

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С МЯГКИМИ ПРОСЛОЙКАМИ

© 2015

Л.С. Диньмухаметова, кандидат технических наук, заведующий лабораториями Самарский государственный университет путей сообщения, филиал в г. Орске, Орск (Россия)
Е.В. Пояркова, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиноведения Оренбургский государственный университет, Оренбург (Россия)

Ключевые слова: сварные соединения; стали повышенной прочности; механическая неоднородность; коррозия; термоциклическая обработка.

Аннотация: Исследовано влияние структурно-механической неоднородности сварных соединений на характеристики несущей способности сталей повышенной прочности классов К52 (марок 09Г2С и 17Г1СУ), К56 (09Г2ФБ), К66 (10ХСНД) и К70 (10Г2ФБЮ). Определена топография механической неоднородности сварных элементов при наличии в них мягких прослоек в области шва и (или) околошовной зоны, диапазон относительной толщины которых варьируется от 0,6 до 0,8. Доказано, что мягкие прослойки в сварных соединениях вызывают снижение показателей прочности до 30 %, а удельной работы разрушения до 50 %. На примере натурных испытаний сварных элементов штуцерных узлов оценено влияние механической неоднородности на сопротивление разрушению при воздействии коррозионно-активных нефтепродуктов. Показано повышение скорости коррозии и значительное снижение показателей пластичности для металла мягкой прослойки (околошовной зоны) по сравнению с основным металлом на всем сроке эксплуатации. Также выявлено существенное снижение показателей вязкости разрушения по мере наработки, которое особенно интенсивно проявлялось в течение первых трех лет эксплуатации. Оценено воздействие термоциклической обработки на механическую неоднородность и показатели сопротивления разрушению сварных элементов. Выполнена количественная оценка влияния термической обработки на живучесть сварных элементов конструкций как способность противостоять разрушению в присутствии повреждений. Анализ результатов испытаний на статическую и циклическую трещиностойкость позволил определить предельные размеры повреждений и остаточный ресурс сварных элементов, а также проанализировать их изменение после термообработки. Показана трансформация характера напряженно-деформированного состояния при проведении термоциклической обработки.

ВВЕДЕНИЕ

В аспекте изучения надежности сварных соединений свойственная им структурно-механическая неоднородность обеспечивает некоторую уязвимость таким элементам конструкций, особенно при эксплуатации в коррозионно-активных средах, при циклических нагрузках и низких температурах. С позиций исследования работоспособности сварных соединений наибольший интерес при различных видах нагружения вызывают сварные элементы, ослабленные мягкими прослойками (участками), которые лимитируют прочностные и пластические свойства соединений в целом [1–6]. Для снижения механической неоднородности и повышения эксплуатационных характеристик сварных соединений применяются методы, основанные на оказании на металл импульсных термических воздействий, в частности, термоциклическая обработка.

Цель работы заключалась в оценке изменения характера механической неоднородности и показателей эксплуатационной стойкости сварных элементов с мягкими прослойками при термоциклической обработке (ТЦО).

МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования были использованы натурные сварные элементы конструкций из низкоуглеродистых низколегированных сталей повышенной прочности классов К52 (марок 09Г2С и 17Г1СУ), К56 (09Г2ФБ), К66 (10ХСНД) и К70 (10Г2ФБЮ) в исходном состоянии и после различной наработки (химический состав, геометрия и условия изготовления образцов в [4–9]). Разработку режимов термической обработки проводили в соответствии с методикой, описанной в [9; 10]. ДюрOMETрический контроль, определение механических свойств при испытаниях на растяжение, ударной вязкости, анализ трещиностойкости при стати-

ческом и циклическом нагружении выполняли по стандартным методикам на оборудовании, прошедшем государственную поверку [4; 7–9; 12]. Для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) сварных соединений проводили моделирование полей остаточных напряжений методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS [14; 17]. Расчеты ресурса безопасной эксплуатации, вероятности возникновения аварийных ситуаций и анализ рисков выполнены по методикам [12; 13; 18; 19].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Металлографическим анализом и дюрOMETрическим контролем установлено наличие в исследуемых сварных соединениях мягких прослоек, в роли которых выступает металл шва и (или) околошовной зоны (ОШЗ) [5; 19; 20]. Выявлена зависимость свойств сварных соединений от степени и топографии механической неоднородности [5], характеризуемой взаимным расположением и геометрией твердых и мягких прослоек. Степень механической неоднородности K_{σ} определялась как отношение $\sigma_{0,2}$ твердой прослойки к $\sigma_{0,2}$ мягкой прослойки. На рисунке 1 показано значительное снижение прочностных и пластических свойств при наличии в сварном соединении мягких прослоек относительной толщины $\chi > 0,4$. Практически двукратное уменьшение величины удельной работы разрушения сварного элемента вызывают прослойки с $\chi = 0,6 \div 0,8$.

Коррозионно-механические испытания сварных соединений [20], контактирующих с керосином при различной наработке, показали локализацию коррозионного износа в металле мягкой прослойки и интенсификацию в нем эксплуатационного старения. Рисунок 2

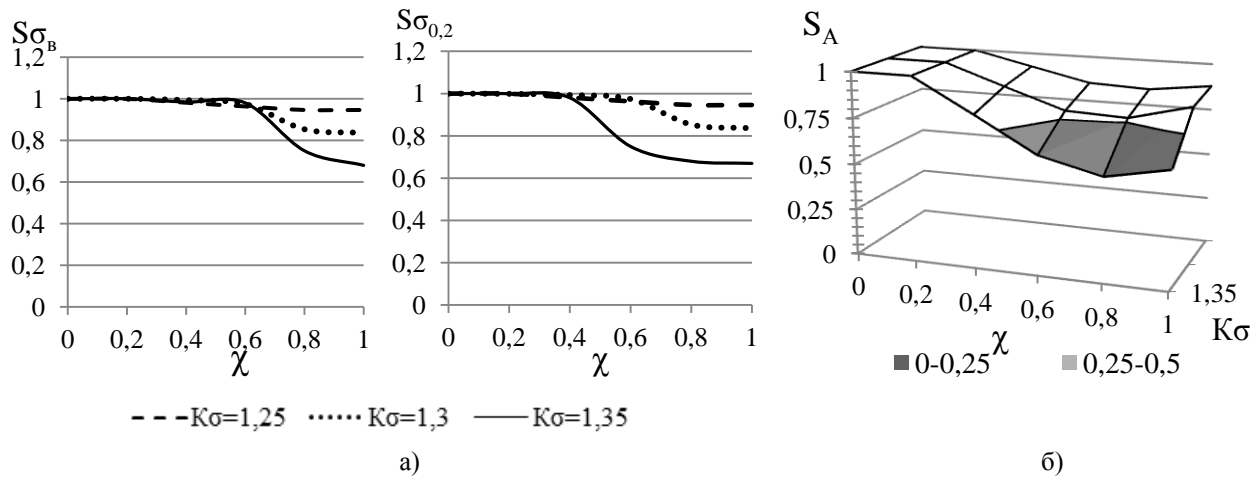


Рис. 1. Влияние характера структурно-механической неоднородности на относительное изменение показателей несущей способности сварных соединений с мягкими прослойками (по вертикальным осям отложены величины, равные отношению соответствующей характеристики, определенной для сварного соединения, к характеристике основного металла): а) предела прочности и предела текучести; б) удельной работы разрушения

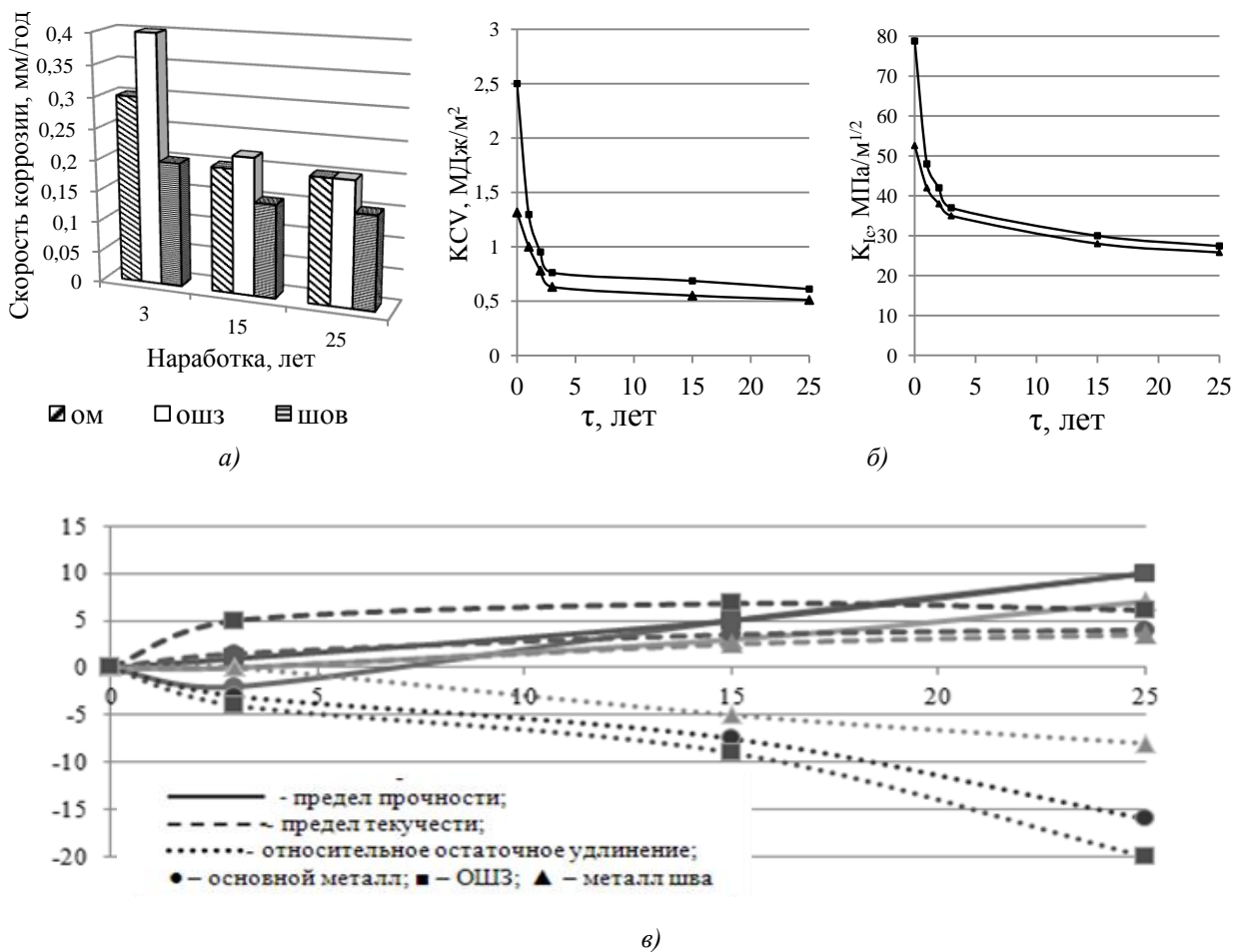


Рис. 2. Изменение показателей эксплуатационной стойкости для различных зон сварных соединений: а) скорости коррозии; б) вязкости разрушения; в) относительное изменение механических свойств сварных элементов в зависимости от продолжительности контакта с керосином

Таблица 1. Режимы ТЦО сварных соединений

Сварное соединение	Вид обработки	$T_{нагр}, ^\circ C$	$V_{нагр}$	$T_{охл}, ^\circ C$	$V_{охл}, ^\circ C / мин$	Число циклов
09Г2С	ТЦО1	770 ± 10	$250 \pm 10^\circ C / мин$	550_{-20}	200 ± 20	3
	ТЦО2	790 ± 10	$25 \pm 2^\circ C / с$	550_{-20}		4
	ТЦО3	770 ± 10	$250 \pm 10^\circ C / мин$	600_{-20}		3
10ХСНД	ТЦО1	780 ± 5	$250 \pm 10^\circ C / мин$	580_{-20}	200 ± 20	3
	ТЦО2	790 ± 10	$250 \pm 10^\circ C / мин$	600_{-20}		2

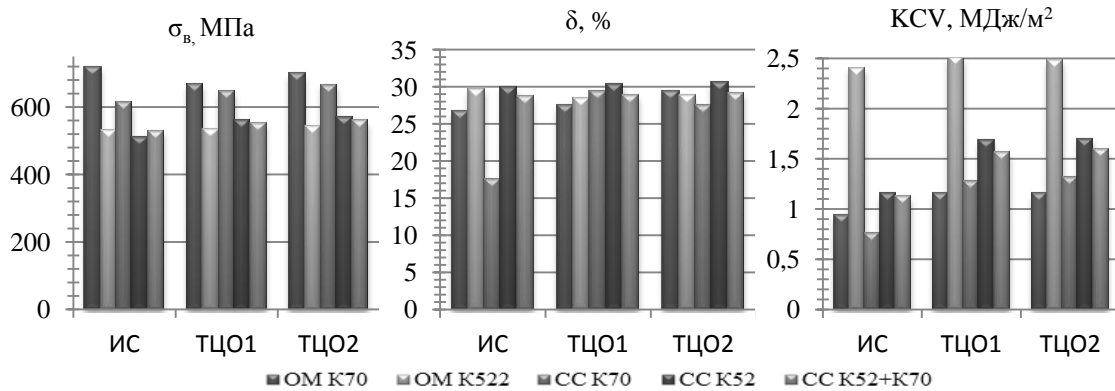


Рис. 3. Механические свойства сварных элементов в исходном состоянии и после термообработки

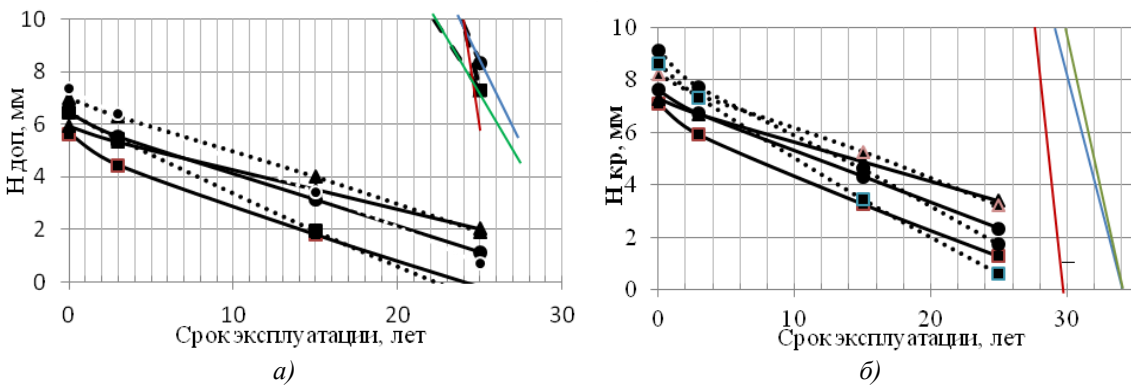


Рис. 4. Кривые живучести сварных элементов: а) допускаемая глубина дефекта; б) критическая глубина дефекта; сплошными линиями показаны результаты расчета на статическую прочность; штриховыми – расчета на сопротивление хрупкому разрушению; пунктирными – на сопротивление усталости; сплошными тонкими линиями обозначен прогноз изменения предельных размеров дефектов; ● – основной металл; ■ – ОШЗ; ▲ – металл шва

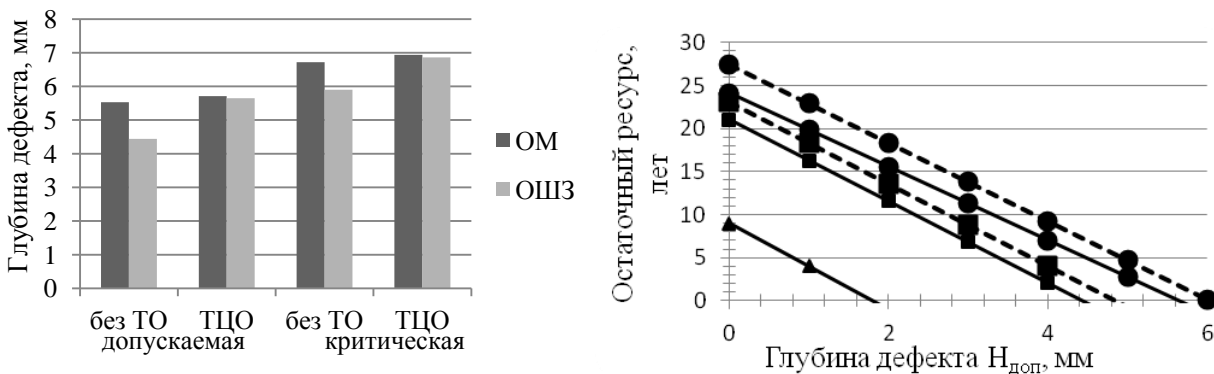


Рис. 5. Изменение предельных размеров дефектов и остаточного ресурса в сварных элементах после ТЦО: ● – ранее не эксплуатируемая конструкция; ■ – после трех лет эксплуатации; ▲ – после 15 лет эксплуатации; сплошные линии – без термической обработки; штриховые – после ТЦО

демонстрирует снижение вязкости разрушения у металла ОШЗ более чем в 1,5 раза по мере наработки, а относительного удлинения – на 20 %.

Для оценки влияния термического воздействия на структурно-механическое состояние и сопротивление разрушению сварных элементов проводилась термоциклическая обработка, при разработке режимов которой (см. таблицу 1) использовался метод планирования экспериментов; при этом критерием оптимизации выбрано повышение прочности сварного соединения при сохранении высоких вязкопластических свойств [10; 11; 14; 17].

Анализ результатов механических испытаний термообработанных образцов, представленных на рисунке 3, позволил установить, что проведением ТЦО возможно обеспечить существенное повышение удельной работы разрушения и ударной вязкости материала сварных соединений (СС). Для более прочных сталей (К70) ТЦО способствует повышению показателей пластичности сварных соединений. При этом во всех исследуемых случаях показатели прочности изменяются незначительно (в пределах 10 %).

Оценка НДС сварных соединений на основе конечно-элементного анализа выявила снижение при термической обработке максимума значений остаточных растягивающих напряжений, проявляющихся в наплавленном металле сварного элемента, от 336 МПа (в исходном состоянии) до 316 МПа (в термически обработанном) [5; 14; 17].

По результатам испытаний на статическую и циклическую трещиностойкость установлены предельные размеры повреждений и остаточный ресурс сварных элементов из стали 09Г2С [2; 9; 19; 21; 22]. Проведением конечно-элементного анализа [14; 15; 17] определено, что наибольшие значения эксплуатационных напряжений в рассматриваемом сварном элементе составляют около 332 МПа, тогда как средние значения напряжений варьируются на уровне 16÷66 МПа. Таким образом, ресурс прочности, рассчитанный по основному металлу с учетом максимальных напряжений и коррозионных воздействий (при условии отсутствия дефектов сплошности), составляет 27 лет.

Постулируя наличие неравномерного распределения напряжений в различных участках сварного элемента, выполнены расчеты допускаемой и критической глубины трещин в зависимости от срока эксплуатации. При расчете на статическую прочность в качестве предельного состояния принималось наступление текучести материала в нетто-сечении конструктивного элемента, ослабленном трещиноподобным дефектом [1]. Графическая интерпретация результатов расчетов представлена на рисунке 4.

Показано, что наступление отказа исследуемого сварного элемента обусловлено потерей сопротивления усталости металла мягкой прослойки; при этом после 10 лет эксплуатации допускаемая глубина дефекта в ОШЗ примерно в два раза ниже, чем в основном металле.

Для оценки влияния ТЦО на живучесть исследуемых сварных соединений проанализированы эволюция структурно-механического состояния, регресс предельных размеров дефектов в околошовной зоне и изменение остаточного ресурса (см. рисунок 5). Сопоставле-

нием предельных размеров повреждений элементов в исходном и термически обработанном состоянии установлено, что проведение ТЦО способствует увеличению предельно допускаемых размеров повреждений в прилегающем к сварному шву участке до соответствующих значений, характерных для основного металла. Данный факт, в свою очередь, благоприятствует продлению ресурса безопасной эксплуатации исследуемых конструкций на 15 % и снижению вероятности возникновения аварийной ситуации в 1,3 раза.

ВЫВОДЫ

1. При оценке сопротивления разрушению сварных соединений сталей повышенной прочности классов К52-К70 установлено, что наличие мягких прослоек приводит к снижению прочности конструктивных элементов в зависимости от степени механической неоднородности до 30 %, удельной работы разрушения до 50 % и ресурса безопасной эксплуатации до 15 %.

2. Проведение термоциклической обработки сварных элементов способствует снижению степени их механической неоднородности, уменьшает чувствительность материала мягкой прослойки к концентраторам напряжений, гарантирует продление ресурса безопасной эксплуатации сварных конструкций на 15 % и снижение вероятности возникновения аварийной ситуации в 1,3 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винокуров В.А., Куркин С.А., Николаев Г.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности. М.: Машиностроение, 1996. 576 с.
2. Махутов Н.А., Митрофанов Н.В., Барышов С.Н. Оценка сопротивления разрушению и продление ресурса безопасной эксплуатации оборудования, эксплуатируемого в H₂S-содержащих средах // Прочность и разрушение материалов и конструкций: материалы V междунар. науч. конф. Т. 2. Оренбург, 2008. С. 5–21.
3. Шахматов М.В., Шахматов Д.М. Прочность механически неоднородных сварных соединений. Челябинск: Сварка и Контроль, 2009. 223 с.
4. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Н.М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.
5. Диньмухаметова Л.С., Пояркова Е.В. Влияние механической неоднородности на предельную несущую способность сварных соединений из сталей повышенной прочности // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. № 6. С. 160–163.
6. Шахматов Д.М., Шахматов М.В., Усманова Е.А. Особенности определения прочности механически неоднородных сварных соединений по результатам испытания вырезаемых из них образцов // Сварка и диагностика. 2012. № 2. С. 9–12.
7. ГОСТ 6996–66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. М.: Стандартинформ, 2007. 66 с.
8. ГОСТ 14771–76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. М.: Стандартинформ, 2007. 37 с.

9. ГОСТ 25506–85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. М.: Стандартиформ, 1986. 66 с.
10. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. 255 с.
11. Кузеев И.Р., Пояркова Е.В., Диньмухаметова Л.С. Эволюция градиентных структурно-механических состояний сварных соединений при термоциклическом воздействии // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2011. № 1. С. 254–267.
12. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч. 2. Обоснование ресурса и безопасности. Новосибирск: Наука, 2005. 610 с.
13. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч. 1. Критерии прочности и ресурса. Новосибирск: Наука, 2005. 493 с.
14. Диньмухаметова Л.С., Пояркова Е.В. Применение магнитных методов при контроле качества сварных конструкций из сталей повышенной прочности // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2012. № 4. С. 352–360.
15. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: Наука, 1980. 354 с.
16. Пономаренко Д.В., Сюкаев Г.М. Механизм возникновения сварочных напряжений и деформаций. М.: УГТУ-УПИ, 2010. 46 с.
17. Dinmukhametova L.S., Poyarkova E.V. The application of magnetic methods at the quality control of welded designs made from increased durability steel // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2012. № 4. С. 361–369.
18. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов: РД 03-418-01. М.: Промбезопасность, 2001. 35 с.
19. Стеклов О.И. Мониторинг и прогноз ресурса сварных конструкций с учетом их старения и коррозии // Сварочное производство. 1997. № 1. С. 16–22.
20. Кузеев И.Р., Диньмухаметова Л.С., Пояркова Е.В. Прогнозирование безопасности эксплуатации сварных конструкций в условиях нефтесодержащих сред // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2011. № 6. С. 254–262.
21. Методика оценки потенциальной опасности и остаточного ресурса трубопроводов, имеющих коррозионные поражения и несплошности в сварных швах и основном металле, выявленные при внутритрубной дефектоскопии: СТО 0-13-28-2006. М.: ВНИИнефтемаш, 2006. 65 с.
22. Куркин С.А., Лавряков Ю.Ю. Оценка работоспособности стыковых сварных соединений при наличии несквозных дефектов // Заводская лаборатория. 1981. № 4. С. 66–70.
2. Makhutov N.A., Mitrofanov N.V., Barishov S.N. Evaluation of the resistance to breakage and life extension of safe operation of equipment used in H₂S-bearing environment. *Materiali V mezhdunar. nauch. konf. "Prochnost i razrushenie materialov i konstruktsiy"*. Orenburg, 2008, vol. 2, pp. 5–21.
3. Shakhmatov M.V., Shakhmatov D.M. *Prochnost mekhanicheskii neodnorodnikh svarnikh soedineniy* [Strength of mechanically heterogeneous welded joints]. Chelyabinsk, Svarka i Kontrol publ., 2009, 223 p.
4. Serensen S.V., Kogaev V.P., Shneyderovich N.M. *Nesushchaya sposobnost i raschet detaley mashin na prochnost* [Bearing capacity and calculation of machine parts for strength]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1975, 488 p.
5. Dinmukhametova L.S., Poyarkova E.V. Influence of mechanical heterogeneity on limiting bearing ability of welded connections from steels of the raised durability. *Nauchno-tekhnicheskyy vestnik Povolzhya*, 2011, no. 6, pp. 160–163.
6. Shakhmatov D.M., Shakhmatov M.V., Usmanova E.A. Aspects of determining the strength of mechanically heterogeneous welded joints basing on the results of testing of cut samples. *Svarka i diagnostika*, 2012, no. 2, pp. 9–12.
7. GOST 6996–66. Welded joints. Methods of determining of mechanical properties. Moscow, Standartinform publ., 2007, 66 p. (In Russian).
8. GOST 14771–76. Arc welding in shielding gas. Welded joints. Basic types, structural elements and dimensions. Moscow, Standartinform publ., 2007, 37 p.
9. GOST 25506–85. Calculations and strength tests. Moscow, Standartinform publ., 1986, 66 p.
10. Fedyukin V.K., Smagorinsky M.E. *Termotsiklicheskaya obrabotka metallov i detaley mashin* [Thermal cyclic treatment of metals and machine parts]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1989, 255 p.
11. Kuzeev I.R., Poyarkova E.V., Dinmukhametova L.S. The evolution of gradient of structural and mechanical conditions of welded connections under thermocyclic influence. *Elektronniy nauchniy zhurnal Neftegazovoe delo*, 2011, no. 1, pp. 254–267.
12. Makhutov N.A. *Konstruktsionnaya prochnost, resurs i tekhnogennaya bezopastoct. Ch. 2. Obosnovanie resursa i bezopasnosti* [Structural strength, resource and technogenic safety. Part 2. Resource and safety argumentation]. Novosibirsk, Nauka publ., 2005, 610 p.
13. Makhutov N.A. *Konstruktsionnaya prochnost, resurs i tekhnogennaya bezopastoct. Ch. 1. Kriterii prochnosti i resursa* [Structural strength, resource and technogenic safety. Part 1. Strength and safety criteria]. Novosibirsk, Nauka publ., 2005, 493 p.
14. Dinmukhametova L.S., Poyarkova E.V. The application of magnetic methods at the quality control of welded designs made from increased durability steel. *Elektronniy nauchniy zhurnal Neftegazovoe delo*, 2012, no. 4, pp. 352–360.
15. Morozov E.M., Nikishkov G.P. *Metod konechnikh elementov v mekhanike razrusheniya* [Finite elements method in fracture mechanics]. Moscow, Nauka publ., 1980, 354 p.
16. Ponomarenko D.V., Syukasev G.M. *Mekhanizm vozniknoveniya svarochnikh napryazheniy i deformatsiy*

REFERENCES

1. Vinokurov V.A., Kurkin S.A., Nikolaev G.A. *Svarnie konstruktsii. Mekhanika razrusheniya i kriterii rabotosposobnosti* [Welded structures. Fracture mechanics and performance standards]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1996, 576 p.

- [Mechanism of origination of welding stresses and deformations]. Moscow, UGTU-UPI publ., 2010, 46 p.
17. Dinmukhametova L.S., Poyarkova E.V. The application of magnetic methods at the quality control of welded designs made from increased durability steel. *Elektronniy nauchniy zhurnal Neftegazovoe delo*, 2012, no. 4, pp. 361–369.
 18. *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu analiza riska opasnikh proizvodstvennikh obyektov* [Technical tips for analysis of risk of hazardous industrial facilities]. RD 03-418-01. Moscow, Prombezopasnost publ., 2001, 35 p.
 19. Steklov O.I. Welded structures resource monitoring and forecast with account of their deterioration and corrosion. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1997, no. 1, pp. 16–22.
 20. Kuzeev I.R., Dinmukhametova L.S., Poyarkova E.V. Forecasting the operation safety of welded designs in the conditions of oilcontaining environments. *Elektronniy nauchniy zhurnal Neftegazovoe delo*, 2011, no. 6, pp. 254–262.
 21. *Metodika otsenki potentsialnoy opasnosti i ostatochnogo resursa truboprovodov, imeyushchikh korroziionnie porazheniya i nesploshnosti v svarnikh shvakh i osnovnom metalle, viyavlenii pri vnutritrubnoy defektoskopii* [Methods of evaluation of potential hazard and remaining lifetime of pipes having corrosion damages and discontinuity flaws in weld seams and basis metal discovered by smart pigging]. STO 0-13-28-2006. Moscow, VNIIneftemash publ., 2006, 65 p.
 22. Kurkin S.A., Lavryakov Yu.Yu. Evaluation of working capacity of butt welded joints in case of part-through flaws. *Zavodskaya laboratoriya*, 1981, no. 4, pp. 66–70.

THE INFLUENCE OF THERMAL CYCLIC TREATMENT ON THE SERVICE DURABILITY OF WELDED ELEMENTS WITH SOFT INTERLAYER

© 2015

L.S. Dinmukhametova, candidate of technical sciences, head of the laboratories

Orsk Branch of Samara State University of Railroads, Orsk (Russia)

E.V. Poyarkova, candidate of technical sciences, Associate Professor,

assistant professor of the department Mechanical Engineering

Orenburg State University, Orenburg (Russia)

Keywords: welded joints; high-strength steel; mechanical heterogeneity; corrosion; thermal cyclic treatment.

Abstract: The authors studied the influence of structural and mechanical heterogeneity of welded joints on bearing capacity characteristics of high-strength steels of K52 (09G2S and 17G1SU brands), K56 (09G2FB), K66 (10HSND) and K70 (10G2FBYU) grades. The authors identified the topography of mechanical heterogeneity of welded elements having soft interlayers in the welded seam area and (or) the near-weld area, the range of thickness ratio of which varies from 0,6 to 0,8. It is proved that the soft interlayers in the welded joints cause the reduction of strength index up to 30%, and the specific fracture work up to 50%. The influence of mechanical heterogeneity on the resistance to breakage in the result of reaction of aggressive corrosive petroleum products was estimated on the example of environmentat tests of welded elements of connection units. The study showed the corrosion velocity increase and the substantial reduction of plasticity index for the soft interlayer metal (near-weld area) in comparison with the base metal during the whole lifetime.

The significant decline of parameters of fracture toughness during the operating time, which is especially intensively manifested during the first three years of operation, was revealed. The authors estimated the influence of thermal cyclic treatment on the mechanical heterogeneity and the indicators of fracture resistance of welded elements. The quantitative assessment of the influence of thermal treatment on the survivability of welded structure elements as the ability to resist destruction in the presence of damages was fulfilled. The analysis of test results for static and cyclic crack resistance allowed to determine the limiting size of damages and residual life of welded elements, as well as to analyze their changes after the thermal treatment. The transformation of the strain-stress state nature during the thermal cyclic treatment is shown.