



МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 539.3

С.В. ШИЛЬКО, канд. техн. наук, доц.
заведующий лабораторией механики композитов и биополимеров
E-mail: shilko_mpr@gmail.ru

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 24.04.2019.

ДВУХУРОВНЕВЫЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА МАТЕРИАЛА ДЕТАЛЕЙ МАШИН ИЗ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ

Описан двухмасштабный расчетный метод, позволяющий оптимизировать состав материала деталей машин и элементов конструкций исходя из требований, предъявляемых к их деформационно-прочностным и триботехническим характеристикам. Предлагаемый метод предусматривает совместное использование аналитического микромеханического моделирования структурно неоднородных конструкционных материалов в виде дисперсно-армированных композитов и численный (конечноэлементный) анализ напряженно-деформированного состояния конкретного изделия. Достоинством метода является обеспечение максимальной прочности, жесткости и износостойкости изделия с одновременной коррекцией его геометрической формы и возможностью использования получаемой уточненной САД-модели для 3D-печати деталей сложной формы экструдированными композитами оптимизированного состава.

Ключевые слова: детали машин, дисперсно-армированные композиты, деформационные и триботехнические характеристики, напряженное состояние, САД-модели, оптимизация состава, 3D-печать

Введение. Разработка конструкционных, антифрикционных, биосовместимых и других функциональных композиционных материалов (КМ) — одно из приоритетных научных направлений. При всей важности и распространенности традиционного, но, к сожалению, во многом эмпирического подхода к поиску оптимальных рецептов, новой тенденцией является попытка расчетного прогнозирования структурных параметров композитов, обеспечивающих получение желаемых деформационно-прочностных и триботехнических характеристик изделий (деталей машин и элементов конструкций) [1].

Это становится возможным благодаря успехам в области физики прочности и механики деформируемого твердого тела. Компьютерное моделирование и последующие так называемые виртуальные испытания уже используют при создании космической и авиационной техники, оборудования для атомного машиностроения, изделий медицинского назначения и других ответственных

приложений, когда отказ одного конструктивного элемента приводит к значительным экономическим и социальным потерям.

Но пока приходится констатировать отсутствие общепризнанного «универсального» метода прочностного и триботехнического расчета деталей машин и элементов конструкций из дисперсно-наполненных КМ, включая полимерные микро- и нанокомпозиты. Между тем эти материалы широко применяются в машиностроении, прежде всего, в триботехнике, поскольку введение в термопластичную полимерную матрицу высокопрочных частиц или коротких волокон существенно улучшает ее антифрикционные и деформационно-прочностные свойства с сохранением высокой технологичности переработки в изделия методами литья под давлением, экструзии и, в последнее время, 3D-печати.

К примеру, расчетная оценка износостойкости зубчатых колес из стекло- и углепластиков на основе полиамида в работе [2] показала кратное по-

вышение ресурса зубчатой передачи в результате одновременного повышения изгибной прочности и износостойкости при оптимальном содержании наполнителя.

В этой связи актуальна разработка метода, предусматривающего расчетное или, по меньшей мере, расчетно-экспериментальное определение базовых деформационно-прочностных параметров композитов.

Методология исследования. Существующие методы механико-математического описания КМ предусматривают возможность континуальной идеализации («размазывания») их реальной микронеоднородной структуры. Это позволяет получить аналитические расчетные зависимости в рамках теории упругости квазиоднородной среды [3]. Затем выполняют расчеты напряженно-деформированного состояния, деформационно-прочностных и триботехнических характеристик изделий. Но эти подходы не всегда дают приемлемую точность оценки прочности и деформативности изделий из структурно-неоднородных материалов.

В то время как трудности описания геометрической формы изделий успешно преодолеваются применением конечноэлементной аппроксимации, остается проблема конкретизации физических соотношений. Это связано с трудностью получения исходных данных (модулей упругости, вязкости, пределов прочности, параметров скоростной чувствительности и т. п. характеристик композитов). Их традиционное экспериментальное определение для различных объемных соотношений матричного и армирующего компонентов, вариантов формы и ориентации частиц наполнителя является дорогостоящей и длительной процедурой.

Весьма востребовано также решение обратной задачи компьютерного дизайна композита, а именно автоматизированный поиск его рецептуры (содержания армирующего наполнителя, формы частиц и т. д.) существующими методами оптимизации [4] по заданному разработчиком критерию качества, в т. ч. без изменения заданной геометрической формы детали [1].

Реализация такого расчетного подхода дополняет трудоемкий экспериментальный поиск оптимальных составов композиционных материалов по общим критериям деформативности, прочности и износостойкости [5], что далеко не всегда учитывает специфику работы конкретных сопряжений.

Рассмотрим возможности мультимасштабного компьютерного дизайна (проектирования) структуры дисперсно-наполненных композитов [6] для создания деталей машин с оптимальными характеристиками. В принципе степень детализации КМ и число уровней могут быть довольно высокими, но адекватное описание сложной структуры и межфазного взаимодействия компонентов

на уровне отдельных армирующих включений, межфазных слоев и надмолекулярных структур путем сквозной дискретизации конечными элементами, очевидно, ограничено вычислительными ресурсами. Представляется рациональным **двухуровневое** моделирование КМ, сочетающее микроскопическое (на уровне структурных единиц материала) и макроскопическое (детали или элемента конструкции) описание с промежуточным этапом верификации в масштабе стандартного образца материала.

На первом (микроскопическом) уровне представительный (повторяющийся характерный и минимальный по размеру) объем неоднородного материала схематизируется в виде структурного элемента (ячейки периодичности), как показано в таблице 1.

Записываются определяющие соотношения для эффективных деформационно-прочностных характеристик компонентов КМ, учитывающие их упругие, пластические и вязкие свойства, форму и ориентацию армирующих включений, параметры межфазного слоя, наличие микродефектов и т. д.

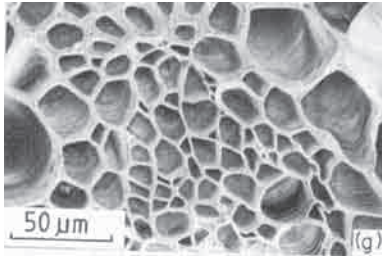
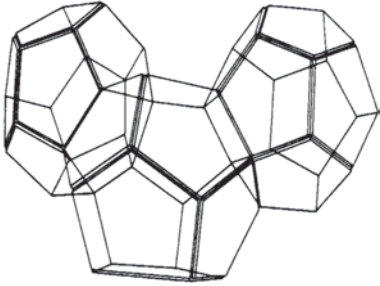
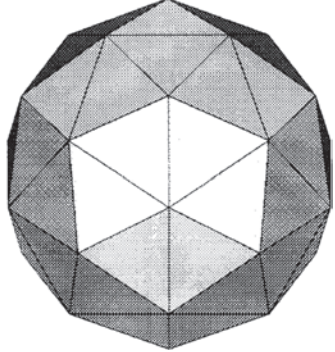
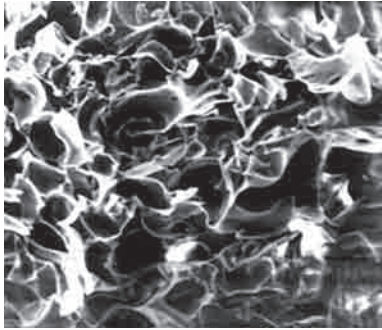
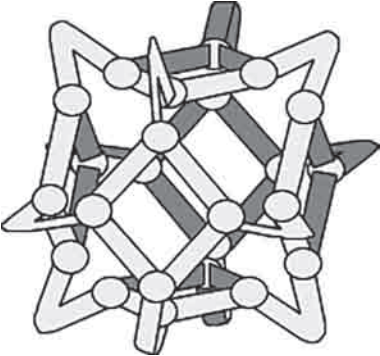
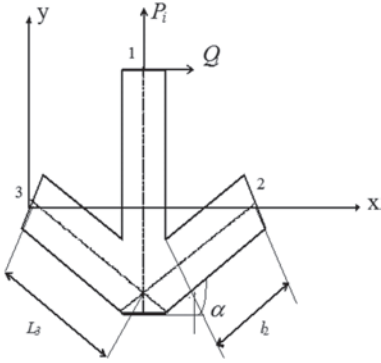
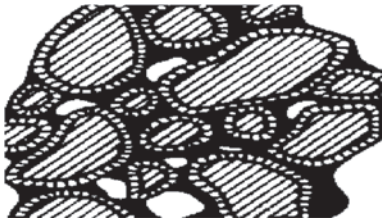
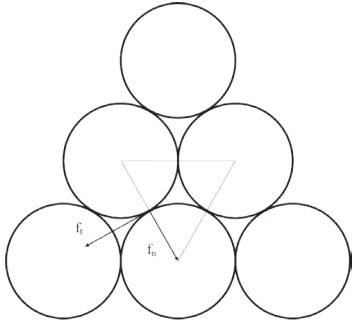
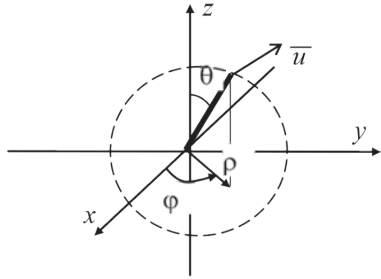
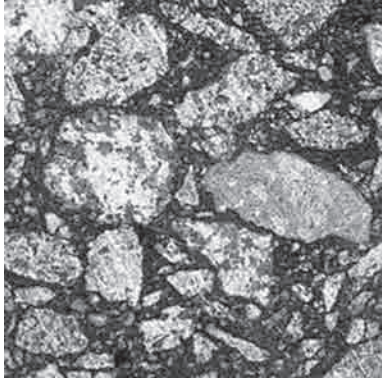
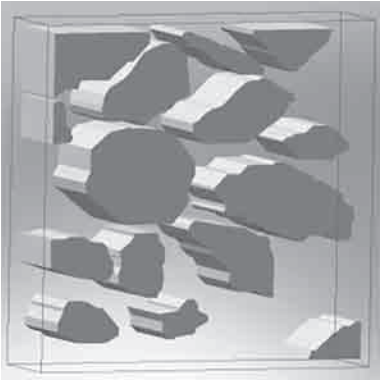
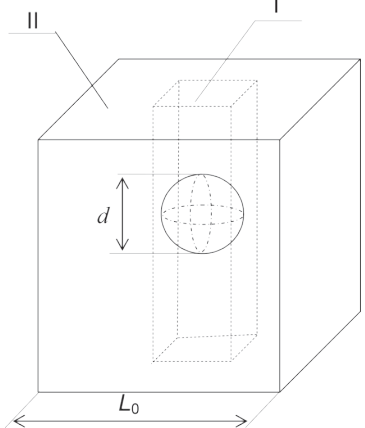
Ввиду ограниченного объема статьи, приходится отсылать читателя к источникам [3, 7–10], в которых дано подробное описание моделей дисперсно-наполненных КМ; укажем лишь естественные требования к структурным элементам и их микромеханическим моделям:

- структурный элемент должен отражать характерные особенности строения и деформационного поведения исследуемого композита;
- при прочих равных условиях предпочтительны модели, основанные на более простом математическом описании, а получаемые расчетные оценки должны соответствовать имеющимся экспериментальным данным.

На промежуточной стадии излагаемого метода расчета с учетом микромеханического описания моделируется образец материала стандартной (обычно канонической — прямоугольной или цилиндрической — формы). Производится сопоставление результатов реальных и виртуальных (полученных с помощью механико-математической модели) механических испытаний образца определенного состава. Стадия верификации очень важна, так как она позволяет минимизировать погрешности микромеханической модели, обусловленные приближенным заданием модулей упругости локальных объемов материала, схематизацией структуры КМ, допущениями о характере деформирования и т. д.

Определенные на первом масштабном уровне эффективные характеристики используются в качестве исходных данных последующего анализа на втором (**макроскопическом**) уровне с учетом реальной геометрии и характера нагружения детали или элемента конструкции.

Таблица 1 — Микроструктура и ячейки периодичности различных неоднородных материалов
 Table 1 — Microstructure and periodicity cells of different inhomogeneous materials

Тип материала	Схема структуры	Структурный элемент (ячейка периодичности)
<p>Закрытопористый</p> 		
<p>Открытопористый</p> 		
<p>Гранулированный</p> 		
<p>Дисперсно-наполненный</p> 		

На основе двухуровневого рассмотрения выполняют компьютерный дизайн («проектирование») структуры материала по схеме, включающей следующие этапы (рисунок 1):

- 1) экспериментальное исследование композита (микроскопия и диагностика);
- 2) схематизация структуры в представительном объеме материала;



Рисунок 1 — Общая схема двухуровневого метода расчета и проектирования изделий из дисперсно-армированных композиционных материалов

Figure 1 — General scheme of two-level method of calculation and design of products from disperse-reinforced composite materials

3) построение структурного элемента «наполнитель—межфазный слой—матрица»;

4) вывод определяющих соотношений для структурного элемента и представительного объема;

5) анализ зависимости физико-механических характеристик от содержания и вида наполнителя;

II Макромеханический анализ:

6) твердотельное моделирование и построение расчетной модели изделия;

7) численный анализ напряженного состояния;

8) численный анализ деформированного состояния;

9) верификация расчетной модели по экспериментальным данным;

10) оптимизация состава композита (материаловедческое решение) и конструкции изделия (инженерное решение) по критериям качества.

После завершения процедуры полученная САД-модель может быть использована для 3D-печати деталей из КМ оптимизированного состава.

Нужно заметить, что в формировании эффективных механических характеристик композита чрезвычайно велика роль межфазного слоя, чему посвящен ряд публикаций [12–14]. Ввести такие слои в механико-математическую модель композита достаточно легко, однако определение их реальных геометрических и прочностных параметров является сложной проблемой, напрямую не решаемой ни экспериментальными, ни теоретическими методами. В этой связи исследователи применяют упрощающие допущения и предположения.

С учетом того, что модуль Юнга армирующего наполнителя во много раз превышает модуль упругости матричного материала, в работе [11] принято, что межфазный слой, как и армирующие включения, представляет собой недеформируемое тело, а для расчета эффективного модуля Юнга наполненного композита E_k справедливо перколяционное соотношение

$$E_k = E_m \left[1 + 11(c_f + c_i)^{1,7} \right],$$

где E_m — модуль Юнга полимерной матрицы; c_f , c_i — объемная доля включений и межфазного слоя соответственно.

Снятие допущения о недеформируемости межфазного слоя возможно при описании полимер-полимерных композитов, в т. ч. экструдированных полимерных сплавов [15], если деформации матрицы и наполнителя имеют один порядок величины. Аналогичное соотношение имеет место в металлокерамических или углерод-углеродных композитах, когда модуль упругости матрицы высок и сопоставим с модулем упругости армирующих частиц. Данная ситуация наблюдается также при наполнении нежесткими частицами оболочечного типа в виде нанотрубок, пустотелых растительных волокон или стеклянных микросфер.

Однако при рассмотрении большинства дисперсно-армированных композитов определение механических характеристик межфазного слоя является ключевой задачей. В работе [1] параметры межфазного слоя предложено вычислять в рамках излагаемого двухуровневого метода путем иденти-

фикации микромеханической модели с использованием экспериментальных данных, полученных при испытании стандартного образца композита. В результате при известных упругих и геометрических параметрах композита и его основных компонент (матрицы и наполнителя) удастся найти эффективные механические характеристики межфазного слоя.

Итерационное повторение этапов 2–9 излагаемого двухуровневого метода позволяет решить материаловедческую задачу определения области значений параметров матрицы, наполнителя и межфазного слоя, обеспечивающих получение заданных физико-механических характеристик изделия с заданной точностью.

Пример расчета. Для иллюстрации метода рассмотрим оптимизацию состава композиционного материала кольцевого уплотнительного элемента камер высокого давления, применяемых для синтеза веществ, получения заготовок материалов методом прессования, а также исследования их физико-механических свойств (рисунок 2). Деформационные характеристики уплотнения должны быть таковы, чтобы обеспечить герметичность и при этом не оказывать чрезмерного сопротивления движению пуансона. Эту задачу можно решить, оптимизируя состав композиционного материала уплотнения описанным выше методом.

Исходные данные для определения механических характеристик материала уплотнения в виде дисперсно-армированного композита (матрица—полиамид, наполнитель—стекловолокно) включали:

- модуль Юнга материала матрицы $E_m = 2$ ГПа;
- коэффициент Пуассона материала матрицы $\nu_m = 0,45$;
- предел текучести материала матрицы $\sigma_m = 50$ МПа;
- модуль Юнга материала наполнителя $E_f = 70$ ГПа;
- коэффициент Пуассона материала наполнителя $\nu_f = 0,2$;
- параметр анизотрии (отношение малой оси эллипсоида, моделирующего частицу наполнителя, к его большой оси) $\chi = 0,1$;
- объемная доля наполнителя $V_f = 0,05 \div 0,35$;
- модуль Юнга материала межфазного слоя $E_j = 1$ ГПа;
- коэффициент Пуассона материала межфазного слоя $\nu_j = 0,4$;
- предел текучести материала межфазного слоя $\sigma_j = 100$ Мпа.

Так как непосредственное определение параметров межфазного слоя затруднено, производилось варьирование его относительного объема q

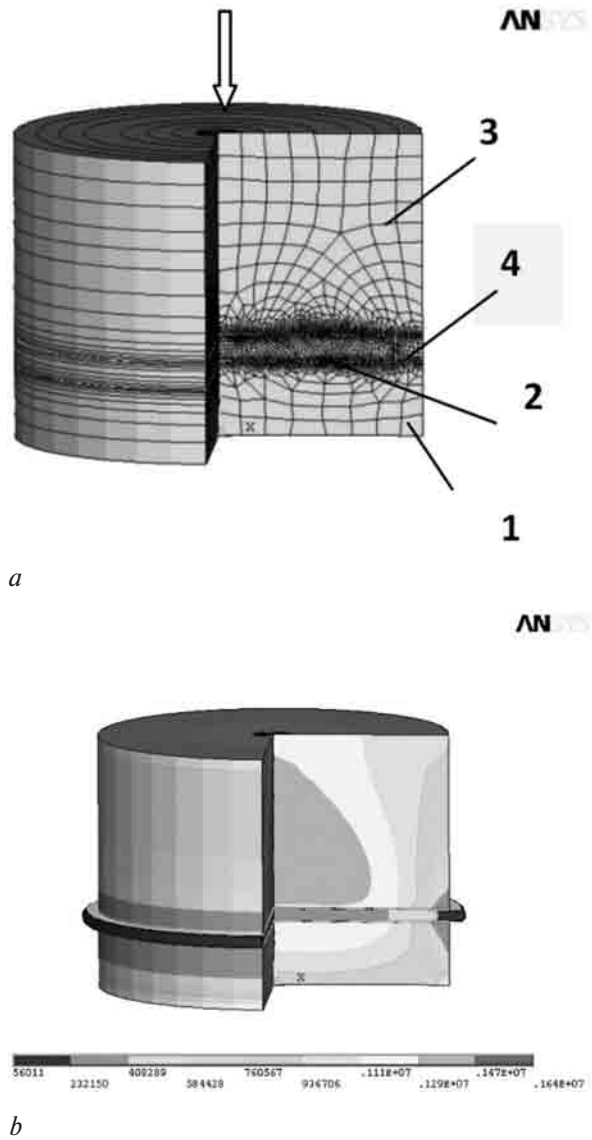


Рисунок 2 — Конечнэлементная модель (а) и напряженное состояние (б) сопряжения: 1 — наковальня; 2 — заготовка; 3 — пуансон; 4 — уплотнительный элемент
Figure 2 — Finite element model (a) and stress state (b) of joint: 1 — anvil; 2 — workpiece; 3 — hob; 4 — seal element

(отношения объема слоя к объему наполнителя) в пределах $0,001 \div 0,1$. Для более точной оценки параметров межфазного слоя следует использовать процедуру идентификации по экспериментальным данным. Коэффициент трения материалов заготовки и уплотнения по стали был равен $0,3$. Для материала заготовки задавались модуль упругости $E_m = 0,5$ ГПа и коэффициент Пуассона $\nu_m = 0,3$. Результаты расчета модуля упругости и коэффициента Пуассона материала уплотнения для $q = 0,1$ приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Теоретические значения модуля упругости E^y и коэффициента Пуассона ν^y дисперсно-наполненного материала уплотнения
Table 2 — Theoretical values of elasticity modulus E^y and Poisson's ratio ν^y of dispersed-filled seal material

V_f	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,70
E^y , ГПа	2,4	2,8	3,3	3,8	4,4	5,0	5,6	13,9
ν^y	0,445	0,439	0,433	0,426	0,421	0,415	0,409	0,369

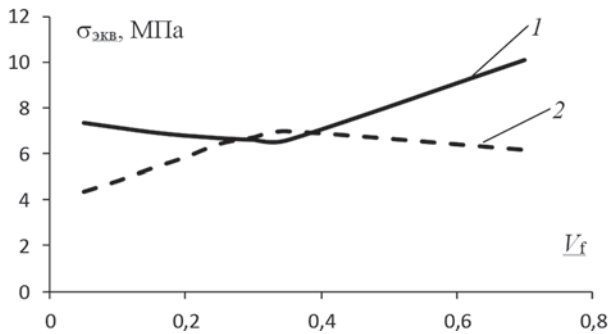


Рисунок 3 — Зависимости максимальных эквивалентных напряжений в заготовке $\sigma_{\text{экв}}^{\text{м}}$ (1) и уплотнительном элементе $\sigma_{\text{экв}}^{\text{у}}$ (2) от объемной доли наполнителя V_f
 Figure 3 — Dependences of maximum equivalent stresses in workpiece $\sigma_{\text{экв}}^{\text{м}}$ (1) and seal element $\sigma_{\text{экв}}^{\text{у}}$ (2) on volume fraction of filler V_f

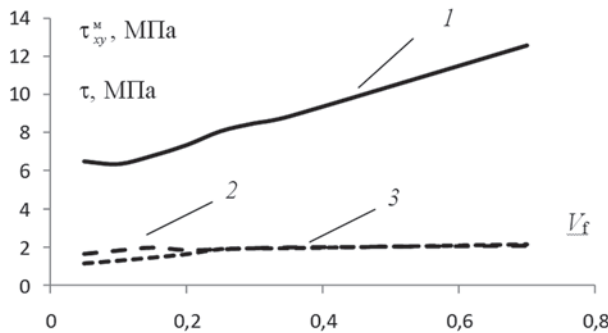


Рисунок 4 — Зависимости максимальных контактных давлений p (1), напряжений трения τ (2) и касательных напряжений $\tau_{\text{xy}}^{\text{м}}$ (3) от объемной доли наполнителя V_f
 Figure 4 — Dependences of maximum contact pressures p (1), friction stresses τ (2) and shear stresses $\tau_{\text{xy}}^{\text{м}}$ (3) on volume fraction of filler V_f

Можно заметить существенное влияние дисперсного армирования на упругие характеристики композита E_c и ν_c . Вычисленные параметры материала использовались в качестве исходных данных для последующего анализа напряженно-деформированного состояния сопряжения.

В результате конечноэлементного решения контактной задачи с трением (программа ANSYS) были получены распределения компонент напряженно-деформированного состояния, включая эквивалентное напряжение в уплотнительном элементе $\sigma_{\text{экв}}^{\text{у}}$; эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв}}^{\text{м}}$ и касательное напряжение $\tau_{\text{xy}}^{\text{м}}$ в заготовке; контактное давление p и касательное контактное напряжение τ . Зависимости максимальных значений напряжений от объемного содержания наполнителя при относительном объеме межфазного слоя $q = 0,1$ приведены на рисунках 3, 4.

Направленно изменяя содержание армирующего наполнителя, можно регулировать распределение указанных напряжений, определяющих работоспособность уплотнения. Как показано на рисунке 4, в определенном интервале объемного содержания наполнителя V_f достигается равенство максимальных эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ в заготовке и уплотнительном элементе.

Заключение. Совместное использование микро- и макроскопического моделирования неоднородных материалов в соответствии с предлагаемым двухуровневым методом является важным преимуществом при определении механических и триботехнических характеристик деталей машин и элементов конструкций, а также оптимизации состава дисперсно-наполненных композитов для изготовления указанных изделий.

Достоинством метода является также возможность использования получаемой оптимизированной CAD-модели для 3D-печати изделий сложной формы экструдированными композитами оптимизированного состава.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (проекты T18P-286 ((№ 18-58-00037_Бел_а), T18KOPГ-4).

Список литературы

1. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б.А. Люкшин [и др.]. — Новосибирск: Изд-во СО РАН Наука, 2017. — 311 с.
2. Элементы привода приборов / В.Е. Старжинский [и др.]. — Минск: Беларус. навука, 2012. — 769 с.
3. Кристенсен, Р. Введение в механику композитов / Р. Кристенсен. — М.: Мир, 1982. — 334 с.
4. Баничук, Н.В. Введение в оптимизацию конструкций / Н.В. Баничук. — М.: Наука, 1986. — 302 с.
5. Современная трибология: итоги и перспективы / отв. ред. К.В. Фролов. — М.: Изд-во ЛКИ, 2008. — 480 с.
6. Двухуровневый метод расчета трибосопряжений из дисперсно-армированных композитов / С.В. Шилько [и др.] // Трение и износ. — 2013. — Т. 34, № 1. — С. 82–86.
7. Mori, T. Average Stress in Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions / T. Mori, K. Tanaka // Acta Metallurgica. — 1973. — Vol. 21, No. 5. — Pp. 571–574.
8. Лагздинь, А. Анизометрия упругости композита с разноориентированными частицами наполнителя / А. Лагздинь, Максимов Р.Д., Э. Плуме // Механика композитных материалов. — 2009. — Т. 45, № 4. — С. 507–524.
9. Яновский, Ю.Г. Некоторые аспекты компьютерного моделирования структуры и микромеханических свойств перспективных полимерных композиционных материалов / Ю.Г. Яновский, И.Ф. Образцов // Физическая мезомеханика. — 1998. — Т. 1, № 1. — С. 135–142.
10. Гаришин, О.К. Исследование структурных напряжений в дисперсно наполненных эластомерных нанокompозитах / О.К. Гаришин, С.Н. Лебедев // Механика композиционных материалов и конструкций. — 2006. — Т. 12, № 3. — С. 289–299.
11. Козлов, Г.В. Фрактальная модель усиления эластомерных нанокompозитов / Г.В. Козлов, А.И. Буря, Ю.С. Липатов // Механика композитных материалов. — 2006. — Т. 42, № 6. — С. 797–802.
12. Interphase Layer Theory and Application in the Mechanics of Composite Materials / S.A. Lurie [et al.] // Journal of Materials Science. — 2006. — Vol. 41, No. 20. — Pp. 140–152.
13. 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.
14. Шилько, С.В. Анализ механического поведения дисперсно-армированного нанокompозита. Ч. 2: Оценка локальной прочности включения, межфазного слоя и приграничного объема матрицы / С.В. Шилько, Д.А. Черноус, С.В. Панин // Физическая мезомеханика. — 2011. — Т. 14, № 1. — С. 67–73.
15. Extrudable UHMWPE-Based Composites: Prospects of Application in Additive Technologies / S.V. Panin [et al.] // Nanoscience and Technology: An International Journal. — 2017. — Vol. 8, No. 2. — Pp. 85–94.

SHILKO Sergey V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Laboratory of Mechanics of Composites and Biopolymers

E-mail: shilko_mpri@mail.ru

V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

Received 24 April 2019.

TWO-LEVEL METHOD FOR OPTIMIZING MATERIAL COMPOSITION OF MACHINE COMPONENTS FROM DISPERSE-REINFORCED COMPOSITES

A two-scale calculation method is described that makes it possible to optimize the material composition of machine components and structural elements on the basis of the requirements for their deformation-strength and tribotechnical characteristics. The proposed method provides the combined use of analytical micromechanical modelling of structurally inhomogeneous structural materials in the form of disperse-reinforced composites and numerical (finite element) analysis of the stress-strain state of a particular product. The advantage of the method is ensuring of maximum strength, stiffness and wear resistance of the product with simultaneous correction of its geometric shape and the possibility of using the resulting refined CAD model for 3D printing of components of complex shape by extruded composites of optimized composition.

Keywords: machine components, disperse-reinforced composites, deformation and tribotechnical characteristics, stress state, CAD models, composition optimization, 3D printing

References

1. Lyukshin B.A., Shilko S.V., Panin S.V., et al. *Dispersno-napolnennyye polimernyye kompozity tekhnicheskogo i meditsinskogo naznacheniya* [Disperse-filled polymer composites for technical and medical purposes]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2017. 311 p.
2. Starzhinskiy V.E., Shalobaev E.V., Shilko S.V. *Elementy privoda priborov* [Device drive elements]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012. 769 p.
3. Christensen R.M. *Mechanics of composite materials*. New York, Wiley-Interscience, 1979. 348 p.
4. Banichuk N.V. *Vvedenie v optimizatsiyu konstruksiy* [Introduction to structural optimization]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 302 p.
5. Frolov K.V. *Sovremennaya tribologiya: itogi i perspektivy* [Modern tribology: results and prospects]. Moscow, LKI Publ., 2008. 480 p.
6. Shilko S.V., Starzhinskiy V.E., Petrokovets E.M., Chernous D.A. Dvukhurovnevyy metod rascheta tribosopryazheniy iz dispersno-armirovannykh kompozitov [Two-level calculation method for tribojoints made of disperse-reinforced composites]. *Trenie i iznos* [Friction and wear], 2013, vol. 34, no. 1, pp. 82–86.
7. Mori T., Tanaka K. Average Stress in Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions. *Acta Metallurgica*, 1973, vol. 21, no. 5, pp. 571–574.
8. Lagzdin A., Maksimov R.D., Plume E. Anizometriya uprugosti kompozita s raznoorientirovannymi chastitsami napolnitya [Anisotropy of elasticity of a composite with irregularly oriented anisometric filler particles]. *Mekhanika kompozitnykh materialov* [Mechanics of composite materials], 2009, vol. 45, no. 4, pp. 507–524.
9. Yanovskiy Yu.G., Obraztsov I.F. Nekotorye aspekty kompyuternogo modelirovaniya struktury i mikromekhanicheskikh svoystv perspektivnykh polimernyykh kompozitsionnykh materialov [Some aspects of computer modeling of advanced polymer composite materials structure and micromechanical properties]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical mesomechanics], 1998, vol. 1, no. 1, pp. 135–142.
10. Garishin O.K., Lebedev S.N. Issledovanie strukturnykh napryazheniy v dispersno napolnennykh elastomernyykh nanokompozitakh [Study of structural stress in the dispersion filled elastomeric nanocomposites]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy* [Mechanics of composite materials and structures], 2006, vol. 12, no. 3, pp. 289–299.
11. Kozlov G.V., Burya A.I., Lipatov Yu.S. Fraktalnaya model usileniya elastomernyykh nanokompozitov [A fractal model of reinforcement of elastoplastic nanocomposites]. *Mekhanika kompozitnykh materialov* [Mechanics of composite materials], 2006, vol. 42, no. 6, pp. 797–802.
12. Lurie S.A., Belov P., Volkov-Bogorodsky D., Tuchkova N. Interphase Layer Theory and Application in the Mechanics of Composite Materials. *Journal of Materials Science*, 2006, vol. 41, no. 20, pp. 140–152.
13. Byryan O.Yu., Novikov V.U. Modelirovanie mezhfaznogo sloya v kompozitakh s polimernoy matritsey. Opredelenie struktury i mekhanicheskikh svoystv [Modelling of interfacial layer in polymer matrix composites. Determination of its structure and mechanical properties]. *Mekhanika kompozitnykh materialov* [Mechanics of composite materials], 2002, vol. 38, no. 3, pp. 289–304.
14. Shilko S.V., Chernous D.A., Panin S.V. Analiz mekhanicheskogo povedeniya dispersno-armirovannogo nanokompozita. Chast 2. Otsenka lokalnoy prochnosti vkhlyucheniya, mezhfaznogo sloya i prigranichnogo obema matritsy [Analysis of the mechanical behavior of disperse-reinforced nanocomposite. Part 2. Evaluation of local strength of the inclusion, the interphase layer and the border volume of the matrix]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical mesomechanics], 2011, vol. 14, no. 1, pp. 67–73.
15. Panin S.V., Kornienko L.A., Aleksenko V.O., Ivanova L.R., Shilko S.V., Pleskachevsky Yu.M. Extrudable UHMWPE-Based Composites: Prospects of Application in Additive Technologies. *Nanoscience and Technology: An International Journal*, 2017, vol. 8, no. 2, pp. 85–94.