

Технология и технологические машины

УДК 620.1:539.4

Экспериментальное моделирование поведения сварных соединений с дефектами несплошности при критических нагрузках

М.Н. Захаров, В.А. Насонов

При диагностическом обследовании эксплуатируемых конструкций часто выявляются дефекты несплошности металла сварного шва (поры, твердые неметаллические включения), размеры которых превышают нормативно допустимые. Рациональная оценка технического состояния таких конструкций может быть произведена на основе данных о фактической прочности сварного соединения, содержащего подобные дефекты.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований разрушения стальных образцов, в том числе сварных образцов с дефектами, смоделированными при изготовлении сварного шва. Проведенные эксперименты показали, что металл сварного шва прочнее основного металла на 15%. Действительное снижение прочности сварного соединения наблюдается при размере внутреннего дефекта свыше 30% толщины свариваемых деталей. При этом, согласно нормативным документам, это значение не должно превышать 20%. Таким образом, оценку допустимости отмеченных дефектов для уже эксплуатируемых объектов рационально вести с использованием данных о критическом размере несплошности, наличие которой действительно приводит к снижению прочности конструкции. Результаты моделирования будут полезны при оценке допустимости дефектов конструкций, находящихся в эксплуатации.

Ключевые слова: сварочные дефекты, сварное соединение, сварной шов, прочность.



ЗАХАРОВ
Михаил Николаевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ZAKHAROV
Mikhail Nikolaevich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



НАСОНОВ
Виктор Андреевич
(РГУ Нефти и газа
им. И.М. Губкина)

NASONOV
Viktor Andreevich
(Moscow, Russian Federation,
Gubkin Russian
State University of Oil and Gas)

Experimental modeling of the behavior of welded joints with discontinuities under critical loads

M.N. Zakharov, V.A. Nasonov

The diagnostic inspection of structures during their service lifetime often reveals discontinuity defects of the weld metal (pores, solid non-metallic inclusions) that are larger than standard defects allowed. Technical conditions of these structures can be evaluated on the basis of the actual strength of a welded joint containing such defects. This paper presents the results of experimental studies of destruction of steel samples, including welded samples with simulated defects. The experiments showed that the weld metal is 15 percent as strong as the base metal. The strength of the welded joint decreases if the internal defect makes up more than 30 percent of the welded part thickness. At the same time, according to normative documents, this value should not exceed 20 percent. Thus, defects in objects being exploited can be estimated by their critical size at which the strength of the structure reduces. The results of modeling will be useful when monitoring the growth of defects in structures in service.

Keywords: welding defects, welded joint, weld, strength.

Сварка металлов является технологическим процессом, требующим высокой культуры исполнения, так как качество конечного сварного соединения определяется совокупностью многих факторов, таких как режим процесса, качество применяемых материалов, человеческий фактор и т. п. Тем не менее, как показывает практика эксплуатации сварных изделий в различных отраслях, в том числе и в нефтегазохимии, зачастую сварные швы действующих конструкций содержат недопустимые дефекты, основную массу которых составляют поры и шлаковые включения [1, 2]. В подобном случае перед руководителями среднего звена встает непростая проблема принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации объекта, поскольку несмотря на наличие в изделии дефекта, размеры которого превы-

шают нормативные допуски, имеет место факт безотказной, безаварийной работы конструкции в течение всего межремонтного периода. При этом следует отметить, что в отличие от ряда других типов дефектов (коррозия, эрозийный износ и др.), образующихся во время эксплуатации, сварочные дефекты присутствуют в изделии с момента его изготовления.

Таким образом, наряду с недостаточным выходным контролем, что особенно характерно для монтажных швов, выполняемых по месту эксплуатации оборудования, можно говорить о необходимости экспериментальных исследований фактической прочности сварных соединений, ослабленных дефектами несплошности. В работах [3, 4] дана общая оценка прочностной надежности таких соединений и показана целесообразность детального изучения вопроса влияния размера дефекта на прочность конструкции.

В рамках обозначенной проблемы авторами настоящей статьи были проведены следующие эксперименты. В соответствии с задачами исследования первоначально было изготовлено два исходных сварных соединения (ИСС). Каждое такое соединение представляет собой две прямоугольные стальные пластины (сталь 09Г2С) размерами 500×150×16 мм, сваренные электродами марки УОНИ-13/55 ручным методом с умышленным допущением в шве дефектов несплошности. При этом, если шов ИСС-1 был выполнен таким образом, что по всей своей длине содержал значительное количество шлаковых включений, то для шва ИСС-2 характерно наличие двух участков сварного шва: на длине порядка 200 мм получены дефекты типа внутренние поры, а оставшаяся часть (около 300 мм) представляет собой высококачественный сварной шов, выполненный с максимально возможным соблюдением технологии процесса и не имеющий внутренних и наружных дефектов. Результаты проведенного впоследствии радиографического контроля подтверждают качество полученных сварных швов (рис. 1).

Исследование прочности полученных сварных соединений проводилось в два этапа.

Целью первого этапа являлось определение механических характеристик основного метал-

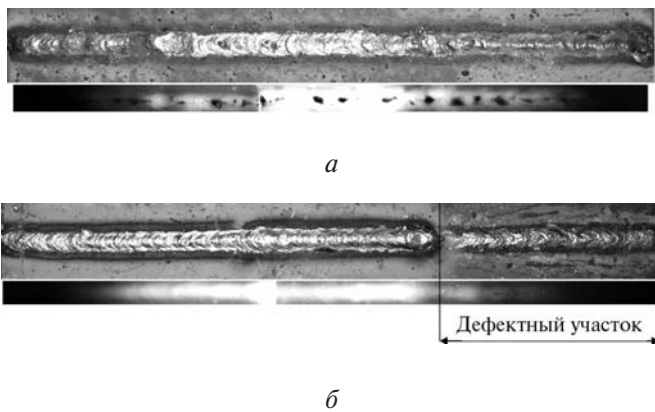


Рис. 1. Радиограмма сварного шва:
а – ИСС-1; б – ИСС-2

ла (стали 09Г2С) и металла сварного шва, для чего испытаниям на растяжение были подвергнуты соответствующие цилиндрические образцы. Образцы основного металла (ОМ) были изготовлены из того же листа, что и ИСС, а металла шва (МШ) выточены из бездефектного участка ИСС-2 согласно схеме, представленной на рис. 2.

Численные данные, полученные в ходе испытаний цилиндрических образцов, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты проведения испытаний на растяжение цилиндрических образцов

Номер образца	d_0 , мм	ψ , %	δ , %	F_{\max} , кН	σ_b , МПа	$F_{\text{разр}}$, кН	σ_d , МПа
ОМ-1	5,00	73	32	10,02	510	6,28	1201
ОМ-2	5,05	72	34	10,15	507	6,51	1180
ОМ-3	5,05	75	36	10,21	510	6,05	1203
Среднее		74	34		509		1195
МШ-1	5,05	71	32	11,58	578	6,96	1216
МШ-2	5,00	70	33	11,38	579	7,25	1239
МШ-3	5,10	70	30	12,26	600	8,17	1327
МШ-4	5,05	70	30	11,61	580	7,31	1231
Среднее		70	31		584		1253

Примечание. d_0 — диаметр рабочей части образца до растяжения; ψ — относительное сужение образца; δ — относительное удлинение образца; F_{\max} — максимальная нагрузка, выдерживаемая образцом; σ_b — предел прочности; $F_{\text{разр}}$ — нагрузка в момент разрыва; σ_d — действительное напряжение в момент разрыва.

Во время растяжения образцов также велась запись диаграмм «нагрузка—перемещение», на

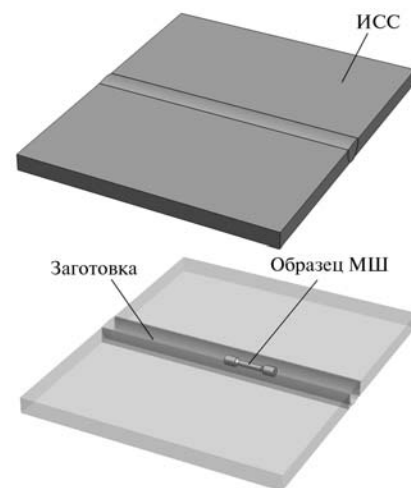


Рис. 2. Схема вырезки цилиндрических образцов из сварного шва

основе которых соответственно для ОМ и МШ построены усредненные диаграммы в координатах σ — δ (рис. 3).

Полученные значения механических свойств для ОМ хорошо согласуются с данными, представленными в сопроводительном сертификате на листовую сталь 09Г2С, которому $\delta = 35\%$, $\sigma_b = 510$ МПа, $\sigma_T = 350$ МПа. Результаты испытаний образцов МШ позволяют сделать вывод о том, что металл сварного шва обладает более высокими прочностными характеристиками по сравнению с основным металлом, при этом он несколько менее пластичен. Указанная закономерность типична для подобных сварных соединений [5].

На втором этапе проводимых исследований растяжению до разрушения подверглись плоские образцы сварного соединения (рис. 4), подавляющее большинство которых содержало дефект в сварном шве. При этом рассматри-

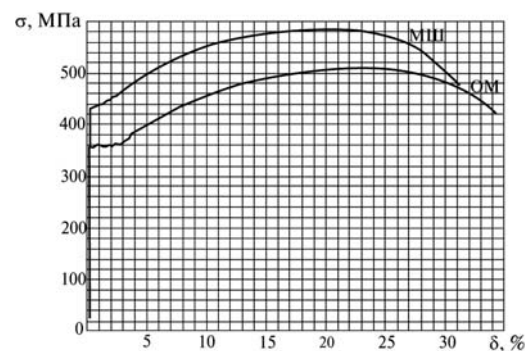


Рис. 3. Усредненные диаграммы растяжения цилиндрических образцов

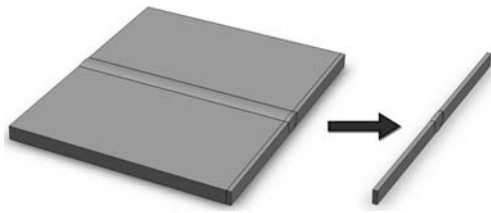


Рис. 4. Схема вырезки плоских образцов сварного соединения из ИСС

вались образцы, сварочный дефект которых представлял собой (по результатам разрушения) единую сквозную несплошность металла шва. Таким образом из ИСС-1 и ИСС-2 получена серия из 61 образца.

Данные об исходной геометрии образцов в области разрыва, размерах дефектов, а также результаты проведенных испытаний для образцов, разрушившихся по дефекту, представлены в табл. 2, а для образцов, разрушившихся вдали от шва по основному металлу, — в табл. 3.

Таблица 2

Результаты проведения испытаний на растяжение плоских образцов, разрушившихся по дефекту

Номер образца	a_0 , мм	b_0 , мм	x_0 , мм	y_0 , мм	y_0/s , %	$\sigma_{бр}$, МПа
1/1	17,3	5,0	3,4	8,7	55	337
1/2	18,3	4,8	3,7	7,4	47	392
1/3	17,7	4,9	3,3	6,5	41	390
1/5	16,8	5,2	6,2	7,6	48	389
1/6	16,8	5,3	2,4	5,3	34	453
1/8	17,2	5,3	6,4	8,2	52	427
1/11	16,4	4,8	4,9	5,9	38	435
1/13	15,9	5,5	7,0	5,3	34	435
1/19	17,2	5,4	4,4	7,0	45	368
1/22	16,8	5,6	5,7	5,1	32	438
1/26	16,7	5,4	5,1	7,3	46	415
1/31	16,7	5,7	4,5	6,1	39	476
1/38	16,3	5,5	5,5	8,2	52	413
1/41	16,0	5,1	2,4	4,9	31	486
1/42	15,8	5,1	5,2	2,4	15	480
1/44	16,3	4,8	2,7	3,2	20	490
1/45	15,6	5,0	2,8	3,3	21	500
1/46	15,7	4,9	3,6	2,4	15	497
2/4	18,0	5,0	3,4	8,7	55	386

Примечание. Номер образца — номер ИСС/номер образца в ИСС; a_0 и b_0 — соответственно начальная ширина и толщина образца в области разрыва (рис. 5); x_0 — длина

дефекта (размер в направлении приложения нагрузки); y_0 — ширина дефекта (размер в направлении, перпендикулярном оси приложения нагрузки); $s = 15,7$ мм — ширина образца в области основного металла, равная толщине исходной стальной пластины; $\sigma_{бр}$ — разрушающее брутто-напряжение (отношение максимальной нагрузки к исходной площади сечения образца в области разрыва без учета несплошностей). Значения $\sigma_{нт}$ в табл. 2 отсутствуют ввиду сложности определения фактической площади разрыва.

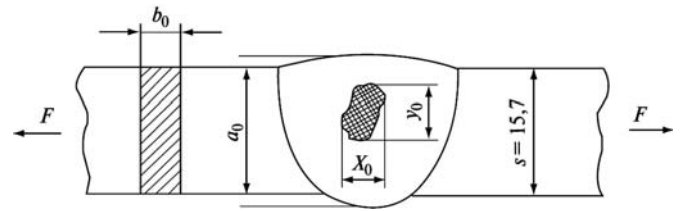


Рис. 5. Эскиз сварного образца

Таблица 3

Результаты проведения испытаний на растяжение плоских образцов, разрушившихся по основному металлу ($a_0 = s = 15,7$ мм)

Номер образца	b_0 , мм	x_0 , мм	y_0 , мм	y_0/s , %	$\sigma_{бр}$, МПа	$\sigma_{нт}$, МПа
1/4	5,9	2,5	1,2	8	510	1 472
1/7	5,2	2,4	3,2	20	516	1 571
1/9	5,3	1,7	4,2	27	518	1 431
1/10	5,3	3,6	1,9	12	514	1 295
1/12	5,3	2,9	2,0	13	512	1 289
1/14	4,8	3,1	2,2	14	517	1 793
1/16	5,5	7,5	2,0	13	511	1 226
1/18	5,0	1,4	1,1	7	511	1 201
1/20	6,1	2,7	4,0	25	511	1 361
1/21	6,0	1,2	2,8	18	507	1 222
1/23	5,5	2,3	2,0	13	511	1 184
1/24	4,8	5,3	1,4	9	515	1 225
1/25	5,5	3,1	2,8	18	509	1 196
1/27	5,2	1,9	2,1	13	509	1 822
1/29	5,4	0	0	0	507	1 234
1/30	5,7	3,0	2,0	13	515	1 220
1/34	5,5	4,4	3,5	22	502	1 208
1/35	5,1	6,5	4,6	29	495	1 206
1/39	5,0	1,8	3,1	20	500	1 241
1/40	5,0	1,1	2,1	13	507	1 205
1/43	5,1	1,5	0,6	4	505	1 205

Окончание табл. 3

Номер образца	b_0 , мм	x_0 , мм	y_0 , мм	y_0/s , %	$\sigma_{бр}$ МПа	$\sigma_{нт}$ МПа
2/3	5,1	2,7	3,6	23	503	1 264
2/5	4,8	2,0	1,1	7	483	1 193
2/6	5,0	0,9	1,4	9	497	1 164
2/7	4,9	2,6	1,0	6	505	1 204
2/8	5,0	1,4	1,5	10	500	1 231
2/9	4,0	2,1	1,2	8	510	1 217
2/10	3,6	1,9	0,9	6	510	1 216
2/11	5,1	1,7	1,1	7	514	1 201
2/12	5,1	2,1	2,3	15	502	1 197
2/13	4,9	1,9	2,8	18	497	1 227
2/14	5,3	1,9	1,6	10	502	1 209
2/15	5,1	2,4	3,4	22	490	1 105
2/16	5,1	2,7	4,7	30	512	1 258
2/17	5,2	0,4	0,3	2	507	1 201
2/18	5,2	0,2	0,3	2	507	1 216
2/19	5,2	0,5	0,6	4	502	1 205
2/20	5,3	0,8	1,1	7	493	1 216
2/21	5,2	0,8	3,7	24	507	1 201
2/22	5,1	0,5	0,6	4	490	1 201
2/23	5,2	0,6	1,5	10	507	1 204
2/24	5,1	0	0	0	502	1 179
Среднее*					505	1 217

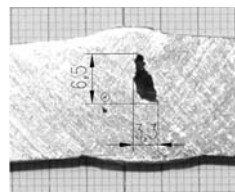
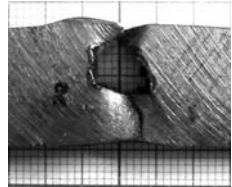
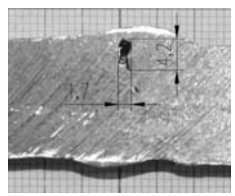
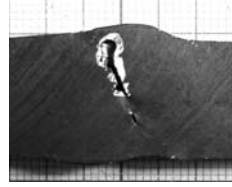
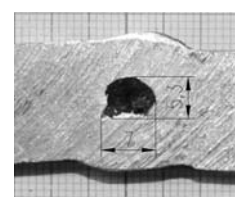
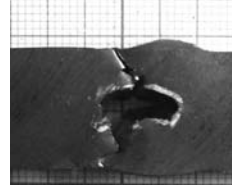
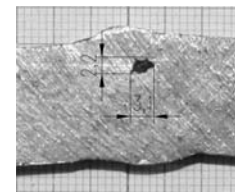
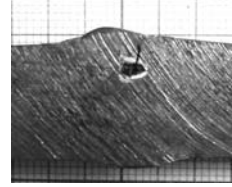
Примечание. Номер образца — номер ИСС/номер образца в ИСС; a_0 и b_0 — соответственно начальная ширина и толщина образца в области разрыва (см. рис. 5); x_0 — длина дефекта (размер в направлении приложения нагрузки); y_0 — ширина дефекта (размер в направлении перпендикулярном оси приложения нагрузки); $s = 15,7$ мм — ширина образца в области основного металла, равная толщине исходной стальной пластины; $\sigma_{бр}$ — разрушающее брутто-напряжение (отношение максимальной нагрузки к исходной площади сечения образца в области разрыва без учета несплошностей); $\sigma_{нт}$ — разрушающее нетто-напряжение (отношение нагрузки в момент разрушения образца к его конечной площади сечения в области разрыва). Значения $\sigma_{нт}$ в табл. 2 отсутствуют ввиду сложности определения фактической площади разрыва.

*Без учета данных для образцов № 1/4, 1/7, 1/9, 1/14 и 1/27, так как по результатам статического анализа соответствующие им значения $\sigma_{нт}$ относятся к выбросам.

Фотографии испытанных образцов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Фотографии сварных образцов до и после испытаний

Номер образца	Фотография шва	
	до испытаний	после испытаний
1/3		
1/9		
1/13		
1/14		

Сопоставление результатов, представленных в табл. 3, с данными, приведенными в табл. 1, показывает, что $\sigma_{бр}$ в этом случае представляет собой временное сопротивление стали (σ_B), а значения $\sigma_{нт}$ хорошо согласуются с σ_d для цилиндрических образцов ОМ.

Для образцов, окончательное разрушение которых зарождалось в зоне сварочного дефекта (см. табл. 2), на рис. 6 изображена зависимость разрушающего брутто-напряжения $\sigma_{бр}$ от размера несплошности, определяющего прочность сварного соединения, т. е. y_0 . На рисунке 6 видно, что зависимость $\sigma_{бр}(y_0)$ является линейной с множественным коэффициентом детерминации $R^2 = 0,72$. В свою очередь, значение

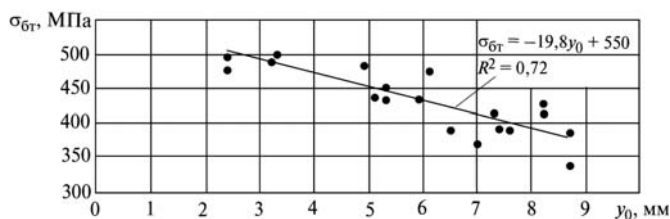


Рис. 6. Разрушающие брутто-напряжения при различной величине дефекта

коэффициента множественной корреляции $R = 0,85$ свидетельствует о высокой степени зависимости между так называемыми результативным признаком $\sigma_{гр}$ и фактором y_0 .

Пропорциональное снижение прочности металла шва с увеличением размера дефекта y_0 , а также вязкий характер разрушения наплавленного металла свидетельствуют о нечувствительности материала сварного соединения к рассматриваемым дефектам несплошности. Дефект в данном случае выступает в качестве фактора, уменьшающего рабочее сечение детали, а не как острый концентратор напряжений [6, 7]. В свою очередь, в сварных соединениях, не чувствительных к дефектам, ослабление сечения шва может быть восполнено высотой валика (усилением). Вследствие этого прочность таких изделий при размерах дефекта ниже некоторой величины будет определяться прочностью основного металла. Данные проведенных исследований показывают, что наличие в сварном шве несплошностей шириной менее 5 мм (до 30% толщины свариваемых деталей) не вызывает видимого снижения прочности соединения и, как правило, локализует разрушение в основном металле вдали от шва (рис. 7).

В соответствующих нормативных документах установлены требования к качеству сварных соединений. Так, например, согласно ГОСТ Р 52630—2012 и ГОСТ 23055—78 для стальных сосудов и аппаратов наиболее распространенных групп (1—3) при толщине основного металла 16 мм максимально допустимый размер поры или включения в шве равен 1,5 мм (по 4-му классу дефектности). При этом даже для наименее опасного 7-го класса указанная величина не превышает 3 мм, что со-

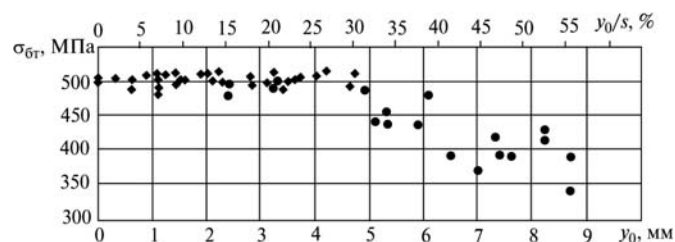


Рис. 7. Прочность сварных образцов с дефектом несплошности металла шва

ставляет порядка 20% толщины свариваемых элементов.

Выводы

1. Наличие несплошности в металле шва не всегда приводит к снижению прочности конструкции в целом, а только в том случае, если размер этой несплошности в направлении, перпендикулярном действию нагрузки, больше некоторой критической величины. Причем, как показали проведенные эксперименты, значение этой величины заметно выше соответствующего допуска на размер дефекта, установленного в нормативных документах.

2. Прочность конструкции, содержащей сварочный дефект несплошности размером меньше критического, не снижается по сравнению с бездефектным изделием за счет увеличения брутто-сечения детали в зоне шва, а также благодаря более высоким прочностным характеристикам металла шва.

3. Результаты полученной критической величины размера дефекта несплошности могут быть положены в основу оценки допустимости дефектов, выявляемых при диагностическом обследовании конструкций, находящихся в эксплуатации уже длительное время. Основанная на экспериментальных данных рациональная оценка технического состояния объекта с соблюдением ключевых аспектов безопасности позволит сократить соответствующие материально-временные затраты на действующем производстве.

Литература

[1] Махутов Н.А., Пермяков В.Н. *Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов*. Новосибирск, Наука, 2005. 516 с.

[2] Kwon J.-R., Lyu G.-J., Lee T.-H., Kim J.-Y. Acoustic emission testing of repaired storage tank. *International journal of pressure vessels and piping*, 2001, vol. 78, no. 5, pp. 373–378.

[3] Захаров М.Н., Насонов В.А. Оценка влияния дефектов сварных соединений на прочностную надежность стальных сосудов и аппаратов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2013, № 4, с. 68–72.

[4] Didžiokas R., Januteniene J., Jonaityte J. The impact of the internal welding defects on the joint strength. *Transport*, 2008, vol. 23, no. 3, pp. 240–244.

[5] Захаров М.Н., Лукьянов В.А. *Прочность сосудов и трубопроводов с дефектами стенок в нефтегазовых производствах*. Москва, ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000. 216 с.

[6] Куркин А.С., ред. *Проектирование сварных конструкций в машиностроении*. Москва, Машиностроение, 1975. 376 с.

[7] Пестриков В.М., Морозов Е.М. *Механика разрушения*. Курс лекций. Санкт-Петербург, ЦОП «Профессия», 2012. 552 с.

References

[1] Makhutov N.A., Permiakov V.N. *Resurs bezopasnoi ekspluatatsii sosudov i truboprovodov* [Resource safe operation of vessels and pipelines]. Novosibirsk, Nauka publ., 2005. 516 p.

[2] Kwon J.-R., Lyu G.-J., Lee T.-H., Kim J.-Y. Acoustic emission testing of repaired storage tank. *International journal of pressure vessels and piping*, 2001, vol.78, no. 5, pp. 373–378.

[3] Zakharov M.N., Nasonov V.A. Otsenka vliianiia defektov svarnykh soedinenii na prochnostnuiu nadezhnost' stal'nykh sosudov i apparatov [Effect Assessment of Welding Defects on Strength Reliability of Steel Vessels and Equipment]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2013, no. 4, pp. 68–72.

[4] Didžiokas R., Januteniene J., Jonaityte J. The impact of the internal welding defects on the joint strength. *Transport*, 2008, vol.23, no. 3, pp. 240–244.

[5] Zakharov M.N., Luk'ianov V.A. *Prochnost' sosudov i truboprovodov s defektami stенок v neftegazovykh proizvodstvakh* [The strength of vessels and pipelines with defects in the walls of the oil and gas industries]. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas publ., 2000. 216 p.

[6] *Proektirovanie svarnykh konstrukttsii v mashinostroenii* [Design of welded structures in mechanical engineering]. Ed. Kurkin S.A. Moscow, Mashinostroenie publ., 1975. 376 p.

[7] Pestrikov V.M., Morozov E.M. *Mekhanika razrusheniia. Kurs lekttsii* [Fracture mechanics. A course of lectures]. St. Petersburg, Professii publ., 2012. 552 p.

Статья поступила в редакцию 19.09.2013

Информация об авторах

ЗАХАРОВ Михаил Николаевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: zmn@gubkin.ru).

НАСОНОВ Виктор Андреевич (Москва) — аспирант кафедры «Оборудование нефтегазопереработки». РГУ Нефти и газа им. И.М. Губкина (119991, Москва, Российская Федерация, Ленинский пр-т, 65, кор. 1, e-mail: viktor.nasonov@mail.ru).

Information about the authors

ZAKHAROV Mikhail Nikolaevich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of «Fundamentals of Machine Design» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: zmn@gubkin.ru).

NASONOV Viktor Andreevich (Moscow) — Post-Graduate of «Oil and Gas Refining Equipment» Department. Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Leninskiy ave., 65, 119991, Moscow, Russian Federation, e-mail: viktor.nasonov@mail.ru).