

Ю. В. Немировский

РАЦИОНАЛЬНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ СТРУКТУР АРМИРОВАНИЯ И ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ОСЕВОМ НАГРУЖЕНИИ КОМПОЗИТНЫХ СТЕРЖНЕЙ

*Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
г. Новосибирск, Россия*

Аннотация. Для композитных стержней с произвольными постоянными поперечными сечениями и кусочно-постоянными вдоль оси усиливающими структурами различной фазовой природы нагружаемых осевыми нагрузками, установлены общие зависимости между параметрами геометрических структур, физико-механических характеристик материалов и координатами приложения осевых нагрузок, обеспечивающих рациональное по сечению поле деформаций. На основании концепции слабейшего звена, сформулированы критерии определения первой (предельной упругой) и второй предельной нагрузки (нагрузки предразрушения).

Ключевые слова: композитные гибридные стержни, металло-пластики, бетоно-пластики, дерево-пластики, металло-керамические структуры, критерии предельных деформаций, предельные нагрузки.

DOI: 10.26293/chgpu.2019.39.1.002

УДК: 539.374

Введение.

Прямолинейные стержни постоянного и переменного сечения широко используются в качестве опорных и соединительных элементов в различных отраслях машиностроения, авиа- и судостроения, в гражданских и промышленных строительных объектах. В процессе эксплуатации они подвергаются интенсивным кратковременным силовым, температурным, химическим и кинематическим воздействиям и силу производства однотипных серийных элементов к ним предъявляются повышенные требования надежной эксплуатации при кратковременных и длительных режимах. При

© Немировский Ю. В., 2019

Немировский Юрий Владимирович

e-mail: nemirov@itam.nsc.ru, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, Россия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 17-41-210272, 19-01-00038.

Поступила 11.02.2019

современных экономических условиях эти требования практически не могут быть реализованы при использовании традиционных конструкционных материалов и поэтому в последние десятилетия активно развиваются технологии создания гибридных композиционных конструкций, в которых материалы различной физической природы могут работать совместно для достижения единой цели: длительной и надежной эксплуатации при разумных расходах на ее поддержание. В настоящее время разработаны простые технологические приемы склейки, сварки, наплавки, напыления тонких покрытий, высокотемпературной поверхностной обработки, химической пропитки, технологии производства дисперсно-упрочненных и направленно-армированных материалов на основе процессов склейки, выкладки или намотки тонких лент или волокон различной физической природы [1-27]. С технологической точки зрения на сегодняшний день можно сформировать без особых ограничений практически любые по форме гибридные конструкции из выбранных по физической природе типов материалов с заранее определенной топологией их расположения, однако при этом отсутствуют методы прогнозирования в заданных режимах эксплуатации возникающих полей внутреннего сопротивления и их изменений при изменении внешних полей воздействия и внутренней структуры. Для их разработки необходимо проводить серии контрольных испытаний образцов-свидетелей для каждого из входящих фазовых материалов, сформировать требования к последующим внешним температурно-силовым воздействиям, критерии предельного деформирования и критерии приемлимых качеств созданных конструкций (по экономическим, жесткостным и эксплуатационным ограничениям). На их основе необходимо устанавливать взаимосвязи между полями внешних воздействий, внутренних топологических структур расположения фазовых материалов и геометрическими параметрами форм созданных конструкций для установления наиболее рациональных режимов эксплуатации. Реализовать подобную программу исследований сегодня практически невозможно. Прежде всего потому, что для широкого класса материалов можно получить надежную информацию по их физико-механическим характеристикам лишь на основе испытаний однородных одномерных образцов свидетелей [1, 2, 6-13, 16-23, 26-28]. Поэтому мы рассмотрим сформулированную проблему для длинных гибридных стержней, нагружаемых осевыми нагрузками сжатия или растяжения.

1. Формулировка задачи и основные уравнения.

Рассмотрим призматический или цилиндрический гибридный стержень с площадью поперечного сечения $S = \bigcup_{i=1}^n S_i$, где S_i – площадь поперечного сечения i -го фазового материала (изотропного, дисперсно-упрочненного, слоистого, слоисто-волоконистого) и будем связывать со стержнем систему декартовых координат x, y, z так, чтобы ось x проходила через точку образующей стержня параллельно линии осевого нагружения, а оси y и z находились в плоскости перпендикулярной оси нагружения (рис. 1а, 1б).

Предполагается, что все фазовые включения имеют формы цилиндров или призм с осями параллельными оси x , их физико-механические характеристики не зависят от координаты x , но могут зависеть от координат y, z , а поперечные размеры всех фазовых областей намного меньше длины рассматриваемого стержня. Будем считать, что при качественных технологических режимах изготовления, соединения фазовых материалов является идеальными (без пор и отслоений), так что при последующих нагружениях стержень деформируется как монолитная сплошная среда. Считаем также, что созданный стержень не подвергается на поверхности воздействию нормальных и

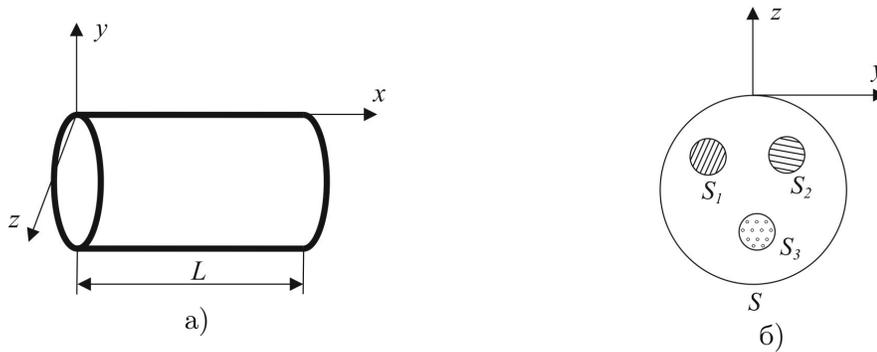


Рис. 1.

(или) касательных распределенных нагрузок. Как показывают многие расчеты и эксперименты, в этом случае все компоненты тензоров деформаций и напряжений будут существенно ниже компонентов осевой деформации ε_{xx} и осевого напряжения σ_{xx} во всех фазовых материалах.

Если ввести вектор перемещения точек на отчетной оси стержня

$$\vec{U}_0 = u_0(x)\vec{i} + v_0(x)\vec{j} + w_0(x)\vec{k}, \quad (1)$$

($\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные орты осей выбранной системы координат), то пользуясь для рассматриваемого гибридного стержня традиционными и многократно проверенными экспериментально гипотезами Кирхгофа-Лява для осевой деформации получим выражение

$$\varepsilon = \varepsilon_{xx}(x, y, z) = e_0(x) + \kappa_y z + \kappa_z y, \quad (2)$$

$$e(x) = \frac{du_0}{dx}, \quad \kappa_y = -\frac{d^2 w_0}{dx^2}, \quad \kappa_z = -\frac{d^2 v_0}{dx^2}, \quad w_0 = w_0(x). \quad (3)$$

Многие фазовые материалы ведут себя существенно по-разному в условиях растяжения и сжатия (армированные и неармированные бетоны, керамики, полимеры, дерево, модифицированные стали и цветные сплавы, армированные металлические сплавы). Некоторые приобретают свойства в процессе технологической переработки, некоторые проявляют и сохраняют их, как присущие по своей физической природе [1-23, 26-28].

Поэтому для i -го фазового материала будем использовать законы деформирования в форме

$$(\sigma_{xx})_i = A_i(x, y)\varepsilon + B_i(x, y)\varepsilon^2, \quad (4)$$

$A_i(x, y), B_i(x, y)$ – известные функции, а ε определяется по формулам (2), (3).

Поля напряжений (4) порождают в сечении стержня усилие N и моменты M_y, M_z внутреннего сопротивления

$$N = \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} (\sigma_{xx})_i dydz = C_1 e + C_2 \kappa_y + C_3 \kappa_z + C_4 e^2 + C_5 \kappa_y^2 + C_6 \kappa_z^2 + \\ + C_7 \kappa_y \kappa_z + C_8 e \kappa_y + C_9 e \kappa_z, \quad (5)$$

$$M_y = \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} (\sigma_{xx})_i z dydz = D_1 e + D_2 \kappa_y + D_3 \kappa_z + D_4 e^2 + D_5 \kappa_y^2 + D_6 \kappa_z^2 + \\ + D_7 \kappa_y \kappa_z + D_8 e \kappa_y + D_9 e \kappa_z, \quad (6)$$

$$M_z = \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} (\sigma_{xx})_i y dydz = E_1 e + E_2 \kappa_y + E_3 \kappa_z + E_4 e^2 + E_5 \kappa_y^2 + E_6 \kappa_z^2 + \\ + E_7 \kappa_y \kappa_z + E_8 e \kappa_y + E_9 e \kappa_z, \quad (7)$$

где

$$C_1 = \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} A_i(y, z) dydz, \quad C_2 = \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} A_i(y, z) dydz, \\ C_3 = \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} A_i(y, z) y dydz, \quad C_4 = \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} B_i(y, z) dydz, \\ C_5 = \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} B_i(y, z) z^2 dydz, \quad C_6 = \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} B_i(y, z) y^2 dydz, \\ D_1 = C_2, \quad D_2 = \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} A_i(y, z) z^2 dydz, \quad D_3 = \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} A_i(y, z) y z dydz, \\ D_4 = \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} B_i(y, z) z dydz, \quad D_5 = \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} B_i(y, z) z^3 dydz, \\ D_6 = \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} B_i(y, z) y z^2 dydz, \quad D_7 = 2 \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} B_i(y, z) y z^2 dydz, \\ D_8 = 2 \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} B_i(y, z) z^2 dydz, \quad D_9 = 2 \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} B_i(y, z) y z dydz, \quad (8)$$

$$E_1 = C_3, \quad E_2 = D_3, \quad D_3 = \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} A_i(y, z) y^2 dydz, \quad E_4 = \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} B_i(y, z) y dydz,$$

$$E_5 = D_6, \quad E_6 = \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} B_i(y, z) y^2 z dydz, \quad E_7 = 2 \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} B_i(y, z) y^2 z dydz,$$

$$E_8 = 2 \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} B_i(y, z) y z dydz, \quad E_9 = 2 \sum_{i=1}^n \int \int_{S_i} B_i(y, z) y^2 dydz,$$

Если внешняя осевая сила P проходит через в точку в поперечном сечении с координатами (ξ, η) , то будем иметь выражения

$$N = P, \quad M_z = P\xi, \quad M_y = P\eta. \quad (9)$$

Соотношения (1)-(8) устанавливают связи между полями внутренней структуры, формой конструкции, действующими внешними нагрузками, напряжениями и деформациями. Поскольку поля внутренней структуры и форма связанного гибридного стержня не могут быть изменены, то создание благоприятных изменений полей деформаций и внутренних напряжений возможно лишь за счет управления внешними нагрузками.

2. Дополнительные требования к рациональным структурам.

Как отмечалось выше в процессе технологической переработки в требуемое изделие многие конструкционные материалы приобретают значительно отличающиеся как качественно, так и количественно свойства в условиях растяжения и сжатия. Естественным требованием рациональных структур должно выступать требование сохранения знака деформаций. Это возможно если линии нулевой деформации будут реализованы при необходимом нагружении на контурных или законтурных образующих линий рассматриваемого стержня. Пусть $\Phi(y_t, z_t) = 0$ — уравнение образующих линии, а (y_t, z_t) ее параметрические координаты в некоторой точке. Если эта точка будет нейтральной точкой деформации, то для нее будем иметь

$$e + z_t \kappa_y + y_t \kappa_z = 0. \quad (10)$$

Учитывая это равенство и зависимости (2)-(9) после исключения амплитуды действующих нагрузок P получим выражения для координат ξ_t, η_t согласованной границы области приложения нагрузок, для которой деформации будут сохранять знак во всем сечении стержня

$$\xi_t = \frac{r_1 + r_2 \xi_2 + r_3 \xi_2^2}{p_1 + p_2 \xi_2 + p_3 \xi_2^2}, \quad \eta_t = \frac{s_1 + s_2 \xi_2 + s_3 \xi_2^2}{p_1 + p_2 \xi_2 + p_3 \xi_2^2}, \quad (11)$$

$$\xi_2 = \frac{\xi_z}{e}, \quad \xi_1 = \frac{\xi_y}{e}, \quad \xi_1 = \frac{1}{z_t} - \frac{y_t}{z_t} \kappa_2. \quad (12)$$

Коэффициенты $p_1, p_2, p_3, r_1, r_2, r_3, s_1, s_2, s_3$ зависят от внутренней структуры $C_1, \dots, C_9, D_1, \dots, D_9, E_1, \dots, E_9$, форму образующую контур (y_t, z_t) и не зависят от величины P прилагаемого усилия. Формулы для коэффициентов могут быть легко получены и не приводятся здесь в силу громоздкости.

Для установления предельных уровней допустимого нагружения и поиска рациональных структур армирования далее необходимо сформулировать дополнительные требования по условиям работы используемых материалов. Например, требование, чтобы все используемые материалы при нагружении работали в пределах упругости. Тогда в выражениях (4) для всех фазовых материалов следует принять все $V_i(x, y) = 0$ и с учетом этого упростить все последующие соотношения, в том числе — коэффициенты p_1, \dots, s_3 в условиях согласования. Затем сканируя по t сечение стержня и решая задачу определения минимально допустимой предельной упругой деформации $\varepsilon_0 = \min(\varepsilon_i^0)$, где ε_i^0 — предельно упругая деформация i -го фазового материала. И затем из первой из формул (9) определить первую предельную нагрузку P_0 (предельную нагрузку упругого деформирования).

Изменяя положение координат точки приложения осевой нагрузки с учетом условий согласования полей нагружения и параметров внутренних структур можно искать максимально возможное увеличение первой предельной нагрузки. Если хотя бы для одного материала при деформировании допускается требование $B_i(x, y) \neq 0$, то далее речь можно вести лишь о второй предельной нагрузке (нагрузке предразрушения) P^* , при которой в рамках концепции слабейшего звена по вышеописанной схеме в одном из неупруго деформирующихся материалов будет достигнута допустимая предельная деформация предразрушения ε^* . Следует подчеркнуть, что достижение первой или второй предельной нагрузки не означает прекращение его функционирования. За счет перераспределения полей напряжений и деформаций между фазовыми материалами он может еще долго и успешно функционировать в ходе развития начинающегося процесса разрушения. Однако эти проблемы требуют отдельное исследование.

Отметим здесь также, что при воздействии сжимающих нагрузок для стержней превышающих некоторую критическую длину исчерпание несущей способности может наступать при амплитудах нагрузок значительно меньших чем первая или вторая предельные нагрузки за счет потери устойчивости при упругих или неупругих деформациях. Приближенное решение соответствующей задачи можно получить, используя концепцию Р.Шенли о продолжающемся догружении в момент потери устойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Цискарели Г. Д. Сопротивление растяжению неармированных и армированных бетонов. М.: Государственное издательство по строительству и архитектуре, 1954. 152 с.
- [2] Немировский Ю. В., Болтаев А. И. Диаграммы деформирования бетонов и железобетона // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2015. № 6. С. 5–13.
- [3] Немировский Ю. В., Батулин А. А. Расчет состояний предразрушения изгибаемых балок из разносопротивляющихся материалов // Труды НГАСУ. 2015. Т. 16. № 2(56). С. 32–44.
- [4] Немировский Ю. В. Метод расчета композитных стержневых систем из разномодульных материалов / Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы V Всероссийской научной конференции. Томск: Изд-во ТГУ, 2006. С. 288–290.
- [5] Мищенко А. В., Немировский Ю. В. Нелинейное деформирование бетонных элементов при продольно-поперечном изгибе // Известия вузов. Строительство. 2013. № 4. С. 3–12.
- [6] Немировский Ю. В. Допредельное деформирование гибридных армированных бетонных конструкций // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2018. № 3(37). С.26–37.
- [7] Карпенко Н. И., Круглов В. М., Соловьев Л. Ю. Нелинейное деформирование бетона и железобетона. Новосибирск: Издательство Сибирского государственного университета путей и сообщений, 2002. 275 с.
- [8] Алиев М. М., Каримова Н. Г. Вариант критерия прочности для изотропных полимеров // Вестник СамГУ. Естественно-научная серия. 2008. № 3(62). С. 217–226.
- [9] Альтенбах Х., Тушнев К. Новый критерий статической прочности изотропных полимеров // Механика композитных материалов. 2001. Т. 37. № 5/6. С. 732–739.

- [10] Алиев М. М., Шифиева С. В. Новые полиномиальные критерии прочности для разнопрочных материалов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2012. № 3. С. 87–91.
- [11] Алиев М. М., Шафиева С. В., Волкова О. Н., Шипилова О. А. Разработка критериев прочности изотропных и армированных полимеров методом разложения в ряды // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2018. № 3(37). С. 152–161
- [12] Пономарев С. Д., Бидерман В. Л., Лихарев К. К. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. Т. 2. Москва: Машгиз, 1958. 974 с.
- [13] Немировский Ю. В., Мищенко А. В., Вохмянин И. Т. Рациональное и оптимальное проектирование слоистых стержневых систем. Новосибирск: Наука, 2004. 188 с.
- [14] Король В. К., Гиллергог М. С. Основы производства многослойных материалов. М.: Металлургия, 1972. 277 с.
- [15] Немировский Ю. В. Второе предельное состояние однородных и композитных балок // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2009. № 1. С. 150–159
- [16] Лихарев К. К. Сопоставление характеристик материалов при одноосном растяжении и сжатии / Сб. Расчеты на прочность в машиностроении. М.: Машгиз, 1958
- [17] Конюшко Э. М. Исследование прочности термически обработанной стали при растяжении и сжатии // Вестник машиностроения. 1955. № 2.
- [18] Хрулев В. М. Технология и свойства композиционных материалов для строительства. Учебное пособие для строительного-технологической специальности вузов. Уфа: ТАУ, 2001. 168 с.
- [19] Кржижановский В. К., Бурлов В. В., Паниматченко А. Д., Крыжановская Ю. В. Технические свойства полимерных материалов. Учебно-справочное пособие / под ред. проф. В. К. Крыжановского. 2-е издание исправл. и дополн. СПб.: Профессия, 2005. 248 с.
- [20] Новиков В. У. Полимерные материалы для строительства. Справочник. М.: Высшая школа, 1995. 448 с.
- [21] Шалун Г. В., Сурженко Е. М. Слоистые пластинки. Л.: Химия, 1978. 232 с.
- [22] Крысин В. Н., Крысин М. В. Технологические процессы формирования, намотки и склеивания конструкций. М.: Химия, 1989. 246 с.
- [23] Калинин Э. Л., Саковцева М. Б. Выбор пластмасс для изготовления и эксплуатации изделия. Л.: Химия, 1987. 416 с.
- [24] Кардашов Д. А. Синтетические клеи. М.: Химия, 1968. 592 с.
- [25] Петрова А. П. Термостойкие клеи. М.: Химия, 1977. 200 с.
- [26] Соломатов В. И., Клюкин В. И., Кочнева Л. Ф. и др. Армополимер бетон в транспортном строительстве. М.: Транспорт, 1979. 232 с.
- [27] Баженов Ю. М. Бетнополимеры. М.: Стройиздат, 1983. 472 с.
- [28] Вигдорович А. И., Сагалаев Г. В., Поздняков А. А. Древесные композиционные материалы. Справочник, 2-е изд. М.: Машиностроение, 1991. 240 с.

Yu. V. Nemirovskii

RATIONAL COORDINATION OF REINFORCEMENT STRUCTURES AND DEFORMATION FIELDS UNDER AXIAL LOADING OF COMPOSITE RODS

S. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia

Abstract. For composite rods with arbitrary constant cross sections and piecewise constant along the axis of the reinforcing structures various phase nature loaded with axial loads, the general dependencies between the parameters of geometric structures, physico-mechanical characteristics of materials and coordinates of application of axial loads, ensuring a rational cross-section deformation field. Based on the concept of the weakest link, the criteria for determining the first (ultimate elastic) and the second ultimate load (pre-fracture load).

Keywords: composite hybrid rods, metal-plastic, concrete-plastic, wood-plastic, metal-ceramic structures, criteria for ultimate deformations, ultimate loads.

REFERENCES

- [1] Ciccarelli G. D. Tensile strength unreinforced and reinforced concrete. M.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo po stroitel'stve i arkhitekture, 1954. 152 p. (in Russian)
- [2] Nemirovsky Yu. V., Boltaev A. I. Diagram of deformation of concrete and reinforced concrete // Vestnik BGTU im. V. G. Shukhov. 2015. No. 6. P. 5–13. (in Russian)
- [3] Nemirovsky Yu. V., Baturin, A. A. calculation of the prefracture States of bendable beams of raznonapravlenymi materials // Proceedings of NGas. 2015. Vol. 16. № 2(56). P. 32–44. (in Russian)
- [4] Nemirovsky Yu. V. Method of calculation of composite rod systems from multi-modular materials / Fundamental and applied problems of modern mechanics: Proceedings of the V all-Russian scientific conference. Tomsk: TSU Publishing house, 2006. P. 288–290. (in Russian)
- [5] Mishchenko A. V., Nemirovsky Yu. V. Nonlinear deformation of concrete elements in longitudinal-transverse bending. Izvestiya vuzov. Construction. 2013. No. 4. P. 3–12. (in Russian)
- [6] Nemirovsky Yu. V. pre-Limit deformation of hybrid reinforced concrete structures. Vestnik Chuvash State Pedagogical University. I. Ya. Yakovlev. Series: Mechanics of the limit state. 2018. № 3(37). P. 26–37 (in Russian)
- [7] Karpenko N. I., Kruglov V. M., Soloviev L. Yu. Nonlinear deformation of concrete and reinforced concrete. Novosibirsk: publishing House of Siberian state University of Railways and communications, 2002. 275 p. (in Russian)
- [8] Aliyev M. M., Karimova N. G. Version of the strength criterion for isotropic polymers. Vestnik SamGU. Natural science series. 2008. № 3(62). P. 217–226. (in Russian)
- [9] H. Altenbach, Tustep K. a New criterion of the static strength of isotropic polymers // Mechanics of composite materials. 2001. Vol. 37. No. 5/6. P. 732–739. (in Russian)

Nemirovskii Yuri Vladimirovich, Dr. Sci. Phys. & Math., Professor, Leading Research Worker, S. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia.

- [10] Aliev, M. M., Safieva S. V. a New polynomial failure criteria for different materials // Vestnik Kazanskogo state technical University. A. N. Tupolev. 2012. No. 3. P. 87–91. (in Russian)
- [11] Aliyev M. M., Shafieva S. V., Volkova O. N., Shipilova O. A. Development of strength criteria for isotropic and reinforced polymers by the method of decomposition into series. Vestnik Chuvash state pedagogical University. I. Ya. Yakovlev. Series: Mechanics of the limit state. 2018. № 3(37). P. 152–161 (in Russian)
- [12] Ponomarev S. D., Biderman V. L., Likharev K. K. and others. strength Calculations in mashinostroeni. Vol. 2. Moscow: Mashgiz, 1958. 974 p. (in Russian)
- [13] Nemirovsky Yu. V., Mishchenko A. V., vokhmyanin I. T. Rational and optimal design of layered rod systems. Novosibirsk: Science, 2004. 188 p. (in Russian)
- [14] King, V. K., Hellerwork M. S. bases for the production of multilayer materials. M.: Metallurgy, 1972. 277 p. (in Russian)
- [15] Nemirovsky Yu. V. the Second limit state of homogeneous and composite beams. Vestnik Chuvash state pedagogical University. I. Ya. Yakovlev. Series: Mechanics of the limit state. 2009. No. 1. P. 150–159 (in Russian)
- [16] Likharev K. K. Comparison of materials characteristics under uniaxial tension and compression / SB. Strength calculations in mechanical engineering. M.: Mashgiz, 1958 (in Russian)
- [17] Konyushko Z. M. Study of the strength of heat-treated steel in tension and compression. Vestnik mashinostroeniya. 1955. No. 2. (in Russian)
- [18] Khrulev V. M. Technology and properties of composite materials for construction. Study guide for structural-technological specialties of higher education institutions. Ufa: TAU, 2001. 168 PP. (in Russian)
- [19] Krzhizhanovsky, V. K., Burlov V. V., Primachenko A. D., Kryzhanovskaya, Yu. V. Technical properties of polymeric materials. Training and reference manual / under the editorship of Professor V. K. Kryzhanovsky. 2nd edition corrected. SPb.: Profesiya, 2005. 248 p. (in Russian)
- [20] Novikov V. U. Polymeric materials for construction. Handbook. M.: Higher school, 1995. 448 p. (in Russian)
- [21] Shalun G. V., Surzhenko E. M. Layered plates. L.: Chemistry, 1978. 232 p. (in Russian)
- [22] Krysin V. N., Krysin M. V. Technological processes of formation, winding and gluing of structures. M.: Chemistry, 1989. 246 p. (in Russian)
- [23] Kalinichev E. L., Sakovtseva M. B. The choice of plastics for the manufacture and operation of the product. L.: Chemistry, 1987. 416 PP. (in Russian)
- [24] Kardashov D. A. Synthetic adhesives. M.: Chemistry, 1968. 592 p. (in Russian)
- [25] Petrov, A. P. Heat-Resistant adhesives. M.: Chemistry, 1977. 200 pp. (in Russian)
- [26] Solomatov V. I. Klyukin V. I., Kochneva L. F. and others Hermopolitan concrete in transportation construction. M.: Transport, 1979. 232 pp. (in Russian)
- [27] Bazhenov Yu. M. Concrete Polymers. M.: Stroizdat, 1983. 472 p. (in Russian)
- [28] Vigdorovich A. I., Sagalaev G. V., Pozdnyakov A. A. Wood composite materials. Handbook, 2nd ed. M.: Mechanical Engineering, 1991. 240 p. (in Russian)