Г.А. и др. Перспективы внедрения лазерно-дугового процесса для сварки металла больших толщин [Электронный ресурс] / Г.А. Туричин, И.А. Цибульский, М.В. Кузнецов, В.В. Сомонов // РИТМ. – 2010. – №10(58). – С. 32–35. – Режим доступа: URL: <http://www.ritm-magazine.ru/ru/magazines/2010/ritm-10-58-2010#page-3233> – 25.09.2017.
27. Специальные методы сварки и пайки [Текст] / Под. Ред. В.А. Фролова. – М.: АЛЬФА-М.; ИНФРА-М. 2013. – 224 с.
28. Гоок, С.Э. и др. Гибридная лазерно-дуговая сварка высокопрочных трубных сталей классов прочности API X80 X120 28. [Текст] / С.Э. Гоок, А.В. Гуменюк, М. Ретмайер // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – №1(22). – С. 21–35.

## REFERENCES

- [1] Markov S.I., Durynin V.A., Mokhov V.A. Stal marok 15Kh2NMFA, 15Kh2NMFA-A i 15Kh2NMFA (klass 1) dlja korpusa reaktora proekta VVEhR-TOI [Steel Grades 15X2NMFA, 15X2NMFA-A and 15X2NMFA (class 1) for the Reactor Vessel of the PWER-TOI Project]. Tjazeloe mashinostroenie [Heavy Engineering], 2013, №3, pp. 2–6. (in Russian)
- [2] Dub A.V. Razvitie osnovnykh konstrukcionnykh materialov dlja izgotovlenija reaktorov VVEhR [перевод]. Materialy Vos'mojj mezhdunarodnoj NTK «Obespechenie bezopasnosti AEhS s VVEhR». OKB Hidropress, 28–31 maja 2013 g. [Development of the Main Structural Materials

- for the Manufacture of PWER Reactors // Proceedings of the Eighth International STC "Ensuring the Safety of Nuclear Power Plants with PWER". OKB Hydropress, May 28-31, 2013] Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/.../49pdf> (in Russian)
- [3] Dub A.V. Progress na pole tekhnologijj. Kompleksnyjj kompetentnyjj podkhod i svoevremennaja smena prioritetov v razvitii materialovedenija [Progress in the Field of Technology. Comprehensive Competent Approach and Timely Change of Priorities in the Development of Materials Science]. REA, 2012, № 1, pp. 22–27. (in Russian)
- [4] Oborudovanie i truboprovody atomnykh ehnergeticheskikh ustanovok. Svarka i naplavka. Osnovnye polozhenija. PNAEh G 7-009-89. Normativnyjj document [Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants. Welding and Surfacing. Basic Provisions. PNAE G 7-009-89. Normative document]. M. Pub. NTC JaRB Gosatomnadzora Rossii, 2000, 189 p. (in Russian)
- [5] Pravila ustrojstva i bezopasnoj ehkspluatatsii oborudovanija i truboprovodov atomnykh ehnergeticheskikh ustanovok (NP-089-15) [Rules for the Arrangement and Safe Operation of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants (NP-089-15)]. M. Pub. Federalnaja sluzhba po ehkologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru [Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision], 2016, 71 p. (in Russian)
- [6] Razrabotka i usovershenstvovanie svarochnykh materialov dlja svarki i naplavki korpusov oborudovanija AEhU. FGUP CNII KM «Prometeyj» [Development and Improvement of Welding Materials for Welding and Surfacing of Hulls of NPP Equipment. FSUE CRI KM "Prometey"], 2009. Available at: <http://www.cri-km-prometey.ru> (in Russian)
- [7] Kolokolov E.I. Issledovanie osobennostej razrushenija konstrukcionnykh stalej v intervale vjazko-khrupkogo perekhoda pri razlichnykh uslovijakh razrushenija [Investigation of the Structural Steel Structural Failure in the Viscous-Brittle Transition Interval under Various Failure Conditions]. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenojj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Thesis Abstract of PhD in Engineering]. 1979, 26 p. (in Russian)
- [8] Chernobaeva A.A., Skorodumov S.V. etc. Vklad zernogranichnogo razrushenija v izmenenie kriticheskoyj temperatury khrupkosti stali 15Kh2NMFA i ee svarnykh soedinenijj [Contribution of Grain Boundary Damage to the Change in the Critical Temperature of Brittleness of 15X2HMΦA Steel and its Welded Joints]. MiTOM, 2011, №8, pp. 27–34. (in Russian)
- [9] Utevskijj L.M., Glikman E.Eh., Kark G.S. Obratimaja otpusknaja khrupkost' stali i splavov zheleza [Reversible Temper Brittleness of Steel and Iron Alloys]. M. Pub. Metallurgija, 1987, 222 p. (in Russian)
- [10] Jurchenko E.V. Issledovanie i prognozirovanie radiacionnogo i teplovogo okhrupchivanija materialov ehkspluatiruemykh i perspektivnykh korpusov reaktorov VVEhR [Investigation and Prediction of Radiation and Thermal Embrittlement of the PWR Reactor Materials Used and Promising for the Reactors]. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenojj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Thesis Abstract of PhD in Engineering]. 2015, 28 p. (in Russian)
- [11] Oborudovanie i truboprovody atomnykh ehnergeticheskikh ustanovok. Svarnye soedinenija i naplavka. Pravila kontrolja. PNAEh G7-010-89. Normativnyjj document [Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants. Welded Joints and Surfacing. Rules of Control. PNAE G7-010-89. Normative document]. M. Pub. NTC JaRB, 2000, 164 p. (in Russian)
- [12] Kuznecov V.D., Smirnov I.V., Shapovalov K.P. Vlijanie nanodobavok na strukturu i svojstva metalla shvov pri svarke vysokoprochnykh nizkolegirovannykh stalej [Effect of Nanoadditives on the Structure and Properties of Weld Metal in the Welding of High-Strength Low-Alloy Steels]. Progresivni tekhnologii i sistemi mashinobuduvannja [Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering], 2013, Vol. 1,2(46), pp. 143–150. (in Russian)
- [13] Kostin V.A., Grigorenko G.M., Zhukov V.V. Modificirovanie struktury svarnykh shvov vysokoprochnykh nizkolegirovannykh stalej nanochasticami tugoplavkikh metallov. Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie: Starodubovskie chtenija [Modification of Welded Seam Structure of High-Strength Low-Alloy Steels by Refractory Metal Nanoparticles], 2016, pp. 93–98. (in Russian)
- [14] Lebedev V.A. Tendencii razvitija mekhanizirovannojj svarki s upravljaemym perenosom ehlektrodnogo metalla [Trends in the Development of Mechanized Welding with Controlled Transfer of Electrode Metal]. Avtomaticheskaja svarka [Automatic Welding], 2010, №10, pp. 45–53. (in Russian)
- [15] Meshkov Ju.Ja., Pakharenko G.A. Struktura metalla i khrupkost stalnykh izdelijj [Structure of Metal and Steel Product Brittleness]. Kiev. Pub. Naukova dumka. 1985, 268 p. (in Russian)
- [16] Grivnjak I. Svarivaemost stalej [Weldability of Steels.]. M. Pub. Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1984, 216 p. (in Russian)
- [17] Koshkarev B.T. Teorija svarochnykh processov [Theory of Welding Processes]. Rostov-on-Don.

- Pub. DGSU, 2003, 217 p. (in Russian)
- [18] Petrov G.L., Tumarev A.S. Teorija svarochnykh processov [Theory of Welding Processes]. M. Pub. Vysshaja shkola [Higher School], 1977, 392 p. (in Russian)
- [19] Uzlov I.G. etc. Novye nauchnye polozhenija i tekhnologicheskie reshenija po sozdaniju vysokoprochnnykh konstrukcionnykh mikrolegirovannykh stalej shirokogo primeneniya [New Scientific Positions and Technological Solutions for the Development of High-Strength Constructional Microalloyed Steels of Wide Application]. Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoj metallurgii: sbornik nauchnykh trudov [Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy: a collection of scientific papers]. Dnepropetrovsk, 2008. Issue.18. pp. 164–174. (in Russian)
- [20] Vzaimodejstvie metalla s gazami. Azot v metalle svarnykh shvov. [Metal and Gases Interaction. Nitrogen in the Weld Metal] Available at: [www.tehnoarticles.ru/svarkaporoshok/5.html](http://www.tehnoarticles.ru/svarkaporoshok/5.html) (in Russian)
- [21] Kolokolov E.I., Tomilin S.A., Shishov V.V. Zadachi sovershenstvovaniya svarochnykh materialov i tekhnologijj pri proizvodstve reaktorov novogo pokolenija [The Issues of Improving Welding Materials and Technologies in the Production of New Generation Reactors]. Bezopasnost jadernojj ehnergetiki: tezisy dokladov XIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, 31 maja – 2 ijunja 2017 goda [Safety of Nuclear Power: abstracts of the report of the 13th International Scientific and Practical Conference, May 31 - June 2, 2017]. Volgodonsk, 2017. CD. (in Russian)
- [22] Malkov S. Sovremennye svarochnye inventory [Modern Welding Inverters]. Silovaja ehlektronika [Power Electronics], 2011, №2, pp. 76–77. Available at: [http://www.power-e.ru/2011\\_2\\_76.php](http://www.power-e.ru/2011_2_76.php) (in Russian)
- [23] STT-perenos metalla (perenos metalla poverkhnostnym natjazheniem) [STT-Transfer of Metal (Transfer of Metal by Surface Tension)]. Available at: <http://svarka-24.info/stt-perenos-metalla-perenos-metalla-poverxnos.../> (in Russian)
- [24] Process kholodnoj svarki-SMT [Cold Welding Process-CMT]. Available at: <http://www.rtkom-electro.ro/process-xolodnoj-svarki-smt/> (in Russian)
- [25] Svarka plavjashhimsja metallicheskim ehlektrodom v zashhitnykh gazakh (MIG/MAG) i svarka poroshkovojj provolokojj [Welding with a Consumable Metal Electrode in Shielding Gases (MIG / MAG) and Welding with Flux-Cored Wire.]. Available at: <http://weldering.com/svarka-plavjashchimsya-metallicheskim-elektrodom-zashchitnyh-gazah-migmag-svarka-poroshkovoy> (in Russian)
- [26] Turichin G.A., Cibul'skijj I.A., Kuznecov M.V., Somonov V.V. Perspektivy vnedrenija lazerno-dugovogo processa dlja svarki metalla bol'shikh tolshhin [Prospects for the Introduction of the Laser-Arc Process for Welding Large-Thickness Metal]. RITHM, 2010, №10(58), pp. 32–35. Available at: <http://www.ritm-magazine.ru/magazines/2010/ritm-10-58-2010#page-3233> (in Russian)
- [27] Specialnye metody svarki i pajjki [Special Methods of Welding and Soldering]. M. Pub. ALFA-M, INFRA-M, 2013, 224 p. (in Russian)
- [28] Gook S.Eh., Gumenjuk A.V., Retmajjer M. Gibrinajazerna lazerno-dugovaja svarka vysokoprochnnykh trubnykh stalej klassov prochnosti API Ch80 Kh120 [Hybrid laser-Arc Welding of high-Strength Tubular Steels of API Ch80 X120 28 Strength Classes]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2017, №1(22), ISSN 2305-414Kh, eISSN 2499-9733, pp. 21–35. (in Russian)

### Providing Constructive Strength of Reactor Installation Welded Joints by the Use of New Welding Materials and Technologies

**E.I. Kolokolov\*, S.A. Tomilin\*\*, V.V. Shishov\*\*\***

\* "Energomash" Limited Liability Company Separate Design and Technological Bureau,  
Sedmaya Zavodskaya St., 44, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360  
<sup>1</sup> e-mail: [e.i.kolokolov@yandex.ru](mailto:e.i.kolokolov@yandex.ru);

\*\* Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI",  
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360  
ORCID iD: 0000-0001-8661-8386  
WoS ResearcherID: G-3465-2017  
e-mail: [SATomilin@mephi.ru](mailto:SATomilin@mephi.ru);

\*\*\* *Public Joint-Stock Company “Mashine-building plant “ZiO-Podolsk”,  
Zheleznodorozhnaya St., 2, Podolsk, Moskovskaya region, Russia 142103  
e-mail: shishov\_yv@atommash.ru*

**Abstract** – The paper shows that existing technologies intended for welding steels of traditional methods of smelting do not provide the characteristics of welded joints adequate to the level of structural strength and manufacturability of new-generation steels. The reasons of the decrease in the structural strength of welded joints are identified and the ways of their elimination are outlined. The article shows that it is necessary to develop welding materials with a low content of harmful impurities and technologies of their use for welding products using modern inverter installations with synergetic control. A number of changes and additions to the normative documentation are proposed.

*Keywords:* structural strength, new-generation reactor vessel bodies, welded metal embrittlement, welding materials and technologies, inverter technologies with synergetic control.