

УДК 62-216.52

doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-10-19

Проблемы конструкторско-технологического проектирования изделий машиностроения на основе дисперсно-упрочненных полимерных композиционных материалов

И.А. Нотин

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Problems Associated with Design and Manufacturing of Parts Based on Particulate-Filled Polymer Composites

I.A. Notin

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрены вопросы конструкторского и технологического проектирования деталей машиностроения из дисперсно-упрочненных полимерных композиционных материалов, связанные с обеспечением заданных прочностных характеристик и технологичности процесса изготовления. Приведена методика, позволяющая оптимизировать процесс выбора рационального состава указанных материалов применительно к каждому конкретному изделию, базирующаяся на оценке удельной адгезионной энергии и эффективной вязкости материала в неотвержденном состоянии. Удельная адгезионная энергия оценена на основе положения о возникновении упорядоченного поверхностного слоя полимера вблизи границы раздела связующее — твердое тело и архитектуры представительного объема материала. Проведено сопоставление расчетных энергетических и технологических характеристик с результатами прочностных испытаний, позволившее установить, что изменение удельной адгезионной энергии находит отражение в варьировании прочностных характеристик дисперсно-упрочненного полимерного композиционного материала в зависимости от его состава. Предложенная методика обеспечивает комплексную оценку такого материала с точки зрения прочностных и технологических характеристик, базируясь на данных о его гранулометрическом составе, степени наполнения и типе связующего.

Ключевые слова: проектирование деталей машиностроения, полимерные композиционные материалы, прочностные характеристики, технологичность композиционного материала

In the article, issues related to engineering and manufacturing design of machine-building parts from particulate-filled polymer composites are considered in the light of achieving the required strength and technological characteristics. A technique is proposed to optimize the process of choosing a rational composition of particulate-filled polymer composites for each specific product based on the estimation of the specific adhesive energy and the effective viscosity of the material in the uncured state. The specific adhesive energy is estimated on the basis of the formation of an oriented surface layer at the binder - solid body interface as well as a structure of representative volume. The calculated energy and technological characteristics are compared with the results of strength testing. The comparison showed that a change in the specific adhesive energy was reflected in the change of strength characteristics of the particulate-filled polymer composite material depending on its composition. Thus, the proposed technique provides a comprehensive assessment of particulate-filled polymer

composite from the standpoint of strength and technological characteristics, based on the data on its granulometric composition, filling ratio and type of binder.

Keywords: design of engineering parts, polymer composite materials, strength characteristics, manufacturability of composite materials

Одним из основных факторов развития современного машиностроения является использование при проектировании деталей новых конструкционных материалов с повышенными физико-механическими свойствами и улучшенными технологическими характеристиками. Последнее имеет особое значение при единичном и мелкосерийном производстве деталей в условиях частой смены их номенклатуры.

В связи с этим обратимся к вопросам проектирования и технологии изготовления таких деталей, как станины станков, корпуса и основания механизмов, демпфирующие платформы и детали машиностроения др. Известно, что эти детали, выполняемые из чугуна, вследствие функционального назначения характеризуются высокими массогабаритными параметрами и жесткими требованиями к показателям надежности (по критерию прочности). Это вызывает при проектировании и изготовлении конструкций известные сложности и проблемы, приводящие к высокой трудоемкости и себестоимости производства [1–3].

В настоящее время в качестве альтернативного варианта рассматривается изготовление корпусных деталей из дисперсно-упрочненного полимерного композиционного материала (ДУПКМ). Этот материал, имеющий сопоставимые с серым чугуном механические свойства и более высокие демпфирующие характеристики [1], значительно снижает трудоемкость и себестоимость производства конструкции.

Основной проблемой при изготовлении деталей из ДУПКМ является определение рационального состава этого материала, обеспечивающего, с одной стороны, требуемые прочностные характеристики изделия (и, следовательно, надежность), а с другой — необходимые показатели вязкости (так как в неотвержденном состоянии ДУПКМ от нее зависят литейные возможности материала в процессе его формообразования).

В настоящее время решение этой проблемы находят в длительном подготовительном цикле подготовки производства, в рамках которого проводят испытания образцов ДУПКМ разного состава. С учетом многовариантности состава

ДУПКМ выбор рационального состава материала представляет для проектировщиков и технологов весьма трудоемкую и непростую задачу с высоким уровнем неопределенности.

Цель работы — проведение исследований, направленных на разработку научно-обоснованной методики, позволяющей снизить трудовые и материальные затраты при выборе рационального состава ДУПКМ на этапе подготовки производства применительно к каждому конкретному проектируемому изделию.

Системный подход к решению задачи выбора рационального состава ДУПКМ базируется на создании двух расчетных моделей, позволяющих оценивать в совокупности прочностные характеристики проектируемого материала и его вязкость в неотвержденном состоянии. Каждый из расчетных модулей дает возможность определить влияние на выходные характеристики всего массива параметров ДУПКМ: granulometric composition of filler, degree of filling, type of binder and structure of representative volume (PO).

Оценка прочностных характеристик ДУПКМ на основе данных о его составе. При разработке модели оценки прочностных характеристик ДУПКМ в качестве базового принципа принято положение о том, что в рассматриваемой системе доминирующая роль принадлежит ориентированному слою, состоящему из макромолекул, расположенному ортогонально к поверхности раздела двух фаз (твердое тело — полимер). В условиях смыкания упорядоченных слоев и образования высокопрочной «третьей пленочной фазы» начинается процесс формирования адгезионного соединения твердое тело — полимер — твердое тело (рис. 1). Вследствие этого энергия, необходимая для разрушения адгезионных связей, может служить критерием оценки прочностных характеристик ДУПКМ.

Справедливость указанного положения базируется на результатах исследований в области физической химии, полученных такими учеными, как В.А. Саркисян [2], Дж. Балко [3], А. Карим [4], А.Е. Грищенко [5] (изучавший

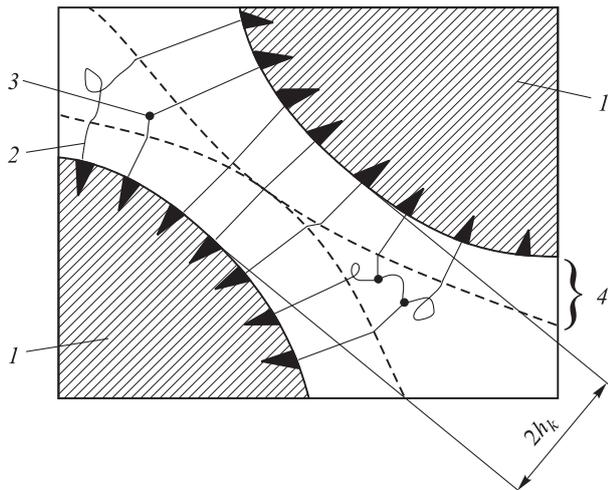


Рис. 1. Схема процесса формирования адгезионного соединения:

1 — SiO₂; 2 — макромолекула полимера; 3 — сшивка макромолекул; 4 — упорядоченный слой

структуру ориентированного слоя на поверхности раздела фаз), Д.А. Фридрихсберг [6] и П.А. Ребиндер [7] (обосновавший ключевую роль ориентированного слоя в формировании адгезионного соединения).

С этих позиций рассмотрим систему из двух частиц наполнителя, находящихся в связующем, расстояние сближения между которыми $h \leq 2h_k$ (рис. 2) [8]. Для случая ДУПКМ на основе кварцевого наполнителя принято допущение о сферичности частиц наполнителя, а также о случайной плотной упаковке частиц в элементарной ячейке, основанное на гипотезах, выдвинутых в работе [9].

В данном случае вблизи частицы формируется упорядоченный слой толщиной h_k , а вблизи поверхности наполнителя — критическая область толщиной h_g , образующая сферу радиусом $r_{gi} = r_i + h_g$, где $r_i = d_i/2$ — радиус

i -й частицы. В зоне пересечения этих областей не будут образовываться адгезионные связи, что согласуется с результатами исследований [10].

Чтобы количественно оценить адгезионную прочность соединения двух частиц в системе, необходимо определить площадь их адгезионного взаимодействия и работу адгезии для пары связующее — наполнитель.

В качестве площади адгезионного взаимодействия можно рассмотреть площадь круга, образуемого при пересечении сфер радиусом $r_{ki} = r_i + h_k$ с последующим вычитанием площади круга, формируемого пересечением сфер r_{gi} . Таким образом, площадь адгезионного взаимодействия двух частиц радиусами r_i и r_j , находящихся на расстоянии h друг от друга, будет иметь вид сечений 1 и 2 (см. рис. 2), площадь которых можно определить как [8]

$$S_{ij}(h) = \begin{cases} 0 & \text{при } h > 2h_k; \\ \pi \left(\frac{r_{ki}r_{kj}}{r_{ki} + r_{ki} + r_{ki}} \right)^2 & \text{при } 2h_k \geq h > 2h_g; \\ \pi \left[\left(\frac{r_{ki}r_{kj}}{r_{ki} + r_{ki} + r_{ki}} \right)^2 - \left(\frac{r_{gi}r_{gj}}{r_{gi} + r_{gi} + r_{gi}} \right)^2 \right] & \text{при } h \leq 2h_g. \end{cases} \quad (1)$$

Работа адгезии для пары связующее — наполнитель определяется по уравнению Юнга — Дюпре

$$W_a = \gamma(1 - \cos \theta), \quad (2)$$

где γ — поверхностное натяжение; θ — краевой угол смачивания.

Найдя площадь адгезионного взаимодействия и работу адгезии, можно вычислить адге-

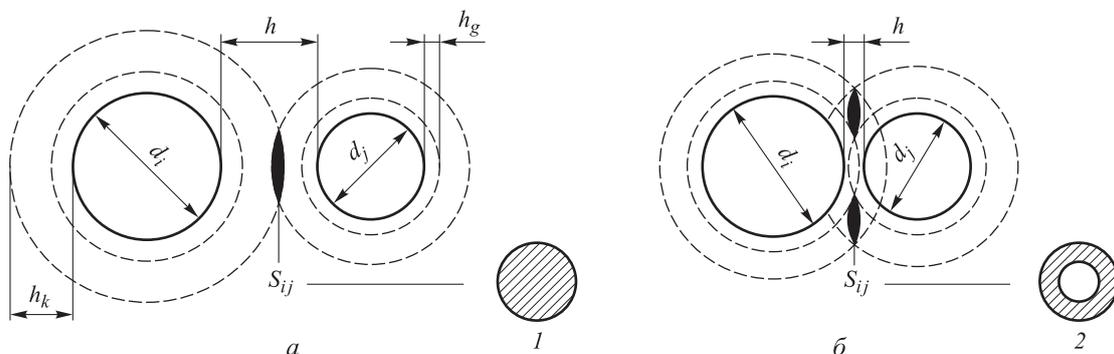


Рис. 2. Формирование пленочной фазы в системе из двух частиц наполнителя при разном расстоянии сближения:

а — $h > 2h_g$; б — $h \leq 2h_g$

зионную энергию элементарной системы из двух частиц

$$W_{ij} = W_a S_{ij}.$$

Для оценки энергетической характеристики того или иного ДУПКМ целесообразно рассматривать удельную характеристику материала, базируясь на анализе ПО ДУПКМ заданного состава. Это можно сделать путем определения частного суммарной адгезионной энергии для каждой из пар частиц в рамках ПО и его объема:

$$W_{sp} = \frac{\sum W_{ij}}{V_{RV}}, \quad (3)$$

где V_{RV} — объем ПО.

Формализация подобного подхода в виде алгоритма (рис. 3) позволяет проводить сравнительный анализ полидисперсных ДУПКМ разного состава по энергетическим характеристикам.

В качестве входных данных алгоритма используются данные о гранулометрическом составе наполнителя (диаметры частиц наполнителя d_1, \dots, d_n и их объемные соотношения $\varphi_1, \dots, \varphi_n$), степени наполнения ν , форме ПО и



Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета удельных энергетических характеристик ДУПКМ

типе связующего. Структурно алгоритм состоит из трех модулей: экспериментального, для определения структуры ПО и расчетного.

В *экспериментальном модуле* определяются значения физических констант: краевого угла смачивания θ с использованием метода сидячей капли и поверхностного натяжения γ согласно стандартизированной методике (ГОСТ 20216–74). На основании полученных данных по выражению (2) вычисляется работа адгезии W_a .

Модуль определения структуры ПО позволяет смоделировать структуру ПО рассматриваемого ДУПКМ. Этот модуль содержит блок для определения размера представительной ячейки и блок для моделирования случайной плотной упаковки частиц.

Блок *определения размера ПО* осуществляет циклическое расширение начальной ячейки с заданным шагом до момента выполнения условия попадания математического ожидания степени наполнения текущей серии заполнения ячейки в заданный доверительный интервал.

Блок *случайной плотной упаковки частиц* проводит последовательное заполнение ПО до выполнения условия достижения заданных значений объемного содержания каждой из фракций и степени наполнения путем реализации алгоритма, разработанного на основе модели, предложенной С. Торкватто [11].

Результатом реализации второго модуля алгоритма являются координаты частиц в рамках этого объема.

На рис. 4 представлена архитектура заполнения ПО полидисперсным наполнителем с помощью модуля определения структуры ПО [8].

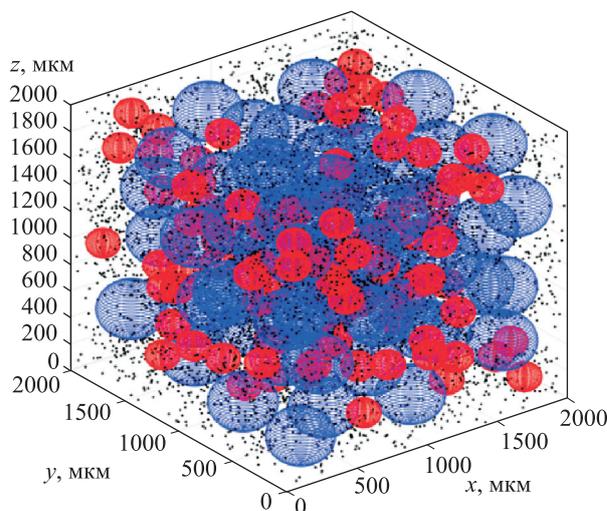


Рис. 4. Архитектура заполнения ПО полидисперсным наполнителем

Расчетный модуль включает в себя блоки для определения площади адгезионного взаимодействия (как функции расстояния между парами частиц (2)), адгезионной энергии пар частиц по выражению (1) и удельной адгезионной энергии по формуле (3) [8].

Оценка технологичности ДУПКМ на основе данных о его составе. Технологичность композиционного материала определяется его вязкостью в неотвержденном состоянии, так как именно этот показатель влияет на проливаемость материала при изготовлении деталей со сложной геометрией, в частности тонкостенных конструкций.

В настоящее время существуют модели, позволяющие эффективно оценивать вязкость систем — монодисперсных [12, 13], бидисперсных [14, 15] и полидисперсных [16–18] — в зависимости от фракционного состава.

Для проведения исследования выбрана модель, разработанная П.М. Мвасаме, Н.Дж. Вагнером и А.Н. Берисом [19], основанная на подходе, предложенном Р.Дж. Фаррисом [20] для бидисперсных систем. Р.Дж. Фаррис рассматривал бидисперсную систему как монодисперсную, вязкость жидкой фазы в которой равна эффективной вязкости монодисперсной системы с наименьшими из имеющихся в бидис-

персной системе частицами. П.М. Мвасаме, Н.Дж. Вагнер и А.Н. Берис предложили представить тридисперсную систему как комбинацию монодисперсных систем с использованием весовых коэффициентов. На основе такого подхода разработан алгоритм, позволяющий оценивать вязкость полидисперсного ДУПКМ (рис. 5).

Входными данными модели являются объемные содержания каждой из трех фракций наполнителя, входящих в состав композиции, динамическая вязкость связующего η_c и объемные соотношения размеров частиц в составе композиции.

На первом этапе определяются весовые коэффициенты для пары фракций по выражению [18]

$$\beta_i = \left[\left(\frac{d}{D} \right)^{0,18} \right]^{1 - \frac{0,54\varphi_d}{0,54\varphi_d + \varphi_D}},$$

где d и D — диаметры частиц фракций с меньшим и большим размером частиц; φ_d и φ_D — объемные содержания фракций с меньшим и большим размером частиц.

На втором этапе вычисляется для пар фракций коэффициент относительных вязкостей бидисперсных систем [19]

$$f_{mi} = \left[1 + 1,5(\beta_i\varphi_d + \varphi_D) \left(1 - \frac{\beta_i\varphi_d + \varphi_D}{0,58} \right)^{-1} \right]^2.$$

На третьем этапе с помощью полученных коэффициентов f_{mi} рассчитывается коэффициент относительной эффективной динамической вязкости полидисперсной системы [19]

$$f_{eff} = f_{m1} + (1 - \beta_1)f_{m2} + \dots + (1 - \beta_{n-1})f_{mn}.$$

На четвертом этапе с использованием найденного коэффициента f_{eff} определяется относительная эффективная динамическая вязкость [19]

$$\eta_r = e^{f_{eff}}.$$

На пятом этапе произведение относительной эффективной динамической вязкости η_r и динамической вязкости связующего η_c позволяет определить эффективную динамическую вязкость полидисперсной системы

$$\eta_{eff} = \eta_r \eta_c.$$

Полученное значение эффективной динамической вязкости дает возможность оценить

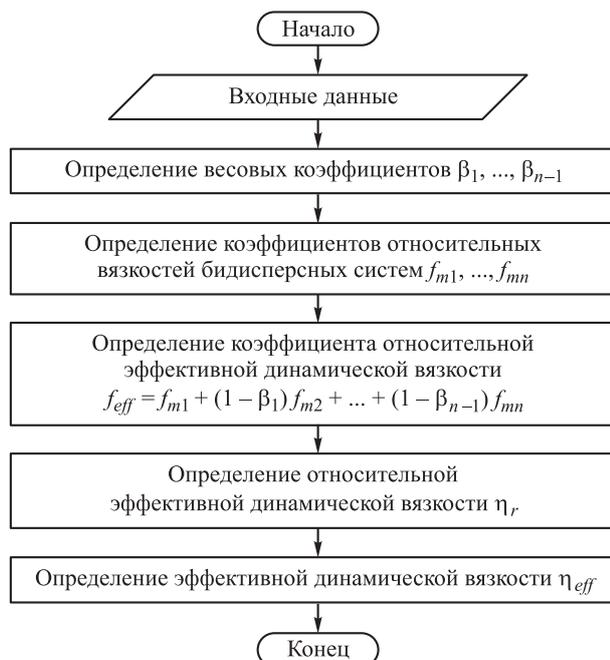


Рис. 5. Блок-схема алгоритма определения динамической вязкости полидисперсного ДУПКМ в неотвержденном состоянии

ДУПКМ заданного состава по технологическим характеристикам.

Численное моделирование энергетических и технологических характеристик ДУПКМ. Предложенные алгоритмы реализованы в программном продукте, позволяющем проводить полноценное численное моделирование, с целью определения удельной адгезионной энергии W_{sp} и эффективной динамической вязкости η_{eff} для ДУПКМ разного состава.

В табл. 1 приведены результаты численного моделирования для некоторого массива показателей состава ДУПКМ. Изменяемыми величинами являлись число фракций, диаметры частиц, объемные соотношения и степень наполнения. В качестве связующего использована ненасыщенная полиэфирная смола 8952AFSZ. Для оценки влияния состава ДУПКМ на его энергетические и технологические характеристики использованы относительные параметры, представляющие собой отношения средних значений удельной адгезионной энергии и расчетной эффективной динамической вязкости $\bar{\eta}_p$ к их максимальным средним значениям $W_{уд\ max}$ и $\eta_{p\ max}$:

$$\frac{\bar{W}_{уд}}{W_{уд\ max}} \text{ и } \frac{\bar{\eta}_p}{\eta_{p\ max}}.$$

Как следует из представленных данных, каждому из приведенных составов ДУПКМ соответствует индивидуальное значение удельной адгезионной энергии и динамической вязкости в неотвержденном состоянии, причем отклик

физических характеристик системы даже на небольшое изменение ее состава является достаточно существенным.

Экспериментальные исследования прочностных и технологических характеристик ДУПКМ. Экспериментальные исследования состояли из двух частей.

Экспериментальное исследование прочностных характеристик выполнено с целью проверки обоснованности применения расчетных значений удельной адгезионной энергии для оценки и ранжирования по прочности ДУПКМ разного состава. В качестве наполнителя использован кварцевый песок разных фракций, приведенных в табл. 1, в качестве связующего — ненасыщенная полиэфирная смола 8952AFSZ.

В результате исследования определены прочностные характеристики ДУПКМ разного состава на растяжение, сжатие и трехточечный изгиб. Экспериментальные исследования проведены по стандартизованным методикам (ГОСТ 1497–84, ГОСТ 25.503–97, ГОСТ 14019–2003) на установке Galdabini Quasar 50.

Следует отметить, что образцы для испытаний изготовлены с применением технологии гидроабразивной резки. Эта технология позволяет по сравнению с фрезерованием снизить термические и механические нагрузки на материал и тем самым исключить влияние разупрочняющих факторов при прочностных испытаниях.

Экспериментальное исследование технологических характеристик проведено в целях сопоставления расчетных и экспериментальных зна-

Таблица 1

Результаты численного моделирования

Номер состава	Число фракций	Диаметры частиц, мкм			Объемные соотношения			Степень наполнения	$\frac{\bar{W}_{уд}}{W_{уд\ max}}$	$\frac{\bar{\eta}_p}{\eta_{p\ max}}$
		d_1	d_2	d_3	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3			
1	1	12	–	–	1,000	–	–	0,5	1,0000 (0,1290)	1,0000
2	1	200	–	–	1,000	–	–		0,6419 (0,1480)	1,0000
3	1	400	–	–	1,000	–	–		0,3424 (0,1040)	1,0000
4	2	12	200	–	0,155	0,845	–	0,6	0,6712 (0,1410)	0,5465
5	2	12	400	–	0,133	0,867	–		0,5723 (0,0960)	0,5287
6	2	200	400	–	0,141	0,839	–		0,4794 (0,1360)	0,8755
7	3	12	200	400	0,028	0,203	0,769		0,7260 (0,0970)	0,1899

Примечание. В скобках указаны коэффициенты вариации.

Таблица 2

Результаты теоретических и экспериментальных исследований

Номер состава	$\frac{\bar{W}_{уд}}{W_{уд\ max}}$	$\frac{\bar{\sigma}_{сж}}{\sigma_{сж\ max}}$	$\frac{\bar{\sigma}_{раст}}{\sigma_{раст\ max}}$	$\frac{\bar{\sigma}_{изг}}{\sigma_{изг\ max}}$	$\frac{\bar{\eta}_p}{\eta_{p\ max}}$	$\frac{\bar{\eta}_{эксп}}{\eta_{эксп\ max}}$
1	1,0000 (0,1290)	1,0000 (0,1060)	1,0000 (0,1060)	1,0000 (0,1190)	1,0000	1,0000 (0,1130)
2	0,6419 (0,1480)	0,4312 (0,1190)	0,4928 (0,1190)	0,4404 (0,1140)	1,0000	0,9174 (0,1100)
3	0,3424 (0,1040)	0,3459 (0,1100)	0,3447 (0,1100)	0,3721 (0,1290)	1,0000	0,8340 (0,1220)
4	0,6712 (0,1410)	0,6746 (0,1150)	0,6724 (0,1150)	0,6518 (0,1190)	0,5465	0,5399 (0,1130)
5	0,5723 (0,0960)	0,5459 (0,1190)	0,5865 (0,1190)	0,3618 (0,1250)	0,5287	0,5308 (0,1160)
6	0,4794 (0,1360)	0,4843 (0,1110)	0,4827 (0,1110)	0,5152 (0,1280)	0,8755	0,9188 (0,1270)
7	0,7260 (0,0970)	0,7265 (0,1230)	0,7241 (0,1230)	0,7635 (0,1250)	0,1899	0,2040 (0,1250)

Примечание. В скобках указаны коэффициенты вариации.

чений эффективной динамической вязкости и верификации используемой модели. Оценка динамической вязкости выполнена по стандартизированной методике (ГОСТ 25276–82) с применением ротационного вискозиметра RV-2Т.

Объем выборок для каждого из указанных испытаний принят исходя из возможности определения вероятностной меры рассматриваемой величины.

Обобщенные результаты теоретических и экспериментальных исследований приведены в табл. 2. Как и в табл. 1, для оценки влияния состава ДУПКМ на его характеристики использованы величины $\bar{W}_{уд}/W_{уд\ max}$ и $\bar{\eta}_p/\eta_{p\ max}$, а также относительные параметры, представляющие собой отношения характеристик (пределов прочности на сжатие $\bar{\sigma}_{сж}$, растяжение $\bar{\sigma}_{раст}$, трехточечный изгиб $\bar{\sigma}_{изг}$ и экспериментальной эффективной динамической вязкости $\bar{\eta}_{эксп}$) к их максимальным средним значениям ($\sigma_{сж\ max}$, $\sigma_{раст\ max}$, $\sigma_{изг\ max}$ и $\eta_{эксп\ max}$):

$$\frac{\bar{\sigma}_{сж}}{\sigma_{сж\ max}}, \frac{\bar{\sigma}_{раст}}{\sigma_{раст\ max}}, \frac{\bar{\sigma}_{изг}}{\sigma_{изг\ max}}, \frac{\bar{\eta}_{эксп}}{\eta_{эксп\ max}}.$$

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных (табл. 1 и 2) показал, что изменение удельной адгезионной энергии в зависимости от состава материала находит свое отражение в варьировании прочностных характеристик ДУПКМ. Причем чем больше значение удельной адгезионной энергии, которой обладает система, тем выше ее прочностные характеристики. Это подтверждает правильность ранее выдвинутых теоретических поло-

жений и расчетных моделей, определяющих закономерности формирования прочностных характеристик деталей из ДУПКМ.

Анализ полученных при численном моделировании значений динамической вязкости (подтвержденных экспериментальными исследованиями) показывает, что влияние состава ДУПКМ на этот параметр является столь же существенным. Причем закономерность изменения динамической вязкости соответствует характеру варьирования прочностных характеристик. Так, при уменьшении диаметра частиц с 200 до 12 мкм прочность материала повышается на 50,79 %, а динамическая вязкость — на 9 %. Последнее приведет к снижению технологичности проектируемого материала и, как следствие, к его проливаемости в условиях изготовления деталей сложного геометрического образа.

Вывод

В результате проведенных исследований разработаны алгоритм и его программное обеспечение, позволяющее ранжировать ДУПКМ по показателям прочности и технологичности (динамической вязкости) исходя из данных о составе материала: типе связующего, гранулометрическом составе наполнителя и степени наполнения. Это делает возможным значительное сокращение временных и материальных затрат на этапе подготовки производства изделий из ДУПКМ.

Литература

- [1] Шевчук С.А., Смайлловская М.С. Минерал-полимерный композит для станкостроения. *РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация*, 2011, № 10(68), с. 26–27.
- [2] Sarkisyan V.A., Asratyan M.G., Mkhitarian A.A., Katrdzhyan K.Kh., Dadivanyan A.K. Orientation of macromolecules at the interface of polymer and fillers. *Polymer Science U.S.S.R.*, 1985, vol. 27, is. 6, pp. 1494–1498, doi: 10.1016/0032-3950(85)90299-0
- [3] Balko J., Portale G., Lohwasser R., Thelakkat M., Thurn-Albrecht T. Surface induced orientation and vertically layered morphology in thin films of poly(3-hexylthiophene) crystallized from the melt. *Journal of Materials Research*, 2017, vol. 32, is. 10, pp. 1957–1968, doi: 10.1557/jmr.2017.107
- [4] Karim A., Kumar S. *Polymer Surfaces, Interfaces and Thin Films*. Singapore, World Scientific, 2010. 304 p.
- [5] Грищенко А.Е., Черкасов А.Н. Ориентационный порядок в поверхностных слоях полимерных материалов. *УФН*, 1997, т. 167, № 3, с. 269–285, doi: 10.3367/UFNr.0167.199703b.0269
- [6] Фридрихсберг Д.А. *Курс коллоидной химии*. Санкт-Петербург, Лань, 2010. 416 с.
- [7] Ребиндер П.А. *Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия: избранные труды*. Москва, Наука, 1978. 386 с.
- [8] Нотин И.А. Повышение эффективности подготовительного этапа изготовления деталей машин из дисперсно-упрочненных полимерных композиционных материалов. *Научно-технические технологии в машиностроении*, 2018, № 9, с. 3–8.
- [9] Тарасов В.А., Галиновский А.Л., Елфимов В.М. Эрозионное изнашивание обрабатываемой поверхности при циклическом нагружении потоком абразивных частиц. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2008, спец. вып., с. 163–174.
- [10] Nardin M., Schultz J. Relationship between Work of Adhesion and Equilibrium Interatomic Distance at the Interface. *Langmuir*, 1996, vol. 12, is. 17, pp. 4238–4242.
- [11] Torquato S., Stillinger F.H. Erratum: Jammed hard-particle packings: From Kepler to Bernal and beyond. *Reviews of Modern Physics*, 2010, vol. 82, is. 4, pp. 2633–2672, doi: 10.1103/RevModPhys.82.3197
- [12] Zarraga I.E., Hill D.A., Leighton D.T. The characterization of the total stress of concentrated suspensions of noncolloidal spheres in Newtonian fluids. *Journal of Rheology*, 2000, vol. 44, pp. 185–220, doi: 10.1122/1.551083
- [13] Singh A., Nott P.R. Experimental measurements of the normal stresses in sheared Stokesian suspensions. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, no. 490, pp. 293–320, doi: 10.1017/S0022112003005366
- [14] Kovář J., Fortelný I. Effect of polydispersity on the viscosity of a suspension of hard spheres. *Rheologica Acta*, 1984, no. 23, pp. 454–456, doi: 10.1007/BF01329199
- [15] Zaman A.A., Moudgil B.M. Rheology of bidisperse aqueous silica suspensions: A new scaling method for the bidisperse viscosity. *Journal of Rheology*, 1998, vol. 42, pp. 21–39, doi: 10.1122/1.550935
- [16] Shewan H.M., Stokes J.R. Analytically predicting the viscosity of hard sphere suspensions from the particle size distribution. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2015, vol. 222, pp. 72–81, doi: 10.1016/j.jnnfm.2014.09.002
- [17] Qi F., Tanner R.I. Relative viscosity of bimodal suspensions. *Korea Australia Rheology Journal*, 2011, vol. 23, pp. 105–111, doi: 10.1007/s13367-011-0013-7
- [18] Pishvaei M., Graillat C., Cassagnau P., McKenna T. Modelling the zero shear viscosity of bimodal high solid content latex: Calculation of the maximum packing fraction. *Chemical Engineering Science*, 2006, vol. 61, pp. 5768–5778, doi: 10.1016/j.ces.2006.04.024
- [19] Mwasame P.M., Wagner N.J., Beris A.N. Modeling the effects of polydispersity on the viscosity of noncolloidal hard sphere suspensions. *Journal of Rheology*, 2016, vol. 60, pp. 225–240, doi: 10.1122/1.4938048
- [20] Farris R.J. Prediction of the Viscosity of Multimodal Suspensions from Monodisperse Viscosity Data. *Transactions of the Society of Rheology*, 1968, vol. 12, pp. 281–301.

References

- [1] Shevchuk S.A., Smaylovskaya M.S. Mineral-polymer composite for machine tool industry. *RITM: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya*, 2011, no. 10(68), pp. 26–27 (in Russ.).
- [2] Sarkisyan V.A., Asratyan M.G., Mkhitarian A.A., Katrdzhyan K.Kh., Dadivanyan A.K. Orientation of macromolecules at the interface of polymer and fillers. *Polymer Science U.S.S.R.*, 1985, vol. 27, is. 6, pp. 1494–1498.
- [3] Balko J., Portale G., Lohwasser R., Thelakkat M., Thurn-Albrecht T. Surface induced orientation and vertically layered morphology in thin films of poly(3-hexylthiophene) crystallized from the melt. *Journal of Materials Research*, 2017, vol. 32, is. 10, pp. 1957–1968, doi: 10.1557/jmr.2017.107
- [4] Karim A., Kumar S. *Polymer surfaces, interfaces and thin films*. Singapore, World Scientific, 2010. 304 p.
- [5] Grishchenko A.E., Cherkasov A.N. Orientational order in polymer surface layers. *Physics-Uspkhi*, 1997, vol. 40, pp. 257–272, doi: 10.1070/PU1997v040n03ABEH000210
- [6] Fridrikhsberg D.A. *Kurs kolloidnoy khimii* [Course of colloid chemistry]. Sankt-Petersburg, Lan' publ., 2010. 416 p.
- [7] Rebinder P.A. *Poverkhnostnyye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Kolloidnaya khimiya: izbrannyye trudy* [Surface phenomena in disperse systems. Colloidal chemistry: selected works]. Moscow, Nauka publ., 1978. 386 p.
- [8] Notin I.A. Preparatory stage effectiveness increase in manufacturing machinery of dispersed-strengthening polymeric composites. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2018, no. 9, pp. 3–8 (in Russ.).
- [9] Tarasov V.A., Galinovskiy A.L., Elfimov V.M. Erosion wear of the treated surface under cyclic loading by the flow of abrasive particles. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2008, spec. is., pp. 163–174 (in Russ.).
- [10] Nardin M., Schultz J. Relationship between Work of Adhesion and Equilibrium Interatomic Distance at the Interface. *Langmuir*, 1996, vol. 12, is. 17, pp. 4238–4242.
- [11] Torquato S., Stillinger F.H. Erratum: Jammed hard-particle packings: From Kepler to Bernal and beyond. *Reviews of Modern Physics*, 2010, vol. 82, is. 4, pp. 2633–2672, doi: 10.1103/RevModPhys.82.3197
- [12] Zarraga I.E., Hill D.A., Leighton D.T. The characterization of the total stress of concentrated suspensions of noncolloidal spheres in Newtonian fluids. *Journal of Rheology*, 2000, vol. 44, pp. 185–220, doi: 10.1122/1.551083
- [13] Singh A., Nott P.R. Experimental measurements of the normal stresses in sheared Stokesian suspensions. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, no. 490, pp. 293–320, doi: 10.1017/S0022112003005366
- [14] Kovář J., Fortelný I. Effect of polydispersity on the viscosity of a suspension of hard spheres. *Rheologica Acta*, 1984, no. 23, pp. 454–456, doi: 10.1007/BF01329199
- [15] Zaman A.A., Moudgil B.M. Rheology of bidisperse aqueous silica suspensions: A new scaling method for the bidisperse viscosity. *Journal of Rheology*, 1998, vol. 42, pp. 21–39, doi: 10.1122/1.550935
- [16] Shewan H.M., Stokes J.R. Analytically predicting the viscosity of hard sphere suspensions from the particle size distribution. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2015, vol. 222, pp. 72–81, doi: 10.1016/j.jnnfm.2014.09.002
- [17] Qi F., Tanner R.I. Relative viscosity of bimodal suspensions. *Korea Australia Rheology Journal*, 2011, vol. 23, pp. 105–111, doi: 10.1007/s13367-011-0013-7
- [18] Pishvaei M., Graillat C., Cassagnau P., McKenna T. Modelling the zero shear viscosity of bimodal high solid content latex: Calculation of the maximum packing fraction. *Chemical Engineering Science*, 2006, vol. 61, pp. 5768–5778, doi: 10.1016/j.ces.2006.04.024
- [19] Mwasame P.M., Wagner N.J., Beris A.N. Modeling the effects of polydispersity on the viscosity of noncolloidal hard sphere suspensions. *Journal of Rheology*, 2016, vol. 60, pp. 225–240, doi: 10.1122/1.4938048
- [20] Farris R.J. Prediction of the Viscosity of Multimodal Suspensions from Monodisperse Viscosity Data. *Transactions of the Society of Rheology*, 1968, vol. 12, pp. 281–301.

Информация об авторе

НОТИН Илья Александрович — аспирант кафедры «Технологии приборостроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: inotin@ya.ru).

Information about the author

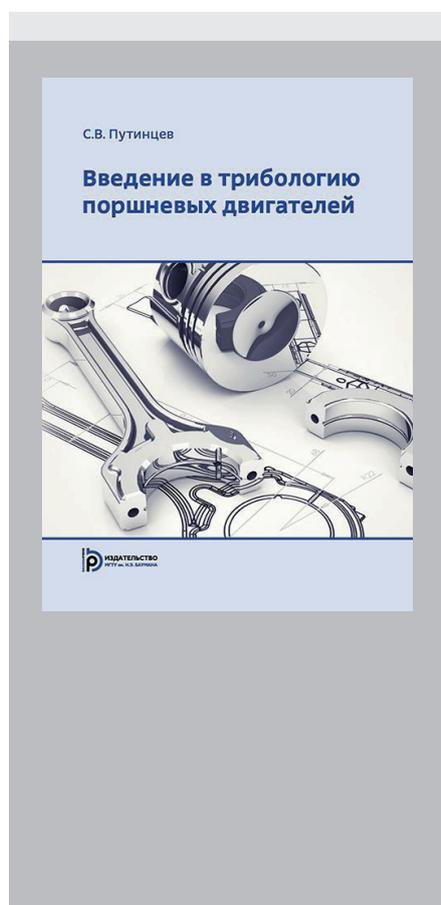
NOTIN Ilya Aleksandrovich — Postgraduate, Technologies of Instrument Manufacturing Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: inotin@ya.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Нотин И.А. Проблемы конструкторско-технологического проектирования изделий машиностроения на основе дисперсно-упрочненных полимерных композиционных материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 12, с. 10–19, doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-10-19

Please cite this article in English as:

Notin I.A. Problems Associated with Design and Manufacturing of Parts Based on Particulate-Filled Polymer Composites. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 12, pp. 10–19, doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-10-19



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышел в свет учебник
С.В. Путинцева

«Введение в трибологию поршневых двигателей»

Изложены научные представления о трении, смазке и изнашивании твердых тел. Рассмотрены современные положения, описывающие физическую сущность этих процессов как в деталях машин, так и в основных сопряжениях поршневых двигателей — цилиндропоршневой группе и кривошипно-шатунном механизме. Описана методология рационального проектирования и выбора материалов основных трущихся деталей поршневых двигателей, направленная на минимизацию их трения и износа. Приведен анализ типовых и нестандартных методов трибометрии поршневых двигателей и примеры выполненных ресурсосберегающих технических решений. Представлены результаты расчетной и экспериментальной проверки эффективности их применения.

Для студентов технических вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» и изучающих дисциплину «Трибология поршневых двигателей», и аспирантов по направлениям обучения «Тепловые двигатели» и «Трение и износ в машинах».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru