

УДК 51-74; 539.4; 620.1; 621.791

## Критерий разрушения сварных стыковых соединений с внутренними дефектами

М.Н. Захаров<sup>1</sup>, В.А. Насонов<sup>2</sup>, Е.М. Морозов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

<sup>2</sup> РГУ Нефти и газа им. И.М. Губкина, 119991, Москва, Российская Федерация, Ленинский пр-т, 65, кор. 1.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет Московский инженерно-физический институт, 115409, Москва, Российская Федерация, Каширское шоссе, д. 31.

## A fracture criterion for welded joints with internal defects

M.N. Zakharov<sup>1</sup>, V.A. Nasonov<sup>2</sup>, E.M. Morozov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.

<sup>2</sup> Gubkin Russian State University of Oil and Gas, GSP-1, Leninskiy ave., 65, 119991, Moscow, Russian Federation.

<sup>3</sup> National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoye shosse, 31, 115409, Moscow, Russian Federation.



e-mail: zmn@gubkin.ru, viktor.nasonov@mail.ru, evgeny-morozov@mtu-net.ru



Разработка методов оперативной оценки опасности дефектов сварных соединений, выявляемых в ходе диагностических обследований оборудования, является важной составляющей комплекса мероприятий по обеспечению безопасной эксплуатации технологического оборудования. Предложен критерий разрушения сварных стыковых соединений с дефектами в виде пор и инородных включений, позволяющий достаточно просто и точно определить предельно допустимую нагрузку на дефектное сварное соединение при известных размере дефекта и свойствах металла шва. Приведены результаты испытаний на разрыв стыковых сварных швов с внутренними дефектами и результаты экспериментальных исследований механических свойств металла сварного шва. Показано, что оценку опасности рассматриваемого типа сварочных дефектов можно проводить по классическим теориям прочности, решая соответствующую задачу нагружения в полной упругопластической постановке. Однако в реальных производственных условиях такой подход нецелесообразен из-за трудоемкости и необходимости привлечения специалистов-расчетчиков.

**Ключевые слова:** дефекты, сварное соединение, сварной шов, критерий разрушения, прочность, технологическое оборудование.



The development of procedures for the rapid detection of hazardous defects in welded joints during diagnostic tests is an important component of the set of measures to ensure the safe operation of technical objects. A fracture criterion of welded joints with pore or inclusion-type defects is proposed. This criterion is sufficiently simple and accurate to determine the maximum permissible load acting on the defective welded joint if the defect size and weld metal properties are known. The results of breaking tests of butt welds with internal defects are presented. Scientific experiments are conducted to study the mechanical properties of the weld metal. It is shown that the danger of welding defects of this type can be estimated using classical theories of strength by solving the corresponding elastoplastic problem. However, this approach is impractical under actual production conditions due to its complexity and the need to involve qualified designers.

**Keywords:** defects, weld, welded joint, fracture criterion, strength, technological equipment.

При оценке прочности инженерных конструкций на этапе эксплуатации не всегда можно ограничиться использованием методов проектных расчетов, так как в готовом сооружении неизбежно проявляются особенности и дефекты, неучтенные при расчетах. Так, при проведении проектных расчетов принято считать, что металл сварных соединений лишен дефектов сплошности, чего на практике почти невозможно достичь. Для реальных изделий наличие в сварных швах твердых и газовых включений вполне возможно. В силу достаточной сложности технологического процесса причинами нарушения сплошности металла шва во время сварки могут являться различные факторы технологического, металлургического и организационного характера [1–3].

Поскольку в отношении дефектов сварных соединений можно говорить об определенной их неизбежности, в соответствующих нормативных документах установлены допуски на максимальный размер дефектов для различных конструкций. Однако в действительности при диагностическом обследовании уже эксплуатируемых объектов нередко случаи выявления в металле сварного шва несплошностей размерами выше нормативно допустимых [4–6]. Если данный, формально недопустимый, дефект в силу ряда причин является трудно или дорого устранимым, то весьма актуальным становится вопрос оценки фактической прочности такого сварного соединения [7–12].

Цель работы — выработать универсальный критерий, позволяющий достаточно точно оценить реальную опасность дефекта, не прибегая к сложному численному упругопластическому моделированию напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции в зоне дефекта в каждом конкретном случае.

Для разработки универсального критерия разрушения сварных стыковых соединений с дефектами в виде пор и инородных включений был выбран методологический подход, основанный на численном анализе НДС в зоне дефекта при экспериментально определенном усилии разрыва сварного соединения (рис. 1). Идея разработки критерия разрушения заключалась в установлении приближенной зависимости между геоме-

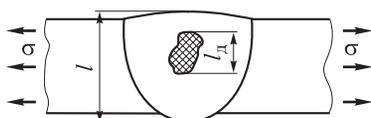


Рис. 1. Эскиз сварного образца с дефектом

трией сварного соединения с дефектом, механическими свойствами зон металла соединения и разрушающей нагрузкой на основе анализа эпюр напряжений в области пор и характере разрушений.

В основу процедуры моделирования положены результаты проведенных ранее авторами данной статьи экспериментальных исследований прочности сварного соединения с дефектом в виде поры или шлакового включения. Основными результатами этих исследований являются данные о сравнительных механических характеристиках основного металла (ОМ) и металла сварного шва (МШ), приведенные в табл. 1, а также частная зависимость прочности сварного соединения от размера дефекта (рис. 2).

Задача анализа НДС сварного соединения в зоне дефекта решалась в упругопластической постановке методом конечных элементов в программном комплексе SW Simulation. В качестве расчетной схемы была принята двумерная модель образца в плоском напряженном состоянии, нагруженная осевой растягивающей силой в плоскости (табл. 2). При этом ширина расчетной модели принималась в соответствии с геометрией образца в месте его фактического разрыва.

Таблица 1

**Основные механические характеристики металла**

Металл	δ, %	ψ, %	σ <sub>т</sub> , МПа	σ <sub>в</sub> , МПа
Основной	34	74	360	509
Сварного шва	31	70	430	584

Примечание. δ — относительное удлинение; ψ — относительное сужение; σ<sub>т</sub> — предел текучести; σ<sub>в</sub> — предел прочности.

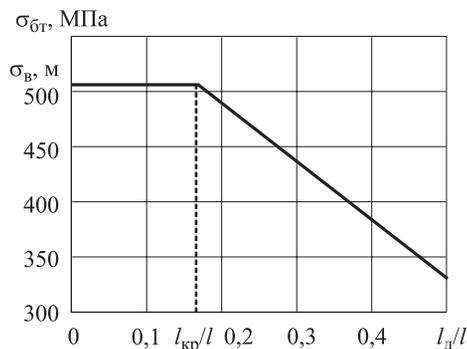
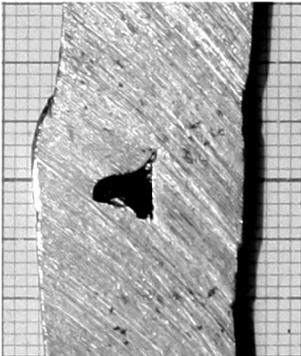
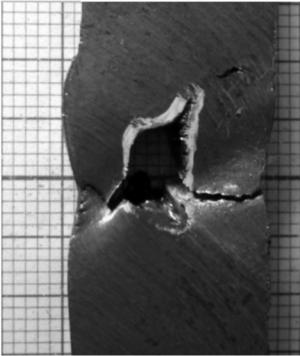
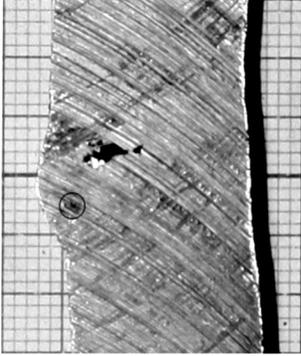
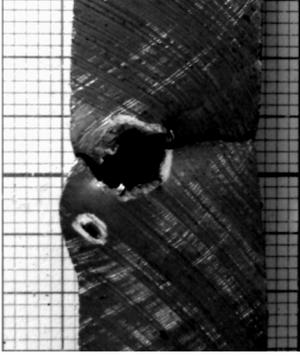
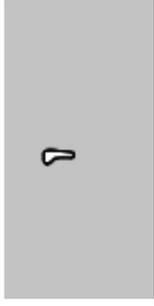
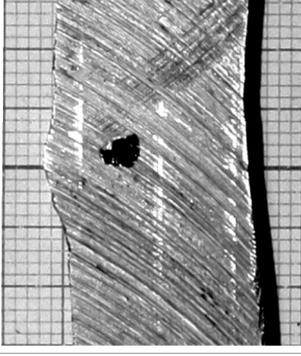
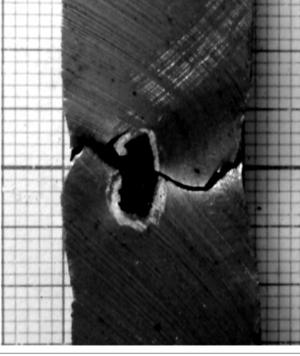
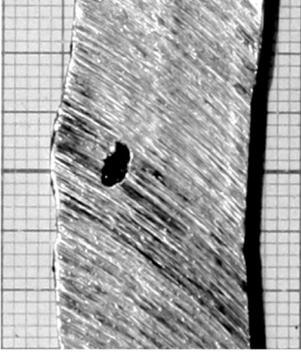
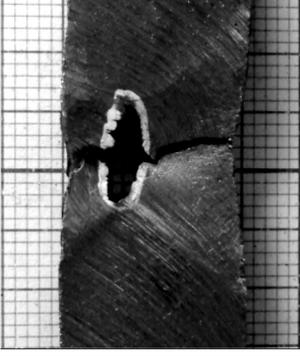


Рис. 2. Экспериментальная зависимость прочности сварного соединения с дефектом в виде несплошности от его относительного размера:

σ<sub>бр</sub> — разрушающее брутто-напряжение, равное отношению максимальной нагрузки к исходной площади сечения образца в области разрыва без учета дефекта; l<sub>кр</sub> — критический размер дефекта, l<sub>кр</sub>/l = 0,17

Таблица 2

## Примеры моделирования сварных образцов с дефектами

Номер образца	Фото шва		Расчетная модель образца
	до испытаний	после испытаний	
1			
2			
3			
4			

Для описания механических свойств металла в программу была заложена кривая растяжения материала сварного шва в истинных координатах. Для оптимизации расчета была принята

билинейная схематизация кривой растяжения (рис. 3).

Расчетным методом получены картины НДС образцов в зоне дефекта на момент достиже-

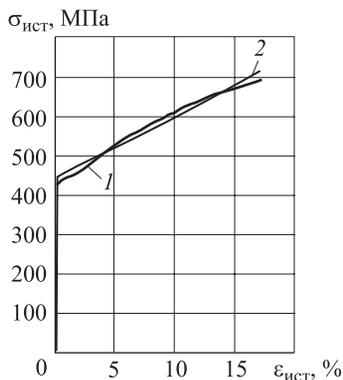


Рис. 3. Истинная диаграмма растяжения материала сварного шва:

1 — диаграмма растяжения; 2 — билинейная аппроксимация диаграммы

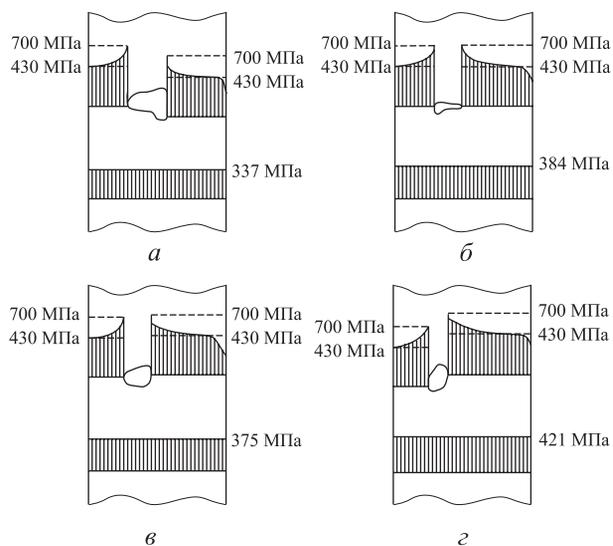
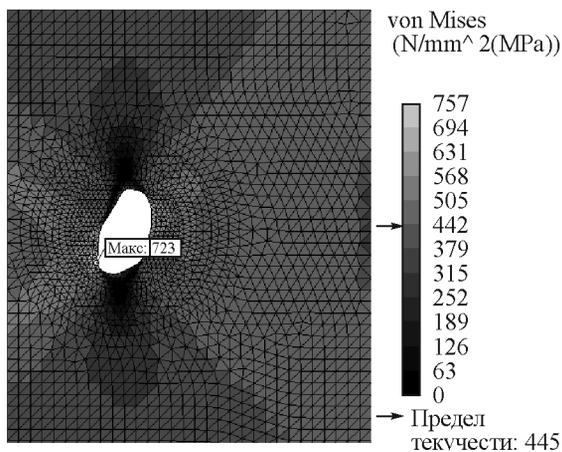
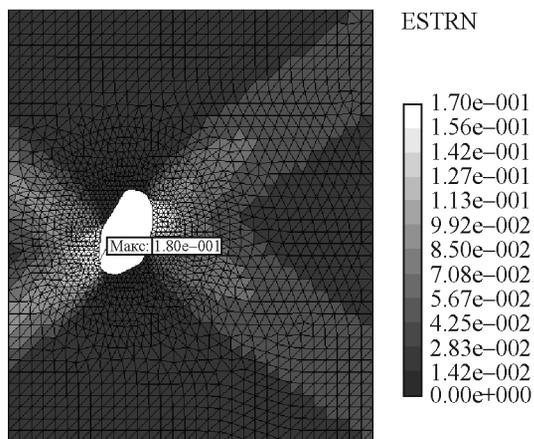


Рис. 5. Эпюры осевых напряжений:

а — образец № 1; б — образец № 2; в — образец № 3; г — образец № 4



а



б

Рис. 4. Характер НДС в зоне дефекта на момент разрушения сварного образца № 4:

а — поля эквивалентных напряжений; б — поля эквивалентных деформаций

ния эквивалентными напряжениями значений, соответствующих пределу прочности материала (рис. 4). При этом расчетное значение критиче-

ской силовой нагрузки оказалось в среднем на 20 % меньше экспериментально определенного значения. Отсюда следует, что оценку опасности рассматриваемого типа дефектов сварных соединений можно вести по классическим теориям прочности, решая соответствующую задачу нагружения в полной упругопластической постановке. Однако на практике такой подход нецелесообразен, поскольку в каждом конкретном случае необходим детальный численный анализ исследуемой конструкции, что в реальных производственных условиях неосуществимо.

Для выявления общих закономерностей НДС в зоне несплошности следует построить и проанализировать эпюры распределения осевых напряжений по сечению образца (рис. 5). Общими закономерностями является наличие вблизи дефекта острого пика напряжений, а также то, что практически все сечение охвачено пластической деформацией.

Критерий разрушения предлагается искать в традиционном виде:

$$\sigma \geq \sigma_{кр}$$

т. е. полагается, что разрушение конструкции, содержащей дефект сварного соединения, произойдет в случае, если действующие напряжения  $\sigma$  от внешних нагрузок в ней превысят некоторое критическое значение  $\sigma_{кр}$ . Численное значение этой величины должно определяться в зависимости от механических свойств материала и относительного размера несплошности, поэтому задача дальнейшей разработки критерия разрушения

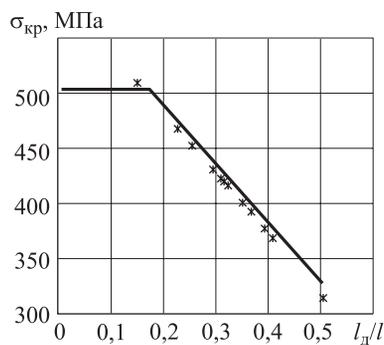


Рис. 6. Сравнительная оценка экспериментальных и расчетных значений  $\sigma_{кр}$ :

— эксперимент; \* — расчет

сводится к выводу математической зависимости для  $\sigma_{кр}$ .

Исходя из условия равновесия системы, суммарная площадь под кривыми эпюр в зоне дефекта равна площади под эпюрой равномерного распределения напряжений в бездефектной области. Анализ полученных эпюр (см. рис. 5) показал, что на момент разрушения данное равенство площадей в первом приближении может быть представлено следующим образом:

$$\sigma_{кр}l = \sigma_{т.ш}(l - l_d) + (\sigma_{в.и.ш} - \sigma_{т.ш})(l - l_d)\alpha, \quad (1)$$

где  $l$  — ширина образца (см. рис. 1);  $l_d$  — ширина дефекта;  $\alpha$  — некоторый коэффициент, учитывающий кривизну эпюр;  $\sigma_{т.ш}$  — предел текучести металла сварного шва;  $\sigma_{в.и.ш}$  — предел прочности материала сварного шва в истинных координатах (см. рис. 3),  $\sigma_{в.и.ш} \approx 700$  МПа.

По результатам проведенных экспериментальных исследований прочность металла сварного шва оказалась выше, чем у основного металла на 15 % (т. е. в частности  $\sigma_{в.и.ш}/\sigma_{в.м} - 1 = 0,15$ ). В случае нетрещиноподобного дефекта это свидетельствует о том, что уменьшение рабочего сечения за счет несплошности на 15 % и менее полностью компенсируется повышенными прочностными характеристиками шва и не приведет к снижению прочности конструкции в целом.

Тогда, на основе уравнения (1) можно записать общее выражение для определения  $\sigma_{кр}$  в следующем виде:

$$\sigma_{кр} = \begin{cases} \sigma_{в.м} & \text{при } \theta \leq \sigma_{в.ш}/\sigma_{в.м} - 1; \\ \sigma_{т.ш}(1 - \theta) + (\sigma_{в.ш} - \sigma_{т.ш})(1 - \theta)(1 + 0,65\theta) & \text{при } \theta > \sigma_{в.ш}/\sigma_{в.м} - 1. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $\sigma_{в.м}$  и  $\sigma_{в.ш}$  — предел прочности основного металла и сварного шва соответственно;  $\theta = l_d/l$  — относительный размер дефекта (см. рис. 1).

Таким образом, для оценки опасности несплошности в сварном шве достаточно информации о ее относительном размере и данных о стандартных прочностных характеристиках ( $\sigma_t$  и  $\sigma_b$ ) основного и наплавленного металла в чистом виде.

Для сравнения рассчитанные по выражению (2) значения  $\sigma_{кр}$  для исследуемых образцов нанесены на рис. 6 экспериментальной зависимости прочности этих образцов, построенной по результатам испытаний.

## Выводы

1. Численное моделирование поведения сварных образцов, содержащих несплошность шва в виде поры или шлакового включения, при критических нагрузках показало, что данный тип дефектов в нагруженной конструкции не является острым концентратором напряжений, а картина НДС в ослабленном сечении имеет вид, характерный для детали с гладким вырезом [13].

2. Практическая оценка опасности дефекта в виде несплошности возможна с использованием полученного критерия разрушения (2). С учетом всех необходимых запасов может быть принято окончательное решение о допустимости обнаруженного дефекта на действующем оборудовании, а также определена предельная для данной конструкции рабочая нагрузка: осевое усилие, внутреннее давление и т. п.

3. В отличие от консервативной оценки по нормативным допускам на размер несплошности предложенная зависимость позволяет определить действительное предельное значение напряжений для дефекта любой величины, тем самым оценив его реальную опасность в рассматриваемой конструкции.

## Литература

- [1] Судакова К.Ю., Казюкевич И.Л. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции. *В мире неразрушающего контроля*, 2004, № 3, с. 8–10.
- [2] Мясникова А.А. Неметаллические включения и их влияние на качество сварных соединений при ручной дуговой сварке. *Master's Journal*, 2012, № 1, с. 50–54.
- [3] Zhiyong L., Bao W., Jingbin D. Detection of GTA welding quality and disturbance factors with spectral signal of arc light. *Journal of materials processing technology*, 2009, vol. 209, no. 10, pp. 4867–4873.

- [4] Махутов Н.А., Пермяков В.Н. *Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов*. Новосибирск, Наука, 2005. 516 с.
- [5] Власов Г.Л., Андреасян И.Г., Зарицкий С.П. Опыт проведения работ по экспертизе промышленной безопасности сосудов, работающих под давлением (СРПД). *Науч.-техн. сб. Диагностика оборудования и трубопроводов*, 2002, № 2, с. 19–27.
- [6] Бирилло И.Н., Теплинский Ю.А., Агинец Р.В., Воронин В.Н., Алиев Т.Т. О некоторых результатах экспериментальных исследований дефектосодержащих сварных швов МГ. *Газовая промышленность. Сер. Диагностика оборудования и трубопроводов*, 2003, № 2, с. 40–45.
- [7] Булатова А.З., Захаров М.Н., Морозов Е.М. Оценка опасности расслоений в металле конструкций на основе диаграммы трещиностойкости. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2010, № 3, с. 41–46.
- [8] Лепихин А.М. Неразрушающий контроль и оценка опасности дефектов сварки на стадии эксплуатации оборудования. *Вопросы материаловедения*, 2007, № 3, с. 208–213.
- [9] 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.
- [10] Schaumann P., Collmann M. Influence of weld defects on the fatigue resistance of thick steel plates. *Procedia engineering*, 2013, vol. 66, pp. 62–72.
- [11] Гумеров А.Г., Зайнуллин Р.С., Халимов А.Г. *Оценка технического состояния и ресурса нефтегазохимического оборудования и трубопроводов*. Москва, Недра, 2004. 286 с.
- [12] Efimenko L.A., Semin E.E. Effects of weld shape and defect size on the stress and strain in a welded joint to a vertical steel vessel. *Chemical and petroleum engineering*, 2006, vol. 42, no. 9–10, pp. 538–542.
- [13] Захаров М.Н. Критерий разрушения трубных сталей в зонах острых и гладких концентраторов. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*, 2000, № 3, с. 74–81.

## References

- [1] Sudakova K.Iu., Kaziukevich I.L. О povыshenii effektivnosti kontroliia kachestva metallurgicheskoi produktsii [On improving the efficiency of quality control metallurgical products]. *V mire nerazrushaiushchego kontroliia* [NDT World]. 2004, no. 3, pp. 8–10.
- [2] Miasnikova A.A. Nemetallicheskie vklucheniia i ikh vliianie na kachestvo svarnykh soedinenii pri ruchnoi dugovoi svarke [Non-metallic inclusions and their influence on the quality of welding joint by manual arc welding]. *Zhurnal magistrrov* [Master's Journal]. 2012, no. 1, pp. 50–54.
- [3] Zhiyong L., Bao W., Jingbin D. Detection of GTA welding quality and disturbance factors with spectral signal of arc light. *Journal of materials processing technology*, 2009, vol. 209, no. 10, pp. 4867–4873.
- [4] Makhutov N.A., Permiakov V.N. *Resurs bezopasnoi ekspluatatsii sosudov i truboprovodov* [Resource safe operation of vessels pipelines]. Novosibirsk, Nauka publ., 2005. 516 p.
- [5] Vlasov G.L., Andreasian I.G., Zaritskii S.P. *Opyt provedeniia rabot po ekspertize promyshlennoi bezopasnosti sosudov, robotaiushchikh pod davleniem (SRPD)* [Experience of the work of industrial safety of vessels operating under pressure (SRAP)]. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik. Diagnostika oborudovaniia i truboprovodov* [Scientific and technical collection. Diagnostics equipment and pipelines]. 2002, no. 2, pp. 19–27.
- [6] Birillo I.N., Teplinskii Iu.A., Aginec R.V., Voronin V.N., Aliev T.T. О некотorykh rezul'tatakh eksperimental'nykh issledovaniy defektosoderzhashchikh svarnykh shvov MG [Some results of experimental studies defektosoderzhashchih welds MG]. *Gazovaia promyshlennost'. Seriya «Diagnostics oborudovaniia i truboprovodov»* [Gas industry. Series «Diagnostics equipment and pipelines»]. 2003, no. 2, pp. 40–45.
- [7] Bulatova A.Z., Zakharov M.N., Morozov E.M. Otsenka opasnosti rassloenii v metalle konstrukt-sii na osnove diagrammy treshchinostoikosti [Assessment of the risk of segregation in metal structures on the basis of crack resistance diagram]. *Zavodskaiia laboratoriia. Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory]. 2010, no. 3, pp. 41–46.
- [8] Lepikhin A.M. Nerazrushaiushchii kontrol' i otsenka opasnosti defektov svarki na stadii ekspluatatsii oborudovaniia [Nondestructive inspection and estimation of hazard that welding defects may bring about in the course of operation of equipment]. *Voprosy materialovedeniia* [Inorganic Materials: Applied Research]. 2007, no. 3, pp. 208–213.

- [9] 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.
- [10] Schaumann P., Collmann M. Influence of weld defects on the fatigue resistance of thick steel plates. *Procedia engineering*, 2013, vol. 66, pp. 62–72.
- [11] Gumerov A.G., Zainullin R.S., Khalimov A.G. *Otsenka tekhnicheskogo sostoiianiia i resursa neftegazokhimicheskogo oborudovaniia i truboprovodov* [Technical evaluation of the resource and petrochemical equipment and pipelines]. Moscow, Nedra publ., 2004. 286 p.
- [12] Efimenko L.A., Semin E.E. Effects of weld shape and defect size on the stress and strain in a welded joint to a vertical steel vessel. *Chemical and petroleum engineering*, 2006, vol. 42, no. 9–10, pp. 538–542.
- [13] Zakharov M.N. Kriterii razrusheniia trubnykh stali v zonakh ostrykh i gladkikh kontsentratorov [Failure criterion pipe steels in virulent and smooth hubs] *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz* [Journal of universities. Oil and gas]. 2000, no. 3, pp. 74–81.

Статья поступила в редакцию 01.04.2014

### 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).

**МОРОЗОВ Евгений Михайлович** (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Физика прочности». Национальный исследовательский ядерный университет Московский инженерно-физический институт (НИЯУ МИФИ) (115409, Москва, Российская Федерация, Каширское шоссе, д. 31, e-mail: evgeny-morozov@mtu-net.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 (GSP-1, Leninskiy ave., 65, 119991, Moscow, Russian Federation, e-mail: viktor.nasonov@mail.ru).

**MOROZOV Evgeniy Mikhailovich** (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Physics of Strength» Department. National Research Nuclear University «MEPhI» (NRNU MEPhI, Kashirskoye shosse, 31, 115409, Moscow, Russian Federation, e-mail: evgeny-morozov@mtu-net.ru).