

**ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ ШВОВ
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОРПУСНОЙ СТАЛИ,
ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ****EFFECT OF WELD DEFECTS ON THE MECHANICAL PROPERTIES
OF THE STEEL BODY, DETERMINED UNDER DYNAMIC LOADING**

Срок службы корпусных конструкций определяется различными дефектами, в том числе технологическими и приобретенными в процессе эксплуатации. Правилами Российского морского регистра судоходства нормируются требования к допускаемым размерам дефектов сварных швов, превышение которых приводит к дополнительным работам по их устранению как при постройке нового судна, так и при судоремонте. Влияние дефектов сварных швов на срок службы корпусных конструкций, на наш взгляд, недостаточно изучен. В приведенном исследовании влияние дефектов сварных швов на механические свойства корпусной стали изучается на стандартных образцах для испытаний на маятниковых копрах с определением ударной вязкости при температуре минус 20 °С. Дефекты сварных швов выявлялись рентгенографированием. Оценивалась их площадь, которая корректировалась последующим макроскопическим анализом. Также применялся микроструктурный анализ металла сварного шва, околошовной зоны и зоны термического влияния. Результаты испытаний показывают, что с увеличением площади дефекта ударная вязкость снижается. Для корпусной стали РСД 40 Правилами Российского морского регистра судоходства нормируется минимальное значение ударной вязкости, которое должно быть не ниже 26 Дж/см². Указанная величина ударной вязкости наблюдается при отношении площади дефекта к площади образца 45 % (при площади дефекта 40 мм²). В диапазоне отношений средней площади дефекта к площади сечения образца от 0 до 30 % снижение ударной вязкости незначительно.

Lifetime hull structures is determined by various defects, including technological and acquired during the operation. Rules of the Russian Maritime Register of Shipping standardized requirements for admissible size of defects of welds, exceeding the size of which leads to additional work to eliminate them, as in the construction of a new vessel, and in ship repair. The influence of defects in the welds lifetime hull structures in our opinion is poorly understood. In this study, the influence of defects in the welds on the mechanical properties of the body began to study for standardized test a pendulum with the definition of toughness at –20 °C. Defects in welds identified radiography. Evaluate their area, which was adjusted, followed by macroscopic analysis. Also used microstructural analysis of the weld metal, heat affected zone and heat affected zone. The test results show an increase of the defect toughness decreases. For cabinet steel RSD 40 Rules of the Russian Maritime Register of Shipping normalized minimum value of toughness, which should not be below 26 J/cm². This value toughness observed with respect to the area of the defect area of a sample of 45 % (the defect area of 40 mm²). The relationship between the average area of the defect to a cross-sectional area of the sample is from 0 to 30 %, reduction in toughness slightly.

Ключевые слова: сварное соединение, сварочные дефекты, непровары, поры, шлаковые включения, сварные конструкции, механические испытания, ударная вязкость.

Key words: welded joint, welding defects, lack of penetration, pores, slag inclusions, welded constructions, mechanical testing, toughness.



ДОЛГОВЕЧНОСТЬ корпусных конструкций судов в значительной степени определяется технологическими и эксплуатационными дефектами. Дефекты, приобретенные в процессе эксплуатации корпусов судов, оказывают влияние на остаточную долговечность корпусных конструкций, но предметом представленного исследования не являются. Это исследование посвящено технологическим дефектам сварки и их влиянию на механические свойства

судостроительной стали. В настоящее время технология сварки в судостроении и судоремонте достаточно отработана, однако вероятность появления технологических дефектов все еще высока [1]. К дефектам сварных швов относятся непровары, несплавления, подрезы, поры, шлаковые включения и т.п. Проблема прогнозирования долговечности таких конструкций является актуальной.

Причинами возникновения дефектов могут являться неудовлетворительная свариваемость металла, плохое качество электродов, покрытий и флюсов, неправильные технология и режимы сварки, недостаточная квалификация сварщика и др. [2] – [4].

Влияние дефектов на механические свойства сварных соединений определяется величиной и формой дефектов, частотой их повторения, материалом конструкции, условиями эксплуатации, характером действующих нагрузок и т. п. [5], [6]. Поэтому наличие дефектов в сварных соединениях еще не означает потери их работоспособности [7], [8].

В работе [9] нами было проведено исследование влияния дефектов сварки на механические свойства корпусной стали, определяемые при статическом нагружении. Плоские образцы с расположением сварного шва с дефектами поперек образца имели среднее значение временного сопротивления разрыву при испытаниях, равное 421 МПа, предела текучести 294 МПа, относительного удлинения 16 % с небольшим разбросом этих характеристик как в сторону увеличения, так и уменьшения. Согласно правилам Российского морского регистра судоходства, для стали категории РСД 40, применяемой в исследовании в качестве основной, значение этих характеристик составляет: временное сопротивление разрыву 510 – 660 МПа, предел текучести 390 МПа, относительное удлинение 20 %. Таким образом, начиная с отношения площади дефекта к площади сечения образцов 35 % и более, результаты испытаний следует в расчет не принимать, так как такие дефекты оказывают влияние на механические свойства, определяемые при статическом нагружении. Характеристики пластичности корпусной стали, начиная с относительной площади дефектов 35 %, резко снижаются, переводя статическое разрушение из разряда пластического в хрупкое, что также негативно сказывается на работоспособности сварных швов и корпуса судна в целом. Круглые образцы с дефектами, вырезанные из сварного шва, имели как хрупкое, так и пластическое разрушение с четко выраженной площадкой текучести, причем их механические свойства, определенные при статическом нагружении (как и плоских образцов), имели сравнительно небольшой разброс, но характеристики прочности примерно на 100 МПа были больше, чем у плоских образцов.

Следующим этапом исследования является изучение влияния размеров дефектов на механические свойства, определяемые при динамическом нагружении. Корпус судна во время эксплуатации воспринимает динамические нагрузки, при которых многие металлы и их сплавы проявляют склонность к хрупкому разрушению [10]. Опасность разрушения усиливают концентраторы напряжений, к которым относят дефекты сварки.

Для оценки склонности металла к хрупкому разрушению под влиянием этих факторов проводят динамические испытания на ударный изгиб на маятниковых копрах. По шкале маятникового копра определяют работу K , затраченную на разрушение, и рассчитывают ударную вязкость KC , МДж/м², по формуле

$$KC = K / S_0^1,$$

где S_0^1 — площадь поперечного сечения образца в месте надреза.

В соответствии со стандартной методикой испытаний разрушению на копре подвергают образцы с U -образным, V -образным надрезами или с T -образной трещиной усталости в основании надреза. Следует отметить, что ударная вязкость, являясь интегральной характеристикой [11], зависящей от прочности и пластичности одновременно, более резко реагирует на изменения структурного состояния материалов, проявляющихся особенно ярко при пониженных значениях температуры. Поэтому нами были проведены испытания при температуре образцов –20 °С, как и установлено требованиями Правил Российского морского Регистра судоходства для стали категории РСД 40.

Таким образом, было изготовлено 63 образца с *V*-образным надрезом для испытаний на ударную вязкость. Эти образцы вырезались поперек сварного шва из 15 сварных стыковых соединений из стали категории РCD 40. Схема вырезки образцов и сами образцы представлены на рис. 1.

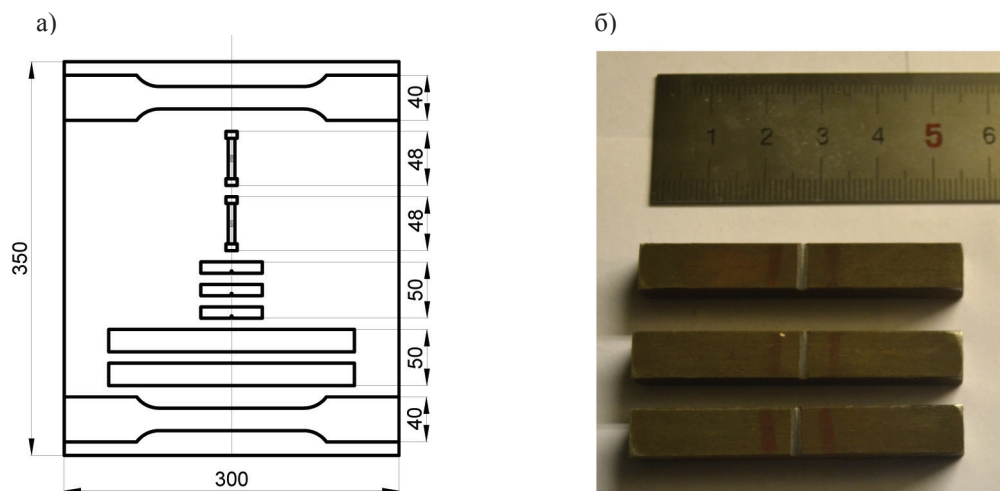


Рис. 1. Образцы для испытаний на ударную вязкость: схема вырезки (а); фотографии образцов (б)

В месте надреза у каждого образца радиографическим контролем оценивалась площадь дефекта. Образцы испытывались по ГОСТ 9454-78 в сертифицированной лаборатории по изучению износов и испытаниям материалов с выдачей протокола результатов испытаний на ударный изгиб сварного соединения № 443-505 от 12 мая 2015 г. После испытаний (рис. 2) образцы подвергались макроскопическому анализу для корректировки площади дефекта.

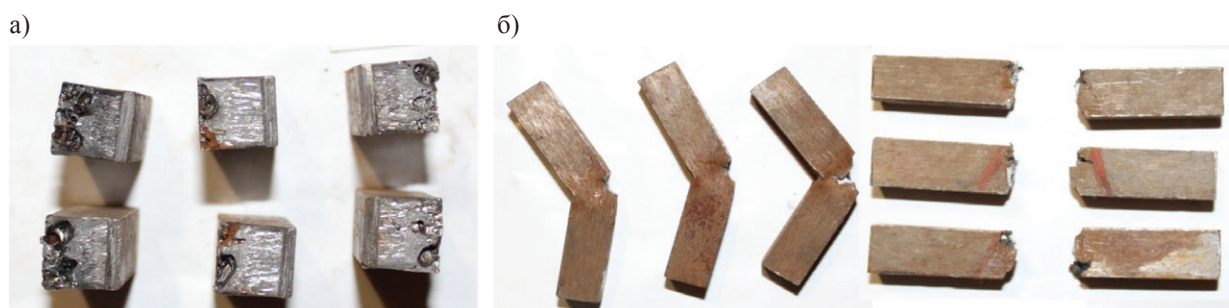


Рис. 2. Образцы после испытаний на ударную вязкость: излом образцов для оценки площади дефектов (а); виды изломов образцов (б)

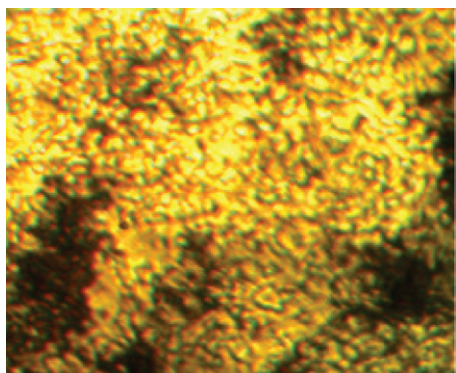


Рис. 3. Микроструктура образцов для испытаний на ударную вязкость (увеличение $\times 200$)

Попутно проводился микроанализ сварного шва, околошовной зоны, зоны термического влияния и основного металла, который показал мелкозернистую ферритно-перлитную структуру, подтверждающую правильную технологию, включая и режимы сварки (рис. 3).

Все экспериментальные данные по результатам испытаний образцов на ударную вязкость были разбиты на пять диапазонов, в которых определялось среднее значение работы удара $KV_T^{-20^\circ C}$, и среднее значение ударной вязкости $KVC^{-20^\circ C}$. Результаты представлены в таблице.

Таблица

Результаты испытаний на ударную вязкость

Номер диапазона	Площадь дефекта A , мм ²	Среднее значение площади дефекта $\bar{A}$, мм ²	Среднее значение работы удара $KV_T^{-20^\circ C}$, Дж	Среднее значение ударной вязкости $KVC^{-20^\circ C}$, Дж/см ²
I	0–17	8,5	87,8	97,7
II	18–35	26,5	84,4	94,4
III	36–53	44,5	23,3	25,9
IV	54–71	62,5	21,6	24,4
V	72–85	80,5	9,0	10,0

По результатам испытаний были построены графики зависимости среднего значения работы удара (рис. 4) и ударной вязкости (рис. 5) от средней площади дефекта.

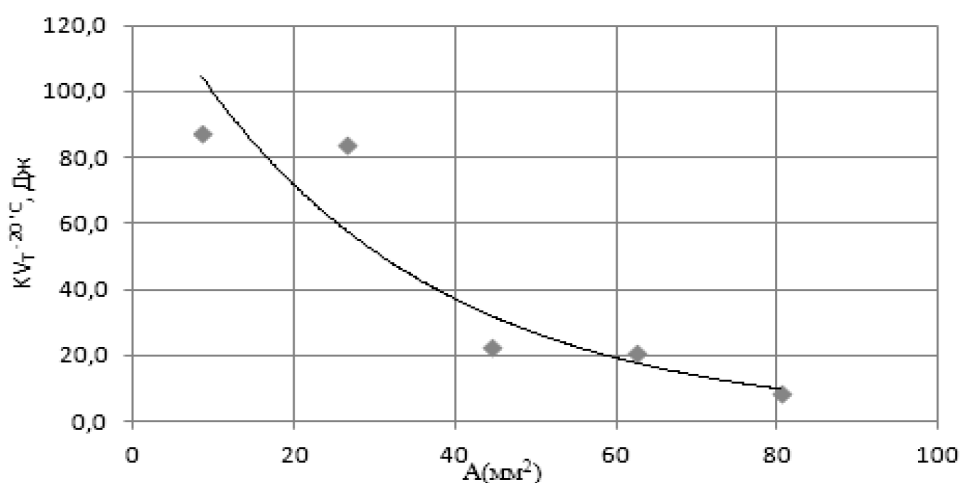


Рис. 4. Зависимость среднего значения работы удара от средней площади дефекта

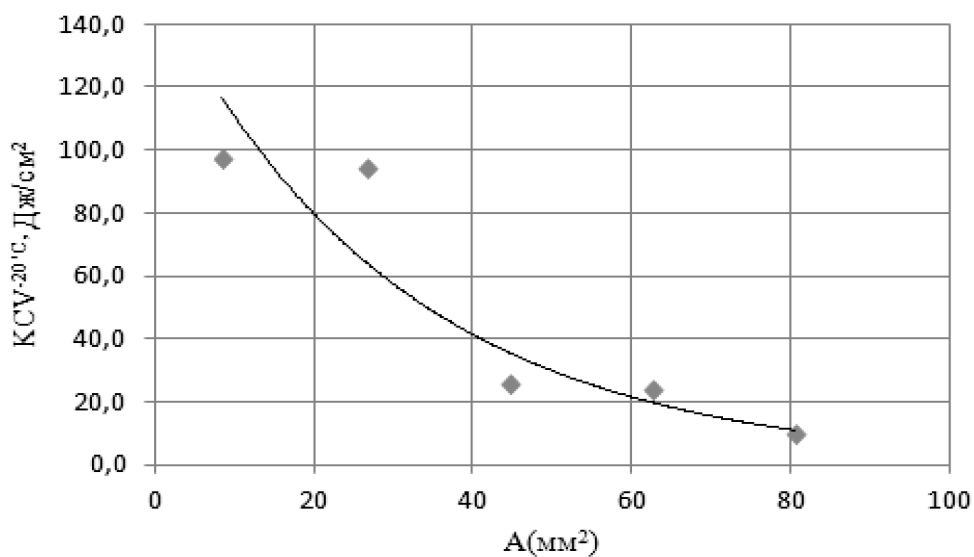


Рис. 5. Зависимость среднего значения ударной вязкости от средней площади дефекта

Результаты испытаний показывают, что с увеличением площади дефекта ударная вязкость снижается. Для корпусной стали РСД 40 Правилами Российского морского регистра судоходства нормируется минимальное значение ударной вязкости, которое должно быть не ниже 26 Дж/см². Указанная величина ударной вязкости наблюдается при отношении площади дефекта к площади образца 45 % (при площади дефекта 40 мм²). В диапазоне отношений средней площади дефекта к площади сечения образца от 0 до 30 % снижение ударной вязкости незначительно.

Таким образом, свойства корпусной стали, определяемые при динамическом нагружении, не снижаются от дефектов сварки (поры, непровары и шлаковые включения), как и свойства, определяемые при статическом нагружении.

Заключительным этапом исследования влияния дефектов сварки на долговечность стальных корпусных конструкций будет изучение этого влияния при циклическом нагружении.

Список литературы

1. Хоанг М. Ш. Управление техническим состоянием конструкций корпуса судов в процессе эксплуатации на основе оценки рисков / М. Ш. Хоанг // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2013. — № 1. — С. 71–77.
2. Судник В. А. Численный анализ дефектов формы сварного шва при дуговой сварке / В. А. Судник // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2008. — № 2. — С. 177–185.
3. Лепихин А. М. Неразрушающий контроль и оценка опасности дефектов сварки на стадии эксплуатации оборудования / А. М. Лепихин // Вопросы материаловедения. — 2007. — № 3. — С. 208–213.
4. Иванов В. И. О нормировании дефектов и достоверности неразрушающего контроля сварных соединений / В. И. Иванов // Безопасность труда в промышленности. — 2005. — № 5. — С. 65–67.
5. Мясникова А. А. Неметаллические включения и их влияние на качество сварных соединений при ручной дуговой сварке / А. А. Мясникова // Master's Journal. — 2012. — № 1. — С. 50–54.
6. Васин Е. С. Совершенствование методики расчета прочности и долговечности труб и сварных соединений с дефектами на основе результатов испытаний / Е. С. Васин, А. А. Белкин, С. П. Мягков // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2012. — № 1. — С. 56–61.
7. Аборкин А. В. Исследование и прогнозирование долговечности деталей машин со сварными соединениями: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02 / А. В. Аборкин. — М., 2010.
8. Гаспарянц Р. С. Методология расчета на прочность и долговечность труб и сварных соединений с дефектами / Р. С. Гаспарянц // Нефтепромысловое дело. — 2008. — № 2. — С. 35–41.
9. Нгуен Ньян. Влияние дефектов сварных швов на механические свойства корпусной стали, определяемые при статическом нагружении / Ньян Нгуен, А. Р. Рубан // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 2. — С. 13–21.
10. Розенштейн И. М. Хрупкое разрушение стальных сварных конструкций / И. М. Розенштейн // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2008. — Т. 74. — № 7. — С. 48–51.
11. Головин С. В. Обоснование прочности и ударной вязкости сварных соединений магистральных трубопроводов из высокопрочных сталей / С. В. Головин, Н. Г. Блехерова, А. П. Ладыжанский, А. С. Зандберг // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. — 2008. — № 2. — С. 42–47.