

УДК 539.3

*Д. А. ЧЕРНОУС*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель*

## **РАСЧЕТНАЯ МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА КОНСТРУКЦИОННОГО КОМПОЗИТА**

Усовершенствован и обобщен ранее разработанный двухуровневый подход к оптимизации состава конструкционного композита. Усовершенствованный подход использован для определения максимально допустимой объемной доли наполнителя, при которой сохраняется прочность детали произвольной конфигурации, изготовленной из дисперсно-наполненного короткими углеродными волокнами политетрафторэтилена. При этом рассматривался фрагмент детали вблизи области контакта цилиндрических поверхностей.

**Введение.** Широкое практическое применение полимеров и композитов на их основе обуславливает повышенный интерес к анализу и прогнозированию механических свойств материалов данного класса. Дисперсно- и волоконно-армированные полимеры характеризуются рядом структурно-механических особенностей, учет которых необходим для расчета элементов конструкций, изготовленных из композитных материалов. Одной из таких особенностей является отличие механических свойств полимерной матрицы от свойств блочного полимера. Изменение структуры и свойств полимера в композите вызвано взаимодействием частиц наполнителя с макромолекулами полимерной матрицы. Для учета данного явления при расчете эффективных характеристик в модель структуры исследуемого композита вводят дополнительную компоненту, которая представляет собой межфазный слой и замещает часть приграничного объема матрицы [1–3]. Толщина и механические свойства межфазного слоя определяются природой наполнителя и матрицы, размерами и фрактальной размерностью частиц наполнителя [4, 5]. При решении прикладных задач параметры данного слоя могут выбираться так, чтобы обеспечить наилучшее соответствие расчетных оценок экспериментальным данным [6].

Ранее была предложена расчетная методика, позволяющая прогнозировать эффективные упругие характеристики [7] и предел текучести [8] дисперсно-наполненного полимера при наличии упруго деформирующегося межфазного слоя. Как и в большинстве научных публикаций, посвященных анализу влияния межфазного слоя на эффективные свойства композитов [2, 3, 6, 9], в работах [7, 8] рассматривалось наполнение полимера сферическими частицами. В случае сферических или длинных цилиндрических включений удается получить и использовать точные аналитические решения урав-

нений теории упругости для каждой компоненты исследуемого композита. Однако в большинстве наполненных полимеров форма частиц наполнителя далека от сферической. В частности, один из наиболее распространенных способов получения конструктивных композитных материалов состоит в наполнении полимерной матрицы короткими (рублеными) волокнами [10]. Данный способ позволяет упростить изготовление изделий, обеспечить относительно высокую жесткость материала и регулировать степень анизотропии его механических свойств.

Расчет эффективных механических характеристик композитов, содержащих включения сложной формы, осуществляется на основе подхода, который подразумевает введение тензора концентрации деформаций [11, 12]. При определении компонент данного тензора используется функция Грина для однородного изотропного упругого пространства [12]. Указанный подход позволил получить расчетные оценки эффективных упругих характеристик композитов с различной конфигурацией и ориентацией включений [13–15]. Однако при таком моделировании недостаточно внимания уделялось учету межфазного слоя. Попытка учета данного слоя в рамках модели Мори-Танаки ранее была осуществлена в работе [16]. При этом частицы наполнителя моделировались вытянутыми эллипсоидами. Однако в рамках методики работы [16] вводится недостаточно обоснованное допущение об изотропности материала составного включения, образованного частицей наполнителя и межфазным слоем. Кроме того, ранее при расчетах не учитывалась зависимость относительной толщины межфазного слоя от объемной доли наполнителя.

Таким образом, актуальной является задача о совершенствовании известных методик механики гетерогенных материалов для получения уточненных расчетных оценок эффективных деформационно-прочностных характеристик наполненных полимеров с учетом наличия межфазного слоя и анизотропии [16] частиц наполнителя. Данные оценки позволят существенно снизить материальные и временные затраты на выбор состава композита, наиболее полно удовлетворяющего техническим требованиям и критерию прочности. Оптимальные значения параметров композита, в частности – объемной доли наполнителя, во многом определяются условиями функционирования конкретного изделия. Поэтому предварительный (теоретический) выбор требуемого состава композита подразумевает комплексное выполнение следующих двух расчетных операций:

- 1) прогноз эффективных механических характеристик материала. При таком расчете обычно рассматривается структурный элемент композита, содержащий частицу наполнителя и окружающий ее объем матрицы;
- 2) определение напряженно-деформированного состояния рассматриваемого изделия при заданном режиме нагружения.

Подобный комплексный (двухуровневый) подход был ранее реализован [17] для определения значения объемной доли наполнителя, при котором реализуется требуемая жесткость зуба композитной зубчатой передачи, а также соблюдается условие прочности. Однако в рамках данного варианта оптимизации для расчета эффективных характеристик композита использовалась методика работы [16]. Отмеченные выше недостатки этой методики снижают достоверность полученных в [17] оценок оптимальной доли наполнителя. Также следует отметить, что полученные в названной работе результаты справедливы только для рассматриваемой конструкции зубчатой передачи. При этом с точки зрения механики материалов она является частным случаем контактного взаимодействия деформируемых тел. Представляется возможным и целесообразным расширить область применения двухуровневого метода оптимизации и использовать его при анализе контактной задачи в общей постановке.

В связи с вышесказанным, целью настоящей работы является определение значений объемной доли наполнителя, при которой выполняется условие прочности для детали, изготовленной из дисперсно-наполненного полимера и работающей в условиях контактного взаимодействия. При этом использована усовершенствованная методика расчета эффективных свойств композита, основанная на модели Мори-Танаки.

**Расчет эффективных свойств композита.** Для описания деформирования композитов, содержащих анизотропические [18] включения, часто используют методику, основанную на модели Мори-Танаки [19, 20]. Преобразовав классические соотношения данной модели, можно получить уравнение для компонент тензора модулей упругости двухкомпонентного композита, одноосно армированного короткими волокнами

$$C_k = C_m + \varphi \left[ (C_f - C_m)^{-1} + (1 - \varphi) S_m C_m^{-1} \right]^{-1}. \quad (1)$$

Здесь  $\varphi$  – объемная доля наполнителя;  $C_m, C_f$  – тензор модулей упругости материала матрицы и наполнителя соответственно;  $S_m$  – тензор Эшелби [12] для материала матрицы. Компоненты тензора Эшелби зависят от параметра анизотропии частиц наполнителя  $\chi$  и коэффициента Пуассона материала матрицы  $\nu_m$ . Параметр  $\chi$  определяется как отношение наименьшей полуоси частицы наполнителя к наибольшей.

Модель Мори-Такаки позволяет также определить тензора концентрации деформаций в матрице  $A_m$  и наполнителе  $A_f$

$$A_f = (C_f - C_m)^{-1} (C_k - C_m) \frac{1}{\varphi}, \quad A_m = (C_f - C_m)^{-1} (C_f - C_k) \frac{1}{1 - \varphi}. \quad (2)$$

Для учета присутствия в композите межфазного слоя используем методику «составного включения» [9]. При этом первоначально определим тензор модулей упругости  $C_{fl}$  композита, в котором материал межфазного слоя армирован частицами наполнителя

$$C_{fl} = C_l + \varphi_f \left[ (C_f - C_l)^{-1} + (1 - \varphi_f) S_l C_l^{-1} \right]^{-1}. \quad (3)$$

Здесь  $C_l$  – тензор модулей упругости материала межфазного слоя;  $S_l$  – тензор Эшелби для материала межфазного слоя;  $\varphi_f$  – объемная доля наполнителя в составном включении. Геометрические параметры межфазного слоя будем характеризовать относительным объемом  $q$ , равным отношению объема слоя к объему частицы наполнителя. Тогда величина  $\varphi_f$  будет определяться следующим образом

$$\varphi_f = \frac{1}{1 + q}. \quad (4)$$

После определения тензора  $C_{fl}$ , характеризующего свойства составного включения, рассмотрим композит, в котором материал матрицы армирован этими включениями. Для эффективных упругих свойств данного композита получим

$$C_k = C_m + \varphi_{fl} \left[ (C_{fl} - C_m)^{-1} + (1 - \varphi_{fl}) S_m C_m^{-1} \right]^{-1}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} A_m &= (C_{fl} - C_m)^{-1} (C_{fl} - C_k) \frac{1}{1 - \varphi_{fl}}; & A_{fl} &= (C_{fl} - C_m)^{-1} (C_k - C_m) \frac{1}{\varphi_{fl}}; \\ A_f &= (C_f - C_l)^{-1} (C_{fl} - C_l) A_{fl} \frac{1}{\varphi_f}; & A_l &= (C_f - C_l)^{-1} (C_f - C_{fl}) A_{fl} \frac{1}{1 - \varphi_f}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь  $\varphi_{fl}$  – объемная доля составных включений, которая определяется соотношением

$$\varphi_{fl} = \frac{\varphi}{\varphi_f}. \quad (7)$$

Соотношения (3)–(7) в отличие от ранее приведенных в работе [16] позволяют использовать методику составного включения без ориентационного усреднения компонент тензора  $C_{fl}$ .

В рамках настоящей работы будем рассматривать композит, при изготовлении которого обеспечена практически хаотическая ориентация армирующих включений в пространстве. Такой материал является макроскопически изотропным, а его упругие характеристики определяются путем ориентационного усреднения компонент тензора  $C_k$

$$\begin{aligned}
K_k &= \frac{1}{9} [C_{k11} + 2(C_{k22} + C_{k23}) + 4C_{k12}]; \\
G_k &= \frac{1}{30} [2C_{k11} + 7C_{k22} - 5C_{k23} - 4C_{k12} + 12C_{k66}]; \\
\nu_k &= \frac{3K_k - 2G_k}{2(3K_k + G_k)}; \quad E_k = 2G_k(1 + \nu_k).
\end{aligned} \tag{8}$$

Здесь  $K_k$ ,  $G_k$ ,  $\nu_k$ ,  $E_k$  – объемный модуль, модуль сдвига, коэффициент Пуассона и модуль Юнга композита соответственно.

Прочностные свойства рассматриваемого композита будем характеризовать пределом текучести при одноосном напряженном состоянии  $\sigma_k^{cr}$ . В качестве критерия текучести выберем достижение усредненной по объему интенсивностью тензора деформаций [21] в материале матрицы некоторого критического значения. При определении предела текучести одноосно армированного композита первоначально надо задать направление нагружения, то есть угол  $\theta$  между направлением армирования и осью, соответствующей ненулевой компоненте напряжения  $\sigma_0$ . Затем осуществляют пересчет компонент тензора напряжения для системы координат, жестко связанной с частицей наполнителя:

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= \sigma_0 \cos^2 \theta; \quad \sigma_{zz} = \sigma_0 \sin^2 \theta; \quad \sigma_{xz} = \sigma_0 \sin \theta \cos \theta; \\
\sigma_{yy} &= \sigma_{yz} = \sigma_{xy} = 0.
\end{aligned} \tag{9}$$

Здесь ось  $x$  соответствует направлению большей полуоси частицы наполнителя. При известном тензоре модулей упругости композита вычисляется тензор макроскопических деформаций

$$\hat{\varepsilon}_k = \mathbf{C}_k^{-1} \hat{\sigma}_k. \tag{10}$$

Затем с учетом концентрации деформаций определяется тензор деформаций для составного включения

$$\hat{\varepsilon}_f = \mathbf{A}_f \hat{\varepsilon}_k. \tag{11}$$

В соответствии с моделью Мори-Танаки усредненный по объему компоненты тензор деформаций для материала матрицы вычисляется по формуле

$$\hat{\varepsilon}_m = \frac{\hat{\varepsilon}_k - \varphi_f \hat{\varepsilon}_f}{1 - \varphi_f}. \tag{12}$$

Из компонент тензора  $\hat{\varepsilon}_m$ , определенного по формуле (12), составляется выражение для интенсивности тензора деформаций в материале матрицы

$$\varepsilon_{mi} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{mxx} - \varepsilon_{myy})^2 + (\varepsilon_{mxx} - \varepsilon_{mzz})^2 + (\varepsilon_{myy} - \varepsilon_{mzz})^2 + 6(\varepsilon_{mzx}^2 + \varepsilon_{myz}^2 + \varepsilon_{mxy}^2)}. \tag{13}$$

Затем для определения предела текучести композита необходимо вычислить значение осевого напряжения  $\sigma_0$ , при котором интенсивность  $\varepsilon_{mi}$  совпадет с критической интенсивностью тензора деформаций материала матрицы

$$\varepsilon_{mi} = \varepsilon_{mi}^{cr} = \frac{\sigma_m^{cr}}{3G_m}. \quad (14)$$

Здесь  $\sigma_m^{cr}$ ,  $G_m$  – предел текучести и модуль сдвига материала матрицы соответственно. В рамках разрабатываемой расчетной методики принято, что компоненты композита до момента начала текучести деформируются линейно упруго. В этом случае предел текучести композита может быть вычислен из соотношения

$$\sigma_k^{cr} = \frac{\sigma_m^{cr}}{3G_m \varepsilon_{mi}^{(1)}}. \quad (15)$$

Здесь  $\varepsilon_{mi}^{(1)}$  – интенсивность тензора деформаций в материале матрицы, вычисленная по формулам (9)–(15) при макроскопическом осевом напряжении  $\sigma_0 = 1$ .

Для одноосно армированного композита предел текучести будет зависеть от направления нагружения. Если армирование хаотичное, то за предел текучести принимается наименьшее из значений  $\sigma_k^{cr}$ , определенных для одноосно армированного композита. То есть, предел текучести выбирается по наиболее «опасной» ориентации частицы наполнителя.

При реализации описанной выше расчетной методики следует учитывать, что относительный объем межфазного слоя  $q$  в общем случае зависит от компонент композита, конфигурации включений и объемной доли наполнителя. При заданной паре материалов «матрица-наполнитель» величина  $q$  является функцией параметра  $\varphi$ . В области малых значений  $\varphi$ , до некоторой  $\varphi_0$ , относительный объем межфазного слоя с ростом объемной доли наполнителя увеличивается [22]. При дальнейшем возрастании  $\varphi$  остается постоянным отношение объема межфазного слоя к «оставшемуся» объему матрицы [23]. Используя результаты работ [22, 23], предложим следующий вид функциональной зависимости параметра  $q$  от объемной доли наполнителя

$$q(\varphi) = \begin{cases} k\varphi \frac{1-\varphi_0}{\varphi_0^2}, & \varphi < \varphi_0; \\ k \frac{1-\varphi}{\varphi}, & \varphi \geq \varphi_0. \end{cases} \quad (16)$$

Здесь  $k$  и  $\varphi_0$  – экспериментально определяемые для исследуемого композита константы. Не снижая общности дальнейших выкладок, примем  $k = 0,2$ ;  $\varphi_0 = 0,2$ .

В рамках настоящей работы в качестве исследуемого композита будем рассматривать материал серии «Флувис», используемый, в частности, в узлах трения компрессионного оборудования [24]. Данный материал представляет собой дисперсно-армированный короткими углеродными волокнами политетрафторэтилен. Параметр анизотропии данных волокон составляет  $\chi = 0,01$ . Значения упругих характеристик материала наполнителя в рассматриваемом композите заимствованы из работы [25]:  $E_f = 228$  ГПа;  $\nu_f = 0,25$ . Здесь  $E_f$ ,  $\nu_f$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала используемых углеволокон соответственно. Значения механических характеристик политетрафторэтилена при температуре 20 °С заимствованы из [26]:  $K_m = 4,7$  ГПа;  $G_m = 90$  МПа;  $\sigma_m^{cr} = 8,9$  МПа. Здесь  $K_m$ ,  $G_m$ ,  $\sigma_m^{cr}$  – объемный модуль, модуль сдвига и предел текучести материала матрицы в рассматриваемом композите соответственно. Согласно ранее обоснованной гипотезе «температурного сдвига» [27] характеристик межфазного слоя по отношению к соответствующим характеристикам матрицы можно принять  $K_l = K_m$ . Здесь  $K_l$  – объемный модуль материала межфазного слоя. В дальнейшем будем рассматривать три варианта исследуемого композита: без межфазного слоя ( $G_l = G_m$ ), при наличии «жесткого» ( $G_l = 2G_m$ ) и «мягкого» ( $G_l = 0,2G_m$ ) слоя.

**Описание контактного взаимодействия.** Одним из наиболее распространенных режимом нагружения элементов механизмов и машин является контактное воздействие. Рассмотрим контактную задачу в классической постановке – задачу Герца. При этом соприкасающиеся поверхности описываются радиусами кривизны главных нормальных сечений  $R_{11}$ ,  $R_{12}$  (для тела 1) и  $R_{21}$ ,  $R_{22}$  (для тела 2). Задана сила  $P$ , которой сдавливаются тела, и упругие характеристики материалов этих тел. Общее аналитическое решение данной задачи представлено, в частности, в учебнике [28]. В качестве примера контактной пары рассмотрим взаимодействие двух цилиндров радиусами  $R_1$  и  $R_2$  соответственно ( $R_{11} = R_1$ ;  $R_{12} \rightarrow \infty$ ;  $R_{21} = R_2$ ;  $R_{22} \rightarrow \infty$ ) по образующей. Длина образующей (высота цилиндров) для обоих тел одинакова и равна  $l$ . Подобная контактная пара является элементом нагружения зубчатого колеса [17], опоры качения [29], кольцевого уплотнения [30] и многих других деталей машин. Примем следующие значения параметров контактной пары [17]:  $R_1 = R_2 = R = 2,3$  мм;  $l = 2$  см;  $P = 20$  Н. Оба тела изготовлены из рассматриваемого в рамках настоящей работы композита (дисперсно-наполненного короткими углеродными волокнами политетрафторэтилена).

Основными результатами решения описанной контактной задачи являются: сближение  $u$  осей цилиндров и максимальные значения  $\sigma_u^{\max}$  интенсивности тензора напряжений для каждого из контактирующих тел. В соответствии с решением, приведенным в [28], для данных величин можно записать

$$u = 2p_0 \frac{(1 - \nu_k^2)^b}{\pi E_k} \int_{-b}^b \sqrt{1 - \left(\frac{x}{b}\right)^2} \ln \left( \frac{\sqrt{4x^2 + l^2} + l}{\sqrt{4x^2 + l^2} - l} \right) dx, \quad (17)$$

$$\sigma_u^{\max} = \frac{p_0}{\sqrt{1 + \gamma^2}} \sqrt{\left[1 - \left(\sqrt{1 + \gamma^2} - \gamma\right) \left(2\nu_k \sqrt{1 + \gamma^2} + \gamma\right)\right]^2 + 3\gamma^2 \left(\sqrt{1 + \gamma^2} - \gamma\right)^2}.$$

Здесь  $p_0$  – максимальное контактное давление;  $b$  – полуширина полоски контакта цилиндрических поверхностей;  $\gamma$  – отношение глубины, на которой достигается максимум интенсивности тензора напряжений, к полуширине  $b$ . Величины  $p_0$  и  $b$  для поставленной контактной задачи определяются следующим образом [28]:

$$b = 2 \sqrt{\frac{PR(1 - \nu_k^2)}{E_k \pi l}}, \quad p_0 = \sqrt{\frac{PE_k}{\pi l R(1 - \nu_k^2)}}. \quad (18)$$

Параметр  $\gamma$  определяется в результате решения нелинейного уравнения

$$\left[ \left( \sqrt{1 + \gamma^2} - \gamma \right) \left( 2\nu_k \sqrt{1 + \gamma^2} + \gamma \right) - 1 \right] \left[ \left( \sqrt{1 + \gamma^2} - \gamma \right) \left( 2\nu_k \gamma + \sqrt{1 + \gamma^2} \right) - 2\nu_k \right] + 3\gamma \left( \sqrt{1 + \gamma^2} - \gamma \right) \left[ 1 + \gamma^2 - \gamma(2 + \gamma^2) \left( 1 + \gamma^2 \right)^{-0,5} \right] = 0. \quad (19)$$

Значение объемной доли наполнителя следует выбирать так, чтобы для данного тела выполнялось неравенство  $\sigma_u^{\max} < \sigma_k^{cr}$ . Диапазон значений  $\varphi$ , при которых выполняется это условие, определяется следующим образом:

1) С использованием ранее изложенной методики (1)–(16) устанавливаются расчетные зависимости упругих характеристик  $E_k$ ,  $\nu_k$  и предела текучести  $\sigma_k^{cr}$  композита.

2) Зная функции  $E_k(\varphi)$  и  $\nu_k(\varphi)$ , по формулам (17)–(19) устанавливаются зависимости от параметра  $\varphi$  сближения  $u$  и максимального значения интенсивности напряжений  $\sigma_u^{\max}$ .

3) Искомый диапазон значений объемной доли наполнителя определяется в результате сопоставления расчетных зависимостей  $\sigma_u^{\max}(\varphi)$  и  $\sigma_k^{cr}(\varphi)$ .

Если на контактную пару дополнительно накладывается условие заданной минимальной жесткости, то значение объемной доли  $\varphi$  должно обеспечивать выполнение неравенства  $u(\varphi) < u_{\max}$ . Здесь  $u_{\max}$  – определяемое техническими условиями максимально допустимое сближение контактирующих тел.

На рисунке 1 представлено сопоставление расчетных зависимостей предела текучести композита и максимального значения интенсивности тензора напряжений. Можно отметить, что условие прочности  $\sigma_u^{\max} < \sigma_k^{cr}$  выполня-

ется при  $\varphi < \varphi_p$ . Значение максимально допустимой по критерию прочности объемной доли наполнителя  $\varphi_p$  определяется как решение нелинейного уравнения  $\sigma_u^{\max}(\varphi_p) = \sigma_k^{cr}(\varphi_p)$ . С уменьшением жесткости межфазного слоя значение доли  $\varphi_p$  увеличивается.

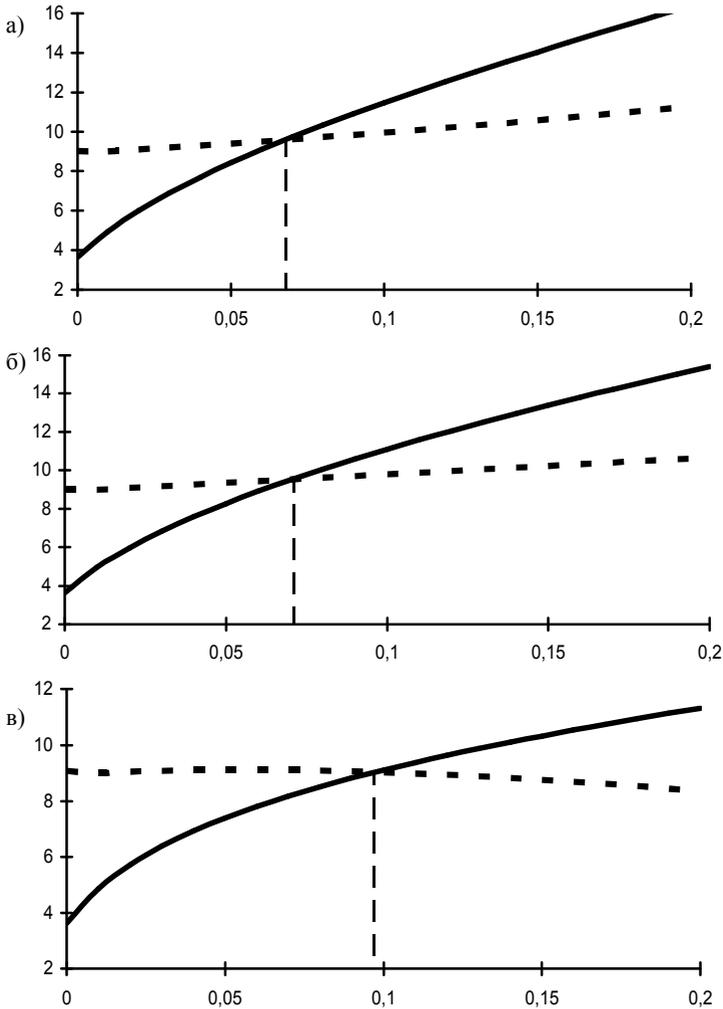


Рисунок 1 – Зависимость максимального значения интенсивности тензора напряжений в контактирующих телах (сплошные кривые) и предела текучести композита (пунктирные) от объемной доли наполнителя в случае жесткого межфазного слоя (а), без учета слоя (б) и для случая «мягкого» межфазного слоя (в)

Наряду со значением объемной доли наполнителя относительно легко регулируемой характеристикой композита является параметр анизотрии частиц наполнителя  $\chi$ . На рисунке 2 представлены расчетные зависимости предельного значения  $\varphi_p$  от параметра  $\chi$  при отсутствии межфазного слоя ( $G_l = G_m$ ). Из анализа данной зависимости следует, что снижение анизотрии включений (приближение их конфигурации к сферической) позволяет расширить диапазон возможных по критерию прочности значений объемной доли наполнителя. Однако рост параметра  $\chi$  сопровождается существенным снижением жесткости контактной пары, о чем свидетельствует представленная на рисунке 2 зависимость сближения  $u$  от параметра  $\chi$  при  $\varphi = 0,05$ .

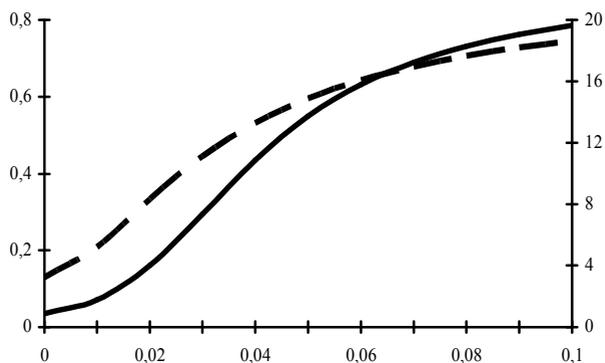


Рисунок 2 – Зависимость максимально допустимого значения объемной доли наполнителя (сплошная кривая) и сближения контактирующих тел при  $\varphi = 0,05$  от параметра анизотрии включений для композита без учета межфазного слоя

**Заключение.** В представленной работе показано, что усовершенствованная методика расчета эффективных механических характеристик композитов позволяет учитывать не только анизотрию частиц наполнителя, но и анизотропию составного включения, образованного частицей наполнителя и межфазным слоем. Также в рамках разработанной методики учитывается зависимость относительного объема межфазного слоя от объемного содержания наполнителя. При использовании предлагаемой методики для анализа контакта цилиндров, образованных дисперсно-наполненным короткими углеродными волокнами политетрафторэтилена, установлены следующие закономерности:

- 1) снижение максимально допустимой по критерию прочности объемной доли наполнителя  $\varphi_p$  с увеличением жесткости межфазного слоя;
- 2) рост максимально допустимой доли  $\varphi_p$  с увеличением параметра анизотрии частиц наполнителя  $\chi$ , равного отношению наименьшего размера частицы к наибольшему;
- 3) увеличение сближения контактирующих тел при неизменной нагрузке и объемной доле наполнителя с ростом параметра  $\chi$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Interphase layer theory and application in the mechanics of composite materials** / S. A. Lurie [et al.] // Journal of Materials Science. – 2006. – Vol. 41, № 20. – P. 140–152.
- 2 **Гаришин, О. К.** Исследование структурных напряжений в дисперсно наполненных эластомерных нанокомпозитах / О. К. Гаришин, С. Н. Лебедев // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2006. – Т. 12, № 3. – С. 289–299.
- 3 **Козлов, Г. В.** Фрактальный анализ структуры и свойств межфазных слоев в дисперсно-наполненных полимерных композитах / Г. В. Козлов, Ю. Г. Яновский, Ю. С. Липатов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2002. – Т. 8, № 1. – С. 111–149.
- 4 **Новиков, В. У.** Фрактальная параметризация структуры наполненных полимеров / В. У. Новиков, Г. В. Козлов // Механика композитных материалов. – 1999. – Т. 35, № 3. – С. 269–290.
- 5 **Козлов, Г. В.** Фрактальная модель усиления эластомерных нанокомпозитов / Г. В. Козлов, А. И. Буря, Ю. С. Липатов // Механика композитных материалов. – 2006. – Т. 42, № 6. – С. 797–802.
- 6 **Бурьян, О. Ю.** Моделирование межфазного слоя в композитах с полимерной матрицей. Определение его структуры и механических свойств / О. Ю. Бурьян, В. У. Новиков // Механика композитных материалов. – 2002. – Т. 38, № 3. – С. 289–304.
- 7 **Черноус, Д. А.** Анализ механического поведения дисперсно-армированных нанокомпозитов. Метод расчета эффективных упругих характеристик / Д. А. Черноус, С. В. Шилько, С. В. Панин // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13, № 4. – С. 85–90.
- 8 **Черноус, Д. А.** Анализ механического поведения дисперсно-армированных нанокомпозитов. Оценка локальной прочности включения, межфазного слоя и приграничного объема матрицы / Д. А. Черноус, С. В. Шилько, С. В. Панин // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14, № 1. – С. 67–83.
- 9 **Липатов, Ю. С.** Расчетно-теоретическая оценка влияния граничных слоев связующего на вязкоупругие свойства композиционного материала / Ю. С. Липатов, В. Ф. Бабич, Л. Н. Перепелицина // Высокомолекулярные соединения. Сер. Б. – 1982. – Т. 24, № 7. – С. 548–553.
- 10 **Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация** / Ю. К. Машков [и др.]. – М.: Машиностроение, 2005. – 240 с.
- 11 **Кристенсен, Р.** Введение в механику композитов / Р. Кристенсен. – М.: Мир, 1982. – 334 с.
- 12 **Эшелби, Дж.** Континуальная теория дислокаций / Дж. Эшелби. – М.: Иностранная лит., 1963. – 247 с.
- 13 **Плуме, Э.** Влияние анизотрии пластинчатых наночастиц наполнителя на константы упругости трансверсально-изотропного композита / Э. Плуме, Р. Д. Максимов, А. Лагздинь // Механика композитных материалов. – 2008. – Т. 44, № 4. – С. 493–504.
- 14 **Лагздинь, А.** Анизотметрия упругости композита с разноориентированными частицами наполнителя / А. Лагздинь, Р. Д. Максимов, Э. Плуме // Механика композитных материалов. – 2009. – Т. 45, № 4. – С. 507–524.

15 **Влияние добавок углеродных нанотрубок на физико-механические свойства поливинилацетата** / Р. Д. Максимов [и др.] // Механика композитных материалов. – 2010. – Т. 46, № 3. – С. 345–362.

16 **Шилько, С. В.** Мезомеханический анализ свойств полимерных композитов, армированных короткими волокнами, с учетом межфазного слоя / С. В. Шилько, С. В. Панин, Д. А. Черноус // Механика композитных материалов. – 2012. – № 2. – С. 249–260.

17 **Двухуровневый метод расчета трибосопряжений из дисперсно-армированных композитов:** Ч. 1 / С. В. Шилько [и др.] // Трение и износ. – 2013. – Т. 34, № 1. – С. 82–86.

18 **Микуленок, И. О.** Классификация термопластических композиционных материалов и их наполнителей / И. О. Микуленок // Пластические массы. – 2012. – № 9. – С. 29–38.

19 **Eshelby, J. D.** The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems / J. D. Eshelby // Proc. Roy. Soc. Ser. A. – 1957. – Vol. 241. – P. 376–396.

20 **Mori, T.** Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions / T. Mori, K. Tanaka // Acta Metallurgica. – 1973. – Vol. 21, № 5. – P. 571–574.

21 **Федотов, А. Ф.** Приложение модели деформирования пористых материалов к расчету пластических свойств зернистых композитов / А. Ф. Федотов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 508–526.

22 **Моделирование изменения механических свойств полиуретановых эластомеров при модифицировании углеродными нанотрубками** / Э. Р. Бадамшина [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15, № 3. – С. 5–10.

23 **Юркин, Ю. В.** Методика прогнозирования динамических свойств полимерных композитов при различных температурах / Ю. В. Юркин, В. Д. Черкасов, В. В. Авдонин // Материалы, технологии, инструменты. – 2012. – Т. 17, № 1. – С. 92–96.

24 **Данченко, С. Г.** Новые полимерные материалы для поршневых колец компрессоров / С. Г. Данченко, В. А. Шелестова, П. Н. Гракович // Сб. науч. тр. «Актуальные вопросы машиноведения». – Минск: ОИМ, 2012. – Вып. 1. – С. 377–379.

25 **Гузь, И. А.** Сравнение механических свойств и эффектов в микро- и нанокompозитах с углеродными наполнителями (углеродными микроволокнами, графитовыми микроусами и углеродными нанотрубками) / И. А. Гузь, Я. Я. Рушицкий // Механика композитных материалов. – 2004. – Т. 40, № 3. – С. 289–306.

26 **Старовойтов, Э. И.** Основы теории упругости, пластичности и вязкоупругости / Э. И. Старовойтов. – Гомель: БелГУТ, 2001. – 344 с.

27 **Черноус, Д. А.** Определение параметров межфазного слоя в наполненных полимерах / Д. А. Черноус // Материалы VI междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы безопасности на транспорте», Гомель, 29–30 ноября 2012 г. – Гомель: БелГУТ, 2012. – С. 306–307.

28 **Демидов, С. П.** Теория упругости / С. П. Демидов. – М.: Высш. шк., 1979. – 432 с.

29 **Тескер, Е. И.** Теоретические исследования контактной прочности высоконагруженных опор качения трансмиссий / Е. И. Тескер, В. Ю. Тараненко // Актуальные вопросы машиноведения. – 2012. – Вып. 1 – С. 232–234.

30 **Кропотин, О. В.** Оценка работоспособности кольцевых уплотнений из углепластиков по модифицированным критериям качества / О. В. Кропотин, Ю. К. Машков, С. В. Шилько // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2013. – № 1 (22). – С. 67–70.

*D. A. CHERNOUS*

## **THE CALCULATION METHOD OF THE STRUCTURAL COMPOSITE COMPONENTS OPTIMIZATION**

Previously developed two-tiered approach for the structural composite composite optimization was improved and generalized. The improved approach was used to determine the filler maximal allowable volume fraction which provides the strength of the arbitrary configuration detail made from the dispersion-filled short carbon fibers of polytetrafluoroethylene. The detail fragment near the cylindrical surfaces contact region was considered.

Получено 28.10.2013

---

**ISSN 2227-1104. Механика. Научные исследования  
и учебно-методические разработки. Вып. 7. Гомель, 2013**

---

УДК 629.423.33

*А. О. ШИМАНОВСКИЙ, И. И. КАПЛЮК*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ПОДВИЖНЫХ РАМ ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Рассматриваются технические требования, предъявляемые к механическим свойствам токоприемников рельсового подвижного состава. Предлагается алгоритм аналитического расчета токосъемника исходя из постоянной силы прижатия токосъемника к проводу.

Спецификой электрического транспорта является подвод энергии через скользящий контакт между токоприемником и контактной подвеской. Конструкции токоприемников и их характеристики определяются мощностью и скоростью электроподвижного состава (ЭПС), габаритами подвижного состава и приближения строений, расположением контактных проводов в плане и по высоте. По величине токовой нагрузки их делят на два типа: тяжелый (Т) и легкий (Л) [1]. Для обеспечения надежного контакта полозов (лыж) токоприемника с расположенными на разной высоте контактными проводами (для магистральных железных дорог эта высота составляет 5550–6900 мм относительно уровня пути) используется специальный механизм подвижных рам. Диапазон рабочих высот токоприемника определяет размеры его конструкции. Наибольшая высота подъема полоза над поверхностью кузова должна быть не менее 2100 мм [2].