

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-113-120
УДК 678,67.014,67.017,67.019

Е. Н. Белецкий

СПЕЦИФИКА РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ ВАЛОПРОВОДОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, С УЧЕТОМ НАПРАВЛЕНИЯ АРМИРОВАНИЯ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДИФИКАТОРОВ МАТРИЦЫ

В статье рассмотрен новый трехуровневый подход к моделированию и расчету параметров напряженно-деформированного состояния элементов конструкции из полимерных композиционных материалов, обладающих явно выраженной анизотропией физико-механических свойств. Данные конструкции из полимерных композиционных материалов в виде тел вращения (валопроводы, оболочки, сосуды под давлением и т. д.) находят широкое применение в судостроении. У подобных композиционных материалов имеются существенные преимущества по сравнению с традиционно используемыми для этих целей сплавами металлов, поскольку они обладают меньшим весом, нечувствительны к локальным дефектам, а самое главное — более долговечны и для отдельных конструкций технологичны. При решении инженерных задач необходимо достаточно точно оценивать параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкционного композиционного материала, а также возможности их регулирования. На каждом уровне расчета производится оценка собственных зависимостей, которые в итоге определяют функцию итогового напряженно-деформированного состояния композиционного материала в рассматриваемой конструкции: уровень 1 — общий подход оценки НДС в зависимости от главных осей, уровень 2 подразумевает учет адгезионных характеристик матрицы и армирующего волокна, на уровне 3 оценивается влияние наполнителей и модификаторов в матрице. В статье изложены результаты, которые показывают, что в разных плоскостях (0° , 45° , 90°), в зависимости от условной оси симметрии укладки волокна при намотке, существенно меняются постоянные упругости, причем они могут иметь несколько экстремальных значений в зависимости от сочетания величин модулей упругости и коэффициентов поперечной деформации. Приведены зависимости и отдельные результаты расчетов, а также построенные на их основе эпюры, например по оси Ox , подтверждающие анизотропию свойств основных физико-механических характеристик композиционного материала. В целом предложенная теория после дополнительных экспериментальных исследований может быть адаптирована не только для расчета тел вращения, полученных методом намотки, но и для других конструктивных исполнений, например методом прессования.

Ключевые слова: композиционные материалы, моделирование, расчет напряжений, тела вращения, угольное волокно, механическое разрушение, граничные условия, модификатор, адгезия, весовые коэффициенты.

Введение

В современном судостроении широкое применение находят изделия из композиционных полимерных материалов (ПКМ), исходные заготовки которых получены методом намотки [1] – [3]. К подобным конструкциям могут быть отнесены различные оболочки в виде сосудов под жидкости или газы. Перспективным направлением является изготовление элементов, передающих крутящий момент в виде валопроводов заданной длины и конфигурации. Такой интерес к изделиям из ПКМ обусловлен возможностью создания материалов с заданными физико-механическими характеристиками под конкретные эксплуатационные свойства. Подобные характеристики могут быть заранее обеспечены в ходе технологического процесса намотки и укладки армирующего материала.

Композиционные материалы на основе эпоксидных, фенольных и полимерных связующих сочетают в себе высокую прочность с относительно небольшой плотностью, хорошую стойкость к динамическим нагрузкам и резким перепадам температур, высокую химическую стойкость. Вы-

сокопрочные стеклянные и угольные волокна обеспечивают прочность и жёсткость композита, синтетические связующие придают материалу монолитность и заданную форму. Матрица способствует более эффективному использованию прочностных свойств армирующих волокон, создает протекторную защиту волокна от внешних воздействий, а также сама воспринимает часть усилий, развивающихся в материале при работе на сжатие. В практике могут быть использованы нити из углерода, бора, асбеста, базальта, керамики. Однако при массовом применении только армирование стекло- и угольным волокном обеспечивает высокую прочность и сравнительно низкую стоимость изделия. Кроме этого, целесообразно использовать комбинированные композиты, поскольку формообразующая часть конструкции может быть армирована стекловолокном, а наиболее нагруженная — содержать угольное волокно.

Одним из положительных качеств ПКМ, армированных стекло- и угольным волокном, является их низкая чувствительность к надрезам, трещинам и другим подобным дефектам, создающим концентраторы напряжений [4]. Для сравнения — традиционно используемые стальные сплавы для изготовления валопроводов при напряжениях, близких к предельному значению предела текучести при растяжении, имеют более высокую чувствительность к крутильным колебаниям, а также склонность к зарождению концентраторов напряжения и последующему катастрофическому разрушению.

При решении инженерных задач необходимо достаточно точно оценивать параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкционного композиционного материала, а также возможности их регулирования [5], [6]. Так, пассивное регулирование параметров НДС возможно за счёт дифференцированной оценки и использования физико-механических характеристик материала, анизотропии свойств, а также за счёт изменения геометрии объекта при нагружении и разгрузке конструкции. В свою очередь, активное регулирование параметров НДС происходит за счёт обратной связи, позволяющей перестроить геометрические схемы в соответствии с видом нагрузок, изменить плотность материала и модули упругости. В итоге обеспечивается оптимальный режим работы конструкции во времени.

ПКМ в виде заготовок (полых валов) и готовых изделий поддаются лишь пассивному регулированию, поскольку выполнены из реактопластов и изменению геометрических форм и направленности армирования в процессе эксплуатации не подвержены. Получение математической модели НДС технологически оформленного ПКМ как композита с заданными фиксированными свойствами и уже не изменяющегося во времени позволит управлять параметрами НДС в заготовках и изделиях из ПКМ, предназначенных для судостроения.

Постановка задачи

Рассматривается расчетная методика параметров НДС цилиндрического сечения, полученного методом намотки, произведенного из композиционного материала, армированного стекловолокном или угольным волокном с эпоксидной матрицей и порошковым модификатором различного масштабного уровня размерности. Элемент выполнен с армированием в растянутой зоне.

При расчете используем основные допущения:

- характеристики композита в заготовке, на контактных поверхностях матрицы и модификатора однородны и не отличаются от основного материала;
- матрица однородна по составу и обладает изотропными свойствами по всему объему среды (показатели обеспечиваются технологией приготовления состава матрицы);
- матрица обладает разномодульностью и нелинейной зависимостью между напряжениями и деформациями в сжатой зоне;
- модификатор (наполнитель) состоит из частиц, размер которых колеблется в пределах от 0,0001 мм до 0,01 мм, их свойства считаем изотропными;
- материал в составе композита подчиняется закону Гука вплоть до разрушения;
- при исследовании упругой зоны композит работает с уровнем напряжений, не превосходящим его длительную прочность.

*Расчет постоянных характеризующих НДС
 вдоль наиболее нагруженных направлений*

В работах [6], [7], в частности, установлено, что волокна стеклопластика можно ориентировать в заготовке изделия при намотке в направлении наибольших напряжений, чем будет достигнута самая большая прочность в отношении действующих максимальных нагрузок. Так, работы [6] – [8] посвящены исследованиям анизотропных материалов, в том числе из композитов, а также расчетам оболочек и цилиндрических конструкций из этих материалов. В них приведены уравнения для упругих постоянных в зависимости от направления выбранных осей X, Y . В случае валопроводов выбранные оси X, Y будут главными осями анизотропии, тогда $E_x = E_r; E_y = E_t; G_{xy} = G_{rt}; \mu_{xy} = \mu_{rt}$. Тогда зависимости для постоянных упругости примут вид:

$$\frac{1}{E_{x'}} = \frac{\cos^4 \theta}{E_r} + \left(\frac{1}{G_{rt}} - \frac{2\mu_{rt}}{E_r} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{E_t}; \quad (1)$$

$$\frac{1}{E_{y'}} = \frac{\sin^4 \theta}{E_r} + \left(\frac{1}{G_{rt}} - \frac{2\mu_{rt}}{E_r} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\cos^4 \theta}{E_t}; \quad (2)$$

$$\frac{1}{G_{x'y'}} = 4 \left(\frac{1}{E_r} + \frac{1}{E_t} + \frac{2\mu_{rt}}{E_r} - \frac{1}{G_{rt}} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{G_{rt}}; \quad (3)$$

$$\mu_{x'y'} = -E_{x'} \left[\left(\frac{1}{E_r} + \frac{1}{E_t} + \frac{2\mu_{rt}}{E_r} - \frac{1}{G_{rt}} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta - \frac{\mu_{rt}}{E_r} \right]; \quad (4)$$

$$v_{x',x'y'} = -\frac{\cos^3 \theta \sin \theta}{E_r} + \frac{\sin^3 \theta \cos \theta}{E_t} + \frac{\cos^3 \theta \sin \theta}{G_{rt}} - \frac{2\mu_{rt}}{E_r}. \quad (5)$$

Из формул можно исключить коэффициент поперечной деформации, тогда зависимости характеристик определяющих НДС примут вид:

– для модуля упругости

$$E_{x'} = E_t / \left[\alpha^2 \cos^4 \theta + \sin^4 \theta + \left(\frac{4E_t}{E_{xy}^{(45)}} - \alpha^2 - 1 \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta \right]; \quad (6)$$

– для модуля сдвига

$$\frac{1}{G_{x'y'}} = \frac{\cos^2 2\theta}{G_{rt}} + \frac{\sin^2 2\theta}{G_{xy}^{(45)}}. \quad (7)$$

Для модуля упругости в направлении $45^\circ E_{xy}^{(45)}$ используем уравнение

$$\frac{1}{G_{rt}} - \frac{2\mu_{rt}}{E_r} = \frac{4}{E_{xy}^{(45)}} - \frac{1}{E_r} - \frac{1}{E_t}, \quad (8)$$

где входящие элементы представлены в виде $\frac{1}{G_{rt}} - \frac{2\mu_{rt}}{E_r} = \frac{B}{E_t}$ или $B = \frac{E_t}{G_{rt}} - 2\alpha^2 \mu_{rt}$.

Зависимость (6) физически указывает на связь между упругими постоянными в плоскости XU для анизотропного тела из ПКМ в виде цилиндрического полого вала. В работе [8] приведено решение дифференциального уравнения в частных производных четвертого порядка для цилиндрически анизотропного тела, которое может быть адаптировано для расчета полого вала из ПКМ. В полиномах это соотношение принимает вид, который удовлетворяет этому дифференциальному уравнению:

$$B = 3 - \alpha^2. \quad (9)$$

После преобразований и подстановки можно получить равенство

$$\frac{3 - \alpha^2}{E_t} = \frac{4}{E_{xy}^{(45)}} - \frac{1}{E_r} - \frac{1}{E_t}. \quad (10)$$

После дальнейшего преобразования получим

$$E_{xy}^{(45)} = E_t. \quad (11)$$

Тогда уравнение (6) для модуля упругости можно записать в виде

$$\frac{1}{E_x} = \frac{\cos^4 \theta}{E_r} + \frac{\sin^4 \theta}{E_t} + \frac{3 - \alpha^2}{E_t} \cos^2 \theta \sin^2 \theta; \quad (12)$$

– для коэффициента Пуассона

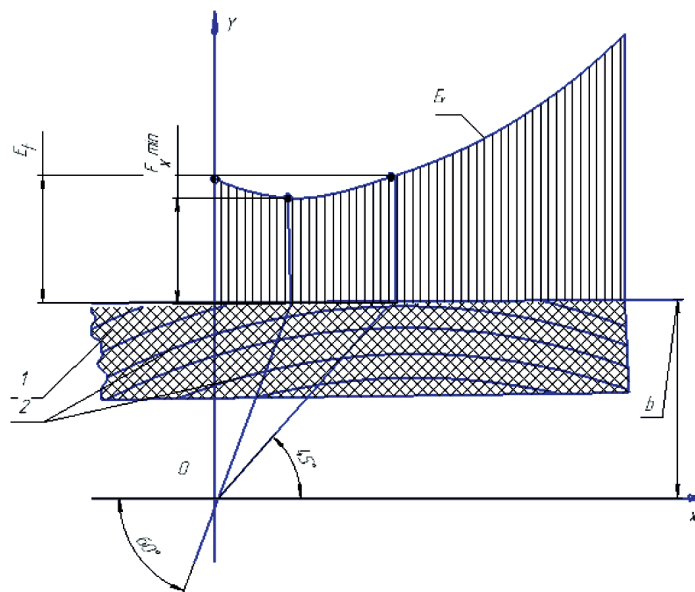
$$\mu_{x'y'} = -E_{x'} \left[\frac{2(\alpha^2 - 1)}{E_t} \sin^2 \theta \cos^2 \theta - \frac{\mu_{rt}}{E_r} \right]; \quad (13)$$

– для коэффициента взаимного влияния

$$\nu_{x',x'y'} = \left(-\frac{\cos^2 \theta}{E_r} + \frac{\sin^2 \theta}{E_t} + \frac{\cos^2 \theta}{G_{rt}} \right) \sin \theta \cos \theta - \frac{2\mu_{rt}}{E_r}. \quad (14)$$

Функция, представленная выражением (12), имеет два экстремума (при $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 90^\circ$), которые соответствуют главным плоскостям анизотропии.

В работах [7], [8] получен результат, показывающий, что при $\theta = 45^\circ$ модуль поперечной упругости составляет величину, равную E_t . На рисунке представлено изменение модуля упругости цилиндрически анизотропного тела в направлении оси X .



Изменение составляющей модуля упругости E_x в направлении оси X [7]:
1 — матрица; 2 — направление армирующих волокон углепластика

В декартовых координатах формулу (12) можно переписать в виде

$$\frac{1}{E_x} = \frac{\alpha^2 x^4 + y^4 + (3 - \alpha^2) x^2 y^2}{E_t (x^2 + y^2)^2}. \quad (16)$$

Модуль сдвига с учетом полученной нами взаимосвязи между постоянными упругости в главных направлениях анизотропии $B = 3 - \alpha^2$ можно вычислить по формуле, полученной после преобразования (12):

$$\frac{1}{G_{x'y'}} = \frac{8(\alpha^2 - 1)}{E_t} \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{G_{rt}}. \quad (17)$$

Приравняв выражения $B = 3 - \alpha^2$ и $B = \frac{E_t}{G_{rt}} - \frac{2\mu_{rt}E_t}{E_r}$, получим

$$3 - \alpha^2 = \frac{E_t}{G_{rt}} - \frac{2\mu_{rt}E_t}{E_r} \text{ или } G_{rt} = \frac{E_t}{3 - \alpha^2 + 2\mu_{rt}}. \quad (18)$$

Уравнение (17) связывает между собой три постоянных упругости в главных направлениях анизотропии для цилиндрически анизотропного тела — элемента валопровода, выполненного из ПКМ.

Государственными стандартами предусмотрено экспериментальное определение (13) величин характеристик упругости ($3E_i, 3G_{ik}, 3\mu_{ik}, 3E_{ik}^{(45)}, 3\mu_{ik}^{(45)}$) для цилиндрически анизотропных тел.

По результатам испытаний определяют модули сдвига по формуле

$$G_{ik} = \frac{E_{ik}^{(45)}}{2(1 + \mu_{ik}^{(45)})}. \quad (19)$$

Установленная взаимосвязь ($B = 3 - \alpha^2$) между упругими постоянными в отдельном случае позволяет исключить экспериментальное определение $E_{ik}^{(45)}, \mu_{ik}^{(45)}$ (испытания образцов под 45°). Для определения упругих постоянных достаточно знать их величины относительно главных осей анизотропии ($3E_i, 3\mu_{ik}, 3\mu_{ki}$). По этим данным, используя полученные формулы, можно найти значения упругих постоянных относительно любого положения осей.

Расчет постоянных характеризующих НДС с учетом адгезионной прочности взаимодействия полимерной матрицы и армирующего волокна

Одним из главных критериев при расчетах параметров НДС являются параметры взаимодействия материала матрицы с поверхностью армирующего волокна (углеродного, стеклов), причем от адгезионной прочности взаимодействия полимерной матрицы [4], [5] существенно зависят характеристики композита: продольная, поперечная и сдвиговая прочность, вязкость разрушения, модуль упругости, термостойкость и др. В таблице (по данным работ [4], [5]) приведены значения адгезионной прочности перспективных ПКМ для судостроения, используемых в качестве связующих для композитов и изделий из них при диаметре волокна $d = 9$ мкм и площади сечения $S = 6 \cdot 10^{-3}$ мм².

Примеры вариантов адгезионной прочности материала матрицы ПКМ

Связующее	Параметры адгезионной прочности	
	углеродное волокно	стеклянное волокно
Эпоксидиановое ЭДТ-10	41,5	40,0
Эпоксифенольное 5-211	41,0	41,0
Эпокситрифенольное ЭТФ	43,0	—
УП-612	40,5	—
ДОЦПД	43,0	—
Полиамидное СП-6	34,0	30,0

В рассматриваемых вариантах адгезионные прочности различных эпоксидных связующих близки между собой и в отдельных конкретных случаях не зависят от материала каркаса — волокна.

Модуль упругости композита E_k может быть выражен в данном случае зависимостью, характеризующей аддитивность [4] вклада волокна, матрицы и межфазного слоя:

$$E_k = E_{a a a} + E_{i a i} + E_{m a m}, \quad (20)$$

где $E_{a a a}$ — модуль Юнга армирующего материала и его объемная доля, МПа; $E_{i a i}$ — модуль Юнга межфазного слоя и его объемная доля, МПа; $E_{m a m}$ — модуль Юнга материала матрицы и его объемная доля, МПа.

При рассмотрении элемента наполненного полимера с цилиндрическим включением (волокна) можно использовать выражение [4]

$$E = E_a (r_a^2 / r_m^2) + E_i [(r_i^2 - r^2) / r_m^2] + E_m [(r_m^2 - r_i^2)], \quad (21)$$

где r_a — величина радиуса армирующего материала; r_i — величина радиуса межфазного слоя; r_m — величина радиуса матрицы.

Масштабный уровень модуля упругости межфазного слоя может быть представлен выражением [4]:

$$E_i(r) = E_m + E_f (r_f / r) \eta_1 - E_m (r_f / r) \eta_2. \quad (22)$$

В случае граничных условий ($r = r_i$) имеем уточненный вид зависимости (22):

$$E_i(r_i) = E_m + E_a (r_a / r_i) \eta_1 - E_m (r_a / r_i) \eta_2. \quad (23)$$

В этих соотношениях экспоненты η_1 и η_2 являются характеристиками адгезии, определяющими передачу напряжений от матрицы к наполнителю.

Расчет постоянных, характеризующих НДС с учетом наполнителей в матрице

Для отдельных задач возможно использование ПКМ с модификаторами разного уровня фракционного состава и размерности: микроуровень — 10^{-3} мм, мезоуровень — 10^{-6} мм, и наноуровень — 10^{-9} мм [9]. В работе [10] рассмотрена методика аналитического определения физико-механических характеристик новых модифицированных ПКМ, основанная на учете свойств его составляющих, согласно которой суммарный модуль упругости и суммарный коэффициент Пуассона можно найти как

$$E_\Sigma = \frac{9K_\Sigma \cdot G_\Sigma}{3K_\Sigma + G_\Sigma}; \quad \nu_\Sigma = \frac{3K_\Sigma - 2G_\Sigma}{2(3K_\Sigma + G_\Sigma)}. \quad (24)$$

Объемные модули K_Σ , G_Σ , характеризующие физико-механические характеристики композиционного материала, можно представить в виде зависимостей:

$$K_\Sigma = (K_1 K_2)^{1/2} \cdot \frac{m_1 K_1^{1/2} + m_2 K_2^{1/2} s^{1/2}}{m_1 K_2^{1/2} + m_2 K_1^{1/2} s^{1/2}}; \quad (25)$$

$$G_\Sigma = (G_1 G_2)^{1/2} \cdot \frac{m_1 G_1^{1/2} + m_2 G_2^{1/2} s^{1/2}}{m_1 G_2^{1/2} + m_2 G_1^{1/2} s^{1/2}}, \quad (26)$$

где m_1 и m_2 — объемные доли матрицы и наполнителя соответственно ($m_1 + m_2 = 1$, а $s = E_1/E_2$).

Заключение

Представленные в статье зависимости могут быть использованы при инженерных расчетах конструкций из ПКМ, полученных методом намотки. Результаты расчетов отдельных элементов конструкций, выполненных из ПКМ, доказывают необходимость учета особенностей поведения матрицы и ориентации угольного или стекловолокна для корректной оценки параметров, определяющих прочность конструкции и параметры НДС. Армирование несущих конструкций из ПКМ в заданном конструкцией направлении приводит к достаточно существенному возрастанию их несущей способности и способствует массовому внедрению новых материалов в судостроении. Предложенный трехуровневый подход при расчете конструкций из ПКМ является универсальным и может быть использован для расчета других аналогичных изделий и конструкций в судостроительной отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баженов С. Л.* Полимерные композиционные материалы. Прочность и технологии / С. Л. Баженов, А. А. Берлин, А. А. Кульков, В. Г. Ошмян. — М.: Интеллект, 2009. — 352 с.
2. Справочник по композиционным материалам / под ред. Дж. Любина; пер. с англ. под ред. А. Б. Геллера, М. М. Гельмонта, Б. Э. Геллера. — М.: Машиностроение, 1988. — 448 с.
3. *Росато Д. В.* Намотка стеклонитью / Д. В. Росато, К. С. Грове. — М.: Машиностроение, 1969. — 310 с.
4. *Белецкий Е. Н.* Учет физико-механических характеристик композиционных углепластиков, влияющих на процессы разрушения при реализации технологического процесса механической обработки и экстремальных условий эксплуатации / Е. Н. Белецкий, В. М. Петров, С. Н. Безпальчук // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 66–73.
5. *Белецкий Е. Н.* Различные уровни моделирования сложных конструкций судовых энергетических установок, отдельные элементы которых выполнены из композиционных полимерных материалов / Е. Н. Белецкий // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 138–144. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-138-144.
6. *Ашкенази Е. К.* Анизотропия конструкционных материалов: справочник / Е. К. Ашкенази, Э. В. Ганов. — Л.: Машиностроение, 1980. — 247 с.
7. *Глухих В. Н.* Плоская задача теории упругости для цилиндрически анизотропного тела / В. Н. Глухих // Известия СПбЛТА. — 1998. — № 6 (164). — С. 141–145.
8. *Глухих В. Н.* Определение постоянных упругости с учетом анизотропии свойств композиционных материалов, используемых для намотки ответственных оболочек и стержневых конструкций в судостроении и портовой инфраструктуре / В. Н. Глухих, В. М. Петров, Н. Ю. Соиту // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 137–142. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-137-142.
9. *Петроченков Р. Г.* Композиты на минеральных заполнителях: в 2 т. / Р. Г. Петроченков. — М.: Изд-во МГГУ, 2005. — Т. 2. — 351 с.
10. *Вержбовский Г. Б.* Прогнозирование характеристик композитных материалов на основе свойств составляющих их частей / Г. Б. Вержбовский // Научное обозрение. — 2014. — № 7–3. — С. 909–913.

THE SPECIFICS OF THE CALCULATION OF THE ELEMENTS OF SHAFTS MADE OF COMPOSITE MATERIALS WITH RESPECT TO THE DIRECTION OF REINFORCEMENT AND PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF MATRIX MODIFIERS

The article describes a new three-level approach to modeling and calculation of parameters of stress strain state of structural elements made of composite materials with a pronounced anisotropy of physical and mechanical properties. These constructions from polymeric composite materials in the form of bodies of rotation of the shafts, casings, pressure vessels, etc. find wide application in shipbuilding. Such composite materials have essential advantages in comparison with traditionally used for these purposes, alloys of metals, because they have less weight, are not sensitive to local defects and, most importantly, more durable and individual designs technological. In solving engineering problems it is necessary to accurately estimate the parameters of the stress-strain state (SSS) of structural composite material, and possibilities of their regulation. Each level of calculation corresponds to the definition of dependency: level one General approach assessment of VAT, depending on the main axes, the second level implies taking into account the adhesion characteristics of the matrix and reinforcing fibres, the third level assesses the influence of fillers and modifiers in the matrix. The article presents the results which show that in different planes (0°, 45°, 90°) depending on the conditional axis of symmetry of laying fiber when winding substantially modified constant elasticity, and they may have several extreme values, depending on combinations of values of modules of elasticity and coefficients of transverse deformation. Given the dependencies and some results of the calculations and the resulting plots, e.g. axis "OH" confirming the anisotropy of properties the main physico-mechanical characteristics of the composite material. In General, the proposed theory, after additional experimental studies can be adapted not only to calculate solids of revolution obtained by winding, but also for other designs, for example by pressing.

Keywords: composite materials, modeling, stress analysis, body rotation, carbon fiber, mechanical disruption, boundary conditions, modifier, adhesion, weights.

REFERENCES

1. Bazhenov, S. L., A. A. Berlin, A. A. Kulkov, and V. G. Oshmján. *Polimernye kompozicionnye materialy. Prochnost i tehnologii*. M.: Intellekt, 2009.
2. Ljubín, Dzh., A. B. Geller, M. M. Gel'mont, and B. Je. Geller, editors. *Spravochnik po kompozicionnym materialam*. Trans. M.: Mashinostroenie, 1988.
3. Rosato, D. V., and K. S. Grove. *Namotka steklonitju*. M.: Mashinostroenie, 1969.
4. Beleckij, E. N., V. M. Petrov, and S. N. Bezpálchuk. "The physical-mechanical characteristics of composite plastics influence on the processes of destruction at realization of technological process of machining and extreme conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(24) (2014): 66–73.
5. Beleckij, Evgenij Nikolaevich. "Different levels of modeling of complex structures marine power plants, the individual elements of which made of composite polymer materials." *Vestnik Gosudarstvennogo morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(35) (2016): 138–144. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-138-144.
6. Ashkenazi, E. K., and Je. V. Ganov. *Anizotropija konstrukcionnyh materialov. Spravochnik*. L.: Mashinostroenie, 1980.
7. Gluhih, V. N. "Ploskaja zadacha teorii uprugosti dlja cilindricheski anizotropnogo tela." *Izvestija SPbLTA* 6(164) (1998): 141–145.
8. Gluhih, Vladimir Nikolaevich, Vladimir Markovich Petrov, and Natalja Jurevna Sojtu. "Determination of elasticity constants with anisotropy of properties of composite materials used for winding the responsible shell and beam structures in shipbuilding and port infrastructure." *Vestnik Gosudarstvennogo morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(36) (2016): 137–142. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-137-142.
9. Petrochenkov, R. G. *Kompozity na mineralnyh zapolniteljah*. M.: Izd-vo moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2005. Vol. 2.
10. Verzhbovsky, Gennadiy Bernardovich. "Forecasting the characteristics of composite materials based on the properties of their components." *Science Review* 7-3 (2014): 909–913.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Белецкий Евгений Николаевич —
кандидат технических наук, главный технолог.
ОАО «Концерн «НПО» Аврора»
famalien@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Beleckij Evgenij Nikolaevich —
PhD, chief technologist.
Concern Avrora Scientific and Production Association JSC
famalien@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-120-129
УДК 620.178

**В. М. Петров,
А. А. Буцанец,
С. Н. Безпальчук**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПАРЫ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ УГЛЕПЛАСТИК – ТИТАН

В современном судостроении при изготовлении судовой запорной арматуры находят широкое применение новые материалы. Среди конструкционных металлических сплавов это сплавы титана, а среди композитных материалов триботехнического назначения широко используются керамика и углепластики. Сочетание этих материалов в нагруженных парах трения объясняется спецификой перекачиваемых жидких сред через элементы судовой запорной арматуры. Высокая агрессивность и температурный фактор играют решающую роль при выборе материалов. Контактующие поверхности деталей пар трения после механической обработки резанием лезвийным или абразивным режущими инструментами, сразу не