

Труды МАИ. 2024. № 135
Trudy MAI, 2024, no. 135

Научная статья

УДК 539.32.624.074.4

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179682>

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗГИБА БАЛОК ТРЕУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА

Яков Вадимович Глазюк¹, Анатолий Семенович Демидов^{2✉}, Владимир Владимирович Кашелкин³

^{1,3}Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала, Москва, Россия

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Аннотация. В статье рассматривается напряженное состояние сплошных и тонкостенных балок треугольного сечения, которые могут выполнять роль конструктивных элементов космических кораблей. Наиболее перспективными для изготовления балок считаются материалы на углеродной основе. Они имеют высокие механические и приемлемые технологические свойства, обладают также невысокой плотностью. Результатом специальных технологий изготовления таких материалов и балок из них является разномодульность, проявляющаяся при изгибе, что приводит к определенным трудностям при расчетах на прочность, так как положение нейтральной линии сечения при изгибе зависит от соотношения модулей Юнга при растяжении и сжатии. В настоящей статье изложены результаты исследования напряженного состояния изгибаемых балок сплошного и

тонкостенного треугольного сечения, приводятся примеры расчетов на прочность балок из углепластиков М46 и IMS-65, даются некоторые практические рекомендации по расчетам.

Ключевые слова: силовая рама, тонкостенные балки, балка треугольного сечения, углепластик, изгиб, напряженное состояние, механические свойства углепластиков, разномодульные материалы

Для цитирования: Глазюк Я.В., Демидов А.С., Кашелкин В.В. Исследование изгиба балок треугольного сечения из углепластика // Труды МАИ. 2024. № 135.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179682>

Original article

STUDY OF BENDING OF TRIANGULAR CROSS-SECTION CARBON FIBER BEAMS

Yakov V. Glazyuk¹, Anatoly S. Demidov², Vladimir V. Kashelkin³

^{1,3}The N.A. Dollezhal Scientific Research and Design Institute of Power Engineering, Moscow, Russia

²Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

²as-festsel@rambler.ru

Abstract. The spaceships, which are expected to fly over the next decades, include large structural assemblies. The largest of them is a refrigerator-radiator, which length may exceed one hundred meters. Its load-bearing base should be a frame made of beams of various cross-sections: round, box-shaped and triangular. At present, carbon-based structural materials are considered the most suitable for the beams manufacturing. They

demonstrate high mechanical, acceptable technological properties and they are of low density as well. The carbon-based materials specificity is that they exhibit various properties under tension and compression. Such materials are commonly referred to as multi-modular. Obviously, the difference in modularity manifests itself while bending as well. The article considers the stress state of bent solid and thin-walled beams of triangular cross-section. It leads to certain difficulties at stress computing, since the neutral section line position while bending depends on the ratio of Young modules under tension and compression. The problem under consideration is being solved in the article by the analytical method. The cross-section of the bent beam is being divided into two zones by a neutral line. Tension stresses are acting in one of the zones, while compression stresses are acting in the other one. An equilibrium equation is drawn up and formulas for the operating stresses computing are derived. Structurally, the article is divided into five parts and consists of an introduction, analysis of stresses in a bent beam of solid triangular section, the same analysis of a beam of thin-walled triangular section, examples of computing and conclusions. When analyzing the stress state, the K function is used, depending on the ratio of Young's modules for tension and compression, on the shape and size of the beam section, as well as on the neutral line position. The article presents formulas for determining maximum stresses in the cross sections. It includes five figures depicting the view of the refrigerator-radiator section, cross sections of solid and thin-walled beams, graphs of K functions for such beams. The examples include comparative results obtained with and without account for the actual position of the neutral line in the beam section. Conclusions present recommendations on the requirement to account for the

difference in modularity of carbon-based materials, which may be useful in engineering practice.

Keywords: power frame, triangular section beam, carbon fiber, bending, stress state, mechanical properties of carbon fiber

For citation: Glazyuk Ya.V., Demidov A.S., Kashelkin V.V. Study of bending of triangular cross-section carbon fiber beams. *Trudy MAI*, 2024, no. 135. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=179682>

Введение

Важными конструктивными узлами крупногабаритных космических кораблей (КК), полеты которых запланированы на ближайшие десятилетия, являются холодильники-излучатели (ХИ). Самым крупным конструктивным узлом космического корабля для межпланетных полетов в пределах Солнечной системы оказывается ХИ на тепловых трубах, размещенный на силовой балке. На рис. 1 показан возможный вид секции ХИ с некоторыми модулями [1]. Общая длина ХИ может составлять более ста метров, поэтому выбор материала для его балочных элементов является важным во всех отношениях. Предполагается, что могут быть использованы материалы на основе углерода, имеющие высокие механические (таблица 1) и приемлемые технологические свойства [2,3]. Важным достоинством является также их невысокая плотность ($1,4 - 2,2 \text{ г/см}^3$) [3].

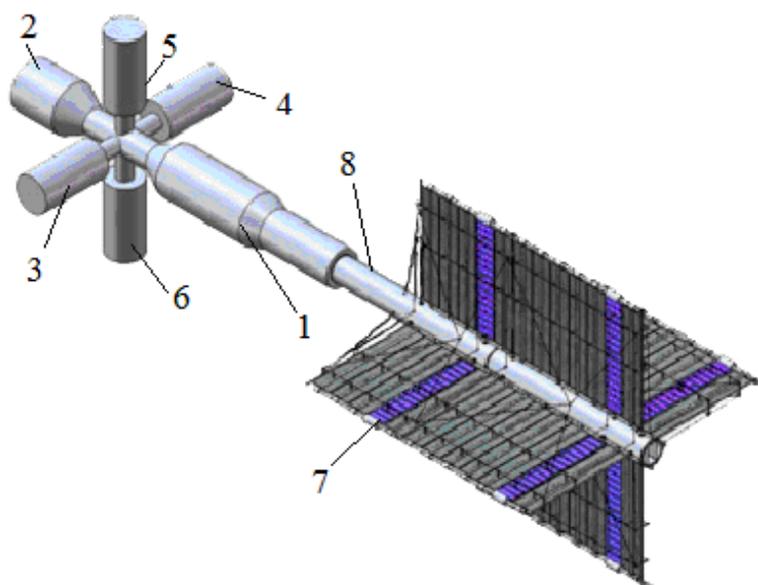


Рисунок 1 – Часть ХИ на тепловых трубах, состыкованная с жилым 1, медицинским 2, оранжерейным 3 и резервными 4, 5, 6 модулями. Показано вантовое крепление коллекторов ХИ с тепловыми трубами к центральной силовой балке 8. Панели 7 солнечных батарей размещены между секциями ХИ [1]. Энергоблок не показан, он крепится к силовой балке 8 со стороны, противоположной модулям 1 – 6.

При использовании материалов на основе углерода балочные силовые элементы ХИ могут быть изготовлены из сплошных или тонкостенных балок круглого, прямоугольного или треугольного сечения. Такие материалы, проявляющие различные свойства при растяжении и сжатии, называются разномодульными. Особенности технологии материалов на углеродной основе рассмотрены в источниках [4,5,6], разработке методики управления качеством процесса производства изделий из композитных материалов посвящена работа [7].

Некоторые специальные вопросы прочности конструктивных элементов из разномодульных материалов изложены в работах [8,9], частные случаи рассмотрены

в статье [10], общие вопросы прочности – в книге [11]. Вопросы о расчете на прочность деталей из материалов, неодинаково сопротивляющихся растяжению и сжатию, неоднократно рассматривались в технической литературе. Металлы по их свойствам было принято подразделять на три группы: пластичные, хрупко-пластичные и хрупкие [12]. К последней группе относились, в частности, специальные чугуны, твердозакаленные и инструментальные стали. Результаты испытаний [13] показали, что многие из хрупких материалов неодинаково сопротивляются растяжению и сжатию.

Методы оценки напряженного состояния элементов конструкций из разномодульных материалов имеют свои особенности. В работе [14] приведены результаты исследования концентрации напряжений в углах тонкостенных коробчатых оболочек методом фотоупругости. В статье [15] рассматривается решение задачи чистого изгиба балки прямоугольного сечения, изготовленной из авиационного сплава АК4-1Т с различными свойствами на растяжение и сжатие, нагруженной постоянным изгибающим моментом. Моделирование поведения изгибаемых тонкостенных труб [16] из авиационного сплава с демпфирующим наполнителем при предельном нагружении (вплоть до потери формы) осуществлялось расчетным (МКЭ) и экспериментальным путем. Было показано хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. Оценкой демпфирующих свойств композитов занимался автор статьи [17], в которой приведены результаты исследования слоистой композитной шарнирно опертой балки, там же предложен способ улучшения демпфирующих свойств материала. Вопросы расслоения поверхностной структуры деталей из композитных материалов

при ударной нагрузке рассматривались в статье [18]. Исследованию прочностных характеристик стальных тонкостенных балок посвящена статья [19].

В настоящей статье рассматривается напряженное состояние сплошных и тонкостенных балок треугольного сечения из углепластика при изгибе. Такой материал может быть применен, в частности, для изготовления заднего стоечного узла (ЗСУ) газотурбинного двигателя вместо металла [20], а для первичной оценки напряженно-деформированного состояния пустотелых стоек ЗСУ целесообразно использовать подход, предлагаемый в данной статье. В статье [21] рассматривается напряженно-деформированное состояние балки из разномодульного материала в условиях внецентренного продольного сжатия и поперечного давления. Особенностью расчета было то, что из-за невозможности введения нейтрального слоя отсчет его положения велся от нижнего слоя сечения балки.

1. Анализ напряженного состояния сплошной балки треугольного сечения

Рассмотрим поперечное сечение – равнобедренный треугольник.

На рисунке 2 приведено сечение балки

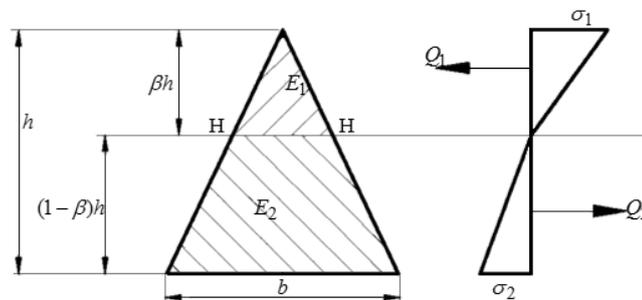


Рисунок 2 – Сечение балки и эпюра напряжений:

Н-Н – нейтральная ось

Для углепластиков принимается справедливость закона Гука, при изгибе справедливость гипотезы плоских сечений. Значение параметра β , который определяет положение нейтральной оси, определим из уравнения равновесия $Q_1 = Q_2$, где Q_1 – усилие, создаваемое напряжениями растяжения σ_1 , Q_2 – усилие, создаваемое напряжениями сжатия σ_2 .

Усилия Q_1 и Q_2 определяются по эпюрам напряжений σ_1 и σ_2 соответственно и равны:

$$Q_1 = \frac{1}{6} \sigma_1 \cdot h \cdot b \cdot \beta^2 \quad (1.1)$$

$$Q_2 = \frac{1}{6} \sigma_2 (1 - \beta) \cdot (2 + \beta) \cdot h \cdot b \quad (1.2)$$

Получим с учетом (1.1) и (1.2) уравнение равновесия:

$$E_1 \cdot \beta^3 = E_2 (1 - \beta)^2 \cdot (2 + \beta) \quad (1.3)$$

На основании уравнения равновесия (1.3) рассмотрим функцию $K(\beta) = f(\beta)$

$$K(\beta) = \frac{(1 - \beta)^2 \cdot (2 + \beta)}{\beta^3}, \quad (1.4)$$

при $0 < \beta < 1$, где $K = \frac{E_1}{E_2}$.

При значении $K = 1$, т.е. при $E_1 = E_2$, получим параметр β , равный $\frac{2}{3}$, что соответствует точному решению.

Для практических инженерных расчётов используется диапазон изменения величины β в пределах $0,4516 < \beta < 0,839$, что соответствует изменению параметра K

от 8 до 0,125. На рисунке 3 приведен график функции (1.4) для указанных выше пределов.

Изгибающий момент, действующий в рассматриваемом сечении, можно представить, как

$$\int_F \sigma y dF = \int_{F_1} \sigma_1 y dF + \int_{F_2} \sigma_2 y dF \quad (1.5)$$

Уравнение (1.5) после преобразования принимает вид

$$E_{np} \cdot J = E_1 \cdot J_1 + E_2 \cdot J_2, \quad (1.6)$$

где E_{np} – приведенный модуль упругости;

J – собственный момент инерции треугольного сечения балки;

J_1 – момент инерции сечения, где действует напряжение σ_1 относительно нейтральной оси Н-Н (рисунок 2);

J_2 – момент инерции сечения, где действует напряжение σ_2 относительно нейтральной оси Н-Н (рисунок 2).

Моменты инерции J , J_1 , J_2 равны

$$J = \frac{b \cdot h^3}{36}, \quad J_1 = \frac{b \cdot h^3}{12} \beta^4, \quad J_2 = \frac{b \cdot h^3}{12} (1 - \beta)^3 (3 + \beta) \quad (1.7)$$

С учётом выражения (1.7) получаем:

$$E_{np} = 3(E_1 \cdot \beta^4 + E_2 \cdot (1 - \beta)^3 (3 + \beta)). \quad (1.8)$$

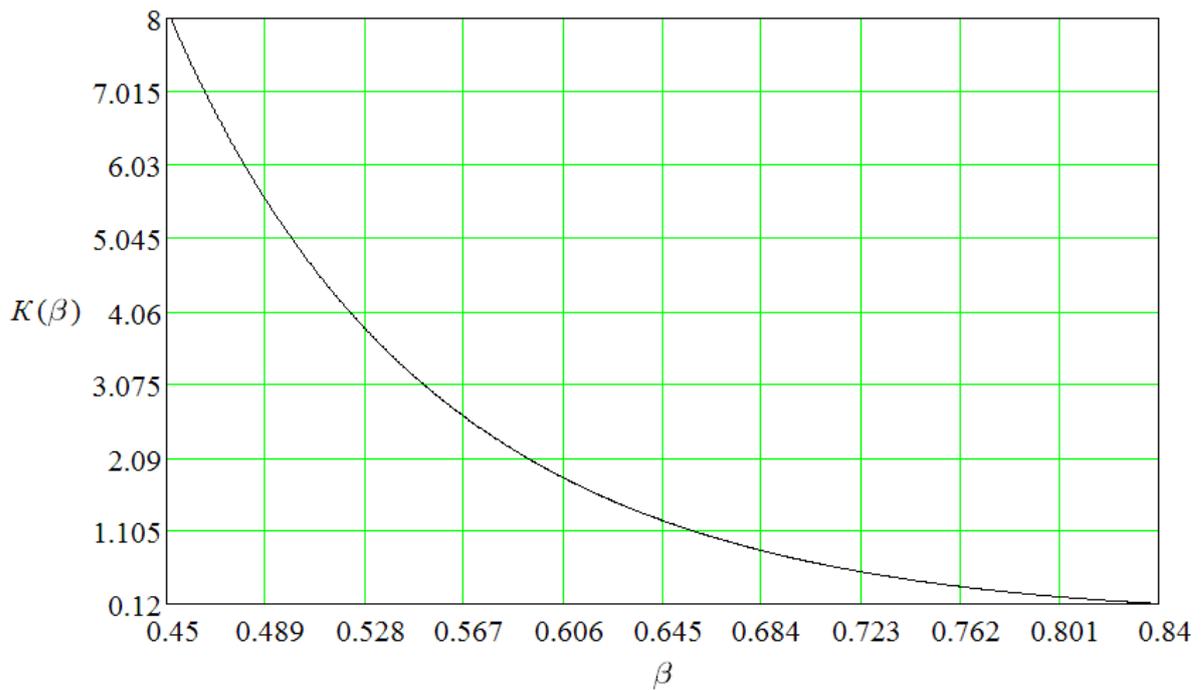


Рисунок 3 – График функции $K = f(\beta)$ при $0,12 < K < 8,0$

Действующие напряжения с учётом $M = M_1 + M_2$ равны:

$$\sigma_1 = \frac{M}{1 + \frac{E_2 J_2}{E_1 J_1}} \cdot \frac{\beta h}{J_1}, \quad \sigma_{np1} = \frac{M \cdot 2h}{3J}; \quad (1.9)$$

$$\sigma_2 = \frac{M}{1 + \frac{E_1 J_1}{E_2 J_2}} \cdot \frac{(1 - \beta)h}{J_2}, \quad \sigma_{np2} = \frac{M \cdot h}{3J}. \quad (1.10)$$

2. Анализ напряженного состояния балки тонкостенного треугольного сечения

Рассмотрим поперечное сечение балки тонкостенного равнобедренного треугольника (рисунок 4).

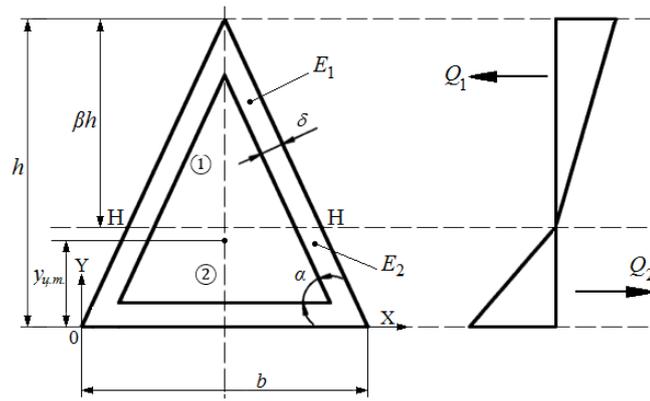


Рисунок 4 – Сечение тонкостенной балки и эпюра напряжений

Для составления уравнения равновесия рассмотрим зону 1, где модуль упругости равен E_1 , и зону 2, где модуль упругости равен E_2 . Размеры элементов в зонах 1 и 2 приведены на рисунке 4.

Усилия Q_1 и Q_2 , создаваемые напряжениями растяжения σ_1 и сжатия σ_2 , равны

$$Q_1 = \frac{1}{6} \sigma_1 h b \beta^2 \left[1 - \left(1 - \frac{2\delta}{b\beta \sin \alpha} \right)^3 \right], \quad (2.1)$$

$$Q_2 = \frac{1}{6} \sigma_2 h b (1 - \beta) \left[(2 + \beta) - \left(1 - \frac{\delta}{(1 - \beta)h} \right)^2 \cdot \left[2 \left(1 - \frac{2\delta}{b \sin \alpha} - \frac{\delta}{h} \right) + \beta \left(1 - \frac{2\delta}{b\beta \sin \alpha} \right) \right] \right]. \quad (2.2)$$

Уравнение равновесия $Q_1 = Q_2$ с учетом (2.1) и (2.2) при $K = E_1/E_2$ принимает

вид

$$K = \frac{(1 - \beta)^2 \left\{ (2 + \beta) - (1 - \gamma_2)^2 \cdot [2(1 - \gamma_3) + \beta(1 - \gamma_1)] \right\}}{\beta^3 [1 - (1 - \gamma_1)^3]}, \quad (2.3)$$

где $\gamma_1 = \frac{2\delta}{b\beta \sin \alpha}$, $\gamma_2 = \frac{\delta}{(1 - \beta)h}$, $\gamma_3 = \frac{2\delta}{b \sin \alpha} + \frac{\delta}{h}$, $\alpha = \arctg \frac{2h}{b}$.

Приведенный модуль упругости $E_{np} = \frac{E_1 \cdot J_1 + E_2 \cdot J_2}{J}$ для сечения в виде

тонкостенного равнобедренного треугольника с размерами: высота h , длина основания b , толщина δ определяется моментами инерции:

$J_{соб}$ – собственный момент инерции сечения;

J_1 и J_2 – моменты инерции сечений относительно нейтральной оси, определяемой параметром β .

$$J_{соб} = \frac{bh^3}{36} + \frac{1}{2} \left(\frac{2}{3}h - y_{ц.м.} \right)^2 \cdot bh - \frac{b_1h_1^3}{36} - \frac{1}{2} \left(\frac{2}{3}h_1 - y_{ц.м.} \right)^2 \cdot b_1h_1,$$
$$J_1 = \frac{bh^3}{12} \beta^4 \left[1 - \left(1 - \frac{2\delta}{b\beta \sin \alpha} \right)^4 \right], \quad (2.4)$$

$$J_2 = \frac{bh^3}{12} (1 - \beta)^3 \left\{ (3 + \beta) - (1 - \gamma_2)^3 \cdot [3(1 - \gamma_3) + \beta(1 - \gamma_1)] \right\},$$

где $y_{ц.м.}$ – ордината центра тяжести сечения (рис. 4),

$b_1 = b(1 - \gamma_3)$ – основание внутреннего треугольника,

$h_1 = h(1 - \gamma_3)$ – высота внутреннего треугольника.

График функции $K = f(\beta, b, h, \delta)$ по (2.3) приведен на рисунке 5.

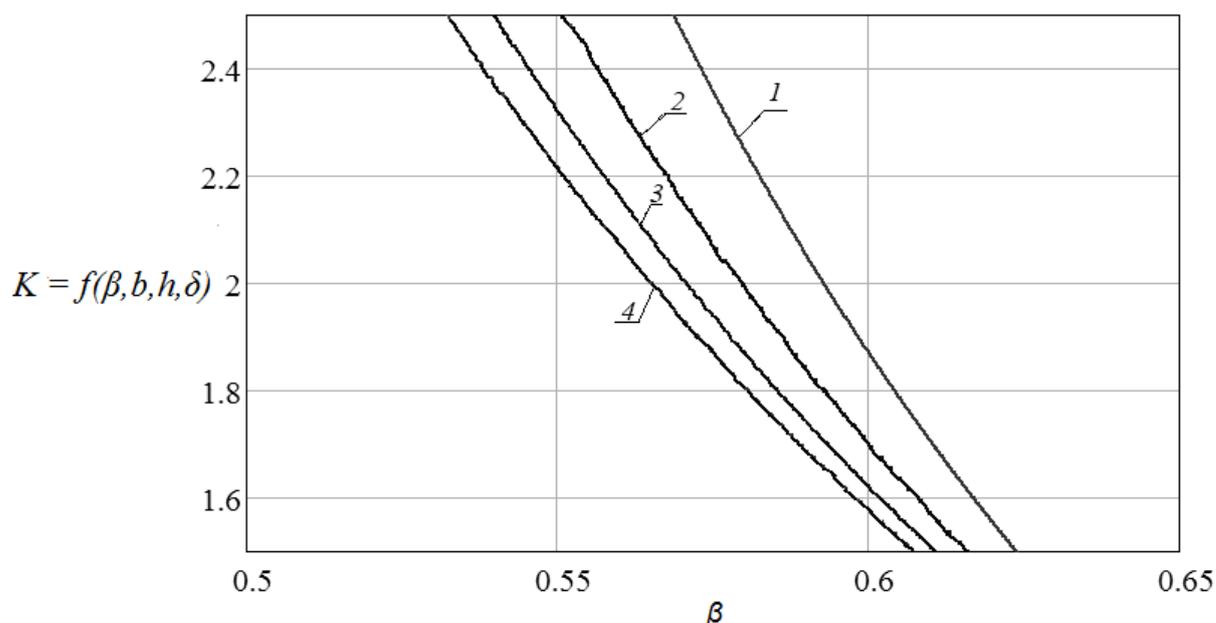


Рисунок 5 – График функции $K = f(\beta, b, h, \delta)$

при $b = 46$ мм; $h = 40$ мм;

1 – $\delta = 10$ мм; 2 – $\delta = 5$ мм; 3 – $\delta = 2,5$ мм; 4 – $\delta = 1$ мм

3. Примеры определения напряжений при изгибе балок треугольного сплошного и тонкостенного сечений (механические характеристики материалов приведены в таблице 1)

Характеристики углепластиковых материалов [10]

Таблица 1

Марка	Модуль Юнга при растяжении E_p , МПа	Модуль Юнга при сжатии $E_{сж}$, МПа	Предел прочности при растяжении σ_1 , МПа	Предел прочности при сжатии σ_2 , МПа
М46	21330	15420	1271	584
IMS-65	26880	12810	2270	610

В таблице модули Юнга и пределы прочности относятся к направлениям

ВДОЛЬ ВОЛОКОН.

Пример 1.

Рассмотрим изгиб балки сплошного треугольного сечения с размерами $h = 40$ мм, $b = 46$ мм. Материал балки углепластик IMS-65 (величина $K = E_1/E_2 = 2,09$). Этому значению K , согласно (1.4), соответствует параметр $\beta = 0,59$.

Геометрические характеристики зон растяжения «1» и сжатия «2» по формулам (1.7) равны

$$J = 8,178 \text{ см}^4, J_1 = 2,973 \text{ см}^4, J_2 = 6,03 \text{ см}^4.$$

Приведенный модуль упругости $E_{\text{пр}} = 19263$ МПа.

Напряжения в сечении балки под воздействием изгибающего момента M размерностью кгс·м равны:

$$\sigma_1 = 4,04 \cdot M, \text{ МПа; для сравнения } \sigma_{\text{пр1}} = 3,26 \cdot M, \text{ МПа;}$$

$$\sigma_2 = 1,34 \cdot M, \text{ МПа; для сравнения } \sigma_{\text{пр2}} = 1,63 \cdot M, \text{ МПа.}$$

Пример 2.

Если рассмотренная в примере 1 балка изготовлена из углепластика М46, то величина $K = 1,383$. Этому значению K , согласно (1.4), соответствует параметр $\beta = 0,634$.

Геометрические характеристики зон растяжения «1» и сжатия «2» равны

$$J = 8,178 \text{ см}^4, J_1 = 3,949 \text{ см}^4, J_2 = 4,389 \text{ см}^4.$$

Приведенный модуль упругости $E_{пр} = 18534$ МПа.

Напряжения в сечении балки под воздействием изгибающего момента M размерностью кгс·м равны

$$\sigma_1 = 3,56 \cdot M, \text{ МПа; для сравнения } \sigma_{пр1} = 3,26 \cdot M, \text{ МПа;}$$

$$\sigma_2 = 1,49 \cdot M, \text{ МПа; для сравнения } \sigma_{пр2} = 1,63 \cdot M, \text{ МПа.}$$

Пример 3.

Рассмотрим балку тонкостенного сечения с размерами $h = 40$ мм, $b = 46$ мм, $\delta = 2,5$ мм. Материал балки углепластик IMS-65. Для этого материала $K = 2,09$. Этому значению K , согласно (2.3), соответствует параметр $\beta = 0,564$.

Геометрические характеристики зон растяжения «1» и сжатия «2» по формулам (2.4) равны

$$J = 4,622 \text{ см}^4, J_1 = 1,575 \text{ см}^4, J_2 = 3,596 \text{ см}^4.$$

Приведенный модуль упругости $E_{пр} = 19045$ МПа.

Напряжения в сечении балки под воздействием изгибающего момента M размерностью кгс·м равны

$$\sigma_1 = 6,86 \cdot M, \text{ МПа; для сравнения } \sigma_{пр1} = 5,76 \cdot M, \text{ МПа;}$$

$$\sigma_2 = 2,53 \cdot M, \text{ МПа; для сравнения } \sigma_{пр2} = 2,88 \cdot M, \text{ МПа.}$$

Пример 4.

Рассмотрим балку с размерами из примера 3, изготовленную из углепластика М46. В этом случае $K = 1,383$, параметр $\beta = 0,6225$.

Геометрические характеристики зон растяжения «1» и сжатия «2» по формулам (2.4) равны

$$J = 4,622 \text{ см}^4, J_1 = 2,183 \text{ см}^4, J_2 = 2,538 \text{ см}^4.$$

Приведенный модуль упругости $E_{пр} = 18541$ МПа.

Напряжения в сечении балки под воздействием изгибающего момента M размерностью кгс·м равны

$$\sigma_1 = 6,2 \cdot M, \text{ МПа; для сравнения } \sigma_{пр1} = 5,76 \cdot M, \text{ МПа;}$$

$$\sigma_2 = 2,72 \cdot M, \text{ МПа; для сравнения } \sigma_{пр2} = 2,88 \cdot M, \text{ МПа.}$$

Выводы

Расчёты показали, что если сплошная балка имеет сечение простой геометрической формы, то при соотношении модулей Юнга, равном 1,4, разность между напряжениями σ_1 и $\sigma_{пр1}$ или σ_2 и $\sigma_{пр2}$ достигает уже более 10%. Решение о том, какие формулы использовать, целесообразно принимать, увязывая этот вопрос с величиной заданного запаса прочности.

Еще более важным оказывается выбор формул для коробчатых и тонкостенных (ленточных) сечений, так как они оказываются более чувствительными к геометрическим характеристикам. В этом случае применять более точные формулы целесообразно практически всегда.

Список источников

1. Андреев П.В., Демидов А.С., Ежов Н.И. и др. Космические ядерные энергоустановки и электроракетные двигатели. Конструкция и расчет деталей. - М.: Изд-во МАИ, 2014. – 507 с.
2. Мелешко А.И., Половников С.П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. – М.: «Сайнс-Пресс», 2007. – 192 с.
3. Симамура С., Синдо А., Коцука К. и др. Углеродные волокна. - М.: Мир, 1987. – 304 с.
4. Рач В.А., Тарасов Ю.М., Воскобойников В.Н., Малков И.В. Технология интегральной намотки пространственных ферменных конструкций космических аппаратов из углепластика // 4-ая Московская международная конференция «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ)»: сборник трудов. - М.: 2005. С. 425–429.
5. Халиулин В.И., Батраков В.В. Технология производства изделий из композитов: технология интегральных конструкций. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2018. - 192 с.
6. Братухин А.Г., Боголюбов В.С., Сироткин О.С. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении. - М.: Готика, 2003. – 515 с.
7. Братухин А.Г. Технологическое обеспечение высокого качества, надежности, ресурса авиационной техники. - М.: Машиностроение, 1996. – 297 с.
8. Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости. – М.: Наука, 1982. – 217 с.

9. Пахомов Б.М. Вариант модели разномодульного материала // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2017. № 6. С. 35–48.
10. Кашелкин В.В., Демидов А.С., Капустин Е.А. Оценка напряженного состояния балок круглого и кольцевого сечения из материалов с различными свойствами на растяжение и сжатие // Космические аппараты и технологии. 2022. № 3(41). Т. 6. С. 128-136.
11. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 744 с.
12. Пономарев С.Д., Бидерман В.Л., Лихарев К.К. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. - М.: Машгиз, 1958, Т. 2. – 974 с.
13. Шапочников Н.А. Механические испытания металлов. – М.: Машгиз, 1954. – 443 с.
14. Хомовский Я.Н. Оценка напряжённо-деформированного состояния конструктивных схем прямоточных воздушно-реактивных двигателей для высокоскоростных летательных аппаратов на ранней стадии проектирования: дисс. канд. техн. наук, 2018, МАИ. – 188 с.
15. Кузнецов Е.Б., Леонов С.С. Чистый изгиб балки из разномодульного материала в условиях ползучести // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2013. Т. 6. № 4. С. 26–38.
16. Гончаров Р.Б., Зузов В.Н., Чайко Д.Н. Моделирование поведения тонкостенных труб с разными наполнителями при предельном нагружении применительно к решению проблем пассивной безопасности автомобилей // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 3. С. 1–14.

17. Кривень Г.И. Оценка демпфирующих свойств композитов // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170333>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-05](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-05)
18. Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Расчетно-экспериментальное исследование поведения плоской подкрепленной панели из углепластика при ударе // Труды МАИ. 2022. № 126. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168990>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-04](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-04)
19. Яковлева Е.Л., Атавин И.В., Казакова Ю.Д., Максудов И.Х. Прочностные характеристики тонкостенных элементов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 12 (63). С. 125–139.
20. Рябов А.А., Железов С.А., Речкин В.Н. и др. Анализ эффективности компьютерных технологий моделирования термонапряженного состояния заднего стоечного узла ГТД // Труды МАИ. 2010. № 41. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=23813>
21. Товстик П.Е., Шеховцов А.С. Нелинейный изгиб балки из разномодульного материала // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия: Математика. Механика. Астрономия. 2007. № 4. С. 47-51.

References

1. Andreev P.V., Demidov A.S., Ezhov N.I. et al. *Kosmicheskie yadernye energoustanovki i elektroraketnye dvigateli. Konstruktsiya i raschet detalei* (Space nuclear power plants

and electric rocket engines. Design and calculation of parts), Moscow, Izd-vo MAI, 2014, 507 p.

2. Meleshko A.I., Polovnikov S.P. *Uglerod, uglerodnye volokna, uglerodnye kompozity* (Carbon, carbon fibers, carbon composites), Moscow, «Sains-Press», 2007, 192 p.

3. Simamura S., Sindo A., Kotsuka K. et al. *Uglerodnye volokna* (Carbon fibers), Moscow, Mir, 1987, 304 p.

4. Rach V.A., Tarasov Yu.M., Voskoboinikov V.N., Malkov I.V. *4-aya Moskovskaya mezhdunarodnaya konferentsiya «Teoriya i praktika tekhnologii proizvodstva izdelii iz kompozitsionnykh materialov i novykh metallicheskih splavov (TPKMM)»: sbornik trudov*. Moscow, 2005, pp. 425–429.

5. Khaliulin V.I., Batrakov V.V. *Tekhnologiya proizvodstva izdelii iz kompozitov: tekhnologiya integral'nykh konstruksii* (Технология производства изделий из композитов: технология интегральных конструкций), Kazan', Izd-vo KNITU-KAI, 2018, 192 p.

6. Bratukhin A.G., Bogolyubov V.S., Sirotkin O.S. *Tekhnologiya proizvodstva izdelii i integral'nykh konstruksii iz kompozitsionnykh materialov v mashinostroenii* (Technology of production of articles and integral structures from composite materials in mechanical engineering), Moscow, Gotika, 2003, 515 p.

7. Bratukhin A.G. *Tekhnologicheskoe obespechenie vysokogo kachestva, nadezhnosti, resursa aviatsionnoi tekhniki* (Technological support of high quality, reliability, service life of aviation equipment), Moscow, Mashinostroenie, 1996, 297 p.

8. Ambartsumyan S.A. *Raznomodul'naya teoriya uprugosti* (Multi-module theory of elasticity), Moscow, Nauka, 1982, 217 p.

9. Pakhomov B.M. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Seriya Mashinostroenie*, 2017, no. 6, pp. 35–48.
10. Kashelkin V.V., Demidov A.S., Kapustin E.A. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii*, 2022, no. 3(41), vol. 6, pp. 128-136.
11. Rabotnov Yu.N. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* (Mechanics of deformable solids), Moscow, Nauka, 1979, 744 p.
12. Ponomarev S.D., Biderman V.L., Likharev K.K. et al. *Raschety na prochnost' v mashinostroenii* (Strength calculations in mechanical engineering), Moscow, Mashgiz, 1958, vol. 2, 974 p.
13. Shapochnikov N.A. *Mekhanicheskie ispytaniya metallov* (Mechanical testing of metals), Moscow, Mashgiz, 1954, 443 p.
14. Khomovskii Ya.N. *Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruktivnykh skhem pryamotochnykh vozdushno-reaktivnykh dvigatelei dlya vysokoskorostnykh letatel'nykh apparatov na rannei stadii proektirovaniya* (Assessment of the stress-strain state of structural schemes of ramjet engines for high-speed aircraft at an early design stage), Doctor's thesis, 2018, MAI, 188 p.
15. Kuznetsov E.B., Leonov S.S. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programirovanie*, 2013, vol. 6, no. 4, pp. 26–38.
16. Goncharov R.B., Zuzov V.N., Chaiko D.N. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2019, no. 3, pp. 1–14.
17. Kriven' G.I. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170333>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-05](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-05)

18. Martirosov M.I., Khomchenko A.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 126. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168990>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-04](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-04)
19. Yakovleva E.L., Atavin I.V., Kazakova Yu.D., Maksudov I.Kh. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdanii i sooruzhenii*, 2017, no. 12 (63), pp. 125–139.
20. Ryabov A.A., Zhelezov S.A., Rechkin V.N. et al. *Trudy MAI*, 2010, no. 41. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=23813>
21. Tovstik P.E., Shekhovtsov A.S. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Astronomiya*, 2007, no. 4, pp. 47-51.

Статья поступила в редакцию 12.02.2024

Одобрена после рецензирования 28.02.2024

Принята к публикации 26.04.2024

The article was submitted on 12.02.2024; approved after reviewing on 28.02.2024; accepted for publication on 26.04.2024