

ВЛИЯНИЕ ПОВТОРНОГО НАГРЕВА ПРИ МНОГОПРОХОДНОЙ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РОТОРНОЙ СТАЛИ ЗАМЕДЛЕННОМУ РАЗРУШЕНИЮ

В.Ю. Скульский¹, С.И. Моравецкий¹, М.А. Нимко¹, Ю.Г. Пашенко², А.Г. Кантор², В.В. Дмитрик³

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²АО «Турбоатом». 61037, г. Харьков, просп. Московский, 199. E-mail: office@turboatom.com.ua

³НТУ «Харьковский политехнический институт». 61002, г. Харьков, ул. Кирпичева, 2. E-mail: svarka126@ukr.net

На примере соединений роторной стали типа 0,25C–2CrNiMoV, полученных сваркой под флюсом, с применением метода Имплант экспериментально изучено изменение сопротивления замедленному разрушению в зависимости от температуры предварительного подогрева и термического воздействия при наложении новых валиков. Исследован характер изменения твердости в поперечном сечении закаливающейся стали с наплавкой, иллюстрирующий формирование участков закалки и отпуска под воздействием повторного сварочного нагрева. Используя в качестве количественного показателя критические напряжения, вызывающие замедленное разрушение, показано, что после повторных сварочных нагревов сопротивление трещинообразованию может возрасти приблизительно в 1,5...2,5 раза и более. В условиях сварки без предварительного подогрева повторные однократный и двухкратный циклы сварочного нагрева повышают стойкость против трещин до уровня, получаемого при сварке с подогревом до 150...200 °С. Библиогр. 9, рис. 4.

Ключевые слова: сталь теплоустойчивая роторная, сварка под флюсом, закалка, повторный сварочный нагрев, Имплант, сопротивление замедленному разрушению

Одним из достоинств автоматической сварки под флюсом является высокая производительность, что позволяет получать соединения металла повышенных сечений при уменьшенном количестве проходов. Увеличение производительности достигается за счет большей тепловой мощности сварочной дуги. Однако сварка на режимах с повышенной погонной энергией ведет к увеличению сварочных напряжений [1], что может отрицательно сказываться на работоспособности сварных соединений. Кроме того, сварочные напряжения являются фактором, провоцирующим развитие замедленного разрушения сварных соединений закаливающих сталей; в свою очередь чрезмерный разогрев ведет к нежелательным структурным изменениям, увеличению размера зерна в околошовной зоне, что также негативно сказывается на эксплуатационных свойствах, увеличивает вероятность замедленного разрушения и образования трещин повторного нагрева [2–5]. С целью снижения уровня остаточных напряжений следует ограничивать вклад тепла в зону соединения, а также ограничивать температуру предварительного подогрева [1, 2]. Применительно к сварным соединениям энергомашиностроительных сталей больших толщин, включая роторные конструкции, применяют многопроходную свар-

ку под флюсом в узкую разделку. Рациональная технологическая схема также предусматривает ограничение погонной энергии для получения оптимального сечения наплавляемых валиков, что обеспечивает качественное формирование сварного соединения и снижение уровня остаточных напряжений [5].

Таким образом, во многих случаях многопроходная сварка с ограничением параметров сварочного режима является более предпочтительной, что сказывается положительно как на снижении напряженно-деформированного состояния, так и на формировании однородной структуры и результирующих свойств. Проблема образования холодных трещин решается применением предварительного и сопутствующего сварке подогрева. Как показано в работе [6] на примере многопроходной ручной дуговой сварки покрытыми электродами, повторный нагрев, за счет воздействия на структурный и водородный факторы, позволяет значительно повысить сопротивление замедленному разрушению металла в ранее выполненных слоях. Это дает возможность несколько снизить температуру предварительного подогрева, делая процесс сварки более экономичным. Представляет интерес проверить возможность получения подобного эффекта в условиях автоматической сварки под флюсом.

Цель работы — оценка влияния повторного нагрева при сварке под флюсом на сопротивление закаливающейся стали образованию холодных трещин.

Исследования выполнены с использованием роторной стали типа 0,25С–2Cr–NiMoV. Испытания на склонность к образованию холодных трещин проведены по методу Имплант [3] с использованием образцов диаметром 8 мм со спиральным концентратором напряжений в рабочей части. Показателем стойкости против трещинообразования было минимальное (критическое) напряжение $\sigma_{кр}$, выше которого развивалось замедленное разрушение. Автоматическую сварку образцов — Имплант с опорной пластиной (из стали 20) и наложение технологических валиков выполняли проволокой с системой легирования 0,14С–Cr–2NiMo под агломерированным флюсом UV422ТТ основного типа (основность по Бонишевскому 2,5 для мас. %). Измерение температуры в ЗТВ образца проводили с помощью термопары, пропущенной в отверстие в торце пластины и приваренной к образцу с помощью конденсаторной машины [6, рис. 1]. Твердость измеряли по методу Виккерса с нагрузкой на индентор 50 Н. Для определения концентрации диффузионного водорода $[H]_{диф}$ в наплавленном металле ($5,23 \text{ см}^3/100 \text{ г Me}$) применен спиртовой метод [7]; пробы металла получали путем наплавки валика на поверхность стали с просверленным отверстием — при смещении дуги в зону отверстия стекающий металл попадал в разъемную медную изложницу, в которой формировался «карандашный» образец для анализа. Повторный нагрев металла в области ранее наплавленного валика создавали, наплавляя один новый валик по центру первого (схема 1+1) или два частично перехлестывающихся валика, наложенных при смешении проволоки от зенита первого приблизительно на 1/4 его ширины (схема 1+2). При наплавке в качестве базового использовали следующий режим: $I_{св} = 320...340 \text{ А}$, $U = 35 \text{ В}$, $V_{св} = 19 \text{ м/ч}$; там, где указано дополнительно, выполняли наплавку только валиков нового слоя на пониженном токе — $I_{св} = 250...280 \text{ А}$, напряжение и скорость оставались как и в базовом режиме. В экспериментах наплавку каждого из последующих валиков проводили после охлаждения металла с предыдущей наплавкой до температуры $100 \text{ }^\circ\text{C}$ и ниже; нагружение испытываемых соединений выполняли после их остывания до комнатной температуры (до $100 \text{ }^\circ\text{C}$ соединения охлаждали на спокойном воздухе, после — ускорено с обдувом

воздухом). В отличие от рекомендованной ГОСТ 26388-84 температуры нагружения $150...100 \text{ }^\circ\text{C}$, выбранный подход обусловлен тем, что, как установлено экспериментально [8], в интервале $120...100 \text{ }^\circ\text{C}$ соединения сталей с мартенситной и мартенситно-бейнитной структурой (типа испытуемой) проявляли нестабильность в сопротивлении замедленному разрушению, а в интервале $100...80 \text{ }^\circ\text{C}$ — весьма высокую склонность к разрушению. Предполагая, что такая высокая чувствительность к факторам, вызывающим замедленное разрушение, и нестабильное поведение нагруженных сварных соединений при их остывании от $150...100 \text{ }^\circ\text{C}$, могут повлиять на точность результатов проводимых сравнительных исследований, принято решение нагружать соединения при комнатной температуре. При оценке влияния повторных нагревов на сопротивление трещинообразованию сварочные операции проводили без предварительного подогрева.

Установленный экспериментально характер изменения стойкости против замедленного разрушения изначально закаленного металла в ЗТВ после повторных циклов нагрева (рис. 1) согласуется с результатами аналогичных экспериментов при ручной дуговой сварке [6]. Исходя из изменений критических напряжений следует, что весьма эффективным является наложение двух последующих валиков (схема 1+2) — сопротивление трещинообразованию, по сравнению со сваркой одним валиком, увеличилось приблизительно в 2,5 раза; однократный нагрев дает промежуточный результат — $\sigma_{кр}$ увеличилось в 1,6 раза. Еще больший эффект получен после повторного нагрева при выполнении второго и третьего валиков при снижении тока (на графике — схема 1+2, «пониженный режим»).

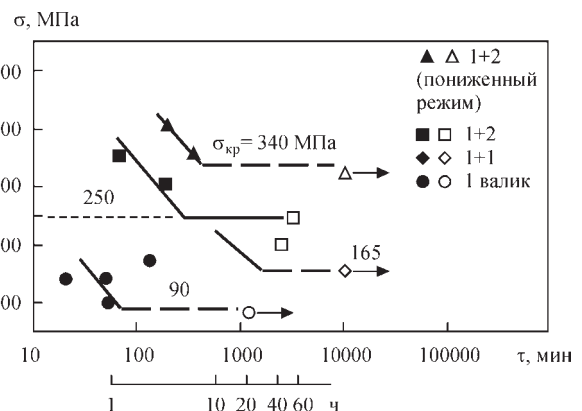


Рис. 1. Влияние повторного нагрева при автоматической сварке под флюсом (без предварительного подогрева) на склонность опытных соединений роторной стали типа 0,25С–2CrNiMoV к замедленному разрушению (темные и светлые значки — есть и нет разрушения, соответственно). $[H]_{диф} = 5,23 \text{ см}^3/100 \text{ г Me}$

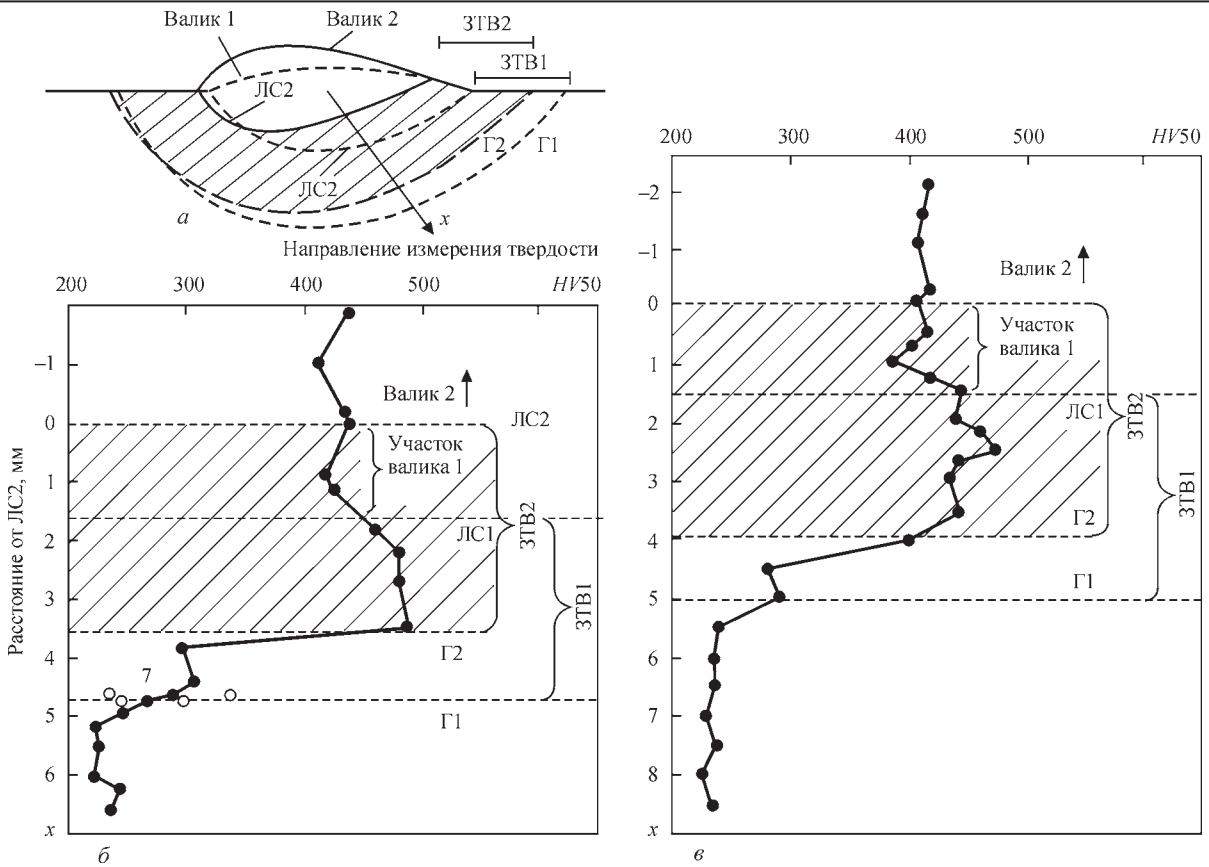


Рис. 2. Изменение твердости в различных зонах поперечного сечения металла с наплавкой двух валиков: *a* — схема наложения второго валика и направление измерения твердости; *b* — соответствующее схеме (*a*) распределение значений твердости при наплавке валиков на режиме с погонной энергией $q/v = 13$ кДж/см ($I_{св} = 200$ А, $U_d = 43$ В, $V_{св} = 19$ м/ч); *e* — профиль значений твердости при наплавке валиков на повышенном режиме — $q/v = 16,23$ кДж/см ($I_{св} = 250$ А, $U_d = 43$ В, $V_{св} = 19$ м/ч)

Изменение сопротивления трещинообразованию в определенной степени связано с геометрией поперечного сечения валиков, распределением температур и степенью отпуска закаленного участка в ЗТВ у исходного валика. При сварке на обычно используемых режимах наплавленные валки имеют вытянутую по ширине близкую к эллипсу форму. Как показали результаты изучения поперечных сечений валиков при автоматической наплавке под флюсом на поверхность стали (эксперименты выполнены с использованием стали X10CrMoVNb91), изменение погонной энергии за счет изменения силы тока в большей мере сказывается на увеличении ширины валиков и глубины проплавления, высота наплавки изменяется незначительно: например, при увеличении q/v от 14 до 20 кДж/см ширина, глубина проплавления и высота валика увеличились, соответственно, на 6,5; 1,8 и 1,0 мм. При наложении на неизменном сварочном режиме второго валика большая часть площади закаленного металла в ЗТВ у первого валика вновь подвергается закалке, что видно на схеме на рис. 2 (в данном случае второй валик выполнен с небольшим смещением от зенита первого; сокращениями обозначены: ЗТВ1, ЗТВ2

— участки закаленного металла, сформировавшиеся от нагревов при выполнении первого и второго валиков, очерченные граничными линиями Г1 и Г2; ЛС1, ЛС2 — соответствующие линии сплавления). На двух схемах изменения твердости видно, что выполнение новых валиков на меньшей (*b*) и большей (*e*) погонной энергии привело к падению твердости лишь на участках ЗТВ1 шириной около 1,0 мм при общей ширине ЗТВ1 для рассматриваемых вариантов приблизительно равной 3,0 и 3,5 мм. Естественно, что наложение только одного валика дает меньший отпускающий эффект, по сравнению с наложением двух, когда дополнительно металл в ЗТВ1 подвергается двукратному отпускающему нагреву (аналогичные результаты при ручной дуговой сварке получены в работе [6]). В свою очередь наложение двух новых валиков на пониженном токе за счет уменьшения глубины проплавления создает условие для воздействия отпускающих температур на большую площадь исходно закаленного металла в ЗТВ1. Результатом явилось повышение сопротивления замедленному разрушению, по сравнению с вариантом сварки одним валиком, приблизительно в 3,5 раза и, по сравнению со схемой 1+2, выполненной на ба-

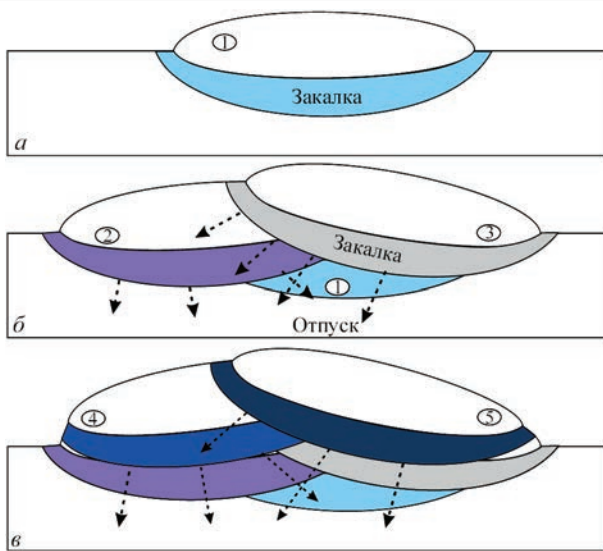


Рис. 3. Схема наложения валиков, формирования участков закалки (затитые области) и наложения температур отпуска (указаны стрелками): а — исходный валик; б, в — наложение двух слоев по два валика

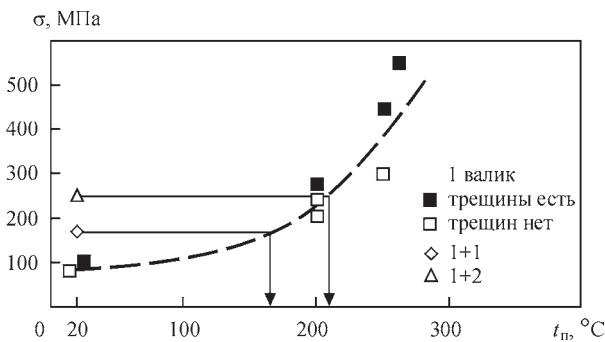


Рис. 4. Влияние температуры подогрева и условий сварки на сопротивление опытных соединений стали типа 0,25С–2CrNiMoV замедленному разрушению (20 °С — сварка без подогрева)

зовом режиме, — приблизительно в 1,5 раза. Подобный эффект следует ожидать при выполнении новых слоев наплаваемых валиков, когда по мере удаления от исходного закаленного металла (в ЗТВ1) будет исключаться его повторная закалка при воздействии только температур отпускающего диапазона (рис. 3).

На рис. 4 представлено сопоставление критических напряжений, полученных при сварке без подогрева и с подогревом до температуры $t_{п}$ 250 °С. Данные показывают, что при сварке без подогрева двукратное термическое воздействие на закаленный металл в области первого прохода (схема 1+2) позволило достичь сопротивления трещинообразованию, эквивалентное сварке с подогревом приблизительно до 200 °С; однократный повторный нагрев (схема 1+1) также создал значительный положительный эффект, близкий к сварке с подогревом приблизительно до уровня 150 °С. На основании представленных выше результа-

тов, а также данных работы [6], можно полагать, что большее число последующих отпускающих циклов при многопроходной сварке под флюсом без подогрева должно обеспечивать еще больший эффект, сопоставимый со сваркой с подогревом до более высокой температуры. В то же время, как показано в работе [9] на примере сварных соединений теплоустойчивой стали 10CrMo9-10, предварительный подогрев при сварке под флюсом способствует снижению концентрации диффузионного водорода в зоне соединения. В этой связи повышение сопротивления замедленному разрушению при повторных циклах сварочного нагрева можно считать как следствие влияния на структурный и, в определенной степени, — на водородный факторы.

Таким образом, полученные результаты показывают, что в условиях многопроходной сварки под флюсом закаливающихся сталей повторный сварочный нагрев существенно повышает стойкость сварных соединений замедленному разрушению, что проиллюстрировано увеличением критических напряжений, вызывающих трещинообразование, приблизительно в 1,5...2,5 раза и более в зависимости от количества циклов нагрева. Можно предположить, что с учетом положительного эффекта от повторных циклов термического воздействия возможно выполнение многопроходной сварки при пониженной температуре предварительного подогрева без риска ухудшения технологической прочности получаемых соединений.

Список литературы

1. Лобанов Л.М., Миходуй Л.И., Пивторак В.А. и др. (1995). Влияние особенностей технологии сварки под флюсом на напряженное состояние сварных соединений высокопрочной стали. *Автоматическая сварка*, 9, 21–23.
2. Бурашенко И.А., Звездин Ю.И., Цуканов В.В. (1981) Обоснование температуры подогрева при сварке хромоникельмолибденованадиевых сталей мартенситного класса. *Там же*, 11, 16–20.
3. Новиков И.И. (1971) *Теория термической обработки*. Москва, Металлургия.
4. Скульский В.Ю. (2009) *Зварюваність теплостійких сталей для котлоагрегатів високим параметрів*: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона.
5. Tsaryuk A.K., Skulsky V.Yu., Moravetsky S.I. (2016). Mechanized narrow-gap submerged arc welding of thick-walled cylindrical products. *Proceedings of the 2nd Medovar Memorial Symposium, June 7–10 2016, Kyiv, Ukraine*. Kyiv, Elmet-Roll.
6. Скульский В.Ю., Стрижиус Г.Н., Нимко М.А. и др. (2019) Сопротивление замедленному разрушению сварных соединений роторной стали 25Х2НМФА после повторного сварочного нагрева. *Автоматическая сварка*, 2, 9–16. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as2019.02.01>
7. Козлов Р.А. (1986) *Сварка теплоустойчивых сталей*. Ленинград, Машиностроение.
8. Скульский В.Ю. (2009) Термокинетические особенности образования холодных трещин в сварных соединениях закаливающихся теплоустойчивых сталей. *Автоматическая сварка*, 3, 14–18.

9. Oring H., Shütz H., Klug P. (1996) Vorwärmen aus Sicht des Schweißgutes bei hoch- und warmfesten Schweißverbindungen. *Schweisstechnik*, **1**, 4–8.

References

1. Lobanov, L.M., Mikhoduj, L.I., Pivtorak, V.A. et al. (1995) Influence of peculiarities of submerged-arc welding technology on stress state of high-strength steel welded joints. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 21–23 [in Russian].
 2. Burashenko, I.A., Zvezdin, Yu.I., Tsukanov, V.V. (1981) Substantiation of heating temperature in welding Cr-Ni-Mo-V steels of martensitic class. *Ib d.*, **11**, 16–20 [in Russian].
 3. Novikov, I.I. (1971) *Theory of heat treatment*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
 4. Skulsky, V.Yu. (2009) *Weldability of heat-resistant steels for boiler units of high parameters*. In: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Kyiv, PWI [in Ukrainian].

5. Tsaryuk, A.K., Skulsky, V.Yu., Moravetsky, S.I. (2016) Mechanized narrow-gap submerged-arc welding of thick-walled cylindrical products. In: *Proc. of 2nd Medovar Memorium Symp. (June 7-10, 2016, Kyiv, Ukraine)*. Kyiv, Elmet-Roll.
 6. Skulsky, V.Yu., Strizhius, G.N., Nimko, M.A. et al. (2019) Delayed fracture resistance of welded joints of rotor steel 25Kh2NMFA after welding reheating. *The Paton Welding J.*, **2**, 7–12. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/tpwj2019.02.01>
 7. Kozlov, R.A. (1986) *Welding of heat-resistant steels*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
 8. Skulsky, V.Yu. (2009) Thermokinetic peculiarities of formation of cold cracks in welded joints on hardening heat-resistant steels. *The Paton Welding J.*, **3**, 8–11.
 9. Oring, H., Shuetz, H., Klug, P. (1996) Vorwaermen aus Sicht des Schweißgutes bei hoch- und warmfesten Schweißverbindungen. *Schweisstechnik*, **1**, 4–8 [in German].

ВПЛИВ ПОВТОРНОГО НАГРІВУ ПРИ БАГАТОПРОХІДНОМУ ЗВАРЮВАННІ ПІД ФЛЮСОМ НА ОПІР ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ РОТОРНОЇ СТАЛІ УПОВІЛЬНЕНОМУ РУЙНУВАННЮ

В.Ю. Скульський¹, С.І. Моравецький¹, М.О. Німко¹, Ю.Г. Пашченко², О.Г. Кантор², В.В. Дмитрик³
¹ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²АО «Турбоатом». 61037, м. Харків, просп. Московський, 199. E-mail: office@turboatom.com.ua
³НТУ «Харківський політехнічний інститут». 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2. E-mail: svarka126@ukr.net

На прикладі з'єднань роторної сталі типу 0,25С–2CrNiMoV, отриманих зварюванням під флюсом, із застосуванням методу Імплант експериментально вивчено зміну опору уповільненому руйнуванню в залежності від температури попереднього підігріву та термічної дії при нашаруванні нових валків. Досліджено характер зміни твердості в поперечному перерізі гартованої сталі з наплавленням, який ілюструє формування ділянок гартування та відпуску під впливом повторного зварювального нагріву. Використовуючи в якості кількісного показника критичні напруги, що викликають уповільнене руйнування, показано, що після повторних зварювальних нагрівів опір утворенню тріщин може зростати приблизно в 1,5...2,5 рази і більше. В умовах зварювання без попереднього підігріву повторні одноразовий і дворазовий цикли зварювального нагріву підвищують стійкість проти тріщин до рівня, одержуваного при зварюванні з підігрівом до 150...200 °С. Бібліогр. 9, рис. 4.

Ключові слова: сталь теплотривка роторна, зварювання під флюсом, гартування, повторний зварювальний нагрів, Імплант, опір уповільненому руйнуванню

EFFECT OF REPEATED HEATING IN MULTI-PASS SUBMERGED ARC WELDING ON RESISTANCE OF WELDED JOINTS OF ROTOR STEEL TO DELAYED FRACTURE

V.Yu. Skulskyi¹, S.I. Moravetskyi¹, M.A. Nimko¹, Yu.G. Pashchenko², A.G. Kantor², V.V. Dmytryk³
¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²JSC «Turboatom». 199 Moscow Ave., 61037, Kharkov, Ukraine. E-mail: office@turboatom.com.ua

³NTU «Kharkov Polytechnic Institute». 2 Kirpicheva Str., 61002, Kharkov, Ukraine

On the example of the 0.25C-2CrNiMoV rotary steel joints, produced by submerged arc welding using the Implant method, the change in resistance to delayed fracture depending on the temperature of preheating and thermal effect during deposition of new beads was experimentally studied. The nature of change in hardness in the cross-section of quenching steel with surfacing was investigated, which illustrates the formation of quenching and tempering areas under the influence of repeated welding heating. Using critical stresses as a quantitative indicator, causing a delayed fracture, it was shown that after repeated welding heating, the resistance to cracking can increase by about 1.5...2.5 times or more. In the conditions of welding without preheating, repeated one-time and two-time cycles of welding heating increase the resistance to cracks up to the level obtained during welding with preheating up to 150...200 °C. 9 Ref., 4 Fig.

Key words: heat-resistant rotary steel, submerged arc welding, quenching, repeated welding heating, Implant, resistance to delayed fracture

Поступила в редакцію 28.11.2018