



ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 621.74 + 624.012
EDN OGLHSP

КОМПЕНСАЦИЯ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ИХ КОНЦЕНТРАЦИИ ПУТЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ИЗГИБА КОРПУСА СУДНА

А.А. Воробьева, аспирант, Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: wiauy1997@mail.ru

А.П. Аносов, д-р техн. наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: anosov49@mail.ru

Остаточные сварочные напряжения, возникающие при судоремонте в процессе замены изношенных листов обшивки, могут представлять серьезную опасность с точки зрения общей продольной прочности корпуса судна. В работе выполнен анализ напряженного состояния по контуру вваренного в настил прямоугольного листа с учетом предварительного растяжения настила. Рассмотрены напряжения как в материале сварного шва, так и в околошовных зонах настила и ввариваемого листа. Обоснован и сформулирован технологический способ устранения вызванной геометрическими параметрами выреза концентрации напряжений на контуре ввариваемого листа при компенсации сварочных напряжений путем предварительного растяжения ремонтируемого настила.

Ключевые слова: остаточные сварочные напряжения, концентрация напряжений, компенсация остаточных сварочных напряжений.

Для цитирования: Воробьева А.А. Компенсация сварочных напряжений с учетом их концентрации путем предварительного изгиба корпуса судна / А.А. Воробьева, А.П. Аносов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 94 — 107. — EDN OGLHSP.

COMPENSATION OF WELDING STRESSES TAKING INTO ACCOUNT THEIR CONCENTRATION BY PRELIMINARY BENDING OF THE SHIP'S HULL

A.A. Vorobyeva, PhD student, Far Eastern Federal University, 690922 Russia, Vladivostok, Russky Island, Ajax Bay, 10, e-mail: wiay1997@mail.ru

A.P. Anosov, DSc, Professor, Far Eastern Federal University, 690922 Russia, Vladivostok, Russky Island, Ajax Bay, 10, tel: +7 (914) 697-01-86, e-mail: anosov49@mail.ru

Residual welding stresses that occur in the course of ship repair during the replacement of worn hull plates can pose a serious danger in terms of the overall longitudinal strength of the ship's hull. The paper analyzes the stress state along the contour of a rectangular sheet welded into the flooring taking into account the preliminary stretching of the flooring. Stresses are considered both in the weld material and in the near-seam zones of the flooring and the sheet being welded. A technological method is substantiated and formulated to eliminate the stress concentration on the contour of the welded sheet caused by the geometric parameters of the cutout while compensating for welding stresses by pre-stretching the repaired flooring.

Key words: residual welding stresses, stress concentration, compensation of residual welding stresses.

For citation: Compensation of welding stresses taking into account their concentration by preliminary bending of the ship's hull. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 94 — 107. — EDN OGLHSP. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию остаточных сварочных напряжений посвящено большое количество публикаций. Они касаются как общих, фундаментальных проблем [1, 2], так и вопросов, связанных с влиянием этих напряжений на прочность судовых конструкций (например, [3 — 6]).

Остаточные сварочные напряжения, возникающие при судоремонте в процессе замены изношенных листов обшивки, могут представлять серьезную опасность с точки зрения общей продольной прочности корпуса судна. На опасность высоких остаточных напряжений косвенно указывают вероятные причины аварий судов, сопровождающиеся переломом их корпусов. В работе [7] речь идет об аварии танкера «Находка» 2 января 1997 г. у побережья Японии. В штормовых условиях корпус переломился на расстоянии трети длины от носовой оконечности. Незадолго до аварии судно проходило ремонт, сопровождавшийся заменой большого количества листов обшивки, в том числе в районе излома. По имеющимся данным, часть ремонтных работ выполнялась на плаву, что ведет к неконтролируемому изменению остаточных сварочных напряжений (см. также [8, 9]). Развитие трещин, разрушивших корпус, по ступенчатой траектории, идущей по кромкам листов, можно объяснить обилием сварочных швов и, как следствие, сложным напряженным состоянием конструкций в районе замены листов при высоком уровне остаточных напряжений.

Сюда же можно отнести катастрофы двух танкеров: «Волгонефть-212» и «Волгонефть-239», произошедшие 15 декабря 2024 г. в Керченском проливе и сопровождавшиеся переломом корпусов (рис. 1). Танкеры 1969 и 1973 гг. постройки соответственно, то есть имеют возраст, значительно превышающий нормативные 24 года. Процесс их эксплуатации вследствие значительного износа сопровождался периодическими ремонтами с заменой листов и целых блоков, что, несмотря на имеющую место релаксацию, накапливало в корпусе остаточные сварочные напряжения, которые, в свою очередь, не могли не сказаться на прочности корпуса.



Рис. 1. Перелом корпуса танкера «Волгонефть»: а — момент аварии; б — оставшаяся часть корпуса

При изгибе корпуса судна в вертикальной плоскости наибольшие напряжения, если не принимать во внимание надпалубные конструкции, действуют в настиле палубы. Ситуация усугубляется наличием прерывистых связей, которые служат источниками концентрации напряжений. Одним из распространенных видов прерывистых связей являются вырезы в палубе. Уровень концентрации напряжений характеризуется ее коэффициентом α_K .

При выполнении штатных вырезов (грузовые люки, шахты, лазы и т.п.) Правилами [10] предусмотрены конструктивные мероприятия, снижающие повышенные напряжения в районе концентраторов до допустимой по соображениям прочности величины. Так, например, в углах грузовых люков, имеющих скругление с регламентируемым Правилами радиусом не менее 0,1 от ширины люка, величина коэффициента концентрации напряжений не превышает $\alpha_K = 2,5$ [11].

Выполнение вырезов при судоремонте либо обусловлено заменой изношенных листов, либо это технологические вырезы для демонтажа (монтажа) подпалубных конструкций или оборудования. При этом вырезы выполняются, как правило, по существующим пазам и стыкам. В этом случае вырезы имеют прямые углы без скруглений, и коэффициент концентрации напряжений достигает величин $\alpha_K = 3 - 8$ в зависимости от ориентации выреза по отношению к направлению действия нагрузки и соотношения длин сторон выреза в диапазоне от 1:5 (вдоль) до 5:1 (поперек) соответственно [12].

В этом случае максимальные напряжения в районе концентратора $\sigma_{\max} = \alpha_K \sigma_0$, где σ_0 — номинальные напряжения без учета концентрации, не будут представлять опасности, если $\sigma_{\max} < [\sigma]$, где $[\sigma]$ — допускаемые напряжения. В противном случае степень опасности разрушения зависит от свойств материала конструкции. Если корпусная сталь обладает высокой пластичностью (малоуглеродистая сталь), то напряжения, достигнув предела текучести, не будут далее расти, пока не будет исчерпана пластичность, а это вряд ли возможно в локальной области реальной судовой конструкции, выполненной из такого материала. Кроме того, возникшая локальная область пластических деформаций становится своего рода деконцентратором, снижающим коэффициент концентрации до величины, определяемой формой пластической области [13]. При этом локальная область пластических деформаций рассматривается как вырез, заполненный абсолютно пластичным материалом при напряжении, равном пределу текучести.

Иначе обстоит дело, если материал обладает низкой пластичностью, не имеет выраженной площадки текучести, а предел текучести по величине близок к пределу прочности (временному сопротивлению). В этом случае возможно быстрое исчерпание пластичности с последующим развитием хрупкой трещины. Для хрупкого материала разрушение неизбежно при $\sigma_{\max} = \sigma_B$, где σ_B — предел прочности.

Концентрация напряжений не имеет значения, если судно стоит на стапеле, обеспечивающем прямолинейную килевую линию. При этом с некоторым допущением можно считать, что в связях корпуса отсутствуют напряжения. Данная статья является частью работы, в которой решается задача компенсации сварочных напряжений при замене листов обшивки за счет напряжений, возникающих в связях корпуса при его целенаправленном предварительном продольном изгибе, то есть в этом случае неизбежно необходим учет концентрации напряжений и, по возможности, ее устранение по контуру ввариваемых листов.

Сварочные напряжения при варке листов в настил возникают вследствие усадки материала сварного шва при его затвердевании и остывании. Зона термического влияния сварного шва, как правило, мала по сравнению с размерами прилегающего к шву настила и ввариваемых в него листов, и при остывании материала шва холодные листы препятствуют его усадке, в результате чего в шве возникают растягивающие напряжения, а в прилегающих к нему областях основного металла — сжимающие напряжения.

На рис. 2 представлен характер распределения нормальных напряжений в поперечном сечении шва и прилегающих областях свариваемых листов [14] из титанового сплава.

Видно, что сварочные напряжения, как растягивающие в материале шва, так и сжимающие в околосшовной зоне свариваемых листов, имеют величину, соизмеримую с прочностными характеристиками материала. При этом сварочные напряжения суммируются с эксплуатационными напряжениями, величина которых в локальных областях зависит от уровня концентрации напряжений. Высокий уровень напряжений в локальных областях с учетом их цикличности при плавании судна в условиях волнения может быстро привести к возникновению трещин вследствие малоциклового усталости.

Целью работы является обоснование способа устранения зон концентрации напряжений, обусловленной геометрическими параметрами вырезов, по контуру ввариваемых листов обшивки при судоремонте.

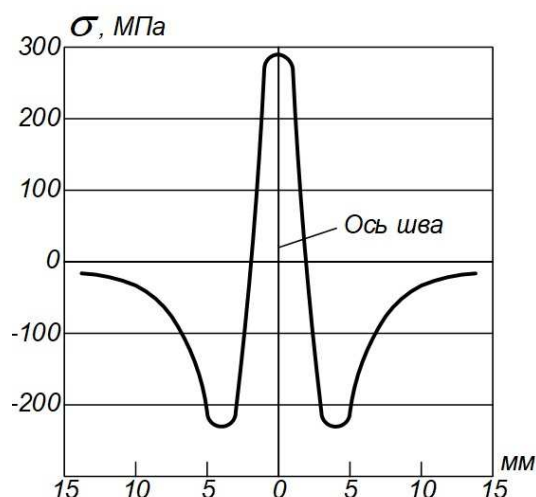


Рис. 2. Распределение нормальных напряжений по поперечному сечению шва и прилегающих областей свариваемых листов из титанового сплава BT20 [14]

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ВВАРКЕ В НАСТИЛ ЛИСТА ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Рассмотрим качественную картину влияния сварочных напряжений на напряженное состояние предварительно растянутого листа с прямоугольным вырезом после сварки в него вставки и снятия предварительной растягивающей нагрузки. Единственным реальным способом обеспечения необходимых растягивающих напряжений в палубе или днище корпуса судна является его изгиб, который в рамках данной работы предлагается создавать с использованием надувных эластичных оболочек (НЭО). Некоторые аспекты их применения в технологических процессах при судоремонте и испытаниях корпусов представлены в работах [15, 16].

Использован вырез со скругленными углами, так как для него в литературе есть конкретные данные по распределению напряжений в районе концентратора, например в [11].

На рис. 3а показано распределение нормальных напряжений по контуру прямоугольного выреза в растянутой пластине и график, демонстрирующий снижение напряжений по мере удаления от кромки выреза (рис. 3б).

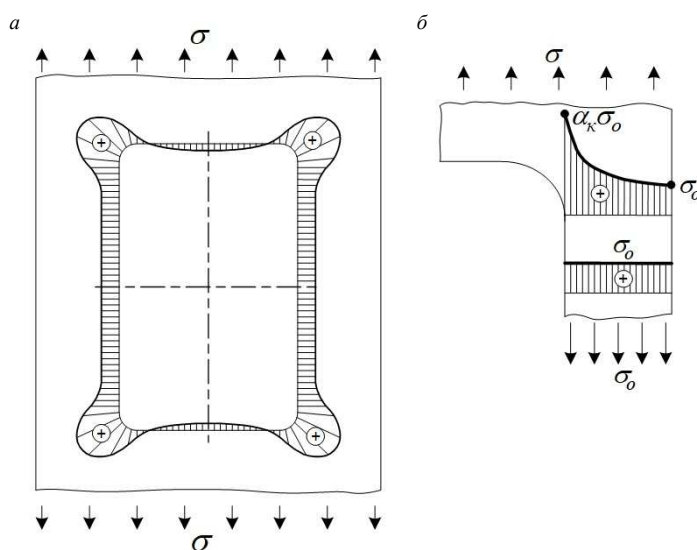


Рис. 3. Распределение нормальных напряжений по контуру прямоугольного выреза в растянутой пластине (а) и снижение напряжений по мере удаления от кромки выреза (б)

Процедура замены части листа выполняется в следующей последовательности. В пластине делается прямоугольный вырез, после чего она нагружается растягивающей нагрузкой (рис. 4а и 5а).

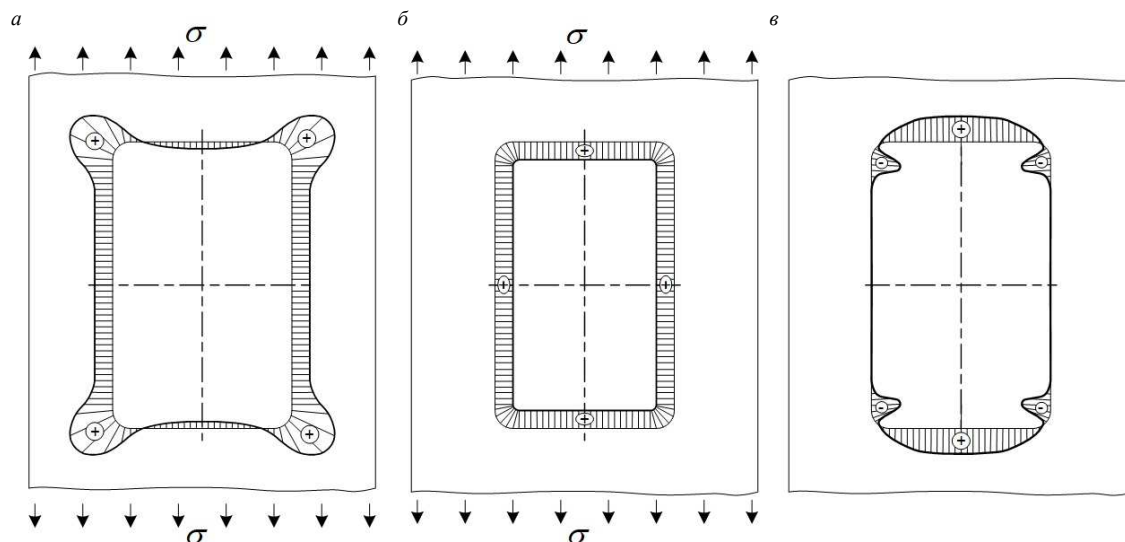


Рис. 4. Компенсация сварочных напряжений в материале сварного шва:

а — нормальные напряжения по контуру выреза в предварительно растянутом листе;

б — нормальные напряжения в материале шва после его затвердевания и остывания;

в — остаточные нормальные напряжения в материале сварного шва после снятия предварительной растягивающей нагрузки

Величина этой нагрузки выбирается такой, чтобы нормальные напряжения на продольных кромках выреза вне зоны концентрации (района углов) равнялись расчетным сварочным напряжениям в материале шва после сварки вставки — листа, повторяющего форму выреза.

После сварки вставки и снятия предварительной нагрузки произойдет следующее (рис. 4в). Нормальные напряжения в сварных швах (рис. 4б) вдоль продольных кромок станут равны нулю. Если бы отсутствовал вваренный лист, то повышенные напряжения и соответствующие им деформации в районе концентратора напряжений при снятии предварительной нагрузки, релаксируя, стали бы равны нулю, но поскольку рядом находится вваренный лист, который препятствует релаксации деформации, то в процессе релаксации напряжения в сварном шве сначала обратятся в ноль, а в конечном итоге станут сжимающими величиной, равной разности сварочных напряжений и повышенных напряжений в районе концентрации. В сварном шве вдоль поперечной кромки вваренного листа по той же логике сжимающие напряжения на кромке выреза в основном металле, возникшие при предварительном нагружении, после снятия нагрузки суммируются со сварочными напряжениями в шве.

Рассуждая аналогичным образом, можно получить картину остаточных сварочных напряжений в околосшовной зоне вварного и основного листов, представленную на рис. 5.

Проведенный анализ не исключает погрешностей, но достаточно наглядно представляет качественную картину возникновения и компенсации сварочных напряжений при замене листов настила палубы.

Таким образом, в результате предварительного растяжения настила палубы при замене листов можно компенсировать растягивающие сварочные напряжения в продольных швах (рис. 4в), которые, не будучи компенсированными и суммируясь с напряжениями от общего продольного изгиба корпуса судна при движении на волнении, могут привести к серьезным повреждениям (усталостным, а затем и хрупким трещинам вплоть до перелома корпуса). При этом повышенные сварочные напряжения вдоль поперечных швов не представляют серьезной опасности для общей прочности корпуса.

Что касается околосшовных зон основного настила и вварного листа, то здесь в результате возникнут повышенные сжимающие напряжения (рис. 5в), которые в сумме с сжимающими напряжениями от общего изгиба корпуса могут достичь значительной величины. Это чревато появлением пластических деформаций или потерей устойчивости листов настила палубы, однако, имея в виду относительно малую ширину околосшовной зоны и быстрое падение напряжений по мере удаления от шва (рис. 2), серьезной опасности ни то, ни другое не представляет. С точки зрения усталости знакопостоянные циклические напряжения, меняющиеся в области сжатия, гораздо менее опасны, чем знакопеременные циклы.

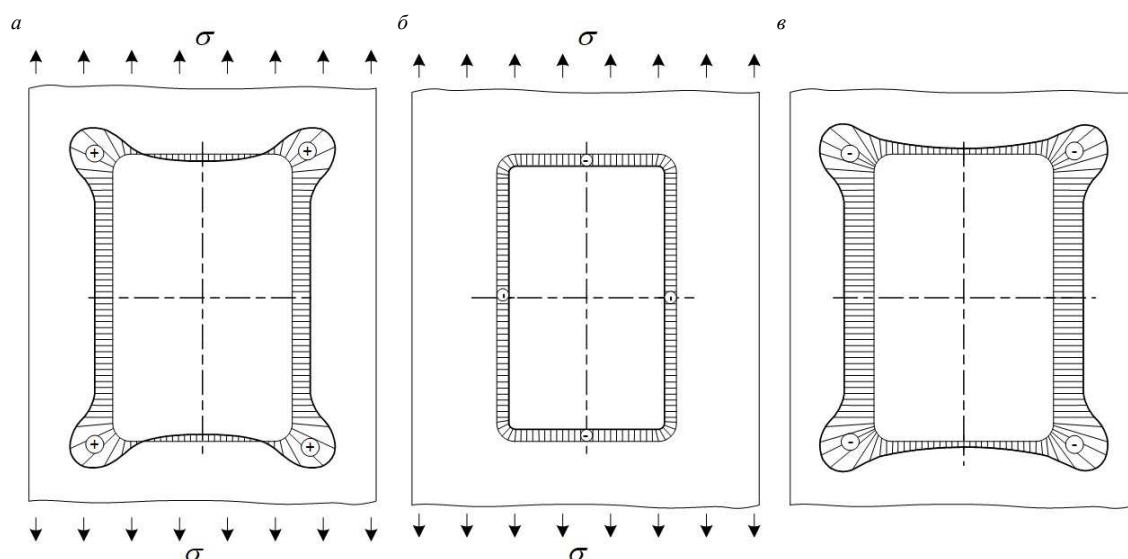


Рис. 5. Сварочные напряжения в основном и сварном листах:

- а* — нормальные напряжения по контуру выреза в предварительно растянутом листе;
б — нормальные сварочные напряжения в околошовной зоне основного и сварного листов (см. рис. 2);
в — остаточные нормальные напряжения в околошовной зоне основного и сварного листов после снятия предварительной растягивающей нагрузки

Необходимость учета концентрации напряжений при назначении величины предварительных компенсирующих напряжений обусловлена следующей причиной. Будем исходить из того, что уровень предварительных компенсирующих напряжений в настиле с вырезом не должен приводить к возникновению пластических остаточных деформаций. Иными словами, величина предварительных напряжений должна быть как минимум ниже предела упругости и во всяком случае не превосходить предела текучести во всех точках контура выреза. В то же время величина предварительных компенсирующих напряжений по условиям рассматриваемого способа компенсации сварочных напряжений должна равняться величине последних, то есть $\sigma_0 = \sigma_{PCB}$, где σ_{PCB} — расчетные сварочные напряжения. Исходя из сказанного, для района выреза, где есть концентрация напряжений, должно выполняться условие $\sigma_{\max} = \sigma_0 \alpha_K < \sigma_T$, где σ_T — предел текучести материала. Выполнение или невыполнение этого условия зависит от величины σ_{PCB} , которая определяется технологическими факторами с ограниченными возможностями влияния на них, и от величины коэффициента концентрации напряжений α_K , на который разными способами можно влиять в достаточно широком диапазоне.

При невыполнении указанного условия возможны два варианта дальнейших действий.

1. Снижение начальных компенсирующих напряжений до величины, при которой оговоренное условие будет выполняться. В результате сварочные напряжения в сварном шве будут компенсированы лишь частично.
2. Тем или иным способом снизить уровень концентрации напряжений до величины, при которой будет выполнено оговоренное условие. В литературе есть описание таких способов. Приведем два из них, которые исследованы в [11].

Первый способ основан на использовании усадки наплавленных валиков сварных швов для создания в зоне концентратора предварительных сжимающих напряжений. На рис. 6 приведена схема испытания на разрыв пластины с прямоугольным вырезом. В процессе испытаний определялся предел прочности. Во всех случаях разрыв происходил по линии, идущей от углов выреза к краю пластины. Испытывалась пластина в исходном состоянии, а также аналогичные пластины с разными вариантами наплавки валиков швов, схемы которых приведены на рис. 7а.



Рис. 6. Схема испытания на разрыв пластины с прямоугольным вырезом [11]

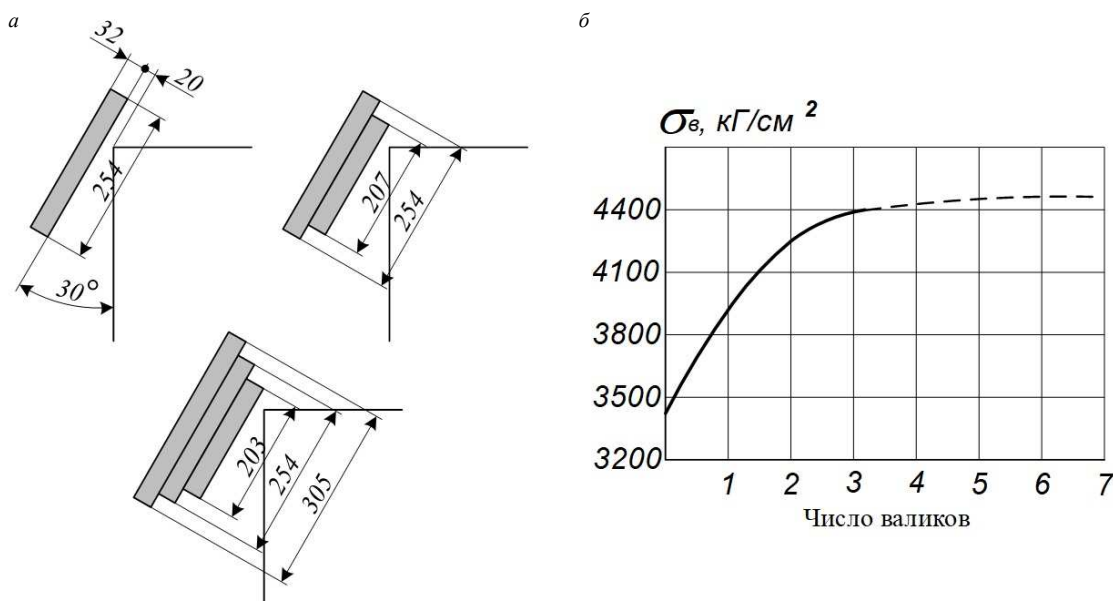


Рис. 7. Наплавка валиков сварных швов с целью создания поля сжимающих напряжений в районе концентратора: а — варианты схемы наложения валиков швов; б — зависимость предела прочности от числа валиков [11]

В процессе испытаний установлено, что наложенные валики швов увеличивают предел прочности пластины. Надо полагать, что речь идет о пределе прочности именно конструкции, но не материала, то есть возрастает суммарная сила P_B , соответствующая моменту разрушения и, как следствие, увеличиваются расчетные напряжения при делении возросшей силы на неизменную площадь сечения. Это объясняется тем, что при возрастании во время испытания растягивающая нагрузка сначала достигает величины, при которой становятся равны нулю предварительные сжимающие напряжения, а далее от этого уровня возрастает до момента разрыва, при этом фактические растягивающие напряжения увеличиваются от нуля до предела прочности материала. Следуя этой логике, по графику на рис. 7б можно вычислить предварительные сжимающие напряжения при различных вариантах наложения валиков швов. Например, при трех валиках начальные напряжения $\sigma_{нач} = 4400 - 3400 = 1000 \text{ кг/см}^2$ или 102 МПа, где $\sigma_B = 4400 \text{ кг/см}^2$ — предел прочности пластины с тремя наплавленными валиками, а $\sigma_B = 3400 \text{ кг/см}^2$ — предел прочности пластины в исходном состоянии.

Второй способ состоит в приваривании в районе концентратора предварительно нагретой полосы, которая, остывая и сжимаясь, создает поле сжимающих напряжений, действующих в направлении последующего растяжения (рис. 8а).

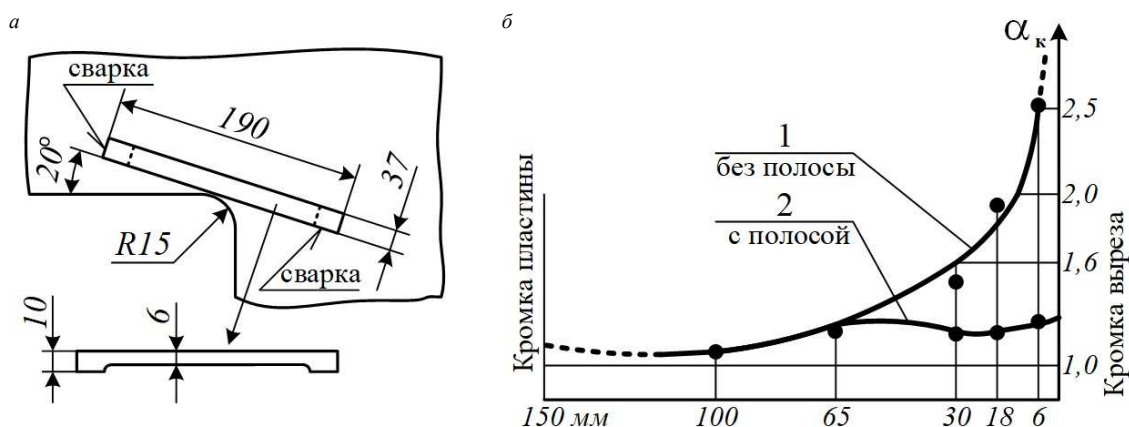


Рис. 8. Снижение коэффициента концентрации напряжений путем создания поля предварительных сжимающих напряжений за счет приварки нагретой полосы: а — схема приварки нагретой полосы; б — изменение коэффициента концентрации напряжений по мере удаления от кромки выреза [11]

По графику (рис. 8б) видно, что данный способ достаточно эффективен: на кромке выреза коэффициент концентрации снизился с величины более 2,5 до 1,3. Однако надо иметь в виду, что приваренная полоса после остывания будет испытывать растяжение, и существует опасность ее разрыва при действии дополнительной эксплуатационной нагрузки. Правда, эту проблему можно решить, используя для изготовления полосы сталь повышенной прочности. Есть и другие отрицательные факторы. Нежелательны любые выступающие над поверхность палубы наварыши. Кроме того, в узкий зазор под полосой будет попадать вода, что при контакте с воздухом неизбежно приведет к интенсивной коррозии.

Наряду со сказанным оба описанных способа «грешат» общим недостатком, связанным с наложением на конструкцию дополнительных сварочных швов. Дело в том, что в то время, когда выполнялась работа [11] (конец 40-х годов прошлого века), преобладало мнение, что причиной имевших место случаев перелома корпусов судов являются хрупкие трещины, распространяющиеся от концентратора напряжений. Это отчасти верно на стадии «долома», когда начальная трещина достигала критической длины. Усталость материала, которая является первопричиной появления начальной трещины, в то время не рассматривалась. Позже было установлено, что сварные швы, одновременно являясь концентраторами напряжений и обладая не лучшей с точки зрения усталости структурой материала, провоцируют зарождение усталостных трещин. В связи с этим следует стремиться к минимальному количеству сварных швов в конструкции, избегая их скученности.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СПОСОБ УСТРАНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ НА КОНТУРЕ ВЫРЕЗА В РАСТЯНУТОЙ ПЛАСТИНЕ

С целью обоснования способа снижения остаточных напряжений, обусловленных концентрацией напряжений в углах выреза в обшивке, технологическими средствами были выполнены расчеты по исследованию напряженного состояния растянутой пластины с прямоугольным вырезом (рис. 9). Расчеты выполнялись с использованием версии МКЭ в программном продукте SolidWorks.

На рис. 10 показано в цветовой визуализации напряженное состояние исследуемой пластины.

Во всех расчетах к пластине прикладывалась растягивающая сила $P=1$ Мн. При этом напряжения в поперечном сечении части пластины без выреза равны 44,6 МПа, а в боковых полосах сечения по вырезу, ширина которого равна половине ширины пластины, их величина составляет 88,5 МПа, то есть практически в два раза больше, чем в сечении без выреза.

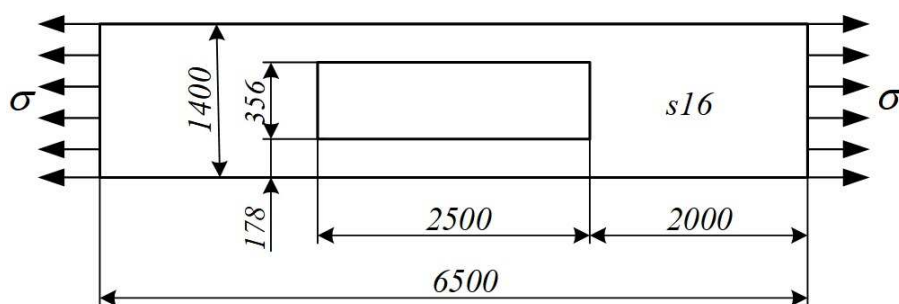


Рис. 9. Размеры исследуемой пластины с вырезом

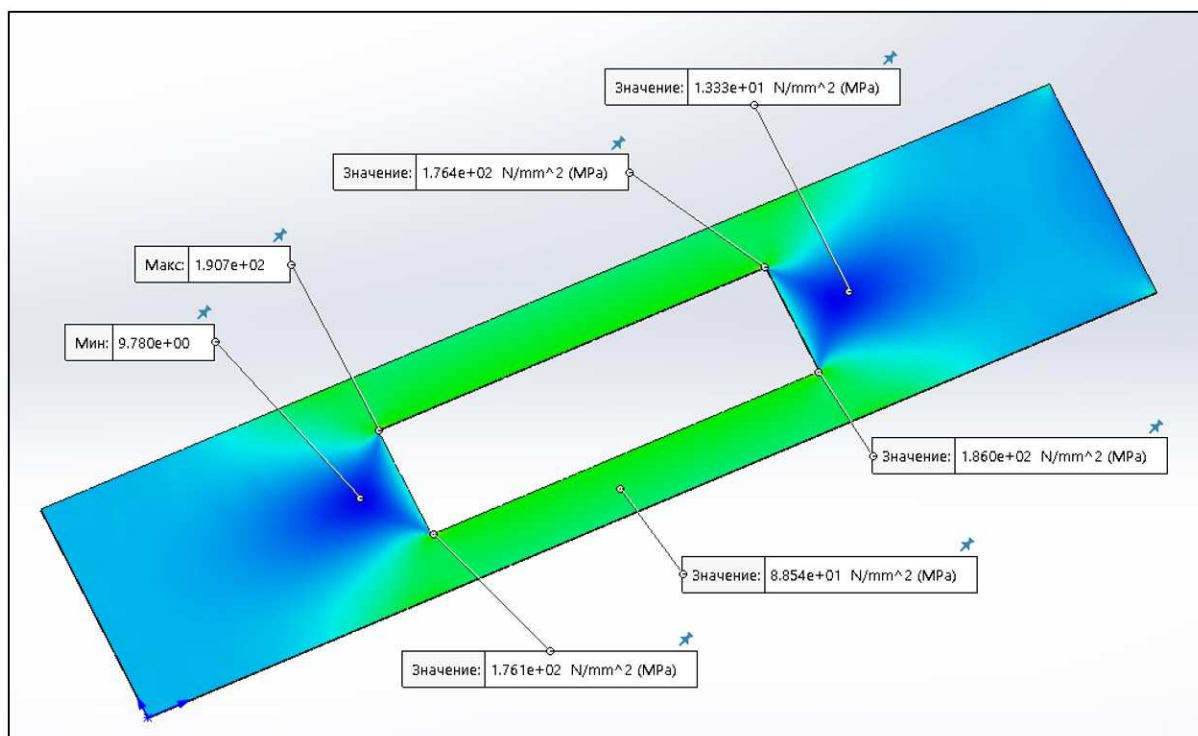


Рис. 10. Напряженное состояние исследуемой пластины

Некоторые различия между значениями напряжений в углах выреза, которые должны быть абсолютно одинаковы, связаны с погрешностями расчета при использовании SolidWorks-версии МКЭ. Среднее значение напряжений в углах выреза $\sigma_{\max} = 182,3$ МПа, то есть коэффициент концентрации напряжений $\alpha_K = 182,3/88,5 = 2,06$, что существенно меньше (в 1,5 раза) значения, указанного в [12]. Фрагмент пластины с углом выреза в увеличенном масштабе приведен на рис. 11.

Полученный результат противоречит общепринятым представлениям: наибольшие напряжения действуют не в вершине угла, а на продольной кромке выреза на некотором расстоянии от вершины. По всей видимости, это опять-таки объясняется погрешностями расчета при использовании SolidWorks-версии МКЭ.

С целью исключения концентрации напряжений в углах выреза вдоль его продольных кромок были выполнены прорезы в поле пластины на 500 мм, как показано на рис. 12. В конце одной из прорезей (правой) было просверлено отверстие диаметром 20 мм. Вторая прорезь (левая) осталась в исходном состоянии.

Пластина, как и ранее, была испытана на растяжение силой 1 Мн. Полученное поле напряжений представлено на том же рис. 12, а напряженное состояние в конце прорезей — на рис. 13 и 14.

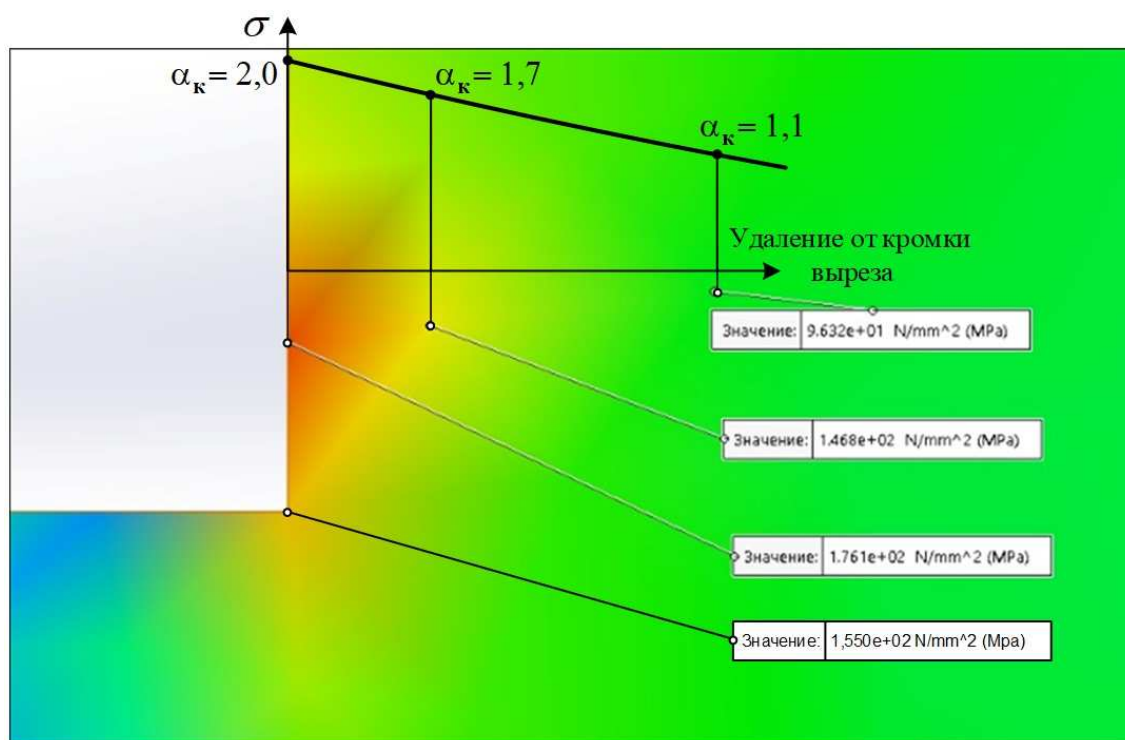


Рис. 11. Напряженное состояние пластины в районе угла выреза

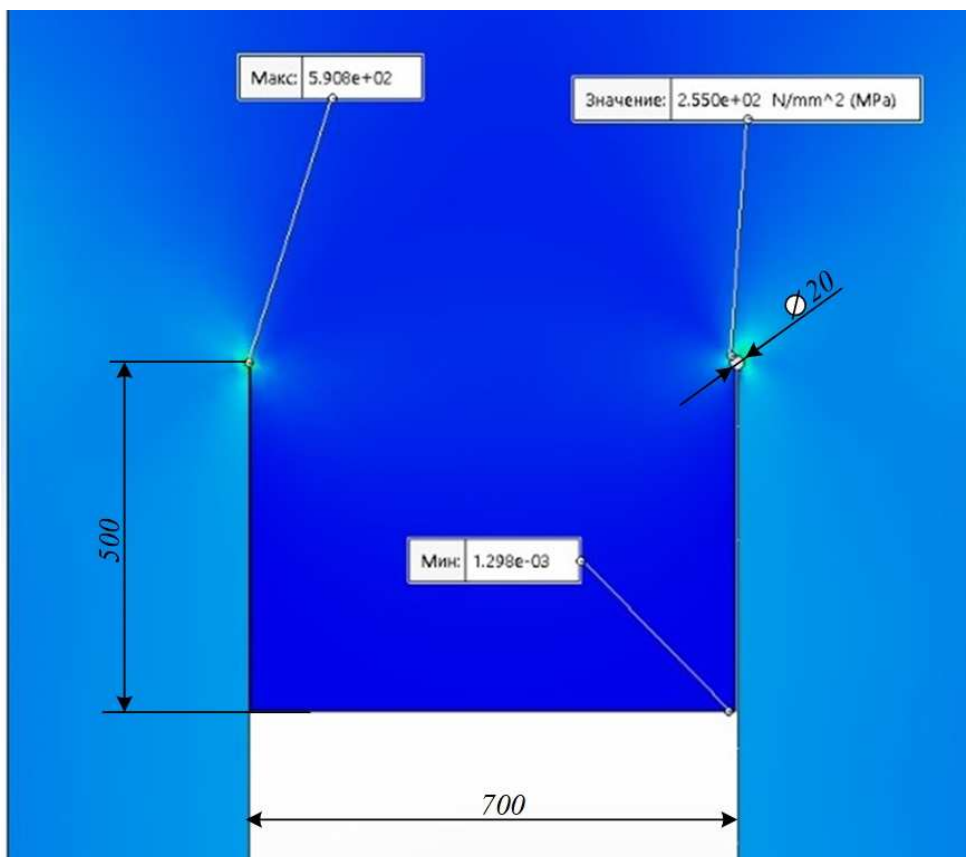


Рис. 12. Напряженное состояние пластины с продольными прорезями за габариты выреза

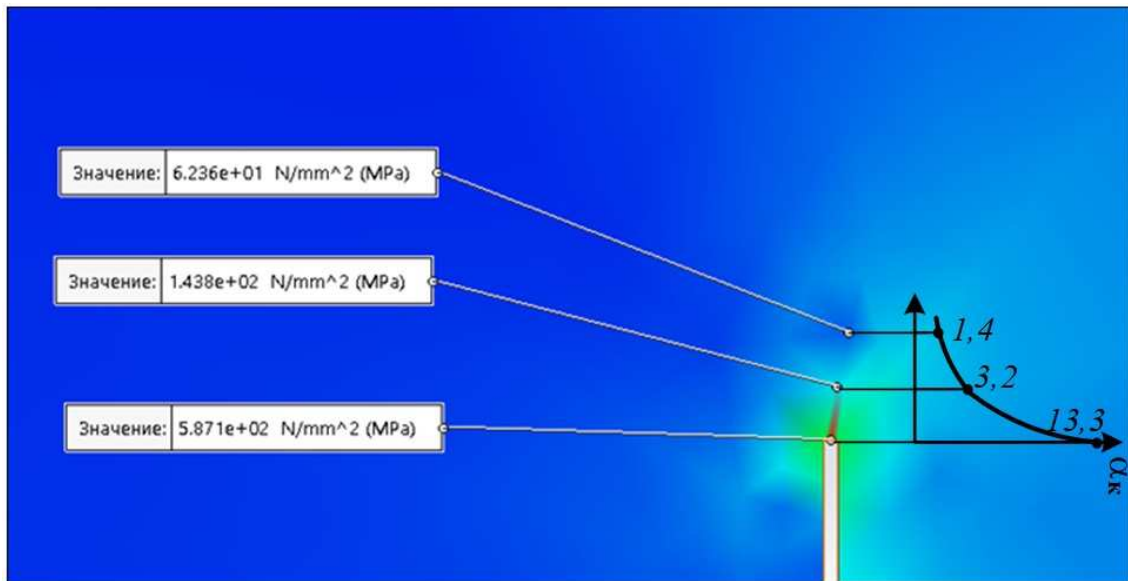


Рис. 13. Напряженное состояние у вершины прорези без круглого деконцентратора

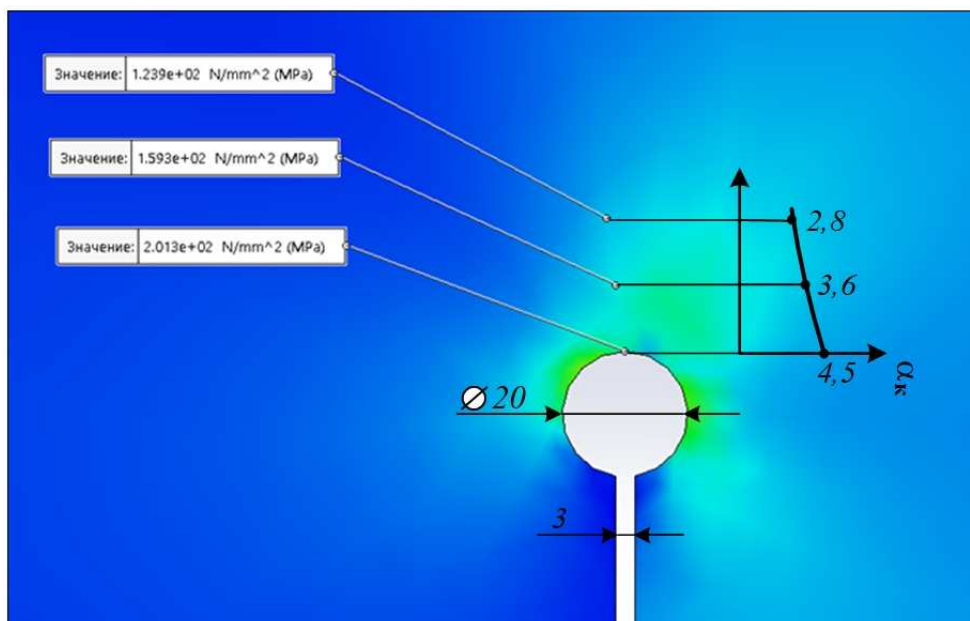


Рис. 14. Напряженное состояние у вершины прорези с круглым деконцентратором

Видно, что в углах прямоугольного выреза исчезла концентрация напряжений, а на его поперечной кромке напряжения практически отсутствуют. В вершине прорези напряжения достигли величины 587 МПа. Это соответствует коэффициенту концентрации $\alpha_K = 587/44,3 = 13,3$, чего практически быть не может, так как максимальное напряжение в 2,5 раза больше предела текучести, при достижении которого у вершины прорези возникнет локальная пластическая область, являющаяся деконцентратором. Наряду с этим важно, что напряжения быстро снижаются по мере удаления от вершины прорези (рис. 13). На расстоянии всего 10 мм величина коэффициента концентрации $\alpha_K = 143,8/44,3 = 3,2$, а на расстоянии 20 мм $\alpha_K = 62,4/44,3 = 1,4$.

Круглое отверстие в конце прорези в три раза снижает максимальный коэффициент концентрации. Как и в случае прорези без деконцентратора, наблюдается его снижение по мере удаления от кромки отверстия, но более медленное, чем в первом случае. Тем не менее размер локальной области повышенных напряжений существенно меньше ширины пластины. В соответствии с опубликованными данными [12], на расстоянии одного радиуса от кромки круглого отверстия коэффициент концентрации напряжений $\alpha_K = 1,22$, а на расстоянии двух радиусов $\alpha_K = 1,07$. Можно констатировать, что вариант прорези, заканчивающейся круглым отверстием, является предпочтительным.

Проведенный анализ позволяет обосновать технологический прием, который предполагает исключение повышенных напряжений в зоне монтажных швов, обусловленных концентрацией напряжений, по контуру выреза при сварке в него вставки. Это обеспечивается следующей последовательностью технологических операций, которая иллюстрируется рис. 15.

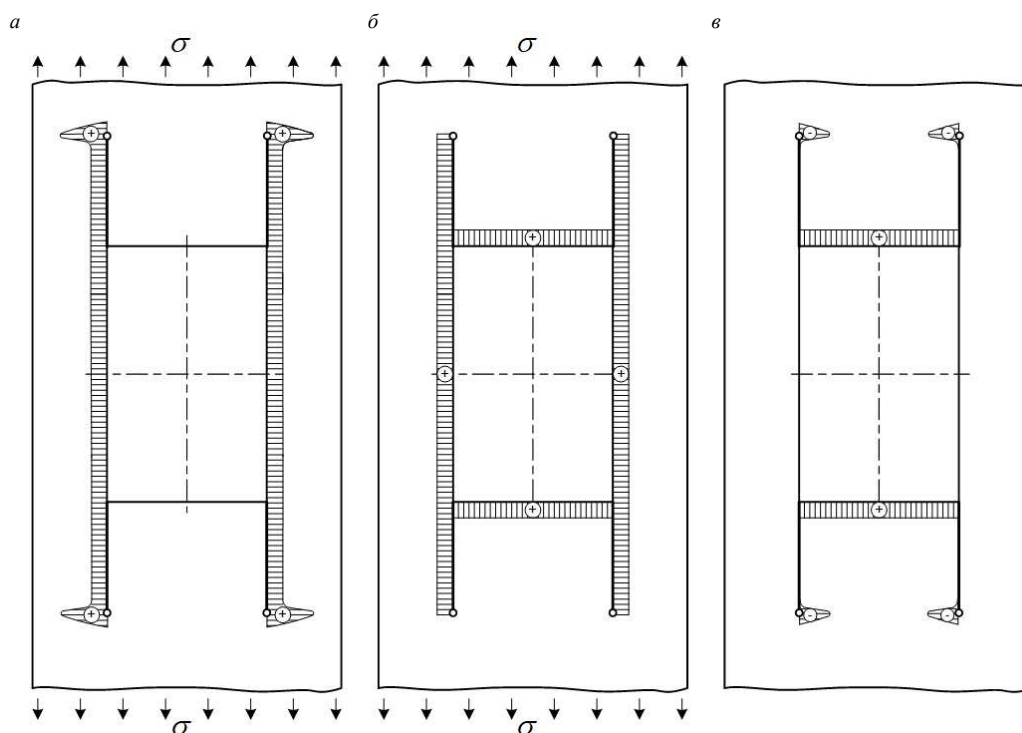


Рис. 15. Компенсация сварочных напряжений в материале продольных сварных швов:

- а* — нормальные напряжения по линиям реза в предварительно растянутом листе;
б — нормальные напряжения в материале швов после их затвердевания и остывания;
в — остаточные нормальные напряжения в материале сварных швов после снятия предварительной растягивающей нагрузки

1. Выполняется вырез в ненапряженном настиле. При этом от углов выреза в продольном направлении в поле настила делаются прорезы определенной длины, измеряемой от поперечной кромки выреза. В конце прорези необходимо просверлить круглое отверстие. Пока нет рекомендации по длине прорези и диаметру отверстия. Эти параметры требуют отдельного исследования, которое не предполагается в рамках данной работы.

2. Изгибом корпуса создаются предварительные растягивающие напряжения в настиле (рис. 15*а*), величина которых определяется величиной сварочных напряжений в сварном шве.

3. В вырез вставляется ввариваемый лист и выполняются поперечные швы, в результате чего в них возникнут растягивающие напряжения (рис. 15*б*).

4. Выполняются продольные швы и заправляются круглые отверстия, в которых также возникают растягивающие напряжения.

5. Снимается предварительная нагрузка. В результате в продольных швах растягивающие напряжения компенсируются, а в районе бывших круглых отверстий появятся локальные поля сжимающих напряжений. При этом в поперечных швах сохраняются не представляющие опасности для общей продольной прочности растягивающие сварочные напряжения (рис. 15*в*).

Таким образом, в сварных швах по периметру вваренного листа нет опасных остаточных напряжений с точки зрения общей продольной прочности при действии эксплуатационных нагрузок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный технологический прием, используемый при замене листов палубного настила, позволяет исключить повышенные остаточные напряжения, возникающие в углах выреза вследствие концентрации напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винокуров В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В.А. Винокуров, А.Г. Григорьянц. — М.: Машиностроение, 1984. — 280 с.
2. Николаев Г.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. — М.: Высшая школа, 1982. — 272 с.
3. Алферов В.И. О влиянии технологического фактора на напряженно-деформированное состояние и прочность судовых корпусных конструкций / В.И. Алферов, В.М. Шапошников // Труды Крыловского гос. науч. центра. — 2010. — № 53 (337). — С. 5 — 12.
4. Гатовский К.М. Изменение напряженного состояния корпусов судов в процессе эксплуатации и ремонта / К.М. Гатовский, И.А. Гунин // Труды ЛИВТ. — 1965. — Вып. 8.
5. Гунин И.А. Обобщение данных по натурным замерам остаточного прогиба корпуса и установление его влияния на общую прочность судов / И.А. Гунин // Труды ЛИВТ. — 1972. — Вып. 135.
6. Дорохов П.И. Методы снижения напряжения при варке заделок в жесткий контур / П.И. Дорохов // Судостроение. — 1989. — № 3.
7. Барабанов Н.В. О вероятных причинах гибели танкера «Находка» / Н.В. Барабанов, Г.П. Турмов // Кораблестроение и океанотехника. Проблемы и перспективы: м-лы междунар. конф. — Владивосток: ДГТУ, 1998. — С. 16 — 20.
8. Ганов Э.В. Определение деформации корпуса судна от выполнения сварки на плаву / Э.В. Ганов, В.Д. Мацкевич, А.С. Роганов // Труды института. Юбилейный выпуск / Николаевский кораблестроит. ин-т. — 1970.
9. Кулик Ю.Г. Об учете технологических напряжений при оценке качества ремонта судового корпуса / Ю.Г. Кулик // Труды ГИИВТ. — 1959. — Вып. 17. — С. 116 — 140.
10. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. II. Корпус / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.
11. Барабанов Н.В. Проектирование конструкций целиком сварных судов в районе прямоугольных вырезов в палубе: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Н.В. Барабанов; ЛКИ. — Л., 1949.
12. Сегаль А.И. Прикладная теория упругости: уч. пос. / А.И. Сегаль. — Л.: Судпромгиз, 1961. — 268 с.
13. Аносов А.П. Термодинамические аспекты циклической прочности судостроительных сталей / А.П. Аносов. — Владивосток: Издат. дом Дальневост. федер. ун-та, 2012. — 348 с.
14. Ночовная Н.А. Анализ остаточных макронапряжений в сварных соединениях титановых сплавов разных классов / Н.А. Ночовная, П.В. Панин // Труды ВИАМ. — 2014. — № 5.
15. Аносов А.П. Применение надувных эластичных оболочек для выполнения технологических операций при ремонте и испытаниях корпусов судов / А.П. Аносов, Н.И. Восковщук, Ю.К. Шарапов // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 2 (44), т. 2. — С. 29 — 38.
16. Аносов А.П. Экспериментальное определение в доке характеристик поперечного сечения корпуса судна, определяющих его общую продольную прочность / А.П. Аносов, С.О. Климов, Ю.К. Шарапов, О.С. Шаринкова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2019. — № 56/57. — С. 66 — 76. — EDN SYAGSP.

REFERENCES

1. Vinokurov V.A., Grigoryants A.G. Teoriya svarochnykh deformatsii i napryazhenii [Theory of welding deformations and stresses]. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 280 p.
2. Nikolaev G.A., Kurkin S.A., Vinokurov V.A. Svarnye konstruksii. Prochnost' svarnykh soedinenii i deformatsii konstruksii [Welded structures. The strength of welded joints and structural deformations]. Moscow: Vysshaya shkola, 1982.
3. Alferov V.I., Shaposhnikov V.M. On the influence of the technological factor on the stress-strain state and strength of ship hull structures. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2010. No. 53 (337). (In Russ.)
4. Gatsvsky K.M., Gunin I.A. Izmenenie napryazhennogo sostoyaniya korpusov sudov v protsesse ekspluatatsii i remonta [Changing the stress state of ship hulls during operation and repair]. *Trudy LIVT [Transactions of the Leningrad Institute of Water Transport]*. 1965. Issue 8.
5. Gunin I.A. Obobshchenie dannykh po naturnym zameram ostatochnogo progiba korpusa i ustanovlenie ego vliyaniya na obshchuyu prochnost' sudov [Generalization of data on full-scale measurements of the residual deflection of the hull and the establishment of its influence on the overall strength of ships]. *Trudy LIVT [Transactions of the Leningrad Institute of Water Transport]*. 1972. Issue 135.
6. Dorokhov P.I. Metody snizheniya napryazheniya pri vvarke zadelok v zhestkii kontur [Methods of voltage reduction when welding seals into a rigid circuit]. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 1989. No. 3.
7. Barabanov N.V., Turmov G.P. O veroyatnykh prichinakh gibeli tankera "Nakhodka" [On the probable causes of the death of the tanker "Nakhodka"]. *Korablestroenie i okeanotekhnika. Problemy i perspektivy [Shipbuilding and Ocean Engineering. Problems and Prospects: Materials of the International conf.]* 1998. P. 16 — 20.
8. Ganov E.V., Matskevich V.D., Roganov A.S. Opredelenie deformatsii korpusa sudna ot vypolneniya svarki na plavu [Determination of the deformation of the ship's hull from welding afloat]. *Trudy instituta. Yubileinyi vypusk [Transactions of the Nikolaev Shipbuilding Institute. Jubilee issue]*. 1970.

9. Kulik Yu.G. Ob uchete tekhnologicheskikh napryazhenii pri otsenke kachestva remonta sudovogo korpusa [On the consideration of technological stresses in assessing the quality of ship hull repairs]. *Trudy GIIVT [Transactions of the Gorky Institute of Water Transport Engineers]*. 1959. Vol. 17. P. 116 — 140.
10. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part II. Hull / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.
11. Barabanov N.V. Proektirovanie konstruktssii tselikom svarnykh sudov v raione pryamougol'nykh vyrezov v palube [Design of structures of fully welded vessels in the area of rectangular cutouts in the deck: abstract of PhD thesis] / Leningrad Shipbuilding Institute. Leningrad, 1949.
12. Segal A.I. Prikladnaya teoriya uprugosti [Applied theory of elasticity: a textbook]. Leningrad: Sudpromgiz, 1961. 268 p.
13. Anosov A.P. Termodinamicheskie aspekty tsiklicheskoï prochnosti sudostroitel'nykh stalei [Thermodynamic aspects of cyclic strength of shipbuilding steels]. Vladivostok: Publishing House of the Far East Federal University, 2012. – 348 p.
14. Nochovnaya N.A., Panin P.V. Residual macrostress analysis in welded junctions of different titanium alloys. *Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]*. 2014. No. 5. (In Russ.)
15. Anosov A.P., Voskovchuk N.I., Sharapov Yu.K. The use of inflatable elastic shells for performing technological operations during the repair and testing of ship hulls. *Marine Intellectual Technologies*. 2019. No. 2 (44), vol. 2. P. 29 — 38.
16. Anosov A.P., Klimov S.O., Sharapov Yu.K., Sharinkova O.S. Experimental determination in the dock of the characteristics of the cross-section of the hull of the vessel, determining its overall longitudinal strength. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2019. No. 56 /57. P. 66 — 76. (In Russ.)