

УДК 620.163.3:621.774

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕТАЛЛА КОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

© Н. И. Голиков, Н. М. Литвинцев¹*Статья поступила 15 октября 2014 г.*

Исследованы механические свойства и структурные показатели металла конструкций, длительно эксплуатируемых в экстремальных условиях Севера. Определены характеристики металла газопровода-отвода диаметром 273 мм и вертикального цилиндрического резервуара вместимостью 700 м³ из низкоуглеродистой стали Ст3сп, а также кольцевого сварного соединения магистрального газопровода диаметром 530 мм из низколегированной стали 09Г2С. Показано, что в процессе эксплуатации происходит изменение структуры сталей, связанное с образованием усталостных и коррозионных повреждений, а также с выпадением карбидов. Оценены степени изменения механических свойств сталей металлоконструкций после их длительной эксплуатации.

Ключевые слова: конструкционные стали; механические свойства; структура; металлоконструкция.

Установление механизмов изменения физических, механических свойств и структурно-фазовых состояний металла конструкций и сооружений при длительной эксплуатации позволяет более обоснованно подходить к проблеме прогнозирования долговечности в процессе их проектирования, строительства и эксплуатации [1]. Под влиянием нагрузок и воздействий на конструкцию из-за неоднородности структуры металла в процессе эксплуатации могут изменяться местное напряженно-деформированное состояние, развиваться микропластические деформации, локализовываться концентрация напряжений и т. п. В результате развивается процесс деградации металла конструкции, т.е. происходит непрерывное накопление повреждений. Физико-механические характеристики металла определяются структурными особенностями. Поэтому процесс деградации металла обуславливает изменение ряда его механических свойств: снижение прочностных характеристик (σ_r , σ_b , $HВ$), вязкопластических показателей (δ , ψ), характеристик сопротивления развитию трещин (K_{IC} , K_{ICU} , K_{ICV}), повышение критических температур хрупкости [2–4].

Исследования, проводимые с целью изучения влияния длительной эксплуатации на механические свойства и структуру металлов конструкций, — трудоемкие и дорогостоящие [5–10]. Для испытаний используют металл действующей конструкции, как правило, разрезая ее. Для сравнения необходимо также иметь данные о первоначальных свойствах и структуре металла, из которого была изготовлена конструкция. Однако запасы металла этой же партии являются большой редкостью. В то же время данные

исследования позволяют установить фактическое состояние металла и дать рекомендации по его дальнейшему использованию.

В работе определяли механические свойства и структурные показатели материала после длительной эксплуатации в экстремальных условиях Севера. Исследования проводили на следующих образцах:

труба из стали 09Г2С диам. 530 мм и толщиной стенки 7 мм с кольцевым сварным соединением, вырезанная из магистрального газопровода после эксплуатации в течение 42 лет;

труба газопровода-отвода (г. Якутск, г. Покровск) диам. 273 мм и толщиной стенки 8 мм, изготовленная из стали марки ВСт3сп, после длительной эксплуатации и труба из аварийного запаса, хранившегося около 38 лет на открытом воздухе; газопровод-отвод построен в 1968 г. с рабочим (нормативным) давлением 3,9 МПа;

листы вертикального стального резервуара вместимостью 700 м³ после 38 лет его эксплуатации и аварийного разрушения.

Статическое растяжение образцов основного металла проводили по ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 10006–80 с помощью универсальной электромеханической испытательной машины Zwick/Roell Z600 (Германия) при комнатной температуре.

Испытания на ударный изгиб (ГОСТ 9454–78, ГОСТ 6996–66) осуществляли на образцах с U-образными надрезами по основному металлу (ОМ), околошовной зоне (ОШЗ) и металлу шва (МШ) в диапазоне температур от –60 до +20 °С. Надрезы образцов выполняли на специальном станке для нарезки концентраторов глубиной 2 мм. Испытания проводили с помощью маятникового копра модели 2010 КМ-30, с энергией 300 Дж. Образцы для испытаний при –20,

¹ Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия;
e-mail: n.i.golikov@mail.ru

–40 и –60 °С охлаждали в температурной камере. Интервал времени переноса образца от температурной камеры до испытания 5 с.

Анализ микроструктуры основного металла, металла шва и околошовной зоны стыкового сварного соединения проводили с помощью металлографических микроскопов METAM PB, Neophot-32 и AxioObserver D1m. Перед исследованием образец шлифовали наждачной бумагой в порядке убывания зернистости, полировали алмазной пастой и травили 4 %-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Микроструктуру некоторых образцов более детально изучали сканирующим электронным микроскопом JSM-6480 (фирмы Jeol) с энергетическим спектрометром фирмы OXFORD.

Микрошлифы для металлографического анализа были изготовлены по сечению, перпендикулярному продольной оси сварного шва. Микроструктуру исследовали в центральной части корневого и облицовочного швов, в переходной зоне облицовочного шва к основному металлу — на участках перегрева и нормализации.

Химический состав образцов определяли методом спектрального анализа на установке Foundry-master (табл. 1).

Приведем результаты испытаний и исследований образцов.

Труба из стали 09Г2С диаметром 530 мм. При растяжении образцов основного металла трубы установлены следующие механические характеристики: предел прочности $\sigma_b = 501$ МПа; предел текучести $\sigma_t = 383$ МПа; относительное удлинение $\delta = 24,9$ %. Полученные значения механических

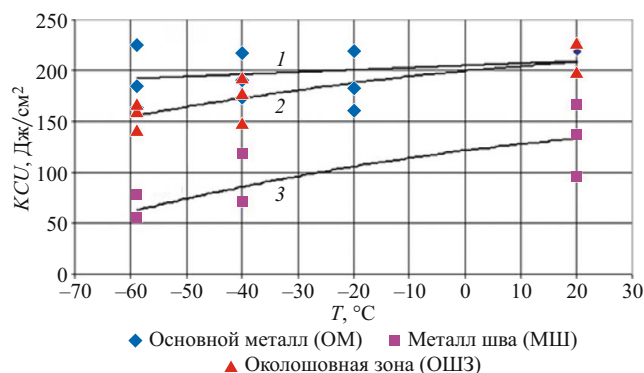


Рис. 1. Зависимости ударной вязкости образцов кольцевого сварного соединения трубы диам. 530 мм после длительной эксплуатации от температуры испытания: 1 — ОМ; 2 — ОШЗ; 3 — МШ

свойств соответствуют требованиям ГОСТ 19282 для низколегированной стали 09Г2С.

По данным динамических испытаний построены зависимости ударной вязкости (KCU) зон кольцевого сварного соединения от температуры (рис. 1). Видно, что самое низкое значение ударной вязкости имеет металл шва, а KCU околошовной зоны при температуре испытания –60 °С меньше, чем KCU основного металла, на 16 % [3].

По результатам металлографического анализа основной металл трубы имеет мелкозернистую ферритно-перлитную структуру, перлит пластинчатый, балл зерна равен 8 (рис. 2). При исследовании шлифов трубы после длительной эксплуатации были выявлены дефекты, так называемые «каверны», с четко выраженными границами на сварном шве и основном

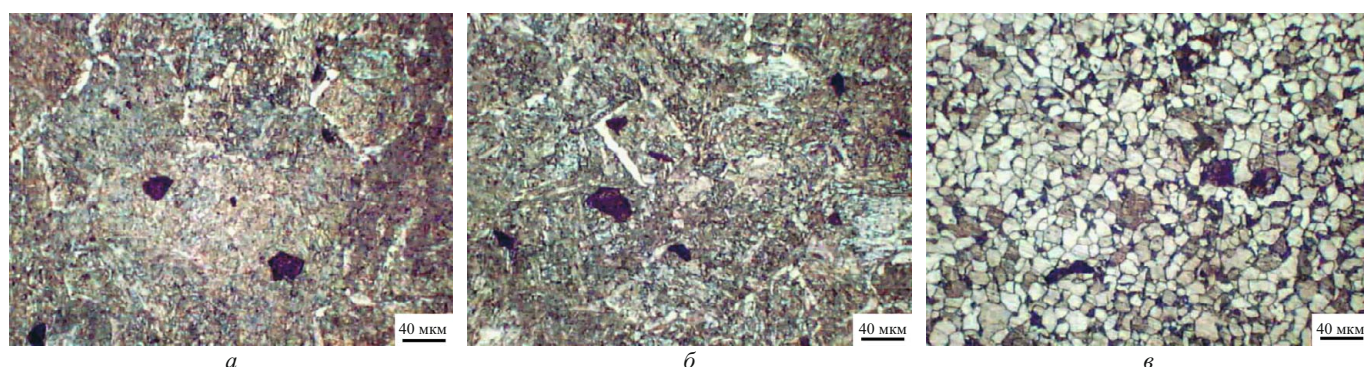


Рис. 2. Микроструктура образцов из магистрального газопровода после 40 лет эксплуатации: а — МШ ($\times 500$); б — ОШЗ ($\times 500$); в — ОМ ($\times 500$)

Таблица 1. Химический состав исследованных образцов

Образец	Массовая доля химических элементов, %							
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Cu	S	P
Труба Ø530 мм из стали 09Г2С	0,07	1,56	0,64	0,03	0,06	0,04	0,03	0,02
Труба Ø273 мм из стали СтЗсп, после эксплуатации	0,17	0,5	0,24	0,07	0,03	0,06	0,02	0,02
Труба Ø273 мм из стали СтЗсп, аварийный запас	0,14	0,55	0,28	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03
Листы стенки резервуара из стали СтЗпс	0,22	0,5	0,1	0,04	0,05	0,07	0,03	0,02

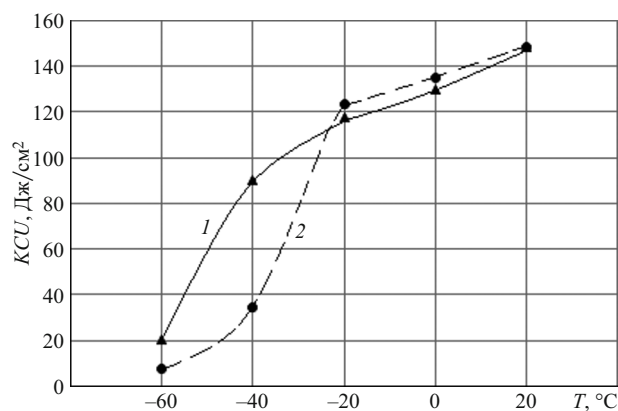


Рис. 3. Зависимости средних значений ударной вязкости основного металла труб диам. 273 мм из стали СтЗсп от температур испытаний: 1 — труба № 1; 2 — труба № 2

металле (см. черные точки на рис. 2). Выпадение зерен «каверны» в сварном шве и в основном металле происходит по границам ферритно-перлитных образований.

С целью детального изучения образцов с выявленными дефектами типа каверн были проведены дополнительные исследования их микроструктуры на сканирующем электронном микроскопе. Исследова-

Таблица 2. Механические свойства трубной стали СтЗсп

Образец	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ , %
Труба Ø273 мм, после эксплуатации	360	476	29
Труба Ø273 мм, аварийный запас	327	414	32

Таблица 3. Результаты испытаний образцов на ударный изгиб основного металла труб диаметром 273 мм из стали СтЗсп

Температура испытаний, °C	Значения ударной вязкости KCU, Дж/см²		Среднее значение ударной вязкости KCU, Дж/см²	
	Труба № 1	Труба № 2	Труба № 1	Труба № 2
+20	142	154	148	148
	137	131		
	156	153		
	158	154		
0	122	129	130	135
	120	128		
	129	146		
	149	135		
-20	98	114	118	124
	89	143		
	159	113		
	125	124		
-40	103	8	90	34
	88	56		
	86	6		
	84	66		
-60	4	6	20	7
	6	8		
	64	6		
	8	9		

ние основного металла образца при увеличении 5000 позволило установить, что структура стали ферритно-перлитная (перлит пластинчатый). Черные язвы каверны расположены в перлитных образованиях. При катрировании (измерении концентрации определенного элемента) установлено, что в кавернах, расположенных в перлитных образованиях, наблюдается избыточное количество углерода С (26,63 %) и уменьшенное содержание Fe (71,84 %).

Измеренное количество углерода в феррите и перлите соответствует показателям стандарта. Карта распределения по С выявила значительное количество углерода в местах расположения перлита, особенно в кавернах.

Исследование микроструктуры образца со сварным швом показало многочисленные повреждения как в основном металле, так и в сварном шве. При увеличении 4000 обнаружены многочисленные каверны. Катрирование наиболее характерных участков шва выявило значительное содержание углерода в поврежденных местах.

В основном металле повреждения образуются на границах перлита и проникают внутрь перлита. В сварном шве карбиды обнаружены не только на границах перлита, но и в ферритных образованиях, что может быть связано со сложными химическими процессами при формировании сварного шва.

Трубы диаметром 273 мм из стали СтЗсп. Испытанием на одноосное статическое растяжение определены механические свойства образцов, изготовленных из труб после длительной эксплуатации и аварийного запаса (табл. 2).

Полученные результаты свидетельствуют о повышении предела текучести и снижении относительного удлинения металла трубы после длительной эксплуатации примерно на 10 %.

По результатам ударных испытаний построены зависимости ударной вязкости от температуры (рис. 3). Низкие значения ударной вязкости обнаружены у образцов, вырезанных из газопровода после эксплуатации в течение ~38 лет (труба № 2). При $t = -60$ °C среднее значение ударной вязкости трубы аварийного запаса (трубы № 1) составило 20 Дж/см², трубы № 2 — 7 Дж/см². Результаты испытаний при отрицательных температурах показали большое охрупчивание стали трубы № 2 по сравнению со сталью трубы аварийного запаса (табл. 3).

Металлографический анализ показал, что сталь обеих труб имеет крупнозернистую ферритно-перлитную структуру, балл зерна равен 6 (рис. 4, а). У образца, вырезанного из длительно эксплуатируемой трубы, в структуре наблюдаются темные полосы, проходящие параллельно друг другу (рис. 4, б). Можно предположить, что это усталостные повреждения, которые вызваны местной пластической деформацией и связанным с ней циклическим упрочнением. Пластическая деформация развивается обычно спонтанно по-

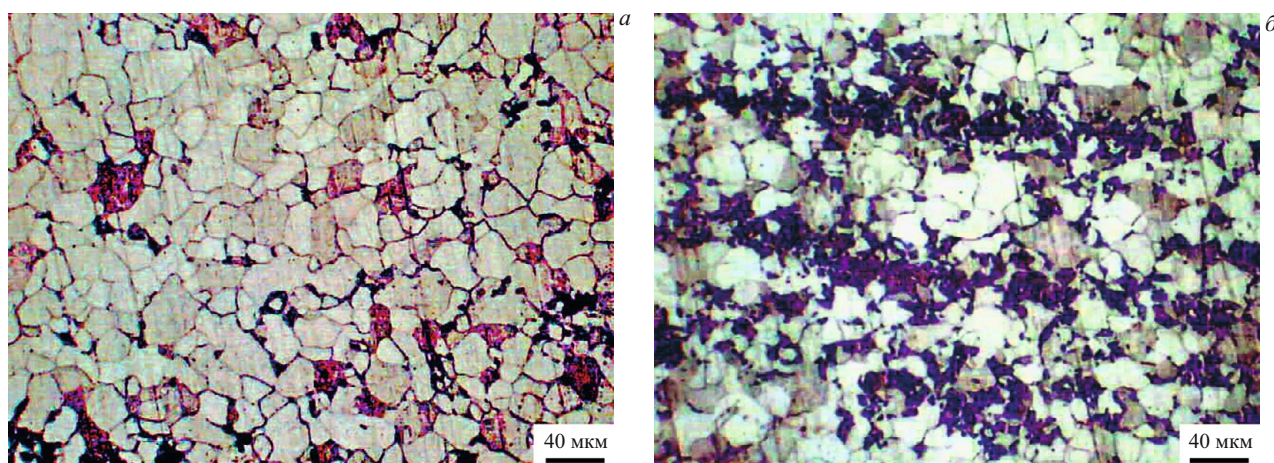


Рис. 4. Микроструктура стали трубы диаметром 273 мм после эксплуатации ($\times 500$)

сле одного или нескольких циклов малоциклового нагружения. Развитая деформация аналогична деформации при статическом нагружении, но значительно более выражена.

Листы стенки резервуара из стали СтЗпс. По данным экспертизы причин аварии катастрофическое разрушение резервуара РВС-700, введенного в эксплуатацию в 1970 г., произошло вследствие хрупкого разрушения по основному металлу стенки, зоне термического влияния швов соединения стенки с крышей и дном при сочетании таких факторов, как старение металла резервуара, проявившееся в его охрупчивании, понижение температуры окружающего воздуха до -42°C , наличие дефекта в виде трещины на стенке. Инициация разрушения началась с усталостной плоскостной трещины длиной 21 мм и глубиной 2,5 мм, расположенной в листе 1-го пояса стенки на высоте 600 мм от уторного соединения стенки резервуара с дном, под углом $15-20^\circ$ к горизонту. Очагом развития трещины послужила несплошность металлургического характера, расположенная в основном металле 1-го пояса стенки.

Резервуар был сконструирован в заводских условиях методом рулонирования из стандартных листов размерами 1500×6000 мм и толщиной 4 мм. Для изучения процессов деформационного старения резервуара из листов его стенки и дна изготавливали образцы на статическое растяжение и ударную вязкость с U-образным надрезом.

Средние значения предела текучести (σ_t), временного сопротивления (σ_b) и относительного удлинения (δ) листов представлены в табл. 4. Из нее следует, что наиболее значительно (на 28 %) повысилось отношение σ_t/σ_b листа дна по сравнению с листами стенки резервуара, а δ при этом уменьшилось на 41 %. У листа 1-го пояса δ оказалось меньше, чем у остальных листов стенки, его снижение составило 17,6 %.

По результатам испытаний построены температурные зависимости ударной вязкости (KCU) образцов, изготовленных из различных поясов стенки и

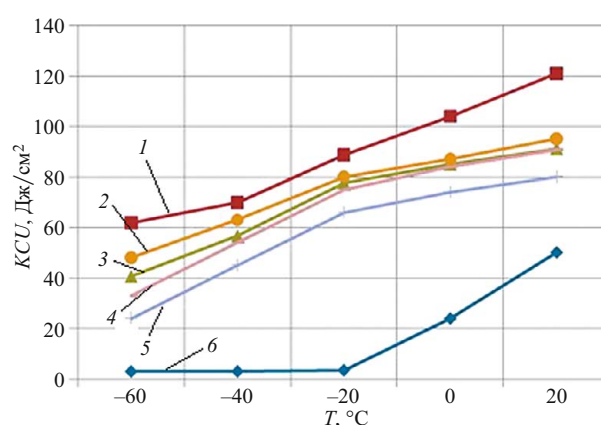


Рис. 5. Зависимости ударной вязкости листов резервуара после длительной эксплуатации от температуры испытания: 1 — 2-й пояс; 2 — 6-й пояс; 3 — 3-й пояс; 4 — 5-й пояс; 5 — 1-й пояс; 6 — дно

дна резервуара (рис. 5). Образцы листа 1-го пояса имеют наименьшие значения ударной вязкости среди других листов стенки резервуара, а образцы листа 2-го пояса — наибольшие KCU . По сравнению с KCV других листов стенки ударная вязкость листа первого пояса при комнатной температуре понизилась на 17,7 %, при -20°C — на 20,8 %, при -40°C — на 26,6 %, при -60°C — на 48,2 %. Таким образом, существенное различие KCU листов проявляется при понижении температуры испытаний. При комнатной

Таблица 4. Механические характеристики стали листов резервуара РВС-700

Месторасположение листов	σ_t , МПа	σ_b , МПа	σ_t/σ_b	δ , %
1-й пояс	261	414	0,630	27,2
2-й пояс	237	406	0,584	41,7
3-й пояс	259	405	0,640	32,3
4-й пояс	247	408	0,600	31,6
5-й пояс	258	406	0,635	31,9
6-й пояс	249	414	0,600	33,5
Дно	301	380	0,790	19,5

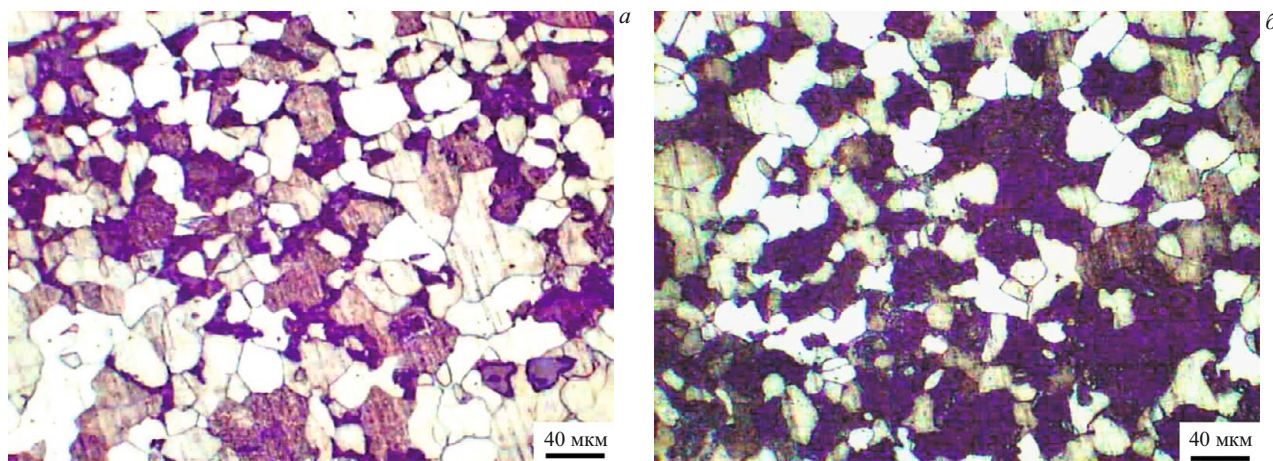


Рис. 6. Микроструктура образцов из 6-го (а) и из 1-го (б) поясов стенки резервуара РВС (x500)

температуре средняя ударная вязкость листа днища меньше, чем средняя KCU листов стенки, на 43,5 %. Результаты ударных испытаний и статического растяжения имеют определенную корреляцию [3].

Листы днища резервуара были подвержены язвенной коррозии, поэтому механические испытания выявили их охрупчивание и потерю пластичности. Как известно, в ходе эксплуатации максимальные нагрузки испытывают нижние листы резервуара. Но результаты испытаний показали отсутствие определенной зависимости уровня нагруженности поясов стенки резервуара на их ударную вязкость. Очевидно, на результаты испытаний оказывают влияние имеющиеся запасы прочности листов стенки. При обследовании листа 1-го пояса была обнаружена деформация стенки (вмятина). Данный дефект, являясь концентратором напряжений, мог существенно повысить действующие нагрузки в листе.

У образцов из 1-го и 6-го поясов стенки резервуара структура крупнозернистая ферритно-перлитная, балл зерна равен 6. Микроструктура образца из стенки 6-го пояса резервуара местами подвержена коррозии, о чем свидетельствуют черные точки, язвы, расположенные в перлитных колониях (рис. 6, а). Микроструктура образца из стенки 1-го пояса резервуара сильно подвержена коррозии (рис. 6, б). Коррозия охватывает сразу несколько зерен, которые образуют ямки, каверны, а также продукты коррозии, которые, соединяясь между собой, могут уменьшить живое сечение стенки, приводя к значительному уменьшению ее механических характеристик.

Таким образом, в процессе эксплуатации изменяется (деградирует) структура конструкционных сталей объектов. В ней образуются усталостные и коррозионные повреждения, а также выпадают карбиды. Такая деградация стали в процессе эксплуатации сама по себе не приводит к разрушению, но изменяет критические параметры и скорости повреждающих процессов и, следовательно, создает условия для быстрого разрушения объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сосновский Л. А., Махутов Н. А., Бордовский А. М., Воробьев В. В. Статистическая оценка деградации свойств материала нефтепровода / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2003. Т. 69. № 11. С. 40 – 49.
2. Зайцев К. И. О старении труб магистральных нефтегазопроводов / Строительство трубопроводов. 1994. № 6. С. 2 – 5.
3. Зорин Е. Е. Разработка основ прогнозирования работоспособности сварных трубопроводов из ферритно-перлитных сталей с учетом условий эксплуатации: автореф. дис. ... докт. техн. наук. — М., 1993. — 37 с.
4. Гумеров А. Г., Зайнуллин Р. С., Ямалеев К. М., Росляков А. В. Старение труб нефтепроводов. — М.: Недра, 1995. — 218 с.
5. Лякишев Н. П., Кантор М. М., Белкин А. А., Тимофеев В. Н. Об оценке влияния длительной эксплуатации на механические свойства и структуру металла магистральных нефтепроводов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 1. С. 75 – 82.
6. Лякишев Н. П., Кантор М. М., Воронин В. Н., Тимофеев В. Н., Шарыгин Ю. М. Исследование структуры металла газопроводов после их длительной эксплуатации / Металлы. 2005. № 1. С. 3 – 16.
7. Ильин С. И., Смирнов М. А., Пашков Ю. И., Анисимов Ю. И., Протопопов В. А. Изменение структуры и свойств трубной стали во время длительных выдержек под нагрузкой / Изв. Челябинского научного центра. 2002. Вып. 4(17). С. 42 – 46.
8. Стеклов О. И. Надежность магистральных газопроводов в условиях интенсификации процессов коррозии и старения / Сварочное производство. 2010. № 5. С. 40 – 43.
9. Махутов Н. А., Пермяков В. Н., Кравцова Ю. А., Ботвина Л. Р. Оценка состояния материала продуктопровода после его длительной эксплуатации / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 2. С. 35 – 43.
10. Сыромятникова А. С. Деградация физико-механического состояния металла труб магистрального газопровода при длительной эксплуатации в условиях криолитозоны / Физическая мезомеханика. 2014. Т. 17. № 2. С. 85 – 91.

REFERENCES

1. Sosnovskii L. A., Makhutov N. A., Bordovskii A. M., Vorob'ev V. V. Statisticheskaya otsenka degradatsii svoistv materiala nefteprovoda [Statistical evaluation of the degradation of the material properties of the oil pipeline] / Zavod Lab. Diagn. Mater. 2003. Vol. 69. N 11. P. 40 – 49 [in Russian].
2. Zaitsev K. I. O starenii trub magistral'nykh neftegazoprovodov [About aging pipes oil and gas pipelines] / Stroit. Truboprov. 1994. N 6. P. 2 – 5 [in Russian].

3. Zorin E. E. Razrabotka osnov prognozirovaniya rabotosposobnosti svarnykh truboprovodov iz ferritno-perlitnykh stalei s uchetom uslovii éksploatatsii [Development of bases of forecasting performance of welded pipes of ferritic-pearlite steels with the operating conditions]. Author's Abstract of Doctoral Thesis. — Moscow, 1993. — 37 p. [in Russian].
4. Gumerov A. G., Zainullin R. S., Yamaleev K. M., Roslyakov A. V. Starenie trub nefteprovodov [Aging oil pipes]. — Moscow: Nedra, 1995. — 218 p. [in Russian].
5. Lyakishev N. P., Kantor M. M., Belkin A. A., Timofeev V. N. Ob otsenke vliyaniya dlitel'noi éksploatatsii na mekhanicheskie svoystva i strukturu metalla magistral'nykh nefteprovodov [An estimate of the impact of long-term operation on the mechanical properties and the metal structure of main oil pipelines] / Zavod Lab. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. N 1. P. 75 – 82 [in Russian].
6. Lyakishev N. P., Kantor M. M., Voronin V. N., Timofeev V. N., Sharygin Yu. M. Issledovanie struktury metalla gazoprovodov posle ikh dlitel'noi éksploatatsii [Investigation of the structure of the metal pipeline after long-term operation] / Metall. 2005. N 1. P. 3 – 16 [in Russian].
7. Il'in S. I., Smirnov M. A., Pashkov Yu. I., Anisimov Yu. I., Protopopov V. A. Izmenenie struktury i svoystv trubnoi stali vo vremya dlitel'nykh vyderzhek pod nagruzkoi [Changes in the structure and properties of the pipe steel during long exposures under load] / Izv. Chelyab. Nauch. Tsentra. 2002. N 4. P. 42 – 46.
8. Steklov O. I. Nadezhnost' magistral'nykh gazoprovodov v usloviyakh intensifikatsii protsessov korrozii i stareniya [The reliability of the main gas pipelines in the conditions of intensification of processes of corrosion and aging] / Svaroch. Proizv. 2010. N 5. P. 40 – 43.
9. Makhutov N. A., Permyakov V. N., Kravtsova Yu. A., Botvina L. R. Otsenka sostoyaniya materiala produktprovoda posle ego dlitel'noi éksploatatsii [Assessment of material product pipeline after long-term operation] / Zavod Lab. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. N 2. P. 35 – 43.
10. Syromyatnikova A. S. Degradatsiya fiziko-mekhanicheskogo sostoyaniya metalla trub magistral'nogo gazoprovoda pri dlitel'noi éksploatatsii v usloviyakh kriolitozony [Degradation of the physical and mechanical condition of metal pipes of main gas pipeline in continuous operation in a permafrost zone] / Fiz. Mezomekh. 2014. Vol. 17. N 2. P. 85 – 91.

УДК 620.163.4:672.3

УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ СВАРНОГО ОБРАЗЦА ИЗ СТАЛИ 09Г2С ПОСЛЕ ТЕРМООБРАБОТКИ И РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ¹

© А. М. Иванов²

Статья поступила 15 октября 2012 г.

Рассмотрены вопросы обеспечения хладостойкости сварного соединения из низколегированной стали методом интенсивной пластической деформации по способу равноканального углового прессования в сочетании с закалкой. Представлены данные по ударной вязкости образцов Менаже из стали 09Г2С со сварными швами при температуре 233 К. Показано, что при комбинировании способов закалки и равноканального углового прессования более высокие показатели сопротивления разрушению при ударном изгибе и низкой температуре обеспечивает тип сварного соединения с Х-образной разделкой кромок заготовок.

Ключевые слова: сталь; ударная вязкость; сварное соединение; закалка; равноканальное угловое прессование; упрочнение; разрушение.

Как известно, качество сварного соединения зависит от множества факторов. Широкие возможности для улучшения свойств сварного соединения открывают методы его обработки в послесварочный период. Дополнительная обработка материалов различными способами продиктована техническими условиями на изделия, требованиями к деталям машин и элементам конструкций по эксплуатационной надежности. Наряду с термообработкой и другими способами на практике применяют деформационную обработку материалов традиционными методами. Но известные деформационные методы обработки незначительно изменяют свойства металлических материалов. В на-

стоящее время достаточно широкое развитие получили методы интенсивной пластической деформации, с помощью которых упрочняют в основном однородные по составу и свойствам заготовки [1 – 3]. Комбинирование методов интенсивной пластической деформации и отжига способствует повышению хладостойкости конструкционных сталей [4 – 6].

Представляет интерес обработка заготовок с неоднородной структурой методами интенсивной пластической деформации. В работе [7] рассмотрен способ обработки заготовок из низкоуглеродистой стали ВСтЗсп со сварным соединением с К- и Х-образными разделками швов равноканальным угловым прессованием (РКУП) и приведены характеристики прочности и пластичности материала.

Цель данной работы — исследование влияния термической обработки закалкой и РКУП на низко-температурную ударную вязкость различных зон свар-

¹ Представленная работа является частью исследований, выполненных при финансовой поддержке проектов РФФИ № 12-01-98509 и № 25.7 Программы президиума РАН.

² Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия;
e-mail: a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru