

существенно сократить время проведения изысканий при конструировании объектов и технологического оборудования атомной энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садигов, И. Р. Исследование устойчивости многослойных круглых пластин переменной толщины из нелинейно-упругого материала / И. Р. Садигов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2019. – № 7(85), Ч. 1. – С. 31-37 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.85.7.006>.
2. Ермоленко, А. В. Расчет круглых пластин по уточненным теориям / А. В. Ермоленко // Вестник Сыктывкарского университета. – 2006. – Сер. 1. – Вып. 6. – С. 79-86.
3. Саченков, А. А. Цикл лекций по теории изгиба пластин / А. А. Саченков. – Казань : КФУ, 2012. – 54 с.
4. Тимошенко, С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – Москва : Наука, 1966. – 636 с.

New Approaches to the Calculation of the Bending of Round Plates with Small Transverse Displacements

A.S. Kravchuk^{*1}, S.A. Tomilin^{**2}, A.I. Kravchuk^{***}, S.F. Godunov^{**3}, A.F. Smalyuk^{**5}

**Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

***Volgodonsk Engineering and Technology Institute – a branch of the National Research Nuclear University MEPhI, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

**Belarusian State University, Minsk, Belarus*

¹e-mail: ask_belarus@inbox.ru

²e-mail: satomilin@mephi.ru

³e-mail: SFGodunov@gmail.com

Abstract – For the first time, a theory of the pure bending of round plates by moments of constant intensity applied to their circular boundaries was developed. A method for determining equivalent moments from the acting axisymmetric load is proposed. Within the framework of the proposed theory, solutions to the problems of bending round plates are demonstrated. When introduced into the design process, the proposed approach will not only clarify the obtained values of transverse displacements, but also significantly reduce the time spent on designing nuclear facilities and technological equipment.

Keywords: pure bending, round plate, equivalent moment calculation.

УДК 621.791.011;620.184.6

ОБРАЗОВАНИЕ И ХАРАКТЕР ТРЕЩИН В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ МНОГОПРОХОДНЫХ СВАРНЫХ ШВОВ СТАЛИ 10ГН2МФА, ВЫПОЛНЕННЫХ МЕТОДОМ АСФ

Е.И. Колоколов^{*}, А.В. Чернов^{*}, А.А. Голубов^{}**

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

***Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

В работе рассмотрены причины появления и характер трещин повторного нагрева в ОШЗ многопроходных сварных соединений стали 10ГН2МФА, выполненных методом АСФ. Показано, что в зависимости от типа неметаллических включений в свариваемых поковках, реализуются разные механизмы образования надрывов в ОШЗ, вскрывающихся при испытании гибовых образцов.

Ключевые слова: эвтектические сульфиды, сложные оксиды, гибовые образцы, фрактографические исследования, очаги образования трещин на первичных сульфидных включениях, трещины повторного нагрева, ослабленные границы крупных зерен ОШЗ, наличие технологического фактора.

Для изготовления парогенераторов и некоторых других изделия ВВЭР используются поковки из стали 10ГН2МФА [1], в которых заметна ликвационная неоднородность (рис. 1), выражающаяся в наличии участков различной степени травимости. В поковках, отличающихся отличиями в технологии выплавки, на этих участках могут располагаться неметаллические включения разной природы. В некоторых преобладают эвтектические сульфиды с пониженной температурой плавления. Разработанные для их устранения технологии внепечной обработки [2] приводят к ограничению неметаллических включений сложными оксидами, экзогенного происхождения или образующимися при раскислении или модифицировании. В работе [3] было показано, эти различия, а также химическая и структурная неоднородность могут вызвать появление в околошовной зоне (ОШЗ) дефектов сварочного происхождения.

В настоящей работе более подробно рассмотрены причины появления и характер дефектов сварочного происхождения в ОШЗ многопроходных сварных соединений, выполненных методом АСФ. Исследования проводили на гибовых образцах контрольных проб для аттестации технологии сварки. После изгиба на некоторых образцах образовывались надрывы разного раскрытия в ОШЗ (рис. 1 *а*), выходящие на внешнюю механически обработанную поверхность (рис. 1 *б*). После долома образцов проводили фрактографические исследования зон первичных надрывов.

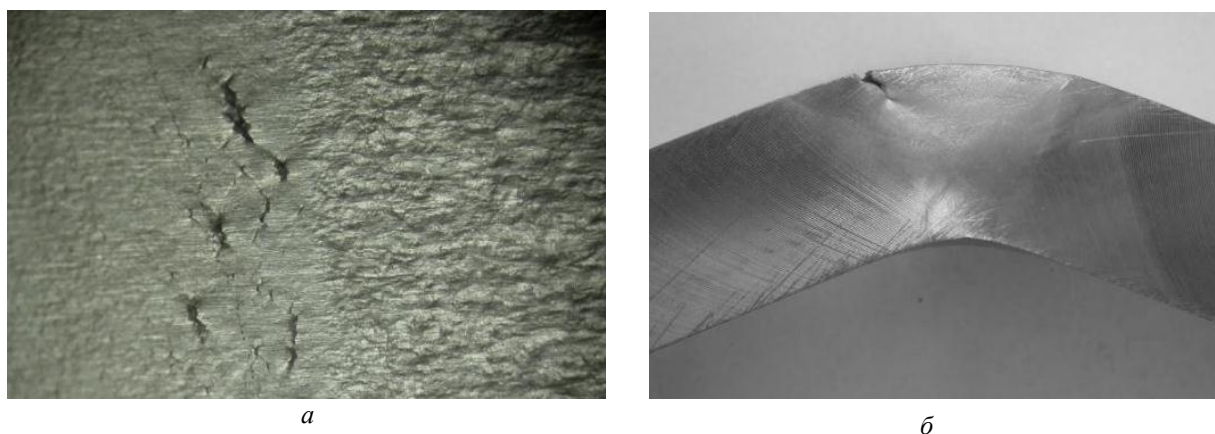


Рисунок 1 – Надрывы разного раскрытия в ОШЗ

Были выявлены два основных типа образующихся дефектов, отличающихся характером очагов зарождения трещин, общий вид которых приведен на (рис. 2 *а*). В первом случае очагами являются кристаллизационные микрополости, формирующиеся на частично растворенных при сварке комплексных включений, основой которых являются скопления первичных сульфидных включений (рис. 2 *б*). Вокруг них вскрываются границы оплавленных зерен с повторными выделениями плоских сульфидных включений и эвтектик на их поверхности. Дальнейшее развитие надрывов осуществляется в пределах ОШЗ по вязкому межзеренному механизму на выделениях вырожденной сульфидной эвтектики (рис. 2 *в*), характерному для трещин повторного нагрева. Долом образца за пределами ОШЗ осуществлялся по механизму вязкого разрушения. Второй вариант образования надрывов реализуется при использовании поковок, в которых первичные сульфиды, невелики, а микроскопические очаги зарождения трещин отсутствуют. При нагреве первичные сульфиды частично растворяются и происходит локальное расплавление приграничных объемов крупных зерен основного металла ОШЗ при взаимодействии с металлической ванной. Под

действием турбулентности металлической ванны, содержащиеся в ней мелкие глобулярные окисные включения проникают в расплавленные зоны и при кристаллизации остаются на границах зерен (рис. 2 *з*), снижая их прочность. При охлаждении ниже линии солидус происходит повторное выделение сульфидов марганца в виде вырожденной эвтектики на границах крупных зерен ОШЗ (рис. 2 *в*). При дальнейшем охлаждении ниже линии A_{c1} на этих границах происходит преимущественное выделение легированных карбидов (рис. 2 *з*), о чем свидетельствуют результаты микрорентгеноспектрального анализа. При загибе образцов происходит вскрытие ослабленных неметаллическими включениями и карбидами границ крупных зерен в ОШЗ. Дальнейшее развитие трещины осуществляется аналогично первому варианту (рис. 2 *а*). Таким образом, и при отсутствии выраженного очага появления надрывов происходит по механизму образования трещин повторного нагрева.

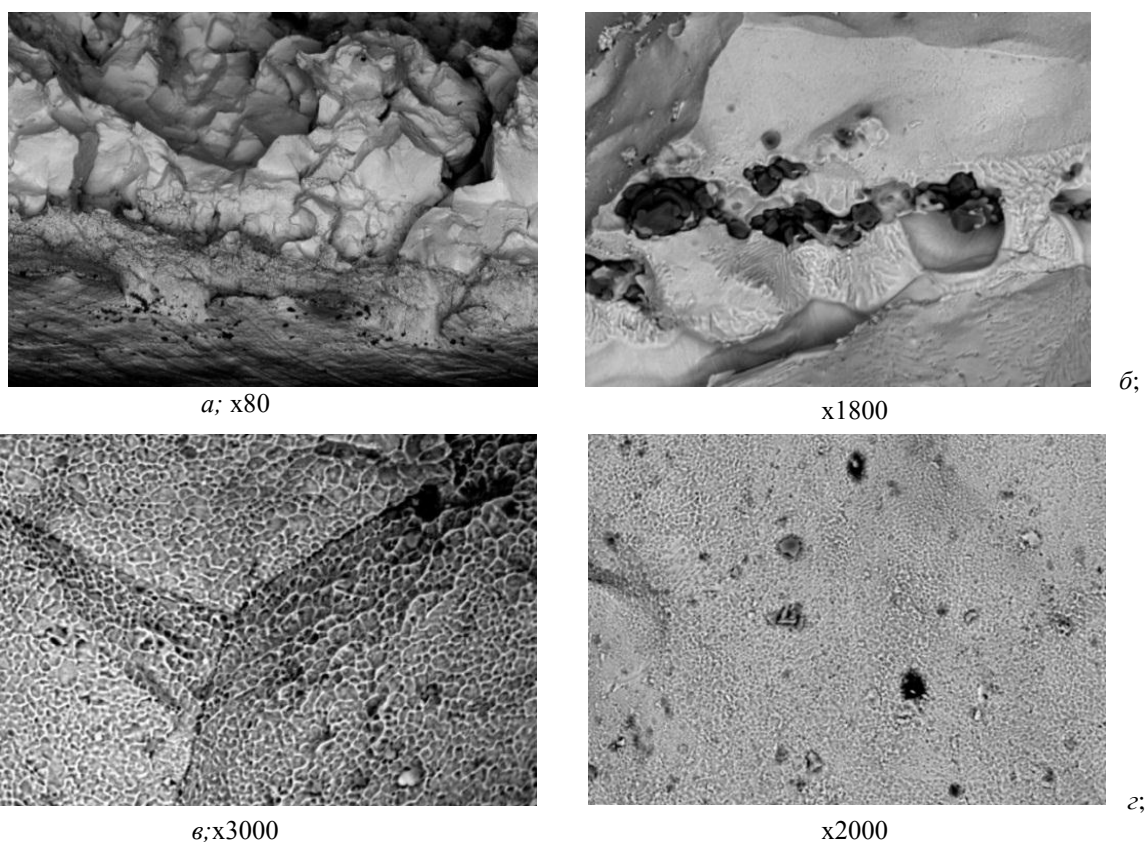


Рисунок 2 – Типы дефектов

Появление надрывов, выявляющихся при загибе образцов, носит случайный нерегулярный характер. Это свидетельствует о наличии технологического фактора – отклонениях в технологии раскладки валиков, тепловом режиме выполнения сварки, стремлении получить «красивую» поверхность шва, наличии ремонтных участков, которые могут привести к появлению микродефектов и избыточным внутренним напряжениям. Надрывы чаще всего появляются на образцах, вырезанных из нижней части Х-образной разделки шва, что свидетельствует о перегреве этой части сварного соединения при выполнении сварки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ТУ 0893-014-00212179-2004. Заготовки из стали марок 10ГН2МФА, 10ГН2МФА-ВД, 10ГН2МФА-Ш, 10ГН2МФА-А для оборудования АЭС. Технические условия. 2005. С изм. 8. 2019.

2. Ефимов, М. В. и др. Исследование неметаллических включений в крупных слитках, произведенных ПАО «Энергомашспецсталь» / М. В. Ефимов, А. А. Селютин, П. М. Явтушенко, В. В. Пашинский. – Наукові праці ДонНТУ. Metallurgy. Выпуск 1(14)-2(15). 2012. – С. 147-155.
3. Колоколов, Е. И. Ликвационная неоднородность и свариваемость стали 10ГН2МФА. Е.И. Колоколов, С.А. Томилин, М. Е. Жидков // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 4(33). – С. 27-36.

Formation and Nature of Cracks in the Heat-Affected Zone of Multi-Pass Welded Joints of Steel 10GN2MFA, Made by the ASF Method

E.I. Kolokolov^{*1}, A.V. Chernov^{*2}, A.A. Golubov^{3}**

**Volgodonsk Engineering and Technical Institute – a branch of the National Research Nuclear University "MEPhI", Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

***Branch of AEM-Technologies JSC «Atomash» in Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

¹e-mail: E.I.Kolokolov@yandex.ru

²e-mail: AVChernov@mephi.ru

³e-mail: golubow.tema@yandex.ru

Abstract – The paper considers the reasons for the appearance and nature of reheating cracks in the welded joint of multipass welded joints of steel 10GN2MFA, made by the ASF method. It is shown that, depending on the type of nonmetallic inclusions in the welded forgings, different mechanisms of the formation of tears in the welded joint are realized, which are opened during testing of bend samples.

Keywords: eutectic sulfides, complex oxides, bending specimens, fractographic studies, cracking centers on primary sulfide inclusions, reheating cracks, weakened boundaries of large grains of OZ, the presence of a technological factor.

УДК 539.4:624.012.45.04:621.039.538

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ТРЕХЛУЧЕВОЙ МОНТАЖНОЙ ТРАВЕРСЫ

С.А. Томилин, Р.В. Пирожков, Е.А. Цвелик, Э.В. Пинчук

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

В работе по результатам проверочного расчета на прочность и устойчивость представлены рекомендации по оптимизации конструкции трехлучевой траверсы для монтажа армоблока бетонной шахты реактора. Рекомендации направлены на уменьшение металлоемкости и снижение расходов и времени на ее изготовление и монтаж.

Ключевые слова: трехлучевая траверса; армоблок бетонной шахты реактора; оптимизация конструкции; металлоемкость; работоспособность.

Для оборудования, используемого при монтаже конструкций атомных станций, предъявляются повышенные требования к критериям работоспособности, в частности к прочности и надежности [1-6]. В то же время, разумное уменьшение металлоемкости, оптимизация конструкций позволяет существенно сократить расходы и время на изготовление и монтаж, а так же упростить процесс управления данным оборудованием при его использовании.

Для монтажа армоблока бетонной шахты реактора используется трехлучевая траверса грузоподъемностью 100 т, общий вид которой показан на (рис. 1).