

Проектирование и конструкция судов

Научная статья

УДК 629.12

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/63-72>

О.Э. Суров, Ю Кан Сон

СУРОВ ОЛЕГ ЭДУАРДОВИЧ – к.т.н., профессор, surov.oye@dvfu.ruЮ КАН СОН – студент, yu.ks@students.dvfu.ru

Отделение машиностроения, морской техники и транспорта

Политехнический институт

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Проектирование подкреплений бортовых перекрытий танкера для безопасной эксплуатации в ледовых условиях

Аннотация. В статье представлены результаты обоснования оптимального выбора геометрических характеристик подкреплений корпуса танкера «Остров Русский» на ледовый класс Ice1 по требованиям Российского морского регистра судоходства в целях обеспечения местной прочности при эксплуатации судна во льдах. Для проверки местной прочности бортовых перекрытий выполнялись расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций с использованием метода конечных элементов. Рассмотрены разные способы разбиений конечных элементов в программном продукте САПР Solidworks Simulation и выбран оптимальный размер расчетной сетки. Достоверность результатов расчетов проверена по критерию влияния устанавливаемых конструктивных элементов на прочность бортовых перекрытий. В результате сравнения трех вариантов ледовых подкреплений с точки зрения обеспечения прочности и экономичности конструкции выбрана оптимальная схема усиления бортов судна. По результатам выполненных расчетов разработан проект подкреплений корпуса танкера «Остров Русский» на ледовый класс Ice1 и согласован в Российском морском регистре судоходства.

Ключевые слова: бортовое перекрытие, сетки балок, статический анализ, ледовые подкрепления, ледовые нагрузки

Для цитирования: Суров О.Э., Ю Кан Сон. Проектирование подкреплений бортовых перекрытий танкера для безопасной эксплуатации в ледовых условиях // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. № 4(57). С. 63–72.

Введение

Обеспечение прочности на стадии проектировании и модернизации конструкции корпусов судов при эксплуатации в ледовых условиях является важной задачей [1–3]. Для судов зарубежной постройки при принятии в класс Российского морского регистра судоходства (РМРС), как правило, необходимо разрабатывать ледовые подкрепления для безопасной эксплуатации судов в ледовых условиях. При модернизации корпуса судна оптимальный выбор усиливающих элементов конструкции имеет принципиальное значение, что объясняется с точки зрения обеспечения прочности и экономичности.

В настоящее время метод конечных элементов (МКЭ) широко применяется для решения множества инженерных задач и в судостроительной отрасли, в частности при проектировании конструкции корпуса судна [4].

На этапе проектировании корпуса с использованием 3D-макет конструкции можно анализировать прочность данной конструкции при заданных нагрузках. При использовании МКЭ необходимо учитывать, что результаты расчётов напряженно-деформированного состояния

(НДС) конструкций очень сильно зависят от количества конечных элементов (КЭ) и способа разбиения сетки. Понятно, что если разбивать сетку мелко, то КЭ приближены к точке, и тем самым получается более правильный результат вне зависимости исследуемой конструкции. Но лишнее количество КЭ, как правило, плохо влияет на продуктивность ЭВМ. Эти проблемы можно решить путем выбора оптимальных способов разбиений сеток КЭ.

В данной статье рассмотрены разные варианты статического анализа бортового перекрытия корпуса судна по способу разбиению сетки в программном продукте Solidworks Simulation. Проверка достоверности полученных результатов расчета выполняется по критерию фибровой текучести и предельной прочности наружной обшивки с учетом устанавливаемых подкрепляющих элементов. Кроме того, в статье представлен сравнительный анализ прочности трех вариантов подкреплений корпуса для танкера «Остров Русский».

Общие сведения и анализ прочности бортового перекрытия судна

Корпус т/х «Остров Русский» изначально не имеет ледовых усилений, однако с учетом желания судовладельца выполнена проверка соответствия корпуса судна ледовому классу Ice 1 в соответствии с требованиями РМРС [5] и предложен вариант подкрепления борта в носовом районе 73–105 шп. Характеристики конструкции борта следующие: расстояние между шпангоутами, шпация – 600 мм; толщина наружной обшивки – 10 мм; значение ледовой нагрузки – 690 кПа; высота распределения ледовой нагрузки – 368 мм; длина распределения ледовых нагрузок – 4120 мм; профиль основных шпангоутов – L125×70×10; предел текучести материала – 235 МПа.

Для сравнительного анализа НДС в программном продукте Solidworks Simulation рассматривается наиболее опасный с точки зрения действующих ледовых нагрузок район бортового перекрытия 96–100 шп. (рис. 1).

Разные варианты статического анализа бортового перекрытия корпуса судна по способу разбиению сетки

Для построения 3D-макета перекрытия и реализации МКЭ использован программный комплекс САПР Solidworks Simulation.

На рис. 1 выделен (см. красный цвет) участок бортового перекрытия в районе ледовых усилений для последующих исследований прочности.

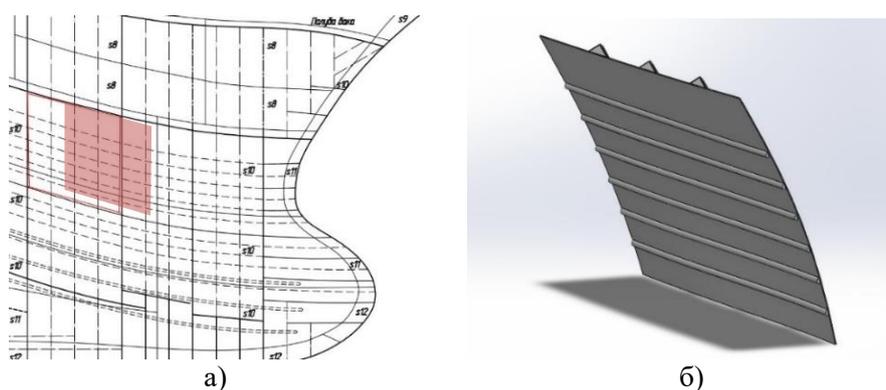


Рис. 1. Район исследования бортового перекрытия ледового усиления: а) чертеж; б) 3D модель

При проектировании 3D-макета все элементы конструкции разделены как отдельные твердые тела, так как в статическом анализе для них будут применены разные способы разбиений сетки. 3D-макет конструкции создается в САПР Solidworks Simulation в следующей последовательности: формируется бортовое перекрытие, которое состоит из балок и листов (рис. 2 а), затем определяется группа соединений (рис. 2 б). Далее в разделе «Соеди-

нения» создаются локальные и глобальные взаимодействия (рис.3 а). При этом следует отметить, что глобальное взаимодействие может быть создано автоматически и с использованием меню выбора в программе САПР Solidworks Simulation. Все четыре грани листа перекрытия «закрепляются», так как они ограничены сверху верхней палубой, снизу платформой, на 96 и 100 шп. поперечными переборками (рис. 1 и 3б).

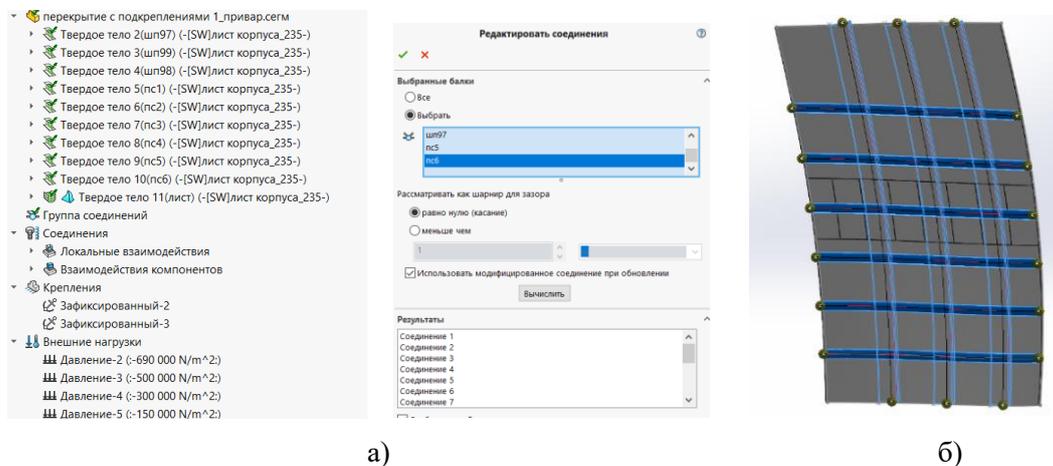


Рис. 2. Создание балочной системы набора:
а) определение конструктивных элементов; б) закрепление балок конструкции

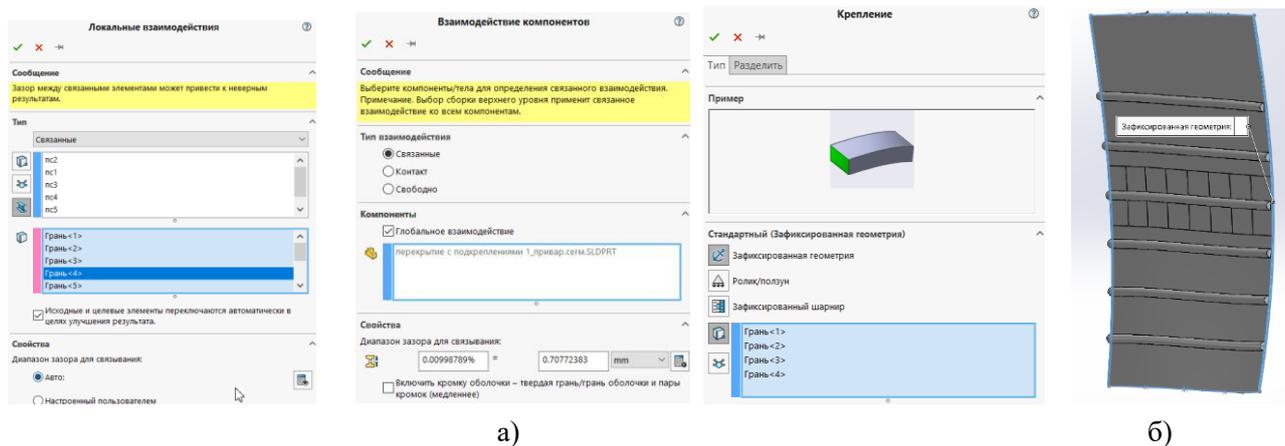


Рис. 3. Взаимодействия (а) и условие крепления (б)

В следующем этапе заданы внешние нагрузки (рис. 4 а). Эпюра ледовой нагрузки для расчетов в МКЭ принята в виде трапеции (690–150 МПа) перпендикулярно ДП (см. рис. 4 а).

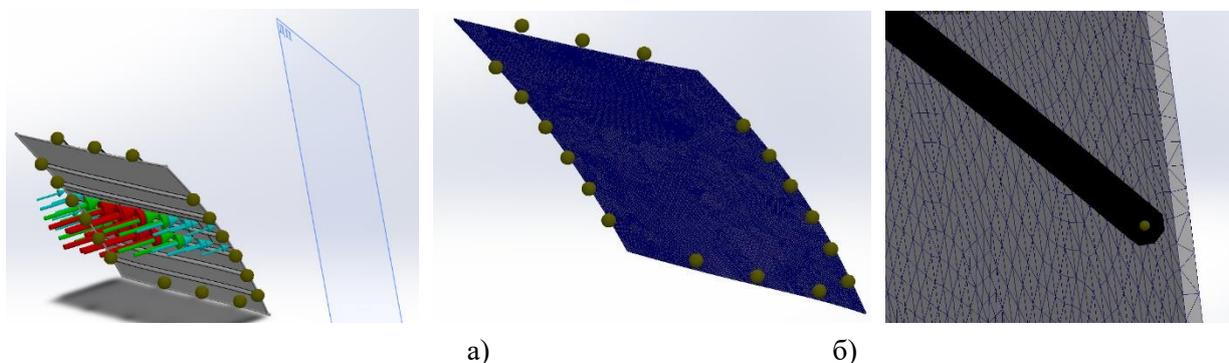


Рис. 4. Внешние нагрузки (а) и сетки для листа и балок (б)

Создана сетка для листов размером 50×50 согласно правилам РМРС, а для балок размером 0,1 мм с использованием функции «Управление сеткой» (см. рис. 4 б). Чтобы создать

сетку для балок, необходимо активировать курсором значок «балки» и выбрать нужные элементы, то есть балки. Если задается тип сеток как «балочный», то в САПР Solidworks Simulation автоматически создается сетка на основе «графита» (рис. 5), что оптимально для балок, работающих на изгиб.



Рис. 5. Фрагмент сетки для балок в виде «графита»

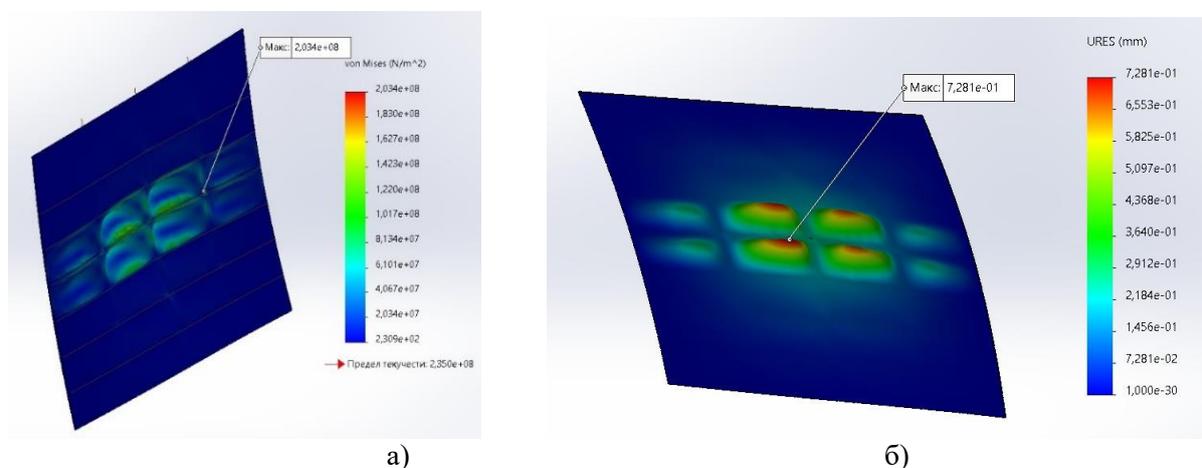


Рис. 6. Результат расчета НДС: а) напряжения; б) перемещения

После завершения и уточнения всех вышеуказанных условий выполнен статический анализ (рис. 6).

В качестве сравнения выполнены НДС со стандартным разбиением КЭ на сетки без ледовых усилений (рис. 7, 8).

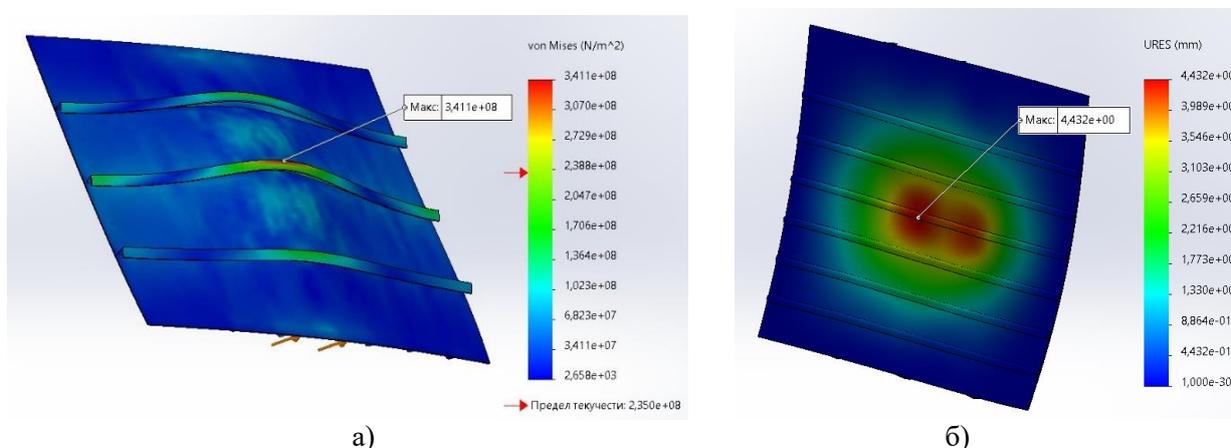


Рис. 7. Результат расчета НДС со стандартным разбиением КЭ на сетки при действии ледовых нагрузок: а) напряжения; б) перемещения

Проверка достоверности результата статического анализа по критерию влияния устанавливаемых элементов на прочность наружной обшивки

Проверка достоверности результата статического анализа в САПР Solidworks Simulation выполнена с использованием методики, приведенной в статье [9], где предлагается оценивать влияние усиления по двум критериям: фибровой текучести и предельному состоянию.

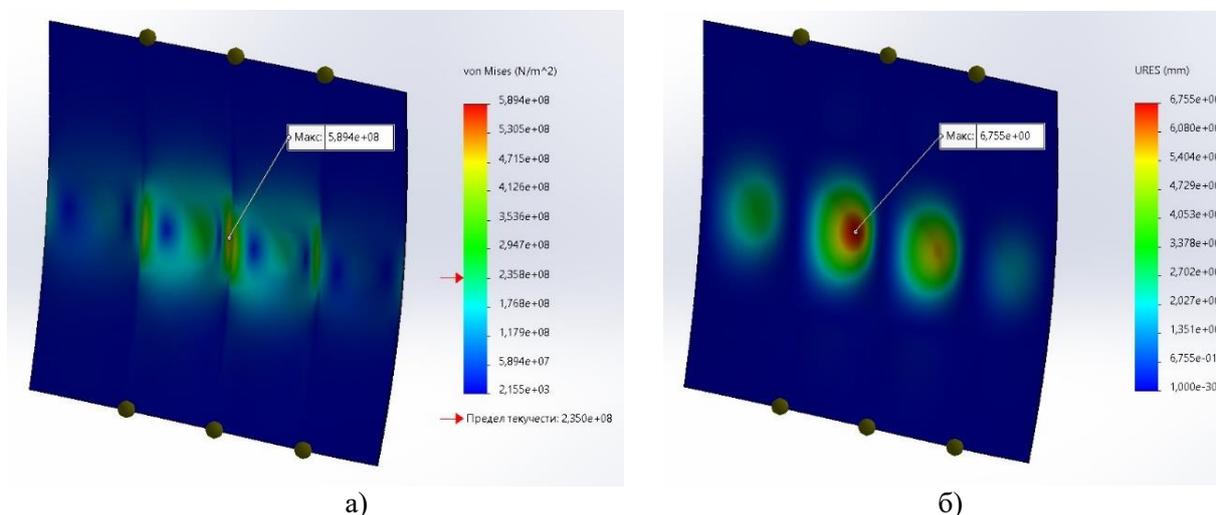


Рис. 8. Результат расчета НДС без учета действия ледовых нагрузок: а) напряжения; б) перемещения

Увеличение прочности оценивается как отношение моментов сопротивлений обшивки с усилениями и обшивки без них.

Для фибровой текучести получена формула (1):

$$k_{\min} = W_{RS} / W_S = 6 \frac{\bar{C} - \bar{B}^2 / \bar{A}}{\bar{R}_S - \bar{B} / \bar{A}}, \quad (1)$$

где W_{RS} – момент сопротивления обшивки с установленными подкреплениями; W_S – момент сопротивления обшивки без подкреплений; $\bar{A} = 0,5\pi \bar{R}_S \bar{R}_b + 1$; $\bar{B} = 2\bar{R}_S^2 \bar{R}_b / 3 - 0,5$; $\bar{C} = \bar{R}_S^3 \bar{R}_b \cdot \pi / 8 + 1/3$; $\bar{R}_S = R/s$; $\bar{R}_b = R/b$; R – радиус подкрепляющего сегмента; b – интервал размещения сегментов; s – толщина обшивки.

Коэффициент усиления обшивки по предельному состоянию оценивается по формуле (2):

$$k_0 = W_{ORS} / W_{OS} = 2\pi \bar{R}_S \bar{R}_b (4\bar{R}_S / 3\pi - \bar{e}) + 2e^{-2} + 2(1 + \bar{e})^2, \quad (2)$$

где W_{ORS} – предельный момент сопротивления обшивки с подкреплениями; W_{OS} – предельный момент сопротивления обшивки без подкреплений; $\bar{e} = 0,25\pi \bar{R}_S \bar{R}_b - 0,5$.

Для оценки роста прочности при переходе от критерия фибровой текучести к критерию предельного состояния использована формула (3):

$$k_w = W_{ORS} / W_{OS} = 1,5\pi k_0 / k_{\min}, \quad (3)$$

По формулам (1–3), предложенных в статье [9], получены результаты критериев, которые представлены в табл. 1 для наружной обшивки с толщиной $s=10$ мм и подкрепленной продольными сегментами $\mathbf{D60 \times 30}$.

На основании результатов расчетов следует, что при расстоянии $b = 300$ мм по критерию фибровой текучести запас составляет 2,8 раза, а по критерию предельной прочности – 4,1 раза.

Расчет критерий фибровой текучести и предельной прочности

Расстояние b, мм	\bar{R}_s	\bar{R}_b	$\bar{\epsilon}$	\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	k_{min}	k_0	k_w
275	3,0	0,1091	-0,2430	1,5141	0,1545	1,4900	3,0523	4,3821	2,1535
300	3,0	0,1000	-0,2644	1,4712	0,1000	1,3936	2,8379	4,1204	2,1778

Исходя из теории предельного нагружения области наружной обшивки, прилегающие к балкам набора и имеющие максимальные напряжения, в результате действия нагрузки, могут считаться последними фибрами в районе пластического шарнира.

Отношение максимальных напряжений двух состояний (без подкреплений и с ними): $589/203 = 2,90$, что подтверждает достоверность результата расчета, выполненного в Solidworks Simulation.

В целом полученные результаты при разных способах разбиения сетки показывают, что при статическом анализе судовых конструкций нужно использовать разные способы разбиения сетки для каждого элемента конструкции, учитывая его функцию в конструкции. Чтобы уменьшить расчетное время, следует обратить внимание на размерность ячейки сетки.

Достоверность полученных результатов позволяет выполнить последующий анализ трех вариантов подкрепления наружной обшивки корпуса судна:

- 1) промежуточные шпангоуты, полосы 125×15;
- 2) приварные сегменты полукруглого сечения $\text{D}60*30$, устанавливаемые вне наружной обшивки;
- 3) интеркостельные (разносящие) стрингеры в виде полос 100×14, имеющие одинаковую площадь поперечного сечения с полукруглым профилем $\text{D}60*30$ и устанавливаемые внутри наружной обшивки, между основными шпангоутами.

Первый вариант подкреплений

Первый вариант подкреплений наружной обшивки в носовом районе ледовых усилений предполагает установку промежуточных шпангоутов на протяжении 73 – 105 шп. в виде полос 125×15, так как она имеет близкое значение предельного момента сопротивления по сравнению с профилем основных шпангоутов (рис. 9).

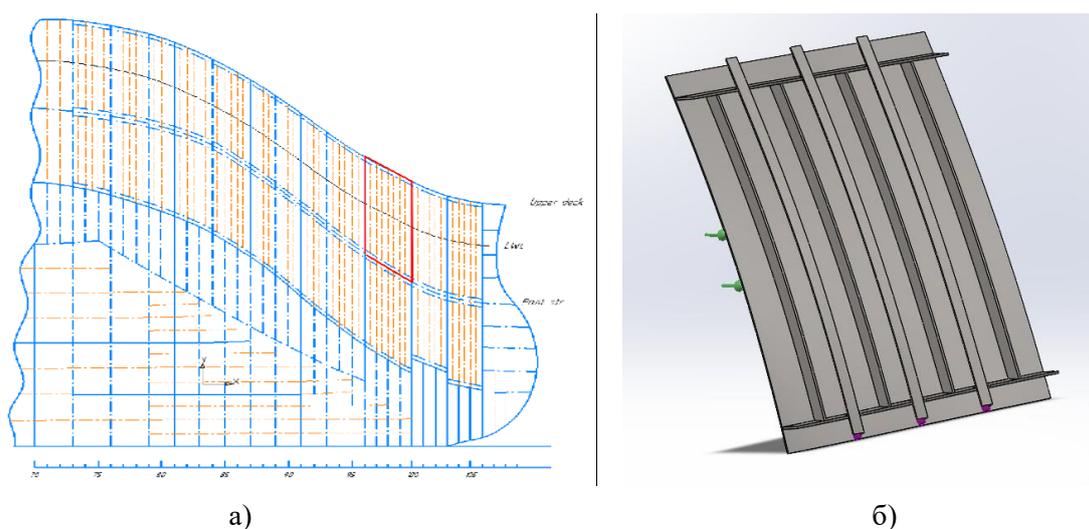


Рис. 9. Установка промежуточных шпангоутов: а) схема; б) 3D модель

При использовании указанного процесса анализа с разными разбиениями сетки выполнен расчет НДС бортового перекрытия в САПР Solidworks Simulation (рис. 10).

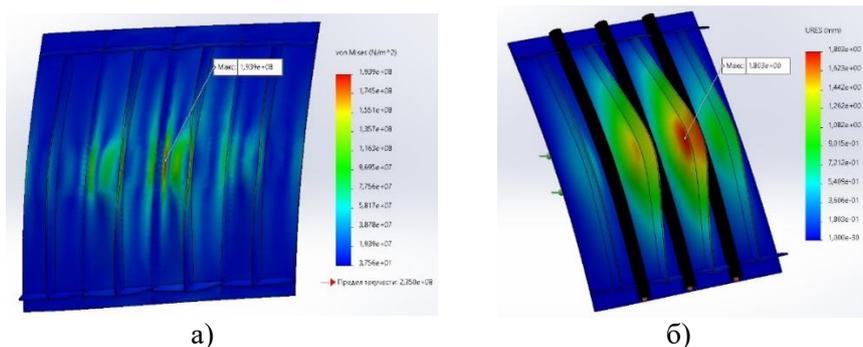


Рис. 10. Результат расчета НДС по первому варианту ледовых усилений: а) напряжения; б) перемещения

Второй вариант подкреплений

Во втором варианте предполагается установка продольных приварных сегментов полу-круглого сечения $\text{D}60 \times 30$ снаружи обшивки (рис. 11).

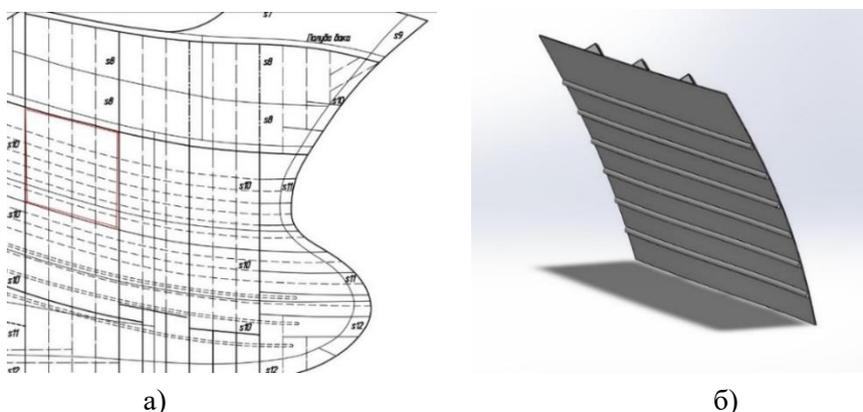


Рис. 11. Установление приварных сегментов: а) схема; б) 3D модель

После построения 3D модели выполнен расчет НДС в САПР Solidworks Simulation (рис. 12).

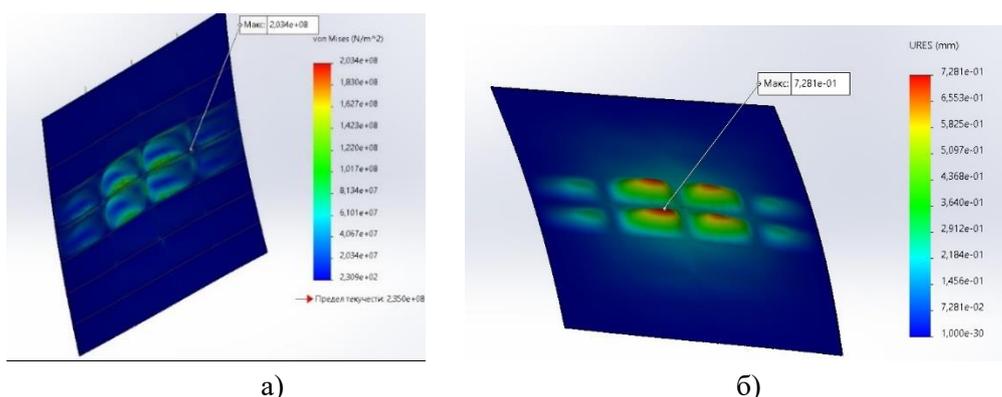


Рис. 12. Результат расчета НДС по второму варианту ледовых усилений: а) напряжения; б) перемещения

Третий вариант подкреплений

В третьем варианте внутри корпуса по наружной обшивке предполагается установка дополнительных разрезных на основных шпангоутах горизонтальных (интеркостельных) стрингеров в виде полос 100×14 .

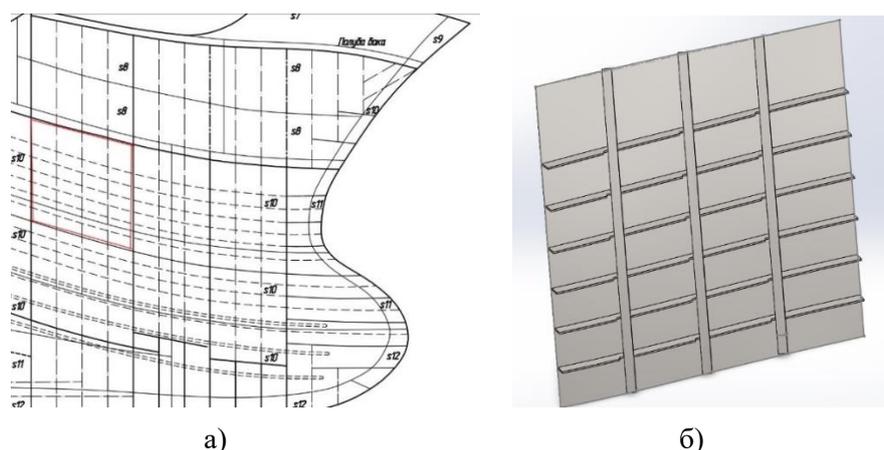


Рис. 13. Схема подкрепления наружной обшивки с использованием разносящих стрингеров: а) схема; б) 3D модель

Выполнен расчет НДС в САПР Solidworks Simulation (рис. 14).

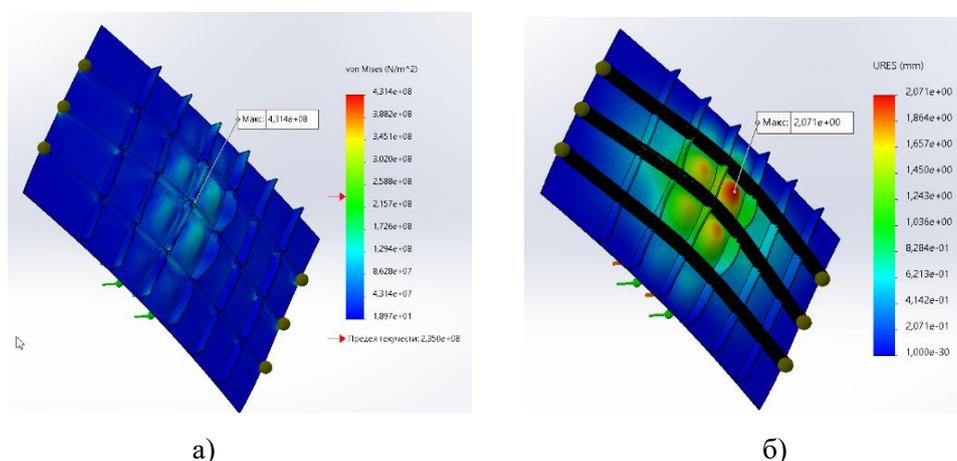


Рис. 14. Результат расчета НДС по второму варианту ледовых усилений: а) напряжения; б) перемещения

Сравнение и анализ трех вариантов подкреплений

Для первичного сравнения разных вариантов подкреплений с экономической точки зрения рассчитаны массы элементов подкреплений. Следует отметить, что при увеличении массы приварных элементов трудоемкость работы соответственно возрастает.

В табл. 2 представлен сравнительный анализ эффективности использования вариантов подкреплений ледовых усилений на основе НДС и массы бортовых перекрытий.

Таблица 2

Сравнение прочностей и массовых характеристик ледовых усилений

Вариант	Напряжение, МПа	Перемещение, мм	Масса, т
1	194	1,803	5,770
2	203	0,728	2,663
3	431	2,070	2,663

Как показано в табл. 2, первый вариант ледового усиления дает меньшие напряжения. Во втором варианте напряжения имеют значения, близкие первому варианту подкрепления, но при этом масса подкрепляющих элементов почти в 2 раза меньше по сравнению с первым вариантом. Кроме того, при реализации второго варианта подкреплений бортовых перекрытий не требуются сварочные работы в стесненных условиях внутренних пространств судна – все

работы выполняются вне наружной обшивки судна, что дает сравнительно высокую технологичность ремонта.

Для третьего варианта предлагается применять интеркостельные (разносящие) стрингеры в виде полос 100×14, имеющие одинаковую площадь поперечного сечения с полукруглым профилем $\text{D}60*30$, в этом случае масса конструкций перекрытия соизмерима со вторым вариантом подкреплений, но максимальные напряжения не соответствуют требованиям РМРС.

Результат анализа рассмотренных трех вариантов подкреплений наружной обшивки в районе ледовых усилений для т/х "Остров Русский" показывает, что второй вариант более эффективен с точки зрения прочности конструкции, массы применяемых материалов и технологичности.

Заключение

По итогам анализа обоснована эффективность применения продольных приварных сегментов полукруглого сечения, устанавливаемых вне наружной обшивки для подкрепления бортового перекрытия в целях безопасной эксплуатации судна по льдах. Обеспечение необходимой прочности при сравнительно небольшом весе приварных сегментов полукруглого профиля обусловлено уменьшением площади элементарной ячейки наружной обшивки, ограниченной продольными и поперечными балками. На основе выполненных исследований был разработан оптимальный с точки зрения массы и прочности проект подкрепления корпуса танкера "Остров Русский" на ледовый класс Ice1 и согласован в РМРС.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Апполонов Е.М., Платонов В.В., Тряскин В.Н. Развитие методов определения ледовых нагрузок и требований к конструкциям ледовых усилений // Арктика: экология и экономика. 2020. № 1(37). С. 65–81.
2. Апполонов Е.М. Проектирование конструкций ледовых усилений по критерию предельной прочности // Судостроение. 1992. № 2. С. 9–13.
3. Bergström M., Li F., Suominen M., Kujala P. A goal-based approach for selecting a ship's polar class. *Marine Structures*. 2022;81(5931):103123.
4. Бугаев В.Г., Дам Ван Тунг. Информационные технологии в жизненном цикле морской техники. Проектирование и инженерный анализ: учебное пособие для вузов / Политехнический институт ДВФУ. Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2022. 128 с.
5. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. РМРС. Часть 2. Корпус. СПб., 2023. 337 с.
6. Каленчук С.В., Козаков Е.В., Котлярова И.А., Сидоренко И.С. Повышение ледовых качеств реклассифицированных судов // Вологдинские чтения. Владивосток, 2008. № 71. С. 119–123.
7. Кулеш В.А., Огай С.А., Пец Н.Г. Проект ледовых усилений сухогрузного судна // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3(37), Т. 2. С. 64–70.
8. Кулеш В.А., Пец Н.Г., Приемкин А.В. Анализ опыта эксплуатации и эффективности наружных ледовых усилений корпуса // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2019. № 56-57. С. 84–93.
9. Кулеш В.А., Пец Н.Г. Учет влияния наружных сегментов на коррозионные надбавки ледового пояса // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2019. № 56-57. С. 77–84.
10. Kulesh V. Improving operational reliability of ice reinforcements of vessels hulls. *Asia-Pacific Journal of Marine Science & Education*. 2013;3(1):9–14.

Original article

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/63-72>

Surov O., Yu Gang Song

OLEG E. SUROV, Candidate of Engineering Sciences, Professor, surov.oye@dvfu.ruYU GANG SONG, Student, yu.ks@students.dvfu.ru*Far Eastern Federal University*

Vladivostok, Russia

Analysis and selection of reinforcements of the outer plating of the vessel for safe operation in ice conditions

Abstract. In this article the results of substantiating the optimal choice of geometric characteristics of the hull strengthening tanker "Ostrov Russkiy" for ice class Ice1 according to the requirements of the Rules Russian Maritime Register of Shipping in order to ensure local strength when operating ship in ice are presented.

To check the local strength of the side construction, calculations of the stress-strain state of structures using the finite element method were performed. Various methods of partitioning finite elements in the CAD software Solidworks Simulation are considered and the optimal size of the computational mesh is selected. The reliability of the calculation results obtained was verified by the criterion of the influence of the installed structural elements on the strength of the side construction. As a result of comparing three options for ice reinforcements, from the point of view of ensuring the strength and cost-effectiveness of the structure, the optimal scheme for strengthening the sides of the vessel was selected. Based on the results of the calculations, a design for reinforcement of the hull of the tanker "Ostrov Russkiy" for ice class Ice1 was developed and approved by the Russian Maritime Register of Shipping.

Keywords: side overlap, beam grids, static analysis, ice reinforcements, ice loads

For citation: Surov O., Yu Gang Song. Analysis and selection of reinforcements of the outer plating of the vessel for safe operation in ice conditions. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023; (4):63–72. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests

REFERENCES

1. Appolonov E.M., Platonov V.V., Tryaskin V.N. Development of methods for determining ice loads and requirements for ice reinforcement structures. *Arctic: Ecology and Economy*. 2020;(1):65–81. (In Russ.).
2. Appolonov E.M. Design of ice reinforcement structures based on the criterion of ultimate strength. *Sudostroenie*. 1992;(2):9–13. (In Russ.).
3. Bergström M., Li F., Suominen M., Kujala P. A goal-based approach for selecting a ship's polar class. *Marine Structures*. 2022;81(5931):103123.
4. Bugaev V.G., Dam Van Tung. Information technologies in the life cycle of marine equipment. Design and Engineering analysis: a textbook for universities. Publishing House of the Far Eastern Federal University. Vladivostok, 2022. 128 p. (In Russ.).
5. Rules of classification and construction of sea vessels. Russian Maritime Register of Shipping. Part II. St. Petersburg, 2023. 337 p. (In Russ.).
6. Kalenchuk S.V., Kozakov E.V., Kotlyarova I.A., Sidorenko I.S. Improvement of ice qualities of reclassified vessels. *Vologda readings*. Vladivostok, 2008. P. 119–123. (In Russ.).
7. Kulesh V.A., Ogai S.A., Petz N.G. Project of ice reinforcements of a dry cargo vessel. *Marine intelligent technologies*. 2017;2(3):64–70. (In Russ.).
8. Kulesh V.A., Petz N.G., Priemkin A.V. Analysis of operational experience and effectiveness of external ice reinforcements of the hull. *Scientific and technical collection of the Russian Maritime Register of Shipping*. 2019. P. 84–93. (In Russ.).
9. Kulesh V.A., Petz N.G. Accounting for the influence of external segments on corrosion surcharges of the forest belt. *Scientific and technical collection of the Russian Maritime Register of Shipping*. 2019. P. 77–84. (In Russ.).
10. Kulesh V. Improving operational reliability of ice reinforcements of vessels hulls. *Asia-Pacific Journal of Marine Science & Education*. 2013;3:9–14.