

**ЗАХАРОВ**

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

ZAKHAROV

Mikhail Nikolaevich
(Moscow, Russian Federation,
MSTU named
after N.E. Bauman)

**НАСОНОВ**

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

NASONOV

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

Оценка влияния дефектов сварных соединений на прочностную надежность стальных сосудов и аппаратов

М.Н. Захаров, В.А. Насонов

В области изготовления и эксплуатации стальных сосудов и аппаратов соответствующие нормативные документы устанавливают ряд требований к качеству сварных соединений, в том числе допуски на величину и тип сварочных дефектов. Однако, как показывает практика, далеко не всегда наличие недопустимого дефекта в сварном шве приводит к достижению конструкцией предельного состояния. Проведенные эксперименты по разрушению дефектных сварных образцов и анализ их прочности дают основание полагать, что для сварных соединений, относящихся к стальным сосудам, допуски на величину и тип дефекта в нормативных документах даны с излишним запасом.

Ключевые слова: сварочные дефекты, сосуды стальные, сварное соединение, прочность, надежность.

Effect Assessment of Welding Defects on Strength Reliability of Steel Vessels and Equipment

M.N. Zakharov, V.A. Nasonov

In the field of manufacture and operation of steel vessels and equipment there are certain standards that establish some requirements to the welds quality including tolerances for size and type of welding defects. However, in practice the presence of unacceptable welding defects do not always bring to the limit state of a design. Conducted experiments on the defective welded samples destruction and the results analysis from strength reliability approach proved that the normative documents contain unnecessary large values of tolerances on welding defects.

Keywords: welding defects, steel vessels, welded joint, strength, reliability.

При изготовлении стальных сосудов и аппаратов наряду с обязательным [1] контролем основных размеров и формы готового изделия, а также проверкой его прочности и герметичности, важным требованием является оценка качества сварных соединений. Применяемые при этом методы разрушающего (механические испытания, стилоскопирование, металлографические и другие исследования контрольных сварных соединений) и неразрушающего (визуальный осмотр, измерение, ультразвуковая дефектоскопия, радиография и др.) контроля сварных соединений неизбежно связаны как с прямыми ма-

териально-временными затратами, определяемыми самой процедурой контроля, так и с возможными дополнительными расходами вследствие выявления некачественных швов, проведения повторных исследований в повышенном объеме и ремонта дефектных участков аппарата.

Многолетняя практика эксплуатации сосудов в области нефте-, газопереработки и нефтехимии показывает, что выявляемые при техническом освидетельствовании дефекты сварных соединений зачастую не соответствуют требованиям нормативно-технической документации [2]. При этом сварочные дефекты (трещины, поры, твердые включения и т. д.) по своему происхождению относятся к производственно-технологическим дефектам, т. е. присутствуют в изделии с момента его изготовления. Таким образом, наличие в сварных швах технологического оборудования недопустимых дефектов не обязательно приводит к достижению конструкцией предельного состояния и возникновению аварийной ситуации.

Из сказанного выше немалый интерес представляет предположение о том, что допуски на величину и тип дефекта в сварных соединениях, регламентируемые соответствующими нормативами, в большинстве случаев установлены исходя из технологических возможностей предприятий и не имеют количественного обоснования с позиций несущей способности, прочности и пластичности конструкции [3]. Следовательно, проведение экспериментальных исследований процесса разрушения сварного соединения с дефектами и оценка его фактической прочностной надежности является весьма актуальной задачей, решение которой может способствовать разработке нового, менее консервативного подхода в определении предельных допусков на сварочные дефекты.

Для рассмотрения этого вопроса были проведены следующие эксперименты. Из двух прямоугольных пластин размером 100Symbol Set×100 мм, вырезанных из листового проката стали 09Г2С номинальной толщиной 22 мм, было изготовлено сварное соединение (рис. 1). Сварка деталей осуществлялась ручным способом с умышленным допущением в шве дефек-

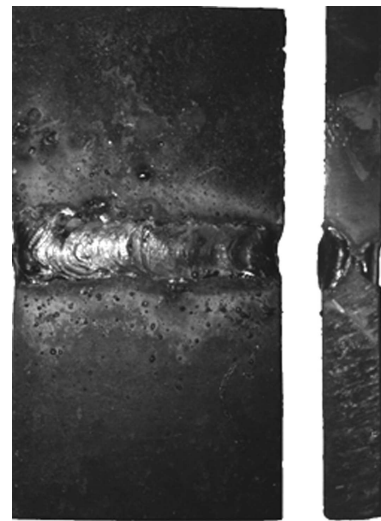


Рис. 1. Исходное сварное соединение

тов типа пор и шлаковых включений, имеющих склонность к развитию под воздействием внешних нагрузок.

Из полученного сварного соединения были вырезаны полнотолщинные образцы шириной около 5 мм так, чтобы плоскость реза была перпендикулярна оси шва (рис. 2). В результате получена серия из семи образцов, имеющих посередине своей длины сварной шов с различными по геометрии дефектами, часть которых выходит на поверхность реза (табл. 1).

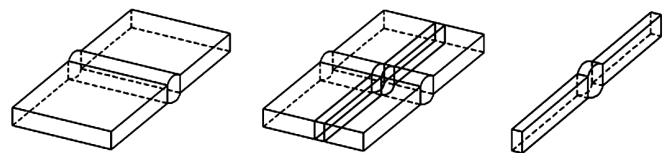


Рис. 2. Схема вырезки образцов из исходной заготовки

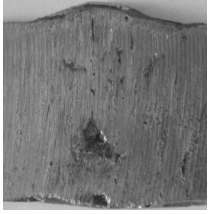
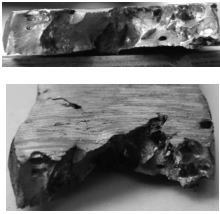

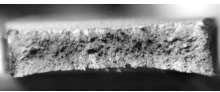
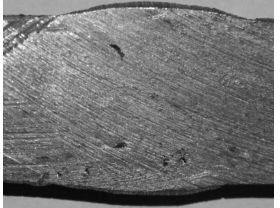
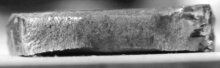
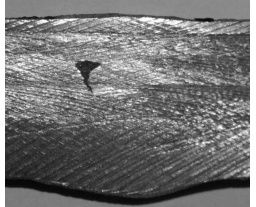
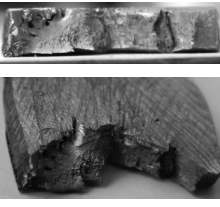
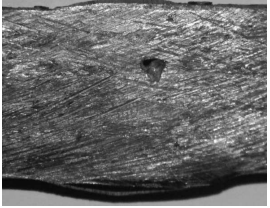

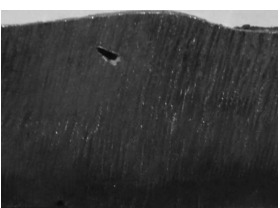
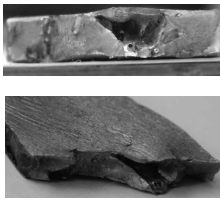

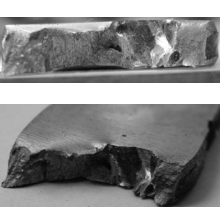
Каждый из образцов подвергался испытанию на растяжение до разрушения с целью определения:

- разрушающего брутто-напряжения;
- реальных размеров внутренних дефектов;
- характера разрушения.

При проведении эксперимента визуально удавалось зафиксировать момент и место начала разрушения, а по диаграмме растяжения также можно было судить о наличии площадки текучести и характере разрушения образца. Часто (образцы № 3–5) разрушение зарождалось на границе видимого дефекта.

Таблица 1

Изображения сварных образцов до и после разрушения

Номер образца	Вид сварного шва в исходном состоянии	Характер разрушения
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

Численные данные, полученные в ходе испытаний, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты проведения испытаний на растяжение

Номер образца	δ , %	a , мм	b , мм	F_c , кг	σ_c , МПа	Количество дефектов	l , мм
1	1,26	23,9	5,1	5300	426,0	множественно	
2	16,7	22,2	5,1	6100	528,0	—	—
3	9,6	21,4	5,3	5550	483,0	1	2,0
4	11,4	23,4	5,0	5850	481,8	1	2,4
5	12,1	22,9	4,9	5950	490,8	2	3,6
6	7,32	22,8	5,1	5650	453,1	2	8,5
7	4,0	23,1	5,2	5450	436,4	2	7,8

Примечание. δ — относительное удлинение образца; a и b — соответственно длина и ширина сечения образца в области разрыва; F_c — разрушающая нагрузка; σ_c — разрушающее брутто-напряжение (отношение разрушающей нагрузки к площади сечения образца без учета несплошностей); l — длина наибольшего дефекта (вдоль стороны a).

Анализируя полученные результаты, в первую очередь следует отметить, что разрушение образца № 2 произошло не в зоне сварного шва или околошовной зоне, а непосредственно в основном металле. Учитывая наличие в исходном образце видимого сварочного дефекта порядка 1 мм (см. табл. 1), это подтверждает тот факт, что в целом металл шва обладает более высокими прочностными характеристиками. Таким образом, полученные для данного образца механические характеристики совпадают с характеристиками стандартного образца из стали 09Г2С — основного металла сварного соединения и можно их использовать для сравнительной оценки прочностных свойств остальных образцов. Отметим, что согласно ГОСТу [4] минимальное значение предела прочности для данной стали (толщина до 32 мм) при температуре 20 °С составляет $\sigma_B^{\min} = 470$ МПа.

Образец № 1, напротив, разрушился в зоне сварки, что объясняется наличием в металле шва множества дефектов различной величины;

при этом четкие границы отдельных несплошностей определить визуально невозможно. Разрушение носило чисто хрупкий характер, о чем свидетельствуют низкие значения величин δ . В целом, для всех образцов (за исключением образца № 2), разорванных по сварному шву, можно сделать общий вывод о том, что чем большее растягивающее напряжение способно выдержать сварное соединение, тем больше его относительное удлинение и разрушение принимает более вязкий характер.

Для оценки прочностной надежности сварного соединения сначала было вычислено снижение для каждого из шести образцов разрушающего брутто-напряжения относительно временного сопротивления основного металла:

$$\Delta_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\text{с}}}{\sigma_{\text{в}}} 100\%,$$

где $\sigma_{\text{в}} = 528$ МПа — предел прочности исследуемой стали, полученный при испытании образца № 2 (см. табл. 2).

Также полезно сравнить значение l_{max} наибольшего дефекта в каждом образце с допусковым нормативным значением. Так, в соответствии с ГОСТ Р 52630—2006 [1] и ГОСТ 23055—78 для сосудов 1-, 2- и 3-й групп опасности, к которым относится основная часть технологического оборудования производств переработки нефти и газа, максимально допустимая длина поры либо неметаллического включения в сварном шве по результатам радиографического контроля составляет $l_{\text{доп}} = 2,5$ мм для свариваемых элементов толщиной 5...8 мм.

Таблица 3

Влияние дефектов на прочность сварного соединения

Номер образца	$\sigma_{\text{с}}$, МПа	Δ_{σ} , %	l_{max} , мм	$l_{\text{max}}/l_{\text{доп}}$
1	426,0	19,3		
3	483,0	8,5	2,0	0,8
4	481,8	8,8	2,4	0,96
5	490,8	7,0	3,6	1,44
6	453,1	14,2	8,5	3,4
7	436,4	17,3	7,8	3,12

Из данных, представленных в табл. 3, следует, что наличие в сварном шве трещиноподобных дефектов размерами, в разы превышающими

нормативный допуск, приводит к снижению прочности соединения не более чем на 20% по сравнению с бездефектным металлом. При этом в случаях, когда величина дефекта соответствует нормам (образцы № 3, 4), значение Δ_{σ} достигает порядка 9%.

Значения коэффициента запаса (коэффициента безопасности) для каждого образца, вычисляются по формуле

$$n = \frac{\sigma_{\text{с}}}{[\sigma]},$$

где $[\sigma] = 196$ МПа — допускаемое напряжение в рабочих условиях для рассматриваемой стали, на которое ведется расчет при проектировании [4]. Значения n приведены в табл. 4.

Таблица 4

Фактические коэффициенты запаса для испытанных образцов

Номер образца	$\sigma_{\text{с}}$, МПа	n
1	426,0	2,17
2	528,0	2,69
3	483,0	2,46
4	481,8	2,46
5	490,8	2,50
6	453,1	2,31
7	436,4	2,23

В работе [5] показано, что при значениях $n > 2$ надежность конструкции (вероятность отсутствия разрушения) в подобном случае превышает 99%.

Выводы

1. Наличие дефектов в шве снижает прочность сварного соединения, локализуя при этом процесс разрушения в самом шве, механические свойства которого в общем случае выше, чем у основного металла. Прочностная надежность сварных соединений, имеющих недопустимые действующим нормам дефекты, остается на достаточно высоком уровне.

2. Проведение более детальных исследований в этой области позволит подробно изучить вопрос влияния дефектов на прочностную надежность сварных соединений и разработать

дополнительные критерии и методики количественной оценки качества таких соединений для стальных сосудов и аппаратов с учетом специфики условий их эксплуатации. В свою очередь, оценка опасности сварочных дефектов, в основе которой лежат данные экспериментальных исследований, даст возможность несколько смягчить требования допустимой дефектности, что приведет к снижению объема работ и соответствующих затрат как на стадии изготовления, так и при проведении периодических освидетельствований эксплуатируемого оборудования.

Литература

1. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия: ГОСТ Р 52630—2006. Введ. 2007—12—01. М.: Стандартинформ, 2007. IV, 77 с.
2. Махутов Н.А., Пермяков В.Н. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов. Новосибирск: Наука, 2005. 516 с.
3. Проектирование сварных конструкций в машиностроении / Под ред. С.А. Куркина. М.: Машиностроение, 1975. 376 с.

4. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования: ГОСТ Р 52857.1—2007. Введ. 2008—04—01. М.: Стандартинформ, 2008. III, 23 с.

5. Захаров М.Н. Прочностная надежность оборудования. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 123 с.

References

1. GOST R 52630-2006. *Sosudy i apparaty stal'nye svarnyye. Obshchie tekhnicheskie usloviia* [State Standard R 52630—2006. Vessels and apparatus welded steel. General specifications] Moscow, Standartinform publ., 2007. IV, 77 p.
2. 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.
3. *Proektirovanie svarykh konstrukttsii v mashinostroenii* [Design of Welded Structures in Mechanical Engineering]. Ed. Kurkina S. A. Moscow, Mashinostroenie publ., 1975. 376 p.
4. GOST R 52857.1-2007. *Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost'. Obshchie trebovaniia* [State Standard R 52857.1-2007. Vessels and equipment. Limits and methods of strength calculation. general requirements]. Moscow, Standartinform publ., 2008. III, 23 p.
5. Zakharov M.N. *Prochnostnaia nadezhnost' oborudovaniia: uchebnoe posobie* [Strength reliability: a manual]. Moscow, MSTU named after N.E. Bauman publ., 2011. 123 p.

Статья поступила в редакцию 21.02.2012

Информация об авторах

ЗАХАРОВ Михаил Николаевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, 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. Techn., Professor of «Fundamentals of machine design» Department. MSTU named after N.E. Bauman (105005, BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya 5, Moscow, Russian Federation, e-mail: zmn@gubkin.ru).

NASONOV Viktor Andreevich (Moscow) — Post-Graduate of «Oil and Gas Equipment» Department. Gubkin Russian State University of Oil and Gas (119991, GSP-1, Leninsky prospekt, 65, Moscow, Russian Federation, e-mail: viktor.nasonov@mail.ru).