DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-29-36
УДК 624.076-036:624.046.4

Н.Н. Федонюк
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

НОРМИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ БАЛОК НАБОРА СУДОВОГО КОРПУСА ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются балки набора судового корпуса из полимерных композиционных материалов (ПКМ) и проблема нормирования их прочности, жесткости и устойчивости. Основная цель работы состоит в оценке взаимосвязи требований к этим характеристикам балок и в определении их влияния на геометрию и вес балок.

Материалы и методы. Материалом исследования являются существующие требования к проектированию балок судового корпуса из ПКМ и расчетам их прочности. Исследования проводились на базе теории сложного изгиба балок с учетом деформаций поперечного сдвига в их стенке.

Основные результаты. Показано, что для реальных балок корпусных конструкций ограничение прогибов в ряде случаев приводит к значительным запасам по прочности и устойчивости и, как следствие, к увеличению их погонной массы. В то же время выполнение требований по прочности и устойчивости может позволить, при незначительном отступлении от требования по допускаемому прогибу, заметно снизить вес конструкции.

Заключение. Введение ограничения на прогибы балок судового корпуса из ПКМ должно быть обосновано в зависимости от степени их ответственности, уровня нагруженности, а также условий работы. При проектировании балок необходимо исходить, в первую очередь, из условия обеспечения их несущей способности. Полученные результаты будут применяться при проектировании корпусов судов из ПКМ в КБ-проектантах, что позволит снизить вес их конструкций.

Ключевые слова: корпус, балка, полимерный композиционный материал, прочность, жесткость, устойчивость, нормирование.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-29-36
UDC 624.076-036:624.046.4

N. Fedonyuk
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

DEVELOPMENT OF STRENGTH AND STIFFNESS REQUIREMENTS TO HULL FRAMING BEAMS MADE OF POLYMERIC COMPOSITES

Object and purpose of research. This paper studies hull framing beams made of polymeric composite materials and discusses how to develop strength, stiffness and stability requirements for them. The main purpose of this research is to perform a comprehensive analysis of these parameters and understand their possible implications in terms of beam geometry and weight.

Materials and methods. The study is based on existing design requirements and strength calculation rules for hull framing beams made of polymeric composites. The basis for investigation was the theory of complex beam bending taking into account transverse shear strains in the web.

Main results. It has been shown that current bending limitations in a number of cases lead to considerable strength and stability margins of hull beams, thus increasing their weight per unit length. Meanwhile, minor deviations from bending

Для цитирования: Федонюк Н.Н. Нормирование прочности и жесткости балок набора судового корпуса из полимерных композиционных материалов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 3(389): 29–36.

For citations: Fedonyuk N. Development of strength and stiffness requirements to hull framing beams made of polymeric composites. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; 3(389): 29–36 (in Russian).

requirements, under condition that strength and stability requirements are satisfied in full, may result in considerable reduction of beam weight.

Conclusion. Bending limitations for composite hull beams must be justified depending on the importance of specific beam, as well as depending on its operational conditions and load. Beam design must be, first of all, focused on ensuring their bearing capacity. The results of this work will be helpful for designers of composite hulls, enabling them to reduce the weight of structures.

Keywords: hull, beam, polymeric composite material, strength, stiffness, stability, regulations.

Author declares lack of the possible conflicts of interests.

Введение

Introduction

Одним из основных элементов корпусных конструкций судов являются балки, которые поддерживают обшивку корпуса, настилы палуб, полотнища переборок и т.д. При проектировании корпусных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) к балкам набора одновременно предъявляются требования по прочности, жесткости и устойчивости. Эти требования задаются исходя из степени ответственности конструкции, условий ее работы, а также из уровня знаний и имеющегося опыта проектирования и эксплуатации. При этом, как показывает анализ, данные требования часто не взаимосвязаны друг с другом и в ряде случаев носят произвольный характер. В подтверждение сказанного можно отметить, что требования по допускаемому прогибу типовых балок набора судового корпуса из ПКМ в разных классификационных обществах могут различаться в несколько раз [1–3]. Естественно, возникает потребность оценить влияние этих требований на характеристики балок и их связь между собой. При решении этой задачи необходимо принимать во внимание еще и то обстоятельство, что упругие характеристики ПКМ ниже, чем у традиционных для судостроения металлов. Следовательно, в этом случае ограничение по прогибам будет играть определяющий характер, что может потребовать дополнительного обоснования для его применения.

Для того, чтобы оценить, в какой степени требования по допускаемому прогибу [w] влияют на запас по прочности, рассмотрим вначале простейший пример – изгиб балки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой q. Предполагается, что нагрузка, действующая со стороны присоединенного пояска, вызывает изгиб балки вниз (рис. 1).

Используя известные формулы [4], запишем выражения для максимального прогиба $w_{\max} = w(l/2)$ и максимального изгибающего момента $M_{\max}$:

- для свободно опертой балки

$$w_{\max} = w(l/2) = \frac{5ql^4}{384D_{11}} + \frac{ql^2}{8K_{11}}; \quad (1)$$

$$M_{1\max} = M_1(l/2) = \frac{ql^2}{8}; \quad (2)$$

- для балки с жестко заделанными опорными концами

$$w_{\max} = w(l/2) = \frac{ql^4}{384D_{11}} + \frac{ql^2}{8K_{11}}; \quad (3)$$

$$M_{1\max} = M_1(0,l) = -\frac{ql^2}{12}; \quad (4)$$

В (1)–(4) обозначено:
l – расчетный пролет балки; D_{11} – изгибная жесткость балки,

$$D_{11} = \sum_{i=1}^{n}\left(E_1^{(i)}F_i z_i^2 + I_i\right) - e^2 A_{11}, \quad e = \frac{1}{A_{11}}\sum_{i=1}^{n} E_1^{(i)} F_i z_i;$$

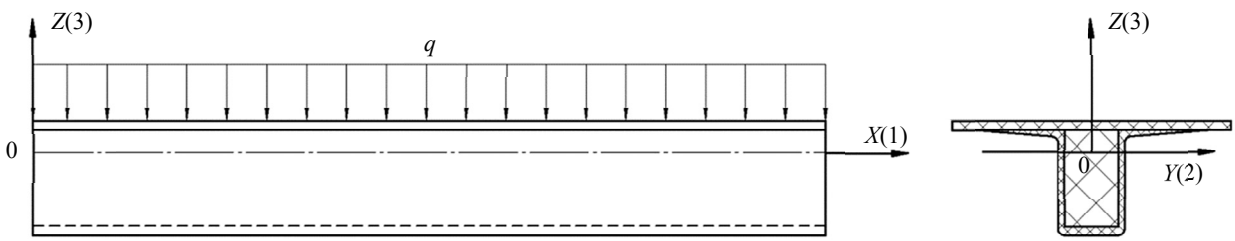


Рис. 1. Балка П-образного профиля. Схема нагружения и система координат

Fig. 1. U-beam. Layout of loading and coordinate system

K_{11} – сдвиговая жесткость балки в плоскости 013 ее изгиба,

$$K_{11} = \sum_{i=1}^{n} G_{13}^{(i)} F_i;$$

A_{11} – осевая жесткость балки,

$$A_{11} = \sum_{i=1}^{n} E_1^{(i)} F_i,$$

где $E_1^{(i)}$, $G_{13}^{(i)}$ – модуль нормальной упругости в направлении продольной оси 01 балки и модуль сдвига в плоскости 013 i-го элемента поперечного сечения соответственно; F_i – площадь i-го элемента; z_i – отстояние центра тяжести i-го элемента от оси сравнения; e – отстояние оси изгиба балки от оси сравнения, которая расположена на наружной поверхности присоединенного пояска.

Балки судового корпуса из ПКМ являются в основном относительно длинными ($H/l \le 0{,}1$, где H – высота профиля балки), поэтому опасным состоянием для них является разрушение от нормальных напряжений, действующих в свободном и присоединенном поясках в их крайних фибрах.

При нормировании прочности балки напряжения в этих поясках при действии нагрузки q не должны превосходить допускаемых $[\sigma_{11}]$, а именно:

$$\left|\max \sigma_{11}^{(n)}\right| = E_1^{(n)} \frac{M_{1\max} \overline{z}_n}{D_{11}} \le \left[\sigma_{11}^{(n)}\right];$$

$$\left|\max \sigma_{11}^{(npn)}\right| = E_1^{(npn)} \frac{M_{1\max} \overline{z}_{npn}}{D_{11}} \le \left[\sigma_{11}^{(npn)}\right], \qquad (5)$$

где индексы n и npn относятся, соответственно, к свободному и присоединенному пояскам,

$$\overline{z}_n = -z_n - \frac{1}{2} t_n + e, \quad \overline{z}_{npn} = e;$$

t_n – толщина свободного пояска.

В соответствии с принятой практикой допускаемые напряжения определяются как

$$[\sigma_{11}] = k_\sigma \Pi_{11(\pm)}, \qquad (6)$$

где $k_\sigma < 1$ – коэффициент допускаемого напряжения; $\Pi_{11(\pm)}$ – пределы прочности материалов поясков при растяжении (+) и сжатии (–).

Величина, обратная k_σ, является запасом прочности

$$n_{np} = k_\sigma^{-1} > 1. \qquad (7)$$

Одновременно с нормированием прочности в балках нормируется жесткость путем ограничения прогиба, который не должен превосходить допускаемый уровень $[w]$. Допускаемый прогиб обычно задают как долю длины пролета балки:

$$[w] = k_w^{-1} l, \qquad (8)$$

где k_w – коэффициент допускаемого прогиба, $k_w >> 1$.

Определим величину максимальной нагрузки, которую может выдержать балка, исходя из требований по прочности и жесткости. В данном случае эту нагрузку удобно выразить через максимальный изгибающий момент.

Для свободно опертой балки, используя (1), (2), (5), (6), (8), можем получить

$$\left|M_{1\max}^{(w)}\right| = k_w^{-1} \frac{48 D_{11}}{5l} \left[1 + \frac{48}{5} \frac{D_{11}}{K_{11} l^2}\right]^{-1}; \qquad (9)$$

$$\left|M_{1\max}^{(\sigma)}\right| = k_\sigma \Pi_{11(\pm)} \frac{D_{11}}{E_1 \overline{z}}, \qquad (10)$$

где $\left|M_{1\max}^{(w)}\right|$, $\left|M_{1\max}^{(\sigma)}\right|$ – изгибающие моменты, которые могут быть достигнуты в балке при выполнении требований, соответственно, по жесткости и прочности (индексы n, npn в (5) для общности опускаем).

Аналогично для жестко заделанной балки получим из (3)–(6), (8):

$$\left|M_{1\max}^{(w)}\right| = k_w^{-1} \frac{32 D_{11}}{l} \left[1 + \frac{48 D_{11}}{K_{11} l^2}\right]^{-1}, \qquad (11)$$

а $\left|M_{1\max}^{(\sigma)}\right|$ будет иметь такой же вид, как в (10).

Используя (9)–(11), найдем отношение между моментами $\left|M_{1\max}^{(w)}\right|$ и $\left|M_{1\max}^{(\sigma)}\right|$:

- для свободно опертой балки

$$m_1 = \left|\frac{M_{1\max}^{(\sigma)}}{M_{1\max}^{(w)}}\right| = k_\sigma k_w \frac{5 \Pi_{11(\pm)} l}{48 E_1 \overline{z}} \left(1 + \frac{48}{5} \frac{D_{11}}{K_{11} l^2}\right); \qquad (12)$$

- для жестко заделанной балки

$$m_1 = \left|\frac{M_{1\max}^{(\sigma)}}{M_{1\max}^{(w)}}\right| = k_\sigma k_w \frac{\Pi_{11(\pm)} l}{32 E_1 \overline{z}} \left(1 + \frac{48 D_{11}}{K_{11} l^2}\right). \qquad (13)$$

Из (12), (13) видно, что если $m_1 > 1$, то определяющим условием для выбора размеров профиля балки является требование по допускаемому прогибу, и наоборот, при $m_1 < 1$ этим условием является обеспечение прочности.

При заданных значениях коэффициентов k_σ и k_w величина m_1 в значительной степени зависит от параметра $\gamma = \dfrac{\Pi_{11(\pm)} l}{E_1 \bar{z}}$, т.к. нетрудно показать, что второе слагаемое в скобках имеет порядок менее 10 % для относительно длинных балок с $H/l \le 0{,}1$.

Для наглядности на рис. 2 (см. вклейку) зависимость $m_1 = m_1(\gamma)$ из (12), (13) представлена в виде обобщенных кривых для $k_\sigma = 0{,}40$ и $k_w = 100{,}50$. Заданные значения этих коэффициентов наиболее часто применяются в отечественном композитном судостроении при нормировании прочности и жесткости балок. Расчеты проводились для балок П-образного профиля в предположении, что наиболее нагруженным является свободный поясок, для которого было задано $\Pi^n_{11(+)} = 390$ МПа, $\Pi^n_{11(-)} = 360$ МПа, $E_1{}^n = 22{,}8$ ГПа.

Из рис. 2 видно, что чем больше k_w, тем более определяющим становится требование по жесткости при меньшем значении γ и, следовательно, при меньшем пролете l. При жесткой заделке опорных концов ограничение по допускаемым напряжениям «работает» в более широком диапазоне γ по сравнению со свободно опертой балкой, что также следует непосредственно из (12), (13).

Нормирование жесткости балок при $\gamma > \gamma_K$, где γ_K определяется из уравнений (12) и (13) $m_1 = m_1(\gamma_K) = 1$ (или как абсцисса точек пересечения кривых $m_1 = m_1(\gamma)$ с прямой $m_1 = 1$, см. рис. 2), приводит к излишним запасам прочности, величина которых будет определяться с учетом (7) как

$$n_{пр} = m_1 k_\sigma^{-1}, \tag{14}$$

где $n_{пр} = k_\sigma^{-1}$ при $m_1 < 1{,}0$.

По результатам выполненных расчетов, представленных на рис. 2, по формуле (14) была определена величина $n_{пр}$ в зависимости от γ (рис. 3, см. вклейку).

Результаты, полученные на примере балок П-образного профиля, нагруженных равномерно распределенной нагрузкой, показывают, что ограничение по прогибам при определенных параметрах балок, характеризуемых величиной $\gamma \ge \gamma_K$, приводит к значительным запасам по прочности. Особенно это заметно в случае со свободно опертыми балками. Такая ситуация вызывает увеличение габаритов профиля и массы балок.

Теперь обратимся к общему случаю, характерному для балок набора судового корпуса, а именно к сложному изгибу балки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой q и осевыми сжимающими силами $T_1 < 0$. Оценим, насколько требования по жесткости, прочности и устойчивости, предъявляемые к балкам, коррелируются друг с другом и в какой степени проявляется взаимосвязь между этими требованиями.

Для решения поставленной задачи необходимо воспользоваться теорией сложного изгиба балок, построенной на основе гипотезы прямой линии С.П. Тимошенко [5]. Она позволяет учесть влияние деформаций сдвига на их напряженно-деформированное состояние (НДС). Ввиду ограниченного объема статьи приведены формулы для определения НДС балки без вывода.

Для свободно опертой по концам балки можем записать:

- выражение для определения прогибов

$$w = -\frac{q}{k^4 D_{11}}\left[\begin{array}{l} k^2 \dfrac{l x_1}{2}\left(1 - \dfrac{x_1}{l}\right) + \\ + \left(1 + k^2 \dfrac{D_{11}}{K_{11}}\right)\left(1 - \dfrac{\cos k\left(x_1 - \dfrac{l}{2}\right)}{\cos \dfrac{kl}{2}}\right) \end{array}\right]; \tag{15}$$

- выражение для определения изгибающего момента

$$M_1 = -\frac{q}{k^2}\left[\begin{array}{l} 1 + k^2 \dfrac{D_{11}}{K_{11}} - \\ - \left(1 + k^2 \dfrac{D_{11}}{K_{11}}\right) \cdot \dfrac{\cos k\left(x_1 - \dfrac{l}{2}\right)}{\cos \dfrac{kl}{2}} \end{array}\right], \tag{16}$$

где $k = \left(\dfrac{|T_1|}{D_{11}}\right)^{1/2}$ при $T_1 < 0$.

Из (15), (16) при $x_1 = l/2$ получим наибольшие значения прогиба и изгибающего момента:

$$w_{\max} = w\left(\frac{l}{2}\right) =$$

$$= -\frac{q}{k^4 D_{11}}\left[k^2 \frac{l^2}{8} + \left(1 + k^2 \frac{D_{11}}{K_{11}}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos \dfrac{kl}{2}}\right)\right]; \tag{17}$$

$$M_{1\max} = M_1\left(\frac{l}{2}\right) =$$

$$= -\frac{q}{k^2}\left[1 + k^2\frac{D_{11}}{K_{11}} - \left(1 + k^2\frac{D_{11}}{K_{11}}\right)\cdot\frac{1}{\cos\frac{kl}{2}}\right]. \qquad (18)$$

Аналогично для балки с жестко заделанными опорными концами выражения для w и M_1 будут иметь вид

$$w = -\frac{q}{2k^4 D_{11}}\left[\begin{array}{l} k^2 l x_1\left(1 - \frac{x_1}{l}\right) + \\ +kl\left(1 + k^2\frac{D_{11}}{K_{11}}\right)\frac{\cos\frac{kl}{2} - \cos k\left(x_1 - \frac{l}{2}\right)}{\sin\frac{kl}{2}} \end{array}\right]; \qquad (19)$$

$$M_1 = -\frac{q}{k^2}\left[\begin{array}{l} 1 + k^2\frac{D_{11}}{K_{11}} - \\ -\frac{kl}{2}\left(1 + k^2\frac{D_{11}}{K_{11}}\right)\cdot\frac{\cos k\left(x_1 - \frac{l}{2}\right)}{\sin\frac{kl}{2}} \end{array}\right]. \qquad (20)$$

При $x_1 = l/2$ из (19), (20) получим

$$w_{\max} = w\left(\frac{l}{2}\right) = -\frac{ql}{2k^3 D_{11}}\left[\frac{kl}{4} - \left(1 + k^2\frac{D_{11}}{K_{11}}\right)\cdot \mathrm{tg}\frac{kl}{4}\right]; \qquad (21)$$

$$M_1\left(\frac{l}{2}\right) = -\frac{q}{k^2}\left[1 + k^2\frac{D_{11}}{K_{11}} - \frac{kl}{2}\left(1 + k^2\frac{D_{11}}{K_{11}}\right)\cdot\frac{1}{\sin\frac{kl}{2}}\right], \qquad (22)$$

где $M_1(l/2) = M_{1пр}$ – наибольший момент в пролете.

При $x = 0, l$ найдем с помощью (20) опорные моменты

$$M_1(0, l) = M_{1оп} =$$

$$= -\frac{q}{k^2}\left[1 + k^2\frac{D_{11}}{K_{11}} - \frac{kl}{2}\left(1 + k^2\frac{D_{11}}{K_{11}}\right)\cdot \mathrm{ctg}\frac{kl}{2}\right]. \qquad (23)$$

Так же, как в случае простого изгиба, определим величину максимальной нагрузки, которую может выдержать балка, удовлетворяя требованиям по прочности, жесткости и устойчивости. В отличие от предыдущего примера в качестве такой нагрузки будем рассматривать равномерно распределенную поперечную нагрузку q.

Для свободно опертой балки из (17) и (18) с учетом (5), (6), (8) найдем:

- величину максимальной нагрузки, исходя из требований по жесткости

$$q_{\max}^{(w)} = \frac{l}{k_w} f_w^{-1}; \qquad (24)$$

$$f_w = -\frac{D_{11}}{|T_1|^2}\left[\frac{|T_1|}{D_{11}}\frac{l^2}{8} + \left(1 + \frac{|T_1|}{K_{11}}\right)\left(1 - \frac{1}{\cos\frac{l}{2}\left(\frac{|T_1|}{D_{11}}\right)^{1/2}}\right)\right]; \qquad (25)$$

- величину максимальной нагрузки, исходя из требований по прочности

$$q_{\max}^{(\sigma)} = \left|-\frac{D_{11}}{E_1 f_m \bar{z}}\left(k_\sigma \Pi_{11(\pm)} + E_1\frac{|T_1|}{A_{11}}\right)\right|; \qquad (26)$$

$$f_m = -\frac{D_{11}}{|T_1|}\left[1 + \frac{|T_1|}{K_{11}} - \left(1 + \frac{|T_1|}{K_{11}}\right)\cdot\frac{1}{\cos\frac{l}{2}\left(\frac{|T_1|}{D_{11}}\right)^{1/2}}\right]. \qquad (27)$$

В (24) и (25) обозначено

$$|T_1| = \frac{T_{1кр}}{n_{кр}}, \quad T_{1кр} = \frac{T_{1э}}{1 + \frac{T_{1э}}{K_{11}}}, \qquad (28)$$

где $T_{1кр}$ – критическая сила потери устойчивости; $n_{кр}$ – запас по устойчивости; $T_{1э}$ – эйлерова сила потери устойчивости, которая для свободно опертой балки определяется по формуле

$$T_{1э} = \frac{\pi^2 D_{11}}{l^2}.$$

В (25) индексы n и $пр n$, относящиеся, соответственно, к свободному и присоединенному пояскам, опущены. При этом имеем в виду, что:

- при $\bar{z} = -\bar{z}_n$, $E_1 = E_1^{(n)}$, $\Pi_{11(\pm)} = \Pi_{11(+)}^{(n)}$;
- при $\bar{z} = \bar{z}_{пр n} = e$, $E_1 = E_1^{(пр n)}$, $\Pi_{11(\pm)} = \Pi_{11(-)}^{(пр n)}$.

Аналогичным образом для балки с жестко заделанными опорными концами напишем формулы для определения максимальных нагрузок, используя зависимости (21), (22), с учетом (5), (6), (8).

Максимальная нагрузка из условия выполнения требования по жесткости определится по формуле (24). При этом

$$f_w = -\frac{l}{2|T_1|\left(\frac{|T_1|}{D_{11}}\right)^{1/2}}\left[\begin{array}{l}\frac{l}{4}\left(\frac{|T_1|}{D_{11}}\right)^{1/2} - \\ -\left(1+\frac{|T_1|}{K_{11}}\right)\mathrm{tg}\frac{l}{4}\left(\frac{|T_1|}{D_{11}}\right)^{1/2}\end{array}\right]. \quad (29)$$

Величина максимальной нагрузки, исходя из требования по прочности, определится по формуле (26), где

$$f_m = -\frac{D_{11}}{|T_1|}\left[\begin{array}{l}1+\frac{|T_1|}{K_{11}} - \\ -\frac{l}{2}\left(\frac{|T_1|}{D_{11}}\right)^{1/2}\left(1+\frac{|T_1|}{K_{11}}\right)\mathrm{ctg}\frac{l}{2}\left(\frac{|T_1|}{D_{11}}\right)^{1/2}\end{array}\right]. \quad (30)$$

В выражениях (29), (30) T_1 определяется по (28), при этом $T_{1э}$ для жестко заделанной балки вычисляется по формуле

$$T_{1э} = \frac{4\pi^2 D_{11}}{l^2}.$$

Запас прочности $n_{пр}$ балок с жестко заделанными опорными концами

Strength margin $n_{пр}$ of beams with clamped bearing ends

k_σ	k_w	$n_{кр}$	l, м	$n_{пр}$
0,35 / 0,40	100	2,5	4	3,7/3,5
			8	4,3/4,2
			12	5,5/5,5
0,35 / 0,40	100	1,5	4	5,4/4,9
			8	5,6/5,3
			12	6,8/6,6
0,35 / 0,40	50	2,5	4	2,8*/2,5*
			8	2,8*/2,5*
			12	2,8*/2,8
0,35 / 0,40	50	1,5	4	2,8*/2,5*
			8	2,8*/2,7
			12	3,4/3,3

Примечание: * – Значения запаса прочности, соответствующие требованию $n_{пр} = k_\sigma^{-1}$.

Так же, как и в случае простого изгиба, оценим, какое из двух условий по жесткости или прочности является определяющим для выбора размеров профиля балки. Для этого найдем величину отношения $m_2 = q_{\max}^{(\sigma)} / q_{\max}^{(w)}$. Очевидно, что если $m_2 > 1$, то размеры элементов профиля балки определяются исходя из необходимости выполнения требования по допускаемому прогибу; в противном случае выбор этих размеров диктуется необходимостью обеспечения прочности балки.

Покажем, в какой степени величина m_2 зависит от геометрии балки и условий закрепления ее опорных концов, на примере П-образной балки с высотой «сердечника» $H_c = 0{,}2$ м и длиной пролета, изменяющейся от 2 до 12 м. Толщина обформовки «сердечника» профиля балки соответствует требованиям [6]. Наиболее напряженным, так же, как и в балках при их простом изгибе, является свободный поясок с уже приводившимися характеристиками материала: $П^n_{11(+)} = 390$ МПа; $П^n_{11(-)} = 360$ МПа; $E_1^n = 22{,}8$ ГПа.

Результаты определения $m_2 = m_2(l)$ приведены в виде графиков: для свободно опертой балки на рис. 4 (см. вклейку), для балки с жестко заделанными опорными концами – на рис. 5 (см. вклейку). При этом задавались значения коэффициентов, которые наиболее часто применяются в практике проектирования: $k_\sigma = 0{,}35$; 0,40; $k_w = 50$, 100; $n_{кр} = 1{,}5$; 2,5.

Представленные графики показывают, что для свободно опертой балки требование по жесткости является ключевым ($m_2 > 1$) для всего диапазона изменения длины пролета. Для жестко закрепленной балки размеры элементов профиля также определяются требованиями по жесткости, если $k_w = 100$. При смягчении требования по жесткости $k_w = 50$ заметную роль начинает играть требование по прочности ($m_2 < 1$). Это хорошо видно для балок любой длины из выбранного диапазона при $n_{кр} = 2{,}5$.

Влияние k_σ на величину m_2 незначительно, за исключением балок с жестко заделанными опорными концами при $k_w = 100$, где оно более выражено.

Величину запаса прочности $n_{пр}$, которую имеют рассматриваемые балки при заданных условиях, нетрудно оценить по формуле (14), если вместо m_1 подставить m_2 из графиков, приведенных на рис. 4–5.

Определим значения $n_{пр}$ для жестко заделанных балок (что представляет бóльший интерес по сравнению со свободно опертыми балками) для длин пролета $l = 4$, 8, 12 м при заданных значениях k_σ, k_w, $n_{кр}$ (см. таблицу).

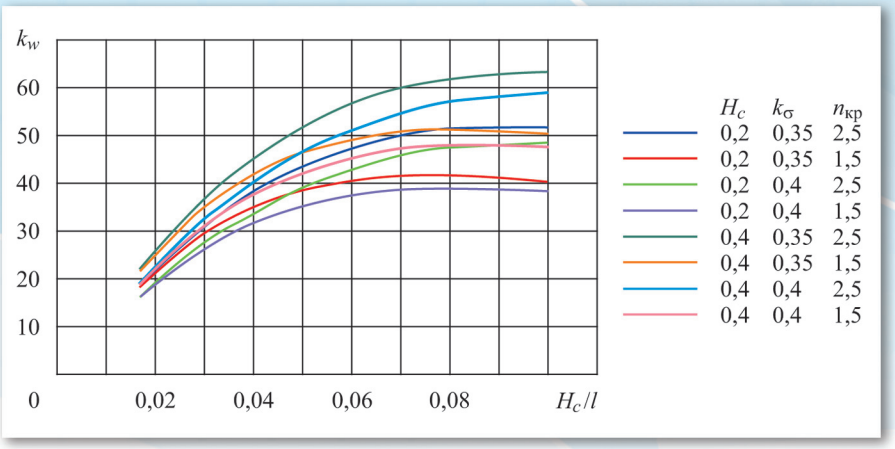


Рис. 6. Зависимость коэффициента прогиба k_w от относительной высоты профиля свободно опертой балки H_c/l, где H_c – высота «сердечника» П-образной балки

Fig. 6. Sagging coefficient k_w versus relative profile height H_c/l of simply supported beam, where H_c is "core" height of U-beam

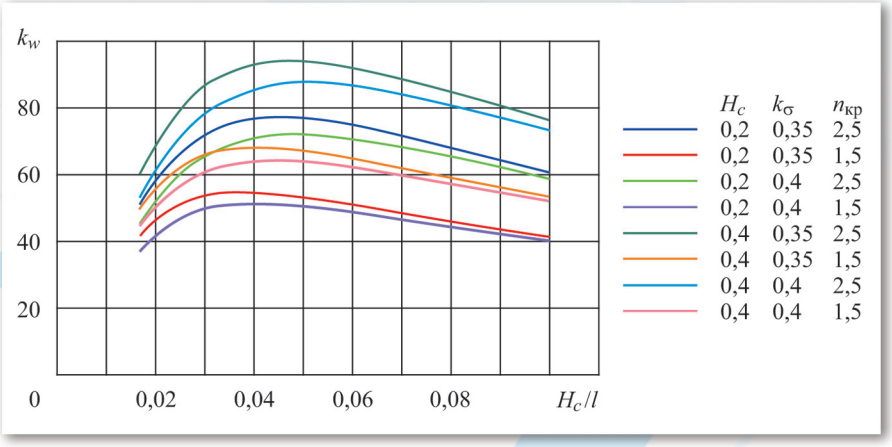


Рис. 7. Зависимость коэффициента прогиба k_w от относительной высоты профиля жестко заделанной балки H_c/l, где H_c – высота «сердечника» П-образной балки

Fig. 7. Sagging coefficient k_w versus relative profile height H_c/l of clamped beam, where H_c is "core" height of U-beam

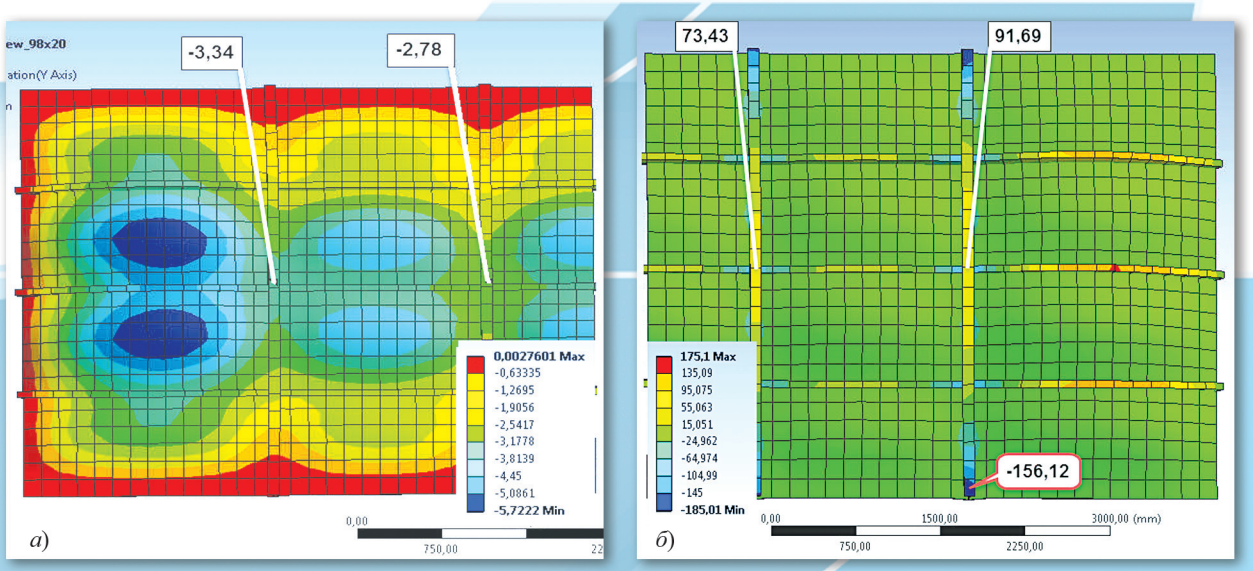


Рис. 8. Распределения прогибов (см) (*а*) и нормальных напряжений (МПа) в свободных поясках карлингсов (*б*) палубного перекрытия (показана его половина от диаметральной плоскости)

Fig. 8. Distributions of *a*) sagging, cm, and *b*) normal stresses, MPa, in free plates of deck grillage carlings (half of the grillage is shown)

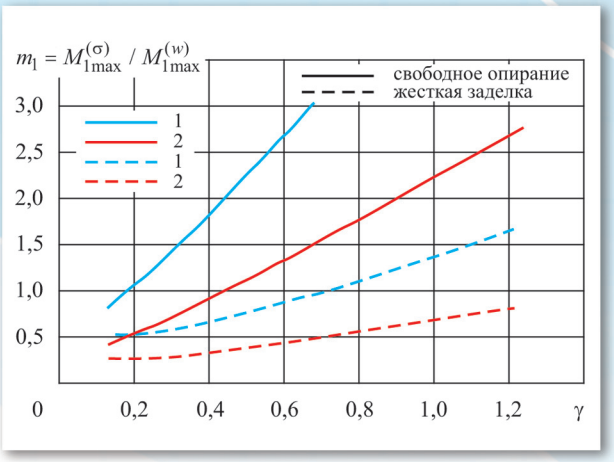


Рис. 2. Зависимость отношения моментов m_1 от параметра γ для балок П-образного профиля при свободном опирании и жесткой заделке опорных концов: 1 – k_w = 100; 2 – k_w = 50

Fig. 2. Moment ratio m_1 versus parameter γ of U-beams (freely supported and with bearing ends clamped): 1 – k_w = 100; 2 – k_w = 50

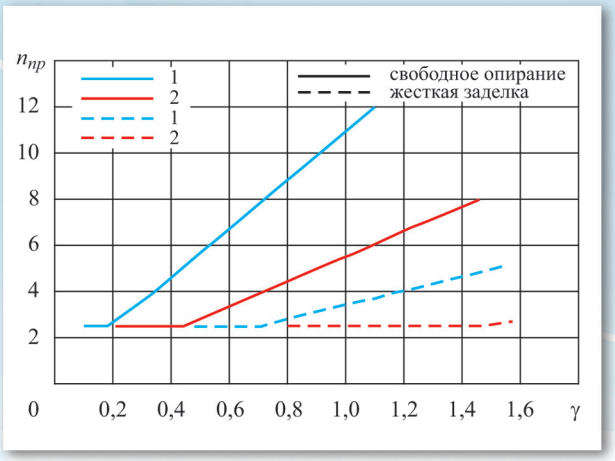


Рис. 3. Зависимость запаса прочности $n_{пр}$ от параметра γ для балок П-образного профиля при свободном опирании и жесткой заделке опорных концов: 1 – k_w = 100; 2 – k_w = 50

Fig. 3. Strength margin $n_{пр}$ versus parameter γ of U-beams (freely supported and with bearing ends clamped): 1 – k_w = 100; 2 – k_w = 50

Рис. 4. Зависимость отношения $m_2 = q^{(\sigma)}_{max}/q^{(w)}_{max}$ от длины пролета l свободно опертой балки с высотой «сердечника» профиля H_c = 0,2 м

Fig. 4. Ratio $m_2 = q^{(\sigma)}_{max}/q^{(w)}_{max}$ versus span length l of simply supported beam with profile "core" height H_c = 0.2 m

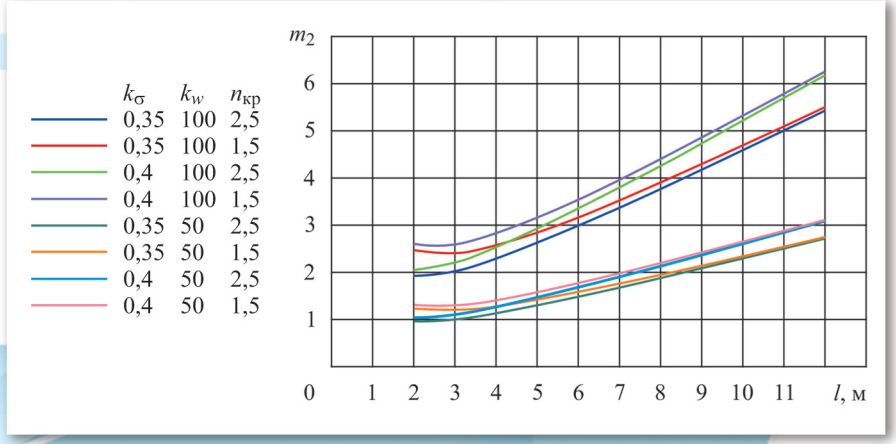
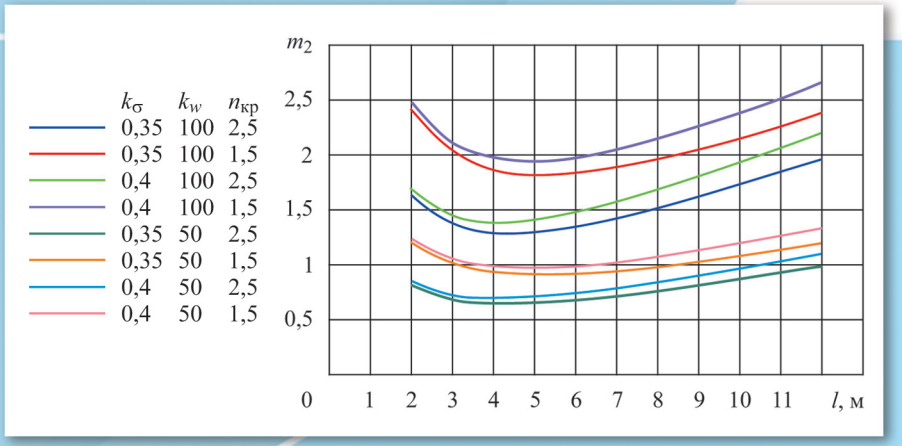


Рис. 5. Зависимость отношения $m_2 = q^{(\sigma)}_{max}/q^{(w)}_{max}$ от длины пролета l жестко заделанной балки с высотой «сердечника» профиля H_c = 0,2 м

Fig. 5. Ratio $m_2 = q^{(\sigma)}_{max}/q^{(w)}_{max}$ versus span length l of clamped beam with profile "core" height H_c = 0.2 m



Выполненные расчеты показывают, что для этих балок запас по прочности $n_{пр}$ может значительно превышать при $k_w = 100$ требуемое значение, которое определяется как $n_{пр} = k_\sigma^{-1}$.

При $k_w = 50$ в большинстве случаев на размеры поперечного сечения профиля балки накладывает ограничение требование по прочности, что отражается на величине $n_{пр}$.

Таким образом, нормируя прогиб балки при выполнении требований по устойчивости, можно получить значительное превышение требуемой величины запаса прочности, что приводит к увеличению материалоемкости и, следовательно, погонного веса.

Если прочность и устойчивость балки обеспечиваются, то возникает вопрос о том, какой прогиб она будет иметь и как он будет коррелировать с требованием по его допускаемой величине.

Для ответа на этот вопрос воспользуемся уравнениями (24)–(30), из которых величину прогиба, выраженную через k_w, найдем с учетом (8) по формуле

$$k_w = \frac{l}{w} = \frac{l}{q_{\max}^{(\sigma)} f_w}, \qquad (31)$$

где для свободно опертой балки $q^{(\sigma)}{}_{\max}$, f_w будут определяться, соответственно, по формуле (26) совместно с (27) и (25), а для балки с жестко закрепленными опорными концами – по формуле (26) совместно с (30) и (29).

Результаты определения k_w (31) представлены в виде графиков на рис. 6–7 (см. вклейку) в зависимости от относительной высоты H_c/l «сердечника» П-образной балки. Для примера были выполнены расчеты для балок с двумя размерами высоты «сердечника» $H_c = 0{,}2$; 0,4 м. Остальные геометрические параметры элементов профиля балок и характеристики материалов соответствовали указанным на страницах 32 и 34. При выполнении этих расчетов так же, как и в предыдущих случаях, было принято $k_\sigma = 0{,}35$; 0,40; $n_{кр} = 1{,}5$; 2,5.

Для свободно опертых балок величина прогиба всегда больше допускаемого ($k_w < 50$), за исключением случая $H_c = 0{,}4$ м при $n_{кр} = 2{,}5$, когда прогиб балки удовлетворяет требованию по жесткости $k_w = 50$, начиная с $H_c/l = 0{,}05$ (рис. 6).

В жестко заделанных балках прогиб, как и следовало ожидать, практически всегда меньше допускаемого ($k_w > 50$) и больше, если требование по жесткости принять равным $k_w = 100$. При этом максимум k_w достигается в диапазоне $H_c/l = 0{,}035$–0,05 (рис. 7).

Как видно из представленных расчетов, прогиб рассматриваемых балок, как свободно опертых, так и с жестко заделанными опорными концами, в большинстве случаев выходит за рамки накладываемых на него ограничений. Однако при этом их прочность и устойчивость заведомо обеспечиваются с необходимыми запасами.

Интересно отметить, что запас по устойчивости $n_{кр}$ сказывается на величине k_w значительно больше по сравнению с влиянием величины допускаемых напряжений, которые выражаются через коэффициент k_σ.

Таким образом, если исходить из необходимости обеспечения несущей способности балки, то нормирование ее жесткости является излишним при условии, что отсутствуют какие-либо функциональные ограничения на прогибы, связанные с работой оборудования, систем и устройств или дополнительные требования, например по вибрации.

В качестве примера для иллюстрации рассмотренного здесь подхода приведем результаты расчетов карлингсов и подкрепленного ими палубного перекрытия из стеклопластика реального судна.

Перекрытие длиной между поперечными переборками $L = 4$ м и шириной $B = 10{,}1$ м имеет однослойный настил толщиной 14 мм, который подкреплен 4 карлингсами Т-образного профиля и 3 бимсами П-образного профиля.

Расчеты карлингса, выполненные в КБ, как балки, жестко заделанной на переборках и нагруженной равномерно распределенным давлением, действующим на настил, $p = 0{,}029$ МПа, позволили определить размеры его свободного пояска и стенки, равные 100×20 и 250×12 мм соответственно. При этом обеспечивается требование по жесткости $k_w = 110>100$ и уровень нормальных напряжений в свободном пояске составляет 0,77 от допускаемых напряжений, равных $[\sigma_{11}] = 156$ МПа.

Используя формулы (26), (29)–(31), можно показать, что размеры свободного пояска и стенки могут быть уменьшены до 98×20 и 230×12 мм соответственно. В этом случае выполняется требование по допускаемым напряжениям $\sigma_{11} = [\sigma_{11}]$ и по запасу устойчивости, принятому для карлингса, при действии сжимающих усилий $T_1 = -132$ кН от общего изгиба. Однако при этом требование по допускаемым прогибам не выполняется: $k_w = 94<100$. Если считать такое положение допустимым, то массу карлингса можно снизить более чем на 14 %.

При расчете карлингсов с данными размерами свободного пояска и стенки в составе палубного перекрытия с помощью программного комплекса

ANSYS требование по допускаемым прогибам выполняется, $k_w = 400/3{,}34 = 120>100$ за счет поддерживающего эффекта, который оказывают бимсы (рис. 8, см. вклейку). Это говорит о том, что расчеты балок по балочной теории, которые обычно проводятся в КБ, целесообразно подтверждать их расчетами в составе перекрытий, особенно когда имеет место невыполнение тех или иных предъявляемых к ним требований.

Заключение

Conclusion

Проведенное исследование показало, что при произвольном задании для балок набора требований по прочности, жесткости и устойчивости они в ряде случаев оказываются несвязанными друг с другом.

Если исходить из необходимости обеспечения несущей способности балки, то требование по допускаемым прогибам может привести к появлению значительных запасов по прочности и устойчивости, а следовательно, к увеличению массы балок и трудоемкости их изготовления.

Учитывая это обстоятельство, к необходимости выполнения требования по жесткости балок нужно подходить избирательно. Оно должно строго выполняться, если связано с функциональными ограничениями на работу судовых механизмов, приборов и систем или обусловлено дополнительными требованиями, например необходимостью работы в условиях воздействия динамических нагрузок, в частности вибрационных. В противном случае введение ограничения на прогибы балок должно быть обосновано в зависимости от степени их ответственности, уровня нагруженности, а также условий работы.

Библиографический список

1. DNV. Rules for Classification of High Speed, Light Craft and Naval Surface. Part 3. Hull Structural Design, Fibre Composite and Sandwich Construction. 2003. P. 1–31.
2. Lloyd's Register. Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft. Part 8. Hull Construction in Composite. 2018. P. 581–721.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVI. Конструкция и прочность корпусов судов и шлюпок из стеклопластика. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2018. С. 713–739.
4. *Королев В.И.* Слоистые анизотропные пластинки и оболочки из армированных пластмасс. М.: Машиностроение, 1965.
5. *Васильев В.В.* Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988.
6. РД 5.1186-90. Корпуса и корпусные конструкции из стеклопластика. Правила проектирования и методические указания по расчетам прочности.

References

1. DNV. Rules for Classification of High Speed, Light Craft and Naval Surface. Part 3. Hull Structural Design, Fibre Composite and Sandwich Construction. 2003. P. 1–31.
2. Lloyd's Register. Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft. Part 8. Hull Construction in Composite. 2018. P. 581–721.
3. RS Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XVI. Hull structure and strength of glass-reinforced plastic ships and boats. St. Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2018, P. 713–739 (*in Russian*).
4. *V. Korolev*. Layered anisotropic plates and shells made of reinforced plastics. Moscow: Mashinostroyeniye, 1965 (*in Russian*).
5. *V. Vasilyev*. Mechanics of structures made of composite materials. Moscow: Mashinostroyeniye, 1988 (*in Russian*).
6. Regulatory Document RD 5.1186-90. Hulls and hull structures made of glass-reinforced plastic. Design rules and strength calculation guidelines (*in Russian*).

Сведения об авторе

Федонюк Николай Николаевич, к.т.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-47-74. E-mail: krylov@ksrc.ru.

About the author

Nikolay N. Fedonyuk, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-47-74. E-mail: krylov@ksrc.ru.

Поступила / Received: 29.05.19
Принята в печать / Accepted: 22.07.19
© Федонюк Н.Н., 2019