

С. И. Корягин, С. В. Буйлов, Н. Л. Великанов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ОСНОВНОМ ЛИСТЕ ТРЕХСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ИЗГИБЕ И РАСТЯЖЕНИИ

Рассматривается трехслойная конструкция с полимерным наполнителем с целью определения нормальных и касательных напряжений в основном листе при изгибе и растяжении.

The article deals with three-layered construction with polymeric core in order to specify the usual and shearing strain in the basic sheet when bending and stretching.

Ключевые слова: трехслойная конструкция, напряжение, изгиб, растяжение.

Key words: sandwich structure, strain, flexure, distention.

Рассмотрим трехслойную конструкцию, нагруженную изгибающим моментом M (рис. 1). Покажем, что при экстремальных условиях работы отремонтированная конструкция не выйдет из строя. При расчете прочности клеевого соединения используем теорию составных стерж-

ней [1–3]. В соответствии с ней пренебрегаем действием нормальных напряжений в клеювом шве, считая, что они малы и незначительно влияют на распределение касательных напряжений [2]. Примем для упрощения, что соединяемые элементы одинаковы ($E_1 = E_k = E$, $\delta_1 = \delta_k = \delta$). Касательные напряжения в клеювом шве определяются по формуле

$$\tau_k = M \frac{3}{4\delta} \sqrt{\frac{G_k}{S_k} \frac{8}{E\delta} \frac{\text{sh}\alpha x}{\text{ch}\alpha l}} \quad (1)$$

где M – действующий момент, нм; δ – толщина соединяемых элементов, см; G_k – модуль сдвига связующего, МПа; S_k – толщина клеювого слоя, см; E – модуль упругости соединяемых элементов, МПа.

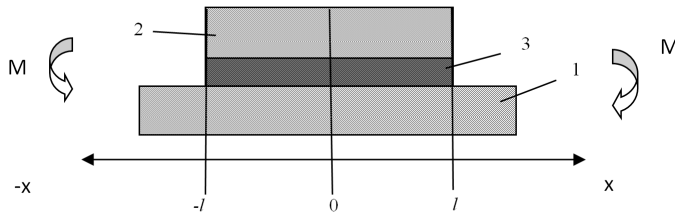


Рис. 1. Схема клеювого соединения, нагруженного изгибающим моментом M (1 – основной лист; 2 – накладной лист; 3 – клеювой слой)

При $x = \pm 1$ напряжения в клеювом шве равны и максимальны; если $x = 1 \rightarrow \infty$, то $\frac{\text{sh}\alpha x}{\text{ch}\alpha l} \rightarrow 1$; если $x = 1 \rightarrow 0$, то $\frac{\text{sh}\alpha x}{\text{ch}\alpha l} \rightarrow 0$. Считая $\frac{\text{sh}\alpha x}{\text{ch}\alpha l} = 1$, делая ошибку в безопасную сторону, из (1) получим: $\tau_k = M \frac{3}{4\delta} \sqrt{\frac{G_k}{S_k} \frac{8}{E\delta}}$.

Примем $G_k = \frac{E}{2(1+V_k)} = \frac{813}{2(1+0,4)} = 290$ (МПа), $\delta = 3 \cdot 10^{-3}$ м, $S_k = 0,2$ см, $E = 205,8 \cdot 10^3$ МПа – для связующего Спрут-Плюс и стали Ст. 3. Момент M выберем из условия экстремальной нагрузки $[R_{\text{ен}}] = R_{\text{ен ст.3}} = \frac{6M}{b\delta^2}$.

Для полосы трехслойной конструкции единичной ширины $b = 1$:

$$M = \frac{[R_{\text{ен}}]\delta^2}{6}, \quad [R_{\text{ен}}] = R_{\text{ен ст.3}} = 300 \text{ (МПа)},$$

где $\delta = 6 \cdot 10^{-3}$ (м) – толщина, принятая равной толщине некорродированного листа; $M = \frac{300(6 \cdot 10^{-3})^2}{6} = 1800$ (нм);

$$\tau_k = 1800 \frac{3}{4 \cdot 3 \cdot 10} \sqrt{\frac{290 \cdot 8}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 205,8 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}} = 19,5 \text{ (МПа)}.$$

Клеювое соединение на воздухе с использованием связующего Спрут-Плюс выдержит расчетную нагрузку по истечении 3,3 дня после выполнения соединения.



Рассмотрим эту же трехслойную конструкцию, нагруженную растягивающими усилиями P (рис. 2). На рисунке 3 представлена зависимость касательных напряжений от времени. Подвергая конструкцию экстремальным нагрузкам, рассчитываем сдвиговые напряжения в клеевом шве, используя снова теорию составных стержней [3–7]. Пренебрегаем действием нормальных напряжений. Соединяемые элементы принимаем одинаковыми: ($E_1 = E_2 = E, \delta_1 = \delta_2 = \delta$).

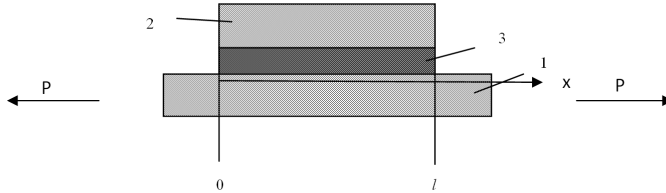


Рис. 2. Схема клеевого соединения, нагруженного растягивающими усилиями P (1 – основной лист; 2 – накладной лист; 3 – клеевой слой)

Напряженное состояние системы из 2 элементов, подверженной растягивающей нагрузке P , описывается дифференциальным уравнением $T'' - \alpha^2 T + \beta P = 0$, где $\alpha^2 = \frac{G_k}{S_k} \frac{2}{E\delta}$; $\beta P = \frac{P G_k}{E\delta S_k}$; T – суммарное сдвигающее усилие в шве.

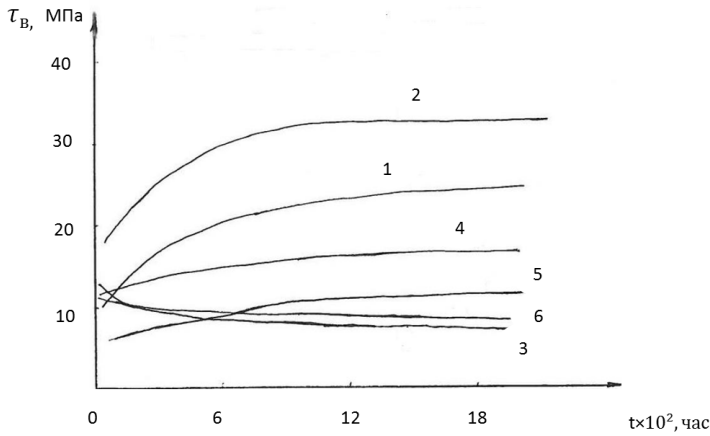


Рис. 3. График зависимости касательных напряжений от времени

Решение дифференциального уравнения ищем в виде

$$T = A \operatorname{sh} \alpha x + B \operatorname{ch} \alpha x + \Psi P,$$

где $\Psi = \frac{E_2 \delta_2}{E_1 \delta_1 + E_2 \delta_2} = \frac{1}{2}$ для случая одинаковых соединяемых элементов.

Определяем произвольные постоянные в решении A и B из граничных условий для усилия во второй пластине: $T_2 = 0$ при $x = 0$; $T_2 = 0$ при $x = l$. Получим:

$$T_2 = \Psi P \left(\frac{\operatorname{ch} \alpha l - 1}{\operatorname{sh} \alpha l} \operatorname{ch} \alpha x - \operatorname{sh} \alpha x + 1 \right).$$



Касательные напряжения в точках $x = l$ и $x = 0$ будут равны

$$\tau_k = \frac{d\Gamma_2}{dx} = \alpha\Psi P \left(\frac{\operatorname{ch}\alpha l - 1}{\operatorname{sh}\alpha l} \operatorname{ch}\alpha x - \operatorname{sh}\alpha x \right).$$

Наибольшее значение по абсолютной величине касательное напряжение имеет при $l \rightarrow \infty$ $\tau_{k \frac{x=0}{x=1}} = P\alpha\Psi$, приближаясь снизу:

$$\tau_{k \frac{x=0}{x=1}} = P\alpha\Psi = \frac{1}{2} P \sqrt{\frac{G_k}{S_k} \frac{2}{E\delta}}.$$

Усилие P выбираем из условия экстремальной нагрузки:

$$[P_{\text{ен}}] = R_{\text{ен ст.3}} = \frac{P}{\nu d}.$$

Рассмотрим полосу трехслойной конструкции единичной ширины $\nu = 1$:

$$P = P_{\text{ен}}\delta = 300 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 1,8 \cdot 10^6 \text{ (Н)},$$

где $\delta = 6 \cdot 10^{-3}$ м – толщина некорродированного листа.

Напряжение в клеевом шве при $x = 0$, $x = l$:

$$\tau_{k \frac{x=0}{x=1}} = \frac{1}{2} 1,8 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{290 \cdot 2}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 205,8 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}} = 19,5 \text{ (МПа)}.$$

В соответствии с графиком, приведенном на рисунке 3, клеевое соединение стали Ст. 3 на воздухе и в нефти с использованием клея «ВАК-А» и «Адгезив» выдержит расчетную нагрузку по истечении 3,3 дня после выполнения соединения. Обозначено на воздухе (см. рис. 3):

- 1 – Адгезив.
 - 2 – Спрут-Плюс.
 - 3 – Адгезив.
 - 4 – ВАК-А.
- В нефти:
- 5 – Адгезив.
 - 6 – Спрут-Плюс.

Клеевое соединение с использованием клеевой композиции типа «Адгезив», модуль сдвига которого 125 МПа, выдержит расчетные нагрузки по двум предложенным на рисунках 1 и 2 схемам нагружения.

Для определения влияния накладного листа на напряженное состояние основного листа были выполнены экспериментальные исследования. Образцы испытывались на растяжение и изгиб. Толщина листов образца 5 мм, ширина 85 мм, длина образца 452 мм, длина накладки 248 мм. Материал – сталь Ст. 3 и клей «Спрут-Плюс». Для сравнения проведены испытания образцов без заклепного соединения [8].

Результат испытаний приведен на рисунках 4 и 5. Как видно из графиков, во всех случаях накладной лист втягивается в работу и частично разгружает основной лист. Об этом свидетельствуют значения уровня напряжений k_1 .

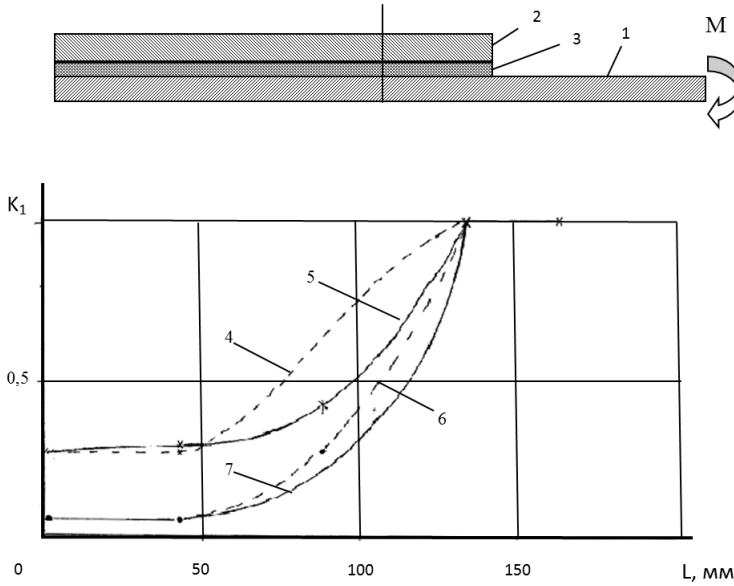


Рис. 4. Распределение напряжений в основном листе при изгибе (сплошная и штриховая линии — образец с заклепкой и без заклепки; 4, 5 — нижние волокна; 5, 6 — верхние волокна)

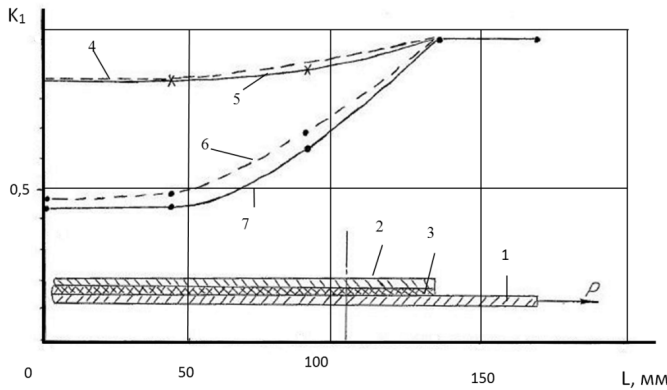


Рис. 5. Распределение напряжений в основном листе при растяжении (сплошная и штриховая линии — образец с заклепкой и без заклепки; 4, 5 — нижние волокна; 5, 6 — верхние волокна)

Была произведена оценка прочности трехслойной конструкции. Разрушение трехслойной конструкции без заклепки (отслоение накладного листа) началось при напряжении в основном листе 220 МПа. В трехслойной конструкции с заклепкой разрушения не наступило при нагрузке, вызывающей напряжение текучести материала в основном листе.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что заклепка решает две задачи: во-первых, работая на срез, снижает напряжение в клеевом соединении и способствует вовлечению в работу накладного листа; во-вторых, в процессе формирования трехслойной конструкции обеспечивает сжатие двух листов, то есть дает возможность получить клеевой слой минимальной толщины, что увеличивает его прочность и жесткость.



Рассмотрим теперь вопрос о целесообразности применения накладных листов для восстановления общей и местной прочности, а также прочности отдельных пластин.

Высокая эффективность применения накладных листов для усиления пластин очевидна из рисунка 4. Накладной лист обеспечивает практически четырехкратное снижение напряжений. Учитывая формулу $\sigma \approx \frac{M}{bh^2/16}$, где σ – напряжение; M – изгибающий момент; h –

высота сечения балки; b – ширина сечения балки.

Можно сделать вывод, что прочность двухслойной пластины при изгибе будет эквивалентна прочности монолитной пластины с толщиной, равной сумме толщин двух листов. Таким образом, общая прочность изношенной пластины может быть восстановлена установкой накладного листа толщиной:

$$\delta = \delta_{\text{пр.доп.}} - \delta_{\text{ср.}}$$

где $\delta_{\text{пр.доп.}}$ – предельно допустимая толщина пластины; $\delta_{\text{ср.}}$ – средняя остаточная толщина пластины.

При общем изгибе элемент конструкции корпуса находится в состоянии растяжения или сжатия, как видно из рисунка 5 применение накладного листа. На основании вышесказанного нельзя рекомендовать применение трехслойной конструкции для восстановления общей прочности.

Наружная обшивка и настилы участвуют в изгибе перекрытий судового корпуса в качестве присоединенных поясков набора. При изгибе балок напряженное состояние присоединенного пояска можно рассматривать как сумму растяжения (сжатия) и изгиба.

$$\text{При этом выполняется условие } \frac{\sigma_p}{\sigma_n} = \frac{z_n}{\delta/2}.$$

Из рисунка 4 и рисунка 5 видно, что как при растяжении, так и при изгибе со стороны накладного листа действуют значительные разгружающие усилия. Эти усилия снизят напряжения в верхних волокнах основного листа и создадут изгибающий момент относительно нейтральной оси, который снизит напряжения в полке балки. Геометрические характеристики ряда профилей с присоединенным пояском рассмотрены в Правилах классификации и постройки морских судов, нейтральная ось таких балок находится вблизи их присоединенного пояска [10]. Следовательно, прочность приложения разгружающих усилий не будут играть решающей роли. Таким образом, можно рекомендовать при ремонте перекрытия судового корпуса установку накладного листа с перекрытием зоны износа не менее чем на 100 мм в направлении балок набора ремонтируемого участка [8].

Напряжения по ширине присоединенного пояска распределены неравномерно. Их максимум находится в районе стенки, поэтому и заклепки целесообразно размещать вблизи стенок балок (рис. 6) [9].

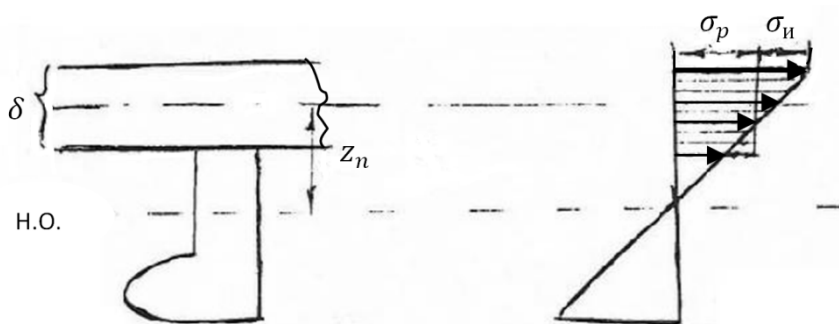


Рис. 6. Распределение напряжений по ширине присоединенного пояса

Результаты проведенного исследования можно использовать в конструкторской практике при выполнении ремонтных работ судовых корпусных конструкций, а также при разработке нормативно-технических документов для судоремонта [4–7].

Список литературы

1. Корягин С. И. Несущая способность композиционных материалов. Калининград, 1996.
2. Корягин С. И. Оптимизация остаточных напряжений в полимерных покрытиях // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2007. № 3. С. 100–104.
3. Великанов Н. Л., Корягин С. И. Механика системы «Кошелковский невод – промысловое судно». Калининград, 2012.
4. А. с. 1011440 СССР. Способ ремонта корпуса судна / С. И. Корягин, С. В. Буйлов, Б. И. Растаргуев // Б.и. 1983. № 14.
5. А. с. 1066882 СССР. Конструктивный элемент для ремонта корпуса судна / С. И. Корягин, С. В. Буйлов, Б. И. Растаргуев // Б.и. 1984. № 2.
6. А. с. 1742122 СССР. Способ ремонта судовой корпусной конструкции / С. И. Корягин, С. В. Буйлов, Б. И. Растаргуев // Б.и. 1992. № 23.
7. А. с. 1796533 СССР. Способ ремонта корпуса судна / С. И. Корягин, Д. Г. Горянский, С. В. Буйлов // Б.и. 1993. № 7.
8. Корягин С. И. Влияние накладного листа на напряженное состояние основного конструктивного элемента // Вестник машиностроения. 1998. № 2. С. 16–19.
9. Сулов В. М., Кочанов Ю. П., Спихтаренко В. Н. Строительная механика корабля и основы теории упругости. Л., 1972.
10. Правила классификации и постройка морских судов. Л., 1979.

Об авторах

Сергей Иванович Корягин – д-р техн. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: SKoryagin@kantiana.ru

Сергей Владимирович Буйлов – канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: SKoryagin@kantiana.ru



Николай Леонидович Великанов – д-р техн. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: NVelikanov@kantiana.ru

About the authors

Prof. Sergey Korjagin – I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: SKoryagin@kantiana.ru

Dr Sergey Bujlov – I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: SKoryagin@kantiana.ru

Prof. Nikolay Velikanov – I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: NVelikanov@kantiana.ru