

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-132-142

**RESEARCH OF APPLICABILITY OF THE WELDED STEMS AND STERNS
INSTEAD OF CAST ONES ON ICEBREAKERS AND ICE-CLASS SHIPS****G. B. Kryzhevich¹, A. A. Petrov²**

1 — Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

2 — Central Marine Research & Design Institute, St. Petersburg, Russian Federation

The requirements of acting Russian Maritime Register of Shipping (RS) Rules do not permit the usage of welded stem and stern for high arctic class vessels and icebreakers. At the same time, welded structures are more effective in the way of technology and economy, in comparison with cast and forged analogs, what is approved by the number of new projects of ships. The main purposes of this research are: determination of applicability of welded stems and sterns on ships under consideration, from the technological and scientific points of view; rate the strength of welded structure; formulate basic requirements and methods of testing of such structures. The article gives the key results of the R&D work devoted to this problem; analysis of the requirements of acting rules of different classification societies — IACS members; typical structures of welded stems, analysis of a number of strength calculations, including the Finite element method analysis (FEM); validation of the update of acting RS Rules. The authors made an analysis of existing tests of welded samples, overviewed means of their application to the welded structures, operating in low-temperature conditions. It was shown in the article that the most important strength parameters of such structures are the cold-resistance and crack growth resistance within the welding zone. In this way the authors gave recommendation for rationalization of existing criteria of the assessment of these parameters. As a result, it is stated, that for today the welded stems may be used for the ships with ice classes Icel-Arc7, and for the expansion of this assumption, a number of additional experiments are needed.

Keywords: stem, stern, ice class, icebreaker, welding, welded stem and stern.

For citation:

Kryzhevich, Gennadiy B. and Alexey A. Petrov. "Research of applicability of the welded stems and sterns instead of cast ones on icebreakers and ice-class ships." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 132–142. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-132-142.

УДК 629.5:658.588.8; 629.5.08**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ СВАРНЫХ ШТЕВНЕЙ ВЗАМЕН ЛИТЫХ
НА ЛЕДОКОЛАХ И СУДАХ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ****Г. Б. Крыжевич¹, А. А. Петров²**1 — ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация2 — АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский
институт морского флота», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Требования действующих Правил Российского морского регистра судоходства (РС) запрещают применять сварные штевни на судах высоких арктических классов и ледоколах. Вместе с тем, использование сварных конструкций более технологично и экономически выгодно, по сравнению с литыми и коваными аналогами, что нашло отражение в ряде новых проектов судов. Основные цели исследования: определить, насколько применение сварных штевней на рассматриваемых судах научно и технологически обосновано; оценить прочность сварной конструкции, аналогичной литой; сформулировать основные требования к таким конструкциям и методам их испытаний. В статье рассмотрены основные результаты научно-исследовательской работы, посвященной данной проблеме, проанализированы требования различных классификационных обществ — членов МАКО, приведены типовые конструкции сварных форштевней, проведен анализ результатов расчетов прочности литых и аналогичных сварных форштевней, выполненных по различным методикам, в том числе с использованием метода конечных элементов (МКЭ), обоснованы предложения по корректировке действующих Правил РС. Выполнен анализ существующих методов испытаний сварных об-

разцов, описана специфика их применения для сварных конструкций, работающих в условиях низких температур. Показано, что важнейшими параметрами прочности таких конструкций является хладостойкость и трещиностойкость в месте сварного шва, даны рекомендации по совершенствованию существующих критериев оценки этих параметров. Сделан вывод о применимости сварных форштевней на судах ледовых классов Ice1 – Arc7 и о необходимости проведения дополнительных модельных и / или полунатурных испытаний для распространения такого допущения на суда более высоких ледовых классов и ледоколы.

Ключевые слова: форштевень, ахтерштевень, ледовый класс, ледокол, сварка, сварные штевни.

Для цитирования:

Крыжевич Г. Б. Исследование применимости сварных штевней взамен литых на ледоколах и судах ледового плавания / Г. Б. Крыжевич, А. А. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 132–142. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-132-142.

Введение

Активное освоение Арктического региона, наряду с интенсификацией морского трафика по Северному морскому пути (СМП), ставит перед проектантами морской техники и органами, осуществляющими надзор за ее проектированием и эксплуатацией, множество сложных задач, среди которых одной из главных является поиск компромисса между экономической эффективностью и эксплуатационной надежностью объектов морской инфраструктуры, проектируемых для работы в Арктических морях. Безусловно, на сегодняшний день накоплен богатый опыт эксплуатации и технического надзора за судами ледового плавания и ледоколами в этом регионе, однако, зачастую развитие новых технологических возможностей судостроительной промышленности опережает совершенствование соответствующих нормативных документов. Российским морским регистром судоходства (РС) при участии ведущих научно-исследовательских предприятий отрасли постоянно ведется работа, направленная на модернизацию действующих Правил РС. Это реализовано во многих научно-исследовательских разработках, в числе которых выполненная АО «ЦНИИМФ» НИР по теме «Подготовка предложений для корректировки нормативных документов РС по техническому обоснованию возможности применения сварных штевней на ледоколах и судах ледовых классов Arc5 – Arc9» [1], [2]. Актуальность данной темы обусловлена тем, что согласно действующим требованиям Правил классификации и постройки морских судов РС [3], на ледоколах и судах с ледовыми классами Arc5 – Arc9 форштевень и ахтерштевень должны быть выполнены из кованой или литой стали. Вместе с тем применение сварных конструкций из катаных листов технологически и экономически более целесообразно, что нашло отражение в ряде новых проектов.

Оценка прочности сварного форштевня

Работа [1] и [2] выполнялась в два этапа с мая по октябрь 2016 г. На первом этапе НИР был выполнен анализ требований ведущих иностранных классификационных обществ — членов МАКО (ИКО), предъявляемых к сварным штевням арктических судов и ледоколов, который показал, что в правилах ИКО [4] – [7] отсутствует запрет на применение сварных штевней для арктических судов, а правила LR, BV и DNV-GL разрешают использование сварных штевней на ледоколах. Анализ современных технологий сварочного производства показал, что свойства конструкционных и сварочных материалов, допускаемых РС для изготовления арктических судов, соответствуют требованиям, предъявляемым к штевням. Исходя из технологических возможностей сварочного производства, а также из существующего опыта применения сварных штевней на судах ледового плавания и ледоколах, был сделан вывод о том, что массивная и геометрически сложная конструкция ахтерштевня крупных судов и ледоколов по-прежнему может быть выполнена только в литом исполнении, в то время как форштевень таких судов технологически может быть изготовлен из свариваемых катаных листов. Конструктивно такой форштевень может быть изготовлен двумя способами: с острыми кромками — из прямых катаных листов, или скругленной формы — из профилированных (гнутых) листов (рис. 1).

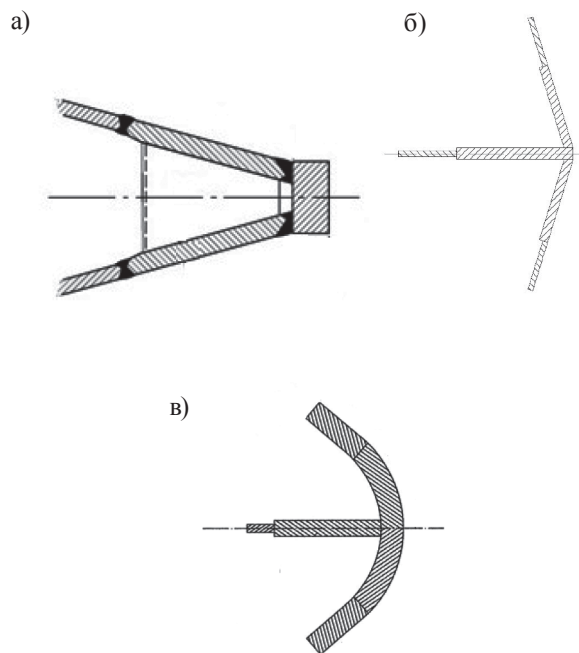


Рис. 1. Сварной форштевень: *а* — брусковый сварной форштевень с острыми кромками;
б — листовой сварной форштевень с острыми кромками;
в — листовой сварной форштевень с профилированным листом

Для трех проектов ледокола и судов ледового плавания выполнен анализ конструкции и прочности форштевня, который показал, что прочность форштевня обеспечивается применением высокопрочной стали, конструктивным оформлением и размерами его элементов: толщиной наружной обшивки, площадью и моментом сопротивления поперечного сечения форштевня. Предложена методика сравнительного расчета прочности конструкций литого и аналогичного сварного штевней (рис. 2), основанная на положении, что при соблюдении всех технологических требований к процессу сварки и проверке качества сварки в установленном требованиями Правил [3] порядке сварная конструкция получается равнопрочной, аналогичной литой, а различия таких конструкций заключаются только в их геометрии. Для верификации этой методики в рамках второго этапа был выполнен сравнительный расчет прочности литого и сварного форштевня в составе носовой оконечности ледокола «Капитан Драницын» с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Расчет выполнялся в лицензионном программном комплексе ANSYS Mechanical, сертифицированном РС для расчетов конструкций на прочность в рамках линейной теории упругости. Согласно проекту, форштевень ледокола представляет собой стальную отливку, имеющую неизменное поперечное сечение в районе переменных ватерлиний (рис. 2, *а*). Для этого поперечного сечения был подобран аналог, который может быть выполнен из сваренных катаных листов (рис. 2, *б*). Сравнение геометрических характеристик поперечных сечений двух форштевней приведено в таблице.

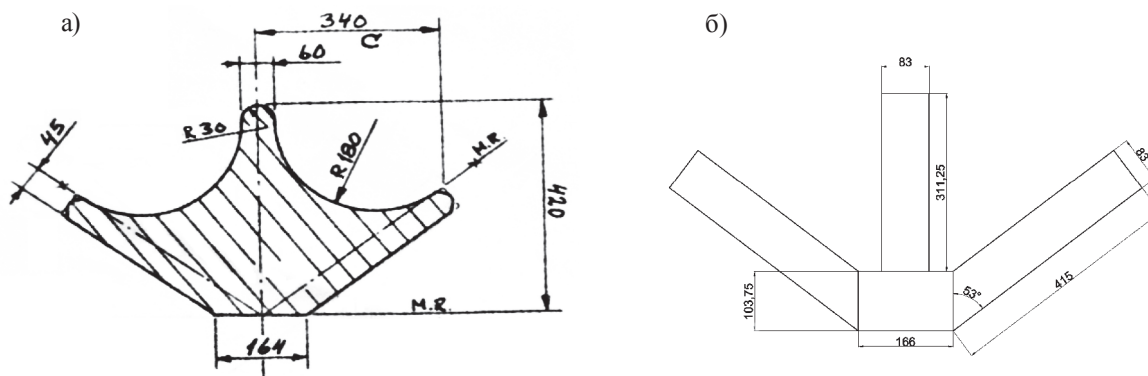


Рис. 2. Сечения литого (*а*) и сварного (*б*) форштевней

Геометрические характеристики поперечных сечений форштевней

Параметр	Обозначение, размерность	Литой	Сварной	Отношение (3) / (4)	Правила РС	Отношение	
						(3) / (6)	(4) / (6)
Площадь поперечного сечения	$S, \text{см}^2$	1150	1066	1,08	1054	1,09	1,01
Момент инерции	$J_{xx}, \text{см}^4$	83809	99435	0,84	—	—	—
Центр тяжести	$CGy, \text{см}$	15,65	17,03	0,92	—	—	—
Момент сопротивления	$W = (J_{xx} / CGy), \text{см}^3$	5355	5837	0,92	5424	0,99	1,08
Толщина листа	$s, \text{мм}$	—	83,00	—	41,50	2,00	—

В состав конечно-элементных 3D-моделей исследуемого объекта были включены конструкции от форштевня до поперечной переборки на 130 шп. — по длине, и от основной плоскости до главной палубы — по высоте (рис. 3). Конструкции форштевней (рис. 4) представлена объемными телами (Solid body), для сварного форштевня выделены отдельные тела, представляющие собой сварные швы, наружная обшивка, основной и рамный набор, платформы, палубы и переборки — двумерными оболочечными телами (Surface body).

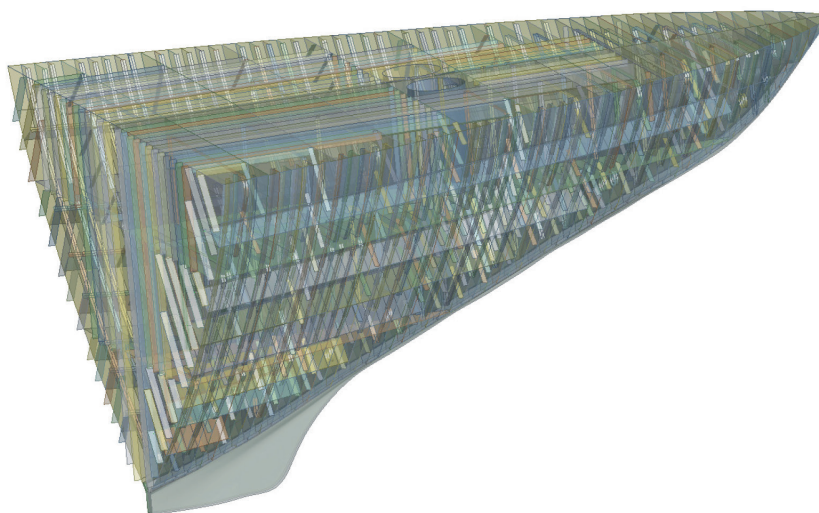


Рис. 3. Общий вид модели (в режиме прозрачности)

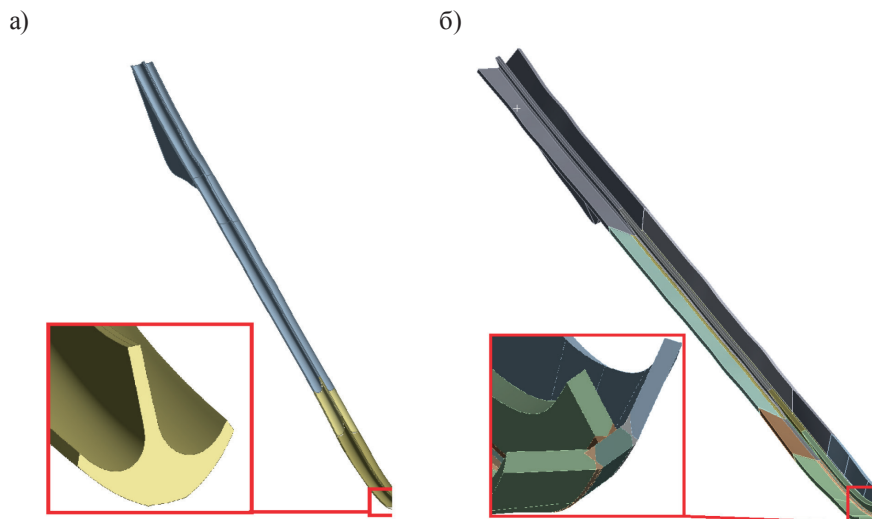


Рис. 4. Модели литого (а) и сварного (б) форштевней

В настоящее время ведется множество исследований, направленных на уточнение способов определения ледовых нагрузок, действующих на плавучие и стационарные морские сооружения, а также описывающих характер взаимодействия таких объектов с ледяными образованиями. Однако ввиду неоднозначности результатов этих исследований и относительной сложности предлагаемых расчетных методик в действующих Правилах РС отсутствуют рекомендации по назначению параметров ледовых нагрузок для прямых расчетов и оценки их результатов. Учитывая, что численные методы, в том числе МКЭ, находят все более широкое применение в проектировании и обосновании различных конструктивных решений, стоит полагать, что в ближайшем будущем эта проблема может быть решена. На данном этапе, ввиду того, что основная цель исследования — сравнительная (по сравнению с литым вариантом) оценка прочности сварного форштевня в контексте Правил РС, в расчете были приняты параметры ледового давления, определенные в соответствии с гл. 3.10 ч. II «Корпус» [3]. Для ледового класса Icebreaker 7, соответствующей построечной категории ледовых усилений LL3, это:

- интенсивность давления $p = 6169$ кПа;
- высота распределения $b = 0,758$ м;
- длина распределения $l_{\text{н}} = 8,344$ м.

Давление приложено по нормали к наружной обшивке на уровне действующей ватерлинии — 8,50 м от основной плоскости. По длине поле давлений распространяется от передней кромки форштевня в корму на 8,34 м симметрично для правого и левого бортов. Модель жестко закреплена по плоскости переборки на 130 шп. Схема приложения нагрузки и закрепления модели представлена на рис. 5.

A: Model, Static Structural
Pressure
Time: 1, s
14.09.2016 11:39
A Pressure: 6,169 MPa
B Fixed Support

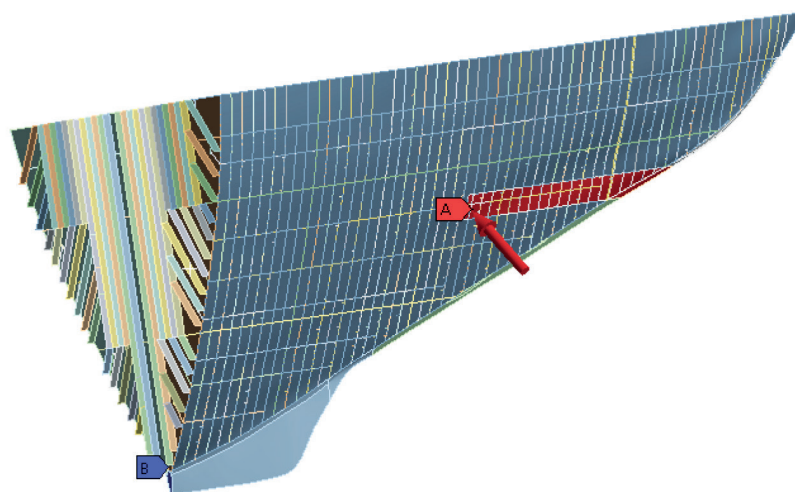


Рис. 5. Закрепление модели и схема приложения нагрузки

В результате расчета было определено, что характер распределения действующих эквивалентных напряжений по Мизесу в обеих моделях идентичен, численные значения напряжений составляют величины одного порядка (рис. 6 – 9) и в общем случае не превышают предел текучести материала ($R_{eH} = 235$ МПа), что позволило сделать вывод об обеспечении требуемого запаса прочности при эквивалентной замене литого форштевня сварной конструкцией. Исключение в характере и значениях действующих напряжений на кромке сварного форштевня (рис. 9) обусловлено сопряжением двух типов тел с сильно отличающимися толщинами: твердого тела Solid body толщиной 83 мм (лист форштевня) с оболочечным телом Surface body толщиной 45 мм (наружная обшивка), что в соответствии с требованиями п. 1.7 ч. II «Корпус» [3] в реальной конструкции невозможно.

A: Model Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
26.09.2016 13:05

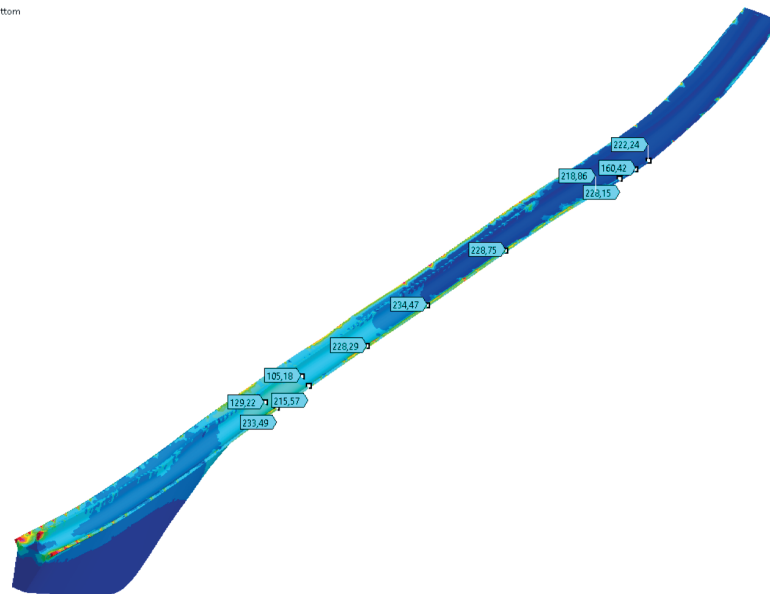


Рис. 6. Напряжения в литом форштевне

A: Model Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
13.10.2016 13:24

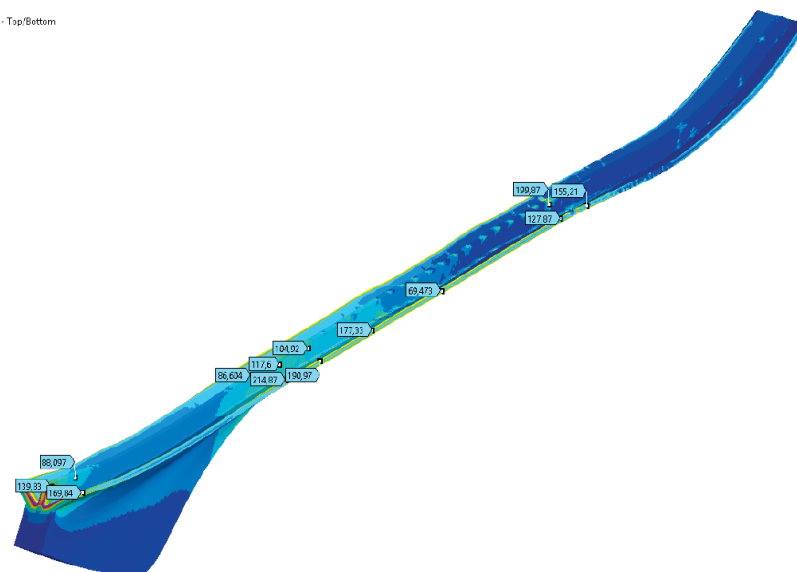
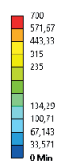


Рис. 7. Напряжения в сварном форштевне

A: Model Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
26.09.2016 14:05

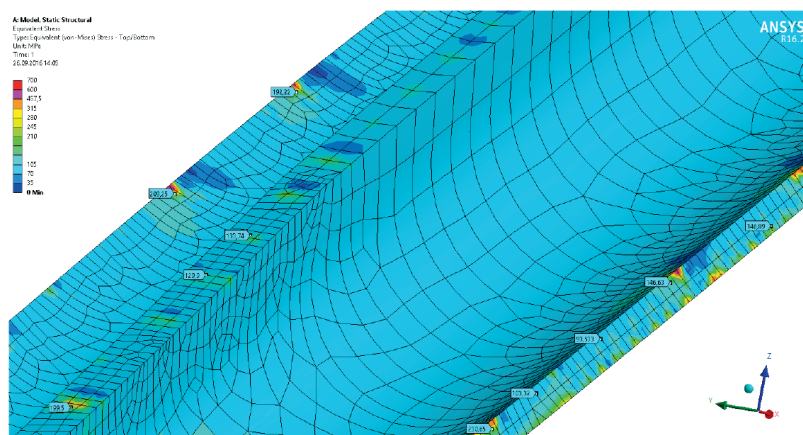
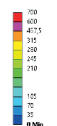


Рис. 8. Напряжения в литом форштевне

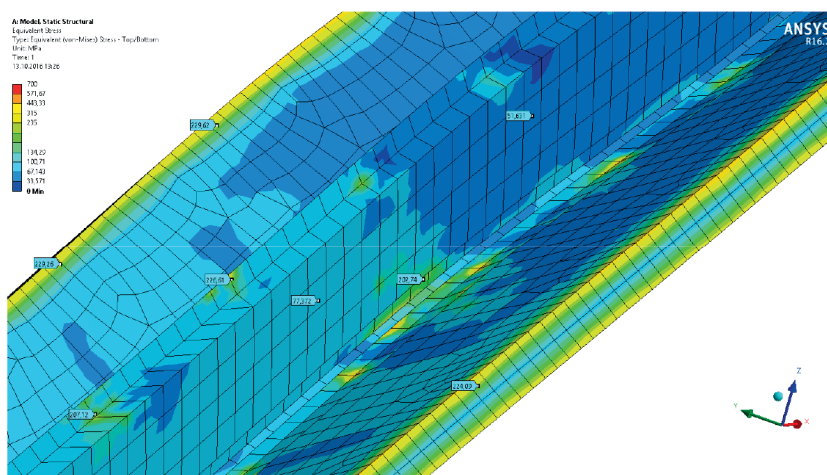


Рис. 9. Напряжения в сварном форштевне

В результате работы были сформулированы предложения по корректировке действующих Правил РС, главным из которых является допущение применения сварных форштевней на судах ледовых классов Arc5 – Arc7, в дополнение к уже разрешенным классам Ice1 – Arc4, а также разработка требований к таким конструкциям. Как было отмечено в ходе рассмотрения результатов работы на секции «Прочность и конструкция корпусов морских судов и плавучих сооружений» Научно-технического совета РС, прошедшей 23.11.2016 г., для распространения этого допущения на ледоколы и суда ледовых классов Arc8 и Arc9, отличающиеся более жесткими эксплуатационными условиями, необходим анализ опыта эксплуатации судов ледовых классов Arc5 – Arc7, а также проведение модельных и / или полунатурных испытаний.

Испытания сварных образцов конструкций, работающих при низких температурах

Помимо геометрических и конструктивных характеристик сварного форштевня, наиболее существенное влияние на его прочность оказывают конструкционные материалы и технология их сварки. Применительно к рассматриваемым судам, важнейшая особенность сталей — наличие существенного изменения их механических свойств (вязко-хрупкого перехода) при пониженных температурах и, как следствие, возможности появления хрупких разрушений. Главные факторы, способствующие хрупкому разрушению — низкая температура и высокая жесткость напряженно-деформированного состояния, вызванная концентраторами напряжений и неизбежными дефектами, приобретаемыми при изготовлении и эксплуатации конструкций. В определенной степени такому разрушению могут способствовать также и динамические ледовые нагрузки.

Толщина стали в штевнях может достигать 100 мм и более, что требует учета масштабного фактора при оценке результатов испытаний, полученных на образцах уменьшенных размеров.

В соответствии с Правилами РС [3] суда, удовлетворяющие требованиям к длительной эксплуатации при низких климатических температурах, могут получить к основному символу класса дополнительный знак WINTERIZATION(DAT), где в скобках указывается расчетная внешняя температура, обычно определяемая как минимальная суточная температура, достигаемая за пятилетний период. Например, DAT должна быть не выше минус 40 °C для ледоколов классов Icebreaker 7 – Icebreaker 9 и судов ледового плавания классов Arc7 – Arc9 [3]. Правила РС предусматривают для таких конструкций применение соответствующих марок стали с верхним индексом «Arc» и числовым значением DAT в градусах Цельсия. Такие стали могут применяться до указанной температуры без ограничений, в том числе для конструктивных элементов форштевней, подвергаемых динамическим ледовым нагрузкам. Данная практика поддерживается россий-

ской системой сертификации материалов, включающей несколько видов испытаний на хладостойкость в соответствии с требованиями Регистра.

Полный объем испытаний обычно включает определение химического состава, микроструктуры, стандартных свойств (включая испытания на растяжение в полной толщине), а также специальные испытания по определению применимости стали по хладостойкости (испытания по определению критических температур вязко-хрупкого перехода) [8]. Российская практика сертификации предусматривает следующие виды испытаний для проверки хладостойкости стали:

- общепринятое построение зависимостей работы, затрачиваемой на ударное разрушение образцов Шарпи, от температуры;

- испытания на вязкость разрушения при нескольких температурах для определения температурного диапазона, в котором удовлетворяются требования по критическому раскрытию трещины в ее вершине (оценка характеристики трещиностойкости материала CTOD);

- определение температуры нулевой пластичности (NDT) по стандарту ASTM E 208 [9], т. е. максимальной температуры, при которой стандартные образцы хрупко разрушаются при ударном трехточечном изгибе;

- определение температуры вязко-хрупкого перехода $T_{кб}$ (критической температуры, определяемой на полнотолщинных образцах с надрезом), которая соответствует 70 %-й вязкой составляющей в изломе образцов, разрушенных статическим трехточечным изгибом.

Используемый в российском судостроении метод механических испытаний для определения $T_{кб}$ предназначен для проверки условий распространения и остановки трещины, а круглый надрез приводит к достижению предельной несущей способности образцов, т. е. накоплению при испытании такого количества упругой энергии, когда энергия, высвобождаемая при продвижении трещины, не зависит от условий ее страгивания. Метод был тщательно изучен для определения значимых факторов, влияющих на результаты испытаний [10]. Для обеспечения стабильности и повторяемости результатов испытаний предусмотрена градация размеров образца и строгая регламентация условий нагружения. Принятая процедура испытаний для определения $T_{кб}$ описана в Правилах РС [3]. Хотя этот вид испытаний в большинстве случаев дает наиболее консервативную оценку хладостойкости металла листового проката, он, все же, не может заменять другие виды испытаний при сертификации.

Наибольшие трудности обычно возникают при выполнении нормативных требований к трещиностойкости сварных соединений. В качестве основной характеристики этого качества, регламентируемой Правилами РС [3], рассматривается критическое значение параметра раскрытия в вершине трещины (δ_{cr}) металла сварных соединений. Требуемые критические значения CTOD представлены в Правилах в табличном виде. Они приблизительно соответствуют следствию из условия прочности сварной конструкции по критерию хрупкого разрушения [12]:

$$\delta_{cr} \geq (1,3 - 1,4) \sigma_T s_{max} / E, \quad (1)$$

где s_{max} — максимальная толщина конструктивного элемента; σ_T — предел текучести; E — модуль упругости.

Правилами РС предусматривается проведение испытаний по методам механики разрушения с использованием образцов типов SENB (single edge notch bend) и CT (compact tension), включенных в известные стандарты [11] – [13]. Тип SENB [11], [12] соответствует типу 4, тип CT — типу 3 по ГОСТ 25.506-85 [13]. Толщина образца должна быть по возможности приближена к максимальной толщине проката, изготавливаемого по одобренной Регистром технологии для производства Агс-сталей, или к максимальной толщине элементов конструкции, свариваемых с применением технологических процессов сварки, одобренных Регистром. Температура испытаний должна соответствовать минимальной (расчетной) температуре эксплуатации конструкции. Для районов Арктики это — минус 40 °С и ниже. Испытания листового проката «на свариваемость» проводятся для металла зоны термического влияния (ЗТВ) при расположении исходного фронта трещины в отдельных «целевых структурах», сварка осуществляется по разделке с одной прямой кромкой.

Наиболее низкие результаты обычно регистрируются для крупнозернистой составляющей зоны термического влияния у границы сплавления [14]. При квалификации сварочных процедур исходный фронт трещины располагается по оси симметрии стыкового шва. В обоих случаях плоскость надреза перпендикулярна поверхности, направление распространения разрушения — вдоль направления сварки.

Согласно [3], с требуемым значением должна сопоставляться средняя величина δ_{cr} , при этом минимальное значение должно быть не менее 0,5 от среднего. При невыполнении какого-либо из этих условий минимально необходимый объем испытаний (три корректных значения CTOD) может быть увеличен до пяти и более, что дает возможность отбросить один минимальный результат.

Оцениваемая таким образом трещиностойкость металла сварных соединений низколегированных сталей, выполненных с применением сварочных материалов, соответствующих наиболее жестким требованиям по хладостойкости, часто оказывается неудовлетворительной. Результаты определения параметра трещиностойкости CTOD при температуре минус 40 °С и ниже в толщинах более 30 мм часто не удовлетворяют требованиям Правил РС.

Аналогичные результаты и выводы получены зарубежными исследователями, анализирующими применимость материалов в условиях Арктики. В ряде работ (например, [15]) отмечается, что существующие редакции стандартов Norsok M 101, ISO 19902, ISO 19904-1, регламентирующих строительство конструкций океанотехники, фактически не распространяются на низкие температуры (ниже минус 30 °С). Для оценки возможности применения существующих в них критериев по CTOD (близких к указываемым в Правилах РС) при низких температурах проводились обширные исследования трещиностойкости металла сварных соединений, выполненных по принятым для офшорных конструкций технологиям. Авторы ряда публикаций, представленных в материалах ежегодной международной конференции ISOPE (International Society of Offshore and Polar Engineers) [15], [16] и др., приходят к тем же выводам: при температуре испытаний стандартных образцов типа SENB натурной толщины ниже минус 40 °С для металла крупнозернистой зоны термического влияния и металла сварного шва низколегированных сталей характерно экстремальное рассеяние данных по CTOD с высокой вероятностью получения неприемлемо низкой трещиностойкости.

В этой связи одним из основных направлений зарубежных исследований, направленных на разработку требований к трещиностойкости сварных соединений, стал анализ корректности применяемых методик испытаний. При таком анализе пытаются удостовериться, в том что величины, получаемые при стандартных испытаниях на трещиностойкость образцов SENB натурной толщины, не являются чрезмерно консервативными.

Несмотря на всю сложность методической стороны экспериментальной оценки трещиностойкости, существующие требования Правил РС [3] применительно к сварным конструкциям штевной должны выполняться, хотя дальнейшие исследования этого вопроса могут привести к корректировке норм трещиностойкости.

Выводы

1. В результате исследования установлено, что в настоящее время, ввиду технологических и научно-экспериментальных достижений в сварочном производстве, а также эксплуатационных особенностей, сварными могут быть форштевни на судах ледовых классов Ice1 – Arc7, что нашло отражение в предложениях по корректировке действующих Правил РС.

2. Сформулированные предложения научно обоснованы и имеют ряд технологических и экономических преимуществ; эти предложения одобрены Научно-техническим советом РС и используются в ряде новых проектов судов.

3. Для более широкого применения сварных конструкций на судах высоких арктических классов и ледоколах необходимо проведение серии модельных и / или полунатурных испытаний в разных температурных условиях.

4. Особое внимание при использовании толстостенных сварных штевней необходимо уделять обеспечению хладостойкости зон сварных швов и термического влияния и точному выполнению всех соответствующих нормативов по трещиностойкости, изложенных в [2].

5. При невозможности строгого выдерживания этих нормативов и эксплуатации судов при температуре порядка минус 40 °С и ниже необходимы дополнительные обоснования для отступления от них путем проведения соответствующих расчетных и экспериментальных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маркозов Г. В. Подготовка предложений для корректировки нормативных документов РС по техническому обоснованию возможности применения сварных штевней на ледоколах и судах ледовых классов Arc5 – Arc9: промежуточный отчет о НИР. — № Гос. рег. АААА-А16116061710099-5. — Инв. № 8542 (НТБ АО «ЦНИИМФ»). — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. — 83 с.

2. Маркозов Г. В. Подготовка предложений для корректировки нормативных документов РС по техническому обоснованию возможности применения сварных штевней на ледоколах и судах ледовых классов Arc5 – Arc9: окончательный отчет о НИР. — № Гос. рег. АААА-А16116061710099-5. — Инв. № 8543 (НТБ АО «ЦНИИМФ»). — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. — 102 с.

3. Правила классификации и постройки морских судов: в 3 т. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015. — Т. 1. — 580 с.

4. Rules and Regulations for the Classification of Ships. — Lloyd's Register Group Limited, 2016. — 1658 p.

5. Rules for the Classification of POLAR Class and Icebreaker Ships. — Bureau Veritas, 2013. — 38 p.

6. Rules for Building and Classing - Steel Vessels. — Houston, USA: American Bureau of Shipping, 2016. — 301 p.

7. Rules for Classification DNVGL-RU-0050. General regulations. — DNV GL AS, 2016. — 29 p.

8. Башаев В. К. Об определении хладостойкости современных высокопрочных сталей для арктических конструкций / В. К. Башаев, А. В. Ильин, В. Ю. Филин, М. А. Гусев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2015. — № 38–39. — С. 74–79.

9. ASTM E208-06 (2012). Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels. — West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012. — 14 p. DOI: 10.1520/E0208-06R12.

10. Данилов Г. И. К проблеме оценки хладостойкости листов из сталей натурной толщины по температуре вязкохрупкого перехода $T_{\text{кв}}$ / Г. И. Данилов, А. В. Ильин, В. П. Леонов, Т. А. Фёдорова // Вопросы материаловедения. — 2005. — № 1. — С. 69–78.

11. ASTM E 399-09. Standard Test Method for Plain-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. — West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009. — 31 p. DOI: 10.1520/E0399-09.

12. BS 7448-1: 1991. Fracture Mechanics Toughness Test. Part 1. Method for determination of K_{Ic}, critical CTOD and critical J values of metallic materials. — BSI, 1991. — 48 p.

13. ГОСТ 25.506-85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 18 с.

14. Виноградов О. П. Научно-методические вопросы аттестационных испытаний на трещиностойкость структурно-неоднородного металла сварных соединений / О. П. Виноградов, А. В. Ильин, В. Ю. Филин // Вопросы материаловедения. — 2004. — № 1. — С. 75–89.

15. Horn A. M. Material Challenges for Arctic Offshore Applications, a Reliability Study of Fracture of a Welded Steel Plate Based on Material Toughness Data at -60°C / A.M. Horn, M. Hauge // The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. — International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011.

16. Hauge M. Arctic offshore materials and platform winterization / M. Hauge // The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference. — International Society of Offshore and Polar Engineers, 2012.

REFERENCES

1. Markozov, G. V. *Podgotovka predlozhenii dlya korrektyrovki normativnykh dokumentov RS po tekhnicheskomu obosnovaniyu vozmozhnosti primeneniya svarnykh shtevnei na ledokolakh i sudakh ledovykh klassov Arc5-Arc9*. Preliminary research report. № Gos. reg. АААА-А16116061710099-5. Inv. № 8542 (NTB AO «TsNIIMF»). SPb.: AO «TsNIIMF», 2016.

2. Markozov, G. V. *Podgotovka predlozhenii dlya korrektyrovki normativnykh dokumentov RS po tekhnicheskomu obosnovaniyu vozmozhnosti primeneniya svarnykh shtevnei na ledokolakh i sudakh ledovykh klassov Arc5-Arc9*. Final research report. № Gos. reg. AAAA-A16116061710099-5. Inv. № 8543 (NTB AO «TsNIIMF»). SPb.: AO «TsNIIMF», 2016.
3. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov: v 3 t.* SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2015. Vol. 1.
4. *Rules and Regulations for the Classification of Ships*. Lloyd's Register Group Limited, 2016.
5. *Rules for the Classification of POLAR Class and Icebreaker Ships*. Bureau Veritas, 2013.
6. *Rules for Building and Classing - Steel Vessels*. Houston, USA: American Bureau of Shipping, 2016.
7. *Rules for Classification DNVGL-RU-0050. General regulations*. DNV GL AS, 2016.
8. Bashaev, V. K., A. V. Il'in, V. Yu. Filin, and M. A. Gusev. "Ob opredelenii khladoistoikosti sovremennykh vysokoprochnykh stalei dlya arkticheskikh konstruktssii." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 38-39 (2015): 74–79.
9. *ASTM E208-06 (2012). Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012. DOI: 10.1520/E0208-06R12.
10. Danilov, G. I., A. V. Ilyin, V. P. Leonov, and T. A. Fedorova. "Regarding problem of coldresistance of steels having natural thickness under temperature of elastic-brittle transition $T_{\text{кб}}$." *Voprosy materialovedeniya* 1 (2005): 69–78.
11. *ASTM E 399 - 09. Standard Test Method for Plain-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009. DOI: 10.1520/E0399-09.
12. *BS 7448-1: 1991. Fracture Mechanics Toughness Test. Part 1. Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of metallic materials*. BSI, 1991.
13. Russian Federation. State Standard 25.506-85. *Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Opredelenie kharakteristik treshchinostoikosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzhении*. Vved. 1986-01-01. M.: Izd-vo standartov, 1985.
14. Vinogradov, O. P., A. V. Ilyin, and V. Yu. Filin. "Scientific and methodical problems of fracture toughness certification for of the welded joint structurally heterogeneous metal." *Voprosy materialovedeniya* 1 (2004): 75–89.
15. Horn, Agnes Marie, and Mons Hauge. "Material challenges for arctic offshore applications, a reliability study of fracture of a welded steel plate based on material toughness data at -60 C." *The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011.
16. Hauge, Mons. "Arctic offshore materials and platform winterisation." *The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2012.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крыжевич Геннадий Брониславович — доктор технических наук, профессор
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Московское шоссе 44
e-mail: G_Kryzhevich@ksrc.ru
Петров Алексей Анатольевич — соискатель
Научный руководитель:
Крыжевич Геннадий Брониславович
АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота»
191015, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул. 6, лит. А.
e-mail: alpetrov.ru@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kryzhevich, Gennadiy B. — Dr. of Technical Sciences, professor
Krylov State Research Centre
44 Moskovskoe Shosse, St. Petersburg, 196158, Russian Federation
e-mail: G_Kryzhevich@ksrc.ru
Petrov, Alexey A. — Applicant
Supervisor:
Kryzhevich Gennadiy B.
Central Marine Research & Design Institute
6A Kavalergardskaya Str., St. Petersburg, 191015, Russian Federation
e-mail: alpetrov.ru@gmail.com

Статья поступила в редакцию 9 января 2017 г.
Received: January 9, 2017.