

На правах рукописи

УДК 621.7-2

НОТИН ИЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВИЧ

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ ИЗ ДИСПЕРСНО-
УПРОЧНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)



Москва – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:

Шашурин Василий Дмитриевич
доктор технических наук, профессор

Научный консультант:

Михайловский Константин Валерьевич
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Барзов Александр Александрович
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Центра гидрофизических исследований Физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова

Бухаров Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии композиционных материалов, конструкций и микросистем» ФГБОУ ВПО «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)» (МАИ)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)

Защита диссертации состоится «25» марта 2020 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д.212.141.06 в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана и на сайте bmstu.ru.

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., доцент



А. В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Развитие машиностроения обуславливается рядом тенденций, которые формируют новые требования к узлам и деталям машин, ключевыми из которых являются повышение технологичности и эксплуатационных характеристик изделий.

Одним из путей, направленных на реализацию данных требований применительно к широкому классу несущих конструкций, таких как станины станков и измерительных систем, демпфирующих платформ, шасси приборов, является применение новых перспективных материалов, обладающих высокими механическими и технологическими характеристиками. Известен успешный зарубежный опыт применения дисперсно-упрочненных полимерных композиционных материалов (обладающих более высокими демпфирующими свойствами по сравнению с чугуном) при изготовлении деталей данного класса.

Вместе с тем, при конструкторско-технологическом проектировании и изготовлении ответственных деталей из ДУПКМ возникает ряд проблем, затрудняющих эффективное применение данного материала в машиностроении:

- Высокая трудоемкость подготовительного этапа производства деталей, где значительная роль отводится технологическим мероприятиям, направленным на выбор рационального состава материала, исходя из заданных требований к показателям прочности и технологичности конструкции. В настоящее время определение рационального состава ДУПКМ решается методом перебора возможных комбинаций наполнителя и связующего. Высокая длительность принятия решений не позволяет осуществлять ускоренную разработку и запуск в производство приоритетных изделий.

- Отсутствие научно-обоснованного подхода к технологическому процессу изготовления тонкостенных и сложнопрофильных элементов деталей из ДУПКМ. Данное положение в первую очередь определяется тем обстоятельством, что выбор режимов вибрационного нагружения технологической оснастки в процессе формирования детали осуществляется без всякого обоснования. Как следствие, это приводит к известным ограничениям по геометрическим размерам элементов конструкции детали.

- Низкая эффективность существующих технологических операций механической обработки деталей из ДУПКМ, обусловленная неудовлетворительной обрабатываемостью данного материала. В настоящее время единственным методом является резание алмазным инструментом. При этом эта операция характеризуется как низкой производительностью, так и неудовлетворительным качеством формирующегося поверхностного слоя детали вследствие действия температурного фактора.

Все перечисленные проблемы определяют необходимость комплексного подхода к решению задач, возникающих при конструкторско-технологическом процессе изготовления деталей машин из ДУПКМ.

В этой связи *представляется актуальной*, имеющей важное научное и практическое значение работа, направленная на разработку конструкторско-технологического обеспечения производства деталей машиностроения из ДУПКМ.

Целью диссертационной работы является разработка методического обеспечения выбора рациональных конструкторско-технологических решений при производстве деталей машиностроения из ДУПКМ.

Решаемые задачи:

1. Разработка методов и средств, направленных на ускорение выбора рационального состава материала, исходя из заданных требований к показателям прочности и технологичности проектируемой детали из ДУПКМ с целью снижения трудоемкости подготовительного этапа производства.

2. Разработка методов и средств направленных на повышение технологических возможностей операции изготовления заготовок деталей из ДУПКМ с тонкостенными и сложно-профильными элементами конструкции.

3. Теоретическое и экспериментальное обоснование целесообразности использования технологии гидроабразивного резания (ГАР) при механической обработке типовых деталей из ДУПКМ вместо традиционного резания алмазным инструментом.

4. Разработка инженерных методик выбора рациональных конструкторско-технологических решений при производстве ответственных деталей машиностроения из ДУПКМ.

Методы исследований. В работе использовались фундаментальные положения технологии машиностроения, материаловедения, механики сплошной среды, физической химии, аппарат численных методов моделирования и специализированные ПС. Эксперименты проводились с использованием апробированных методик, аттестованного оборудования.

Научная новизна:

1. Разработаны математические модели, позволяющие на этапе подготовки производства, осуществлять ускоренный выбор рационального состава материала в зависимости от конструкторских характеристик детали и технологических условий производства. Модели базируются на энергетическом подходе к формированию физико-механических свойств материала изделия.

2. Обосновано положение о доминирующей роли упорядоченного слоя, возникающего на границе раздела «твердое тело – связующее» в формировании прочностных и технологических характеристик деталей из дисперсно-упроченного полимерного композиционного материала. Упрочнение обуславливается смыканием высокопрочных упорядоченных слоев, взаимодействие которых с наполнителем имеет адгезионный характер. Предложен энергетический критерий оценки прочности адгезионных связей ($W_{уд.}$) и доказана его информативность при оценке прочностных и технологических свойств материала.

3. Разработана математическая модель, позволяющая оценивать влияние режимов вибрационного нагружения оснастки станка на

формирование размеров тонкостенных элементов заготовки в зависимости от состава материала. Модель базируется на физических закономерностях механики движения двухфазных сред. Обосновано наличие индивидуальных эффективных режимов вибронагружения (значения виброускорения $a_{эф.} = A\omega^2$ и времени действия t) при производстве каждой конкретной детали.

4. Обоснована эффективность технологической операции ГАР при изготовлении деталей из ДУПКМ. Определены расчетные зависимости, позволяющие осуществлять выбор режимов ГАР деталей из ДУПКМ по критерию производительности, исходя из геометрических характеристик детали и свойств материала ($W_{уд.}$). Доказано, что применение ГАР по сравнению с резанием алмазным инструментом обеспечивает, как повышение производительности обработки в 3 – 5 раз, так и повышение долговечности детали (вибропрочность образцов повышалась на 19,5 – 25,7 %).

Практическая значимость работы состоит в создании инженерного обеспечения производства деталей из ДУПКМ, в которую входят:

- Методика выполнения технологических мероприятий на этапе подготовки производства, направленных на ускоренный выбор рационального состава материала исходя из заданных требований к показателям прочности (надежности) и технологичности проектируемой детали;

- Методика выбора технологических режимов вибрационного нагружения оснастки станка, исходя из заданных геометрических размеров тонкостенных элементов детали и состава материала;

- Рекомендации по выбору технологических режимов ГАР деталей из ДУПКМ по критерию производительности, исходя из геометрических характеристик детали и свойств материала.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, представленных в диссертационной работе автором, подтверждена удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных данных, а также практическим использованием полученных результатов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели, позволяющие на этапе подготовки производства, осуществлять ускоренный выбор рационального состава материала в зависимости от конструкторских характеристик детали и технологических условий ее производства.

2. Положение о доминирующей роли упорядоченного слоя, возникающего в результате адгезионного взаимодействия на границе раздела «наполнитель – связующее» в формировании физико-механических свойств деталей из ДУПКМ. Предложен критерий оценки прочности адгезионных связей и методика его определения.

3. Математическая модель, позволяющая оценивать влияние режимов вибрационного нагружения оснастки станка на формирование геометрических размеров тонкостенных элементов деталей. Наличие индивидуальных эффективных режимов вибронагружения, имеющих место при производстве каждой конкретной детали из ДУПКМ.

4. Обоснование эффективности технологической операции ГАР при изготовлении деталей из ДУПКМ. Расчетные зависимости для выбора эффективных режимов ГАР деталей из ДУПКМ по критерию производительности.

5. Инженерно-методическое обеспечение производства деталей машиностроения из ДУПКМ.

Личный вклад. Получение всех основных научных положений, постановка задач, методов и результатов решения задач, выводов, рекомендаций, изложенных в диссертации. Эксперименты, требующие коллективного выполнения, проводились под руководством автора и при его участии. Во всех необходимых случаях заимствования чужих результатов в диссертации приведены ссылки на литературные источники.

Апробация результатов работ. Результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедр «Технологии специального машиностроения», «Технологии приборостроения» МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, 2018; 2019), на заседании совета молодых ученых Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, на научно-техническом совете ВНИИ-инструмент (Москва, 2019), на 11-ой Международной выставке «Композит-Экспо 2018» (Москва, 2018).

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы реализованы в рамках НИР, проводимых в МГТУ им. Н. Э. Баумана и внедрены на ООО «ФКМ». Результаты исследований использовались при подготовке учебных курсов «Технология конструкционных материалов», «Технология машиностроения», «Технология приборостроения».

Публикации. Основное содержание работы отражено в 5 публикациях в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и Scopus.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Содержит 139 страниц, в том числе 93 иллюстрации и 20 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована цель и задачи работы, показана ее актуальность, сформулирована научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Указаны состав и структура работы.

В Главе 1 обоснована актуальность работы. В настоящее время в машиностроении наблюдается устойчивая тенденция использования новых конструкционных материалов, с более высокими механическими и технологическими свойствами. Одними из таких перспективных материалов являются ДУПКМ, обладающими значительно более высокими демпфирующими характеристиками по сравнению с традиционно применяемым серым чугуном. Область применения данного материала в машиностроении включает в себя станины высокоточных станков (MAIER, Германия; GL&V, Швеция; Mikron, Швейцария) (Рис.1), демпфирующие плиты для литографических машин (TMC, Япония), основания для насосного

оборудования, шасси приборов (BaseTek, США), в которых ДУПКМ составили конкуренцию серому чугуны.

Анализ технологического процесса выявил три основные технологические операции, затрудняющих эффективное применение данного материала в машиностроении.

В первую очередь это технологические мероприятия, связанные с подготовкой производства и направленные на выбор рационального состава материала, исходя из заданных требований к показателям прочности и технологичности проектируемой детали. Подбор состава в настоящее время производится методом «проб и ошибок» с корректировкой начального состава по результатам испытаний, проводимых на предприятии. В среднем подбор состава ДУПКМ при подготовке производства по данным ряда предприятия для каждого типа изделия требует от 6 до 12 итераций вышеописанного цикла.



Рис.1. Станина высокопроизводительного обрабатывающего центра с ЧПУ (Mikron, Швейцария)

Существенные проблемы возникают при изготовлении тонкостенных элементов заготовок (стенки, ребра жесткости и т. д.). В настоящее время технологические возможности производства ограничивают значение минимальной толщины таких элементов конструкции величиной 14 – 16 мм. Причина, как следует из проведенных предварительных исследований, заключается в отсутствии научно-обоснованных рекомендаций по выбору технологических режимов вибронагружения оснастки станка. На предприятиях технологические режимы неизменны и не учитывают геометрические размеры детали и состав ДУПКМ.

Проблемой производства изделий из ДУПКМ является качество и производительность механической обработки рабочих поверхностей детали. В настоящее время формообразование осуществляется алмазным инструментом без использования смазочно-охлаждающих жидкостей, что связано с формированием гидроабразивной суспензии, приводящей к повышенному износу подвижных частей станка. Это определяет низкую производительность операции, а также приводит к термическому разупрочнению поверхностного слоя. Предварительные исследования (МГТУ им. Н. Э. Баумана) показали перспективность использования ГАР при механической обработке деталей из ДУПКМ.

При этом надо отметить, что существующие исследования в этой области знаний (Викторов А. А., Егорова О. В., Рюткянен Е. А., Бородина И. А., Теряева Т. Н., Shao-Yun Fu, Xi-Qiao Feng, Bernd Lauke, Yiu-Wing Mai, Курин С. В., Рогачев Е. А., Бочкарева С. А., Rajinder Pal, S. Sahu, L. J. Broutman и др.) не позволяют как конструкторам, так и технологам системно решать

задачи, связанные с проектированием и производством деталей машиностроения из ДУПКМ.

В этой связи представляется актуальной, имеющей важное научное и практическое значение работа, направленная на разработку конструкторско-технологического обеспечения производства деталей машиностроения из ДУПКМ.

Глава 2 посвящена исследованиям, направленным на разработку методики прогнозирования прочностных и технологических характеристик деталей из ДУПКМ на этапе подготовки их производства. Глава 2 состоит из двух частей: исследования физическо-химических закономерностей, лежащих в основе формирования прочностных и технологических характеристик деталей и разработка методики, позволяющей на этапе подготовки производства осуществлять ускоренный выбор рационального состава материала в зависимости от конструкторских характеристик детали и технологических условий ее производства.

Физико-химическая модель формирования прочностных характеристик ДУПКМ. При разработке модели оценки прочностных характеристик ДУПКМ в качестве базового принципа принято положение о том, что в рассматриваемой системе доминирующую роль в формировании прочностных характеристик принадлежит ориентированному (упорядоченному) слою, состоящему из макромолекул, расположенных ортогонально к поверхности раздела двух фаз и определяющему прочность адгезионных связей («наполнитель – связующее»). Исходя из этого сформулирована гипотеза, согласно которой при достижении степени наполнения композиции, когда расстояние между частицами наполнителя h меньше удвоенного значения толщины упорядоченного слоя $h_{уп.}$, будет наблюдаться рост прочностных характеристик вследствие адгезионного взаимодействия между частицами (Рис. 2, а).

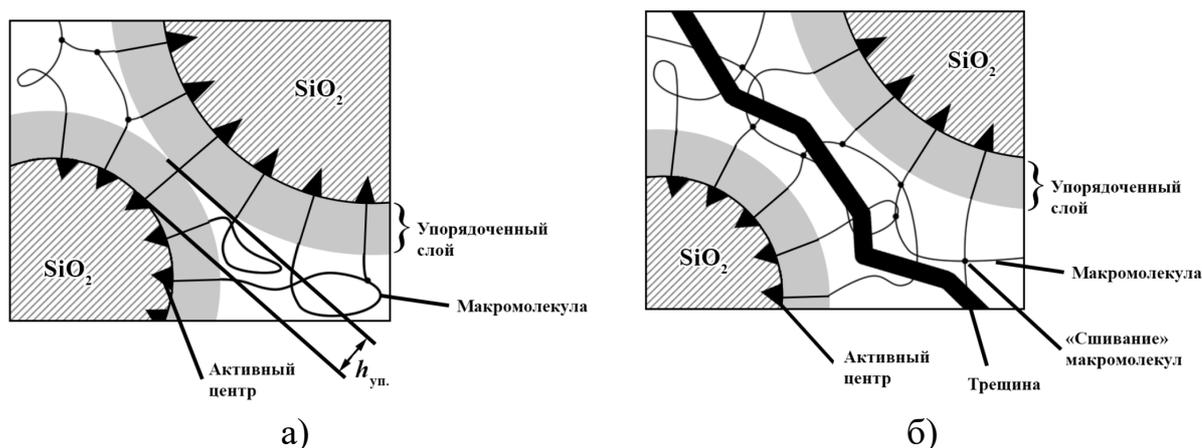


Рис. 2. Схема формирования структуры ДУПКМ: а) – формирование системы «наполнитель – упорядоченный слой – наполнитель»; б) – формирование системы «наполнитель – упорядоченный слой – связующее – упорядоченный слой – наполнитель».

В этой связи показатель удельная адгезионная энергия ($W_{уд.}$) может являться критерием оценки прочностных характеристик исследуемого материала, что позволит производить сравнительный анализ свойств ДУПКМ с различными составами с целью определения рационального состава ДУПКМ для конкретного изделия.

При $h > 2h_{уп.}$ (Рис. 2, б) прочность композиционного материала будет определяться когезионной энергией связующего $W_k < W_a$. Разрушение системы «наполнитель – упорядоченный слой – связующее – упорядоченный слой – наполнитель» будет происходить по фазе связующего, что в свою очередь негативно будет влиять на прочность ДУПКМ.

Удельную адгезионную энергию ДУПКМ определим как: $W_{уд.} = \frac{\sum W_{ij}}{a^3}$, где $\sum W_{ij}$ – сумма работ адгезии для пар частиц наполните, a – размер грани кубического представительного объема. Согласно положению о роли упорядоченного слоя, работа адгезии рассчитывается для пар частиц наполнителя, для которых выполняется условие сближения до величины удвоенной толщины упорядоченного слоя $h_{уп.}$. Тогда адгезионную энергию двух частиц можно оценить как: $W_{ij} = W_a S_{ij}$, где W_a – работа адгезии для пары компонентов «связующее – наполнитель», S_{ij} – площадь адгезионного взаимодействия, зависящая от величины сближения, определяемой степенью наполнения, размеров и геометрического образа частиц наполнителя. Работа адгезии определяется согласно уравнению Дюпре-Юнга: $W_a = \gamma(1 + \cos\theta)$, где γ – поверхностное натяжение связующего, θ – величина краевого угла смачивания для рассматриваемой пары материалов «связующее – наполнитель».

Для проверки обоснованности выдвинутых положений методом электронной микроскопии в ИФТТ РАН (г. Черноголовка) осуществлялись исследования границы раздела системы «наполнитель (SiO_2) – связующее» (Рис. 3). Результатам экспериментов подтверждено наличие упорядоченного слоя на границе раздела двух фаз и определены численные значения их толщин (1,01 – 1,19 мкм). Полученные данные делают возможным проведение численной оценки значений удельной адгезионной энергии для различных составов композиционного материала.

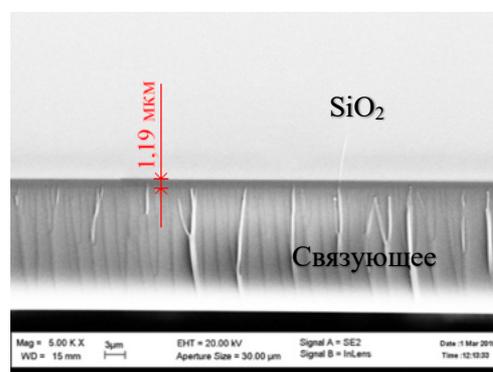


Рис. 3. Снимок структуры границы раздела «наполнитель (SiO_2) – связующее (9652AFSZ)»

Прогнозирование прочностных характеристик деталей из ДУПКМ на этапе подготовки производства. На Рис. 4 приведен алгоритм расчета $W_{уд.}$, в рамках которого было принято допущение о сферичности частиц наполнителя, основанное на проведенном анализе геометрических образов частиц кварцевого песка различных фракций. Входные данные алгоритма: объемные содержания фракций наполнителя ϕ , степень наполнения ν ,

физические константы ($h_{уп.}$, $h_{з.}$, поверхностного натяжения γ , краевого угла смачивания θ).

Алгоритм содержит экспериментальный и расчетный модули. Целью экспериментального модуля является установление физических констант необходимых для реализации расчетного модуля ($h_{уп.}$, $h_{з.}$, γ , θ) с использованием стандартизированных методик (ГОСТ 20216-74, DIN EN 828).

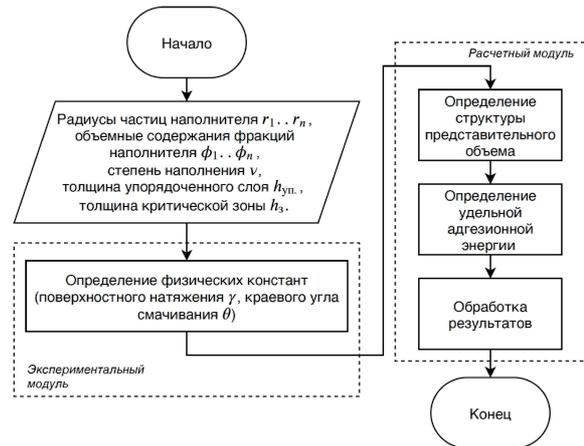


Рис. 4. Алгоритм оценки $W_{уд.}$
Расчетный подлинее

Первым этапом расчетного модуля является определение структуры представительного объема с учетом допущений: представительный объем имеет кубическую форму, упаковка частиц – случайная. Производится определение размера представительного объема, после чего осуществляется моделирование структуры представительного объема заданного ДУПКМ. Заполнение представительного объема частицами с наибольшим диаметром, формирующие плотную гексаэдрическую упаковку вблизи начала координат, с последующим разуплотнением и разупорядочиванием массива частиц в рамках представительного объема. Далее производится заполнение свободного пространства представительного объема частицами других фракций до момента выполнения условия достижения заданного объемного содержания для каждой из фракций (Рис. 5).

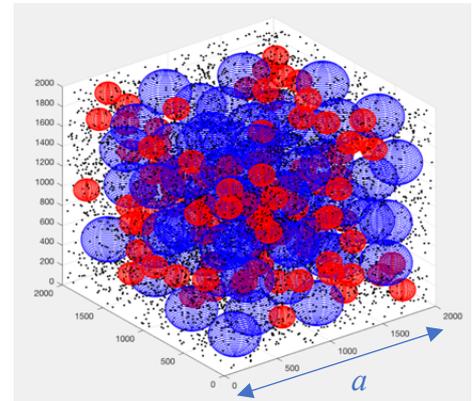


Рис. 5. Структура представительного объема ($v=0,32$; $d_1=400$ мкм; $d_2=200$ мкм; $d_3=12$ мкм)

Площадь адгезионного взаимодействия и удельная адгезионная энергия ($W_{уд.}$) системы определяются, как случайные величины. Приведенный выше алгоритм был реализован в виде программного продукта, позволившего провести численное моделирование исследуемых характеристик (Рис. 6, 7).

Как следует из результатов моделирования каждому составу ДУПКМ соответствует индивидуальное значение $W_{уд.}$, определяемое композицией ДУПКМ, а именно степенью наполнения v , гранулометрическим составом наполнителя и типом связующего. Увеличение значения v приводит к росту $W_{уд.}$, что является общим для моодисперсных, бидисперсных и тридисперсных составов ДУПКМ. Критическому значению показателя v_{max} соответствует предельная упаковка частиц в представительном объеме.

Влияние связующего проявляется в изменении абсолютных значений средней $W_{уд.}$, что связано с различиями в величинах W_a , при этом характер зависимостей $W_{уд.}(v)$

прежний. Рост v приводит к уменьшению коэффициента вариации удельной адгезионной энергии, а при $v = v_{max}$ значения $Var(W_{уд.})$ стремятся к значению коэффициента вариации размеров частиц $Var(d)$.

Таким образом, по результатам численного моделирования можно сделать вывод о том, что критерий $W_{уд.}$ является информативным показателем, позволяющим оценивать все многообразие вариантов составов ДУПКМ.

Экспериментальные исследования влияния значений критерия удельная адгезионная энергия на прочностные характеристик ДУПКМ различных составов включали в себя испытания, устанавливающие пределы прочности при растяжении, сжатии и трехточечном изгибе согласно ГОСТ 11262-2017, ГОСТ 4651-2014, ГОСТ 4648-2014. Технические средства – испытательная установка Galdabini Quasar 5.

Как следует из анализа результатов имеет место устойчивая корреляция результатов экспериментальных исследований прочностных свойств ДУПКМ с расчетными величинами удельной адгезионной энергии $\overline{W_{уд.}}$.

Аппроксимация данных позволила получить следующие искомые зависимости для рассматриваемой композиционной системы:

$$\overline{\sigma_{сж.}} = 0,41 \overline{W_{уд.}}^{0,79}; \quad \overline{\sigma_{раст.}} = 0,13 \overline{W_{уд.}}^{0,77}; \quad \overline{\sigma_{изг.}} = 0,29 \overline{W_{уд.}}^{0,76}.$$

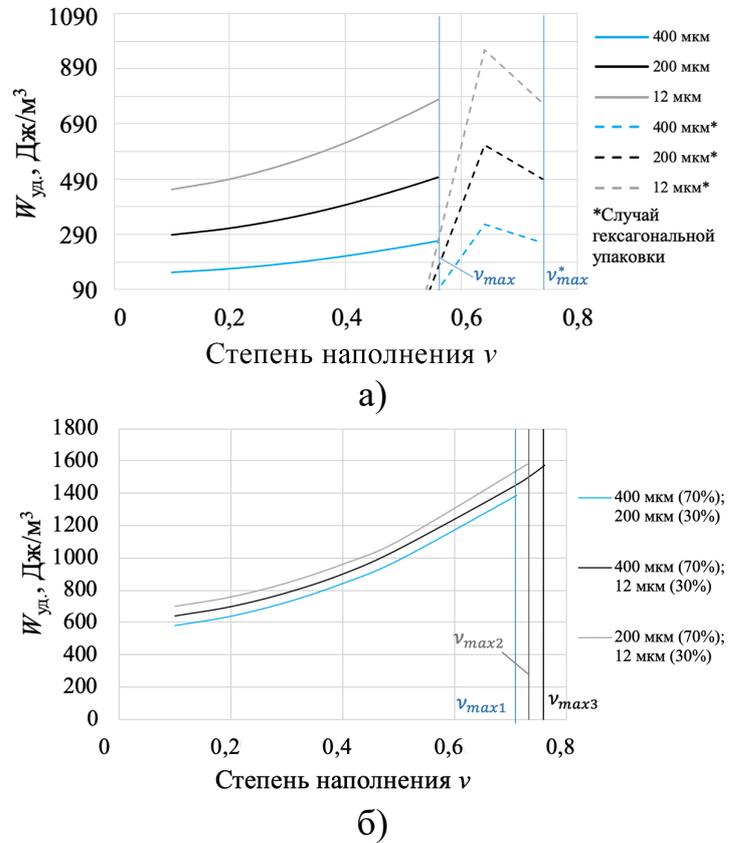


Рис. 6. Зависимости $W_{уд.}$ от состава ДУПКМ: а – монодисперсный; б – бидисперсный

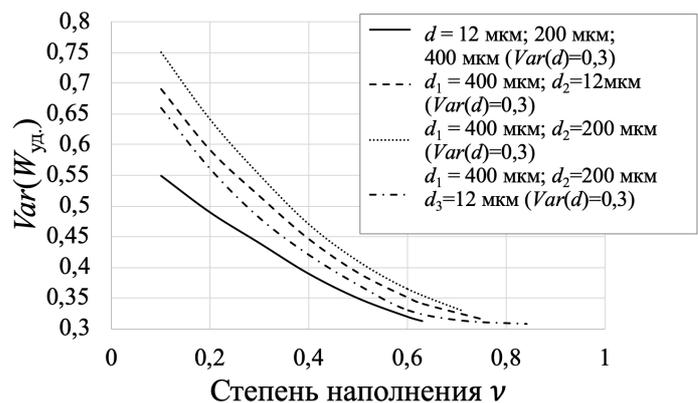


Рис.7. Зависимость $Var(W_{уд.})$ от гранулометрического состава ДУПКМ

Таким образом, теоретически обоснованный критерий $W_{уд.}$ является информативным показателем, позволяющим на этапе подготовки производства, осуществлять ускоренный выбор рационального состава материала в зависимости от конструкторских характеристик детали и технологических условий ее производства. Причем каждому частному значению $W_{уд.}$ может соответствовать пространство составов ДУПКМ с различными гранулометрическими составами наполнителя, типами связующих и степенями наполнения, при этом прочностные характеристики данных материалов будут иметь близкие значения, что расширяет технологические возможности производства. Стоит отметить, что стабильность прочностных характеристик деталей из ДУПКМ (надежность) $Var(\sigma) < 0,25$ обеспечивается только при высоких значениях степени наполнения ($v > 0,5$).

Формирование технологических характеристик деталей на основе ДУПКМ на этапе подготовки производства. Исходя из особенностей технологии изготовления деталей машиностроения из ДУПКМ базовыми технологическими показателями являются: $W_{уд.}$ (удельная адгезионная энергия), определяющая прочностные свойства материала и, следовательно, обрабатываемость материала резанием, и η (динамическая вязкость), определяющая литейные свойства материала, т. е. возможности формирования изделий с заданной геометрией. Вопросы, связанные с определением показателя $W_{уд.}$, были рассмотрены выше. Настоящий раздел посвящен исследованию вопросов, связанных с оценкой динамической вязкости η материала при вариации его состава, возникающих на этапе проектирования изделия и подготовки ее производства.

Для оценки η использовалась модели, разработанные П. М. Мвасаме, Н. Дж. Вагнером и А. Н. Берисом, на основе которой был разработан расчетный алгоритм (Рис. 8). В качестве входных данных используются объемные содержания каждой из фракций наполнителя, входящих в композицию, вязкость связующего, а также соотношения размеров частиц в составе композиции.

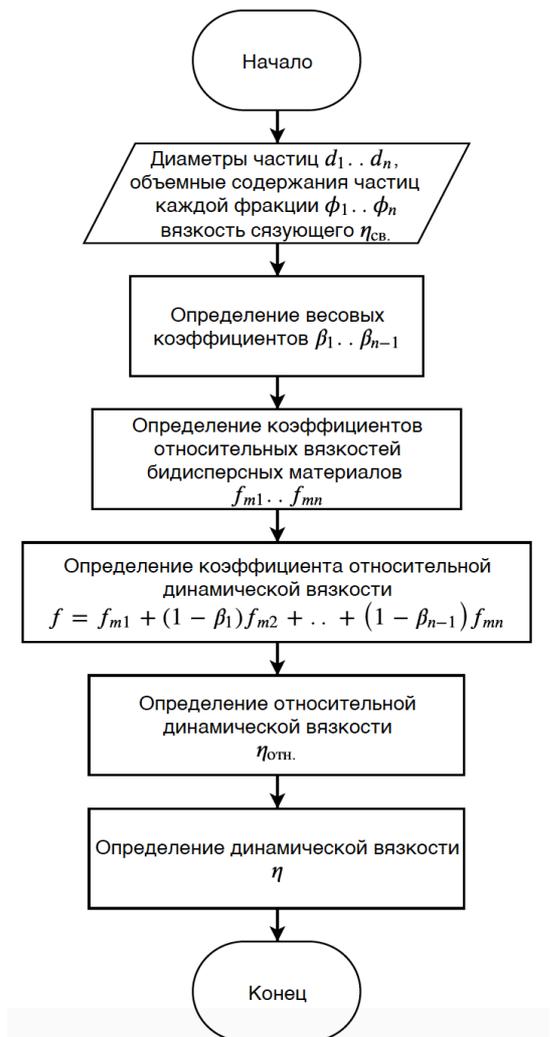


Рис.8. Алгоритм определения динамической вязкости ДУПКМ

Расчетный алгоритм был реализован в виде программного продукта, который позволил провести численное моделирование с целью исследования влияния состава ДУПКМ на значения η . Проверка правильности теоретических положений осуществлялась согласно методике, изложенной в ГОСТ 25276-82. Технические средства – ротационный вискозиметр RV-2Т.

Как следует из результатов моделирования каждому составу ДУПКМ соответствует индивидуальное значение η . Результаты экспериментальных и теоретических исследований хорошо согласуются, что позволяет использовать ПО на этапе подготовки производства, определяя эффективный состав композиционного материала. Отметим, что изменение состава ДУПКМ в сторону повышения $W_{уд}$ (увеличения прочностных характеристик материала и снижение обрабатываемости материала резанием) приводит к росту значений η , т. е. к снижению литейных свойств данного композиционного материала и, следовательно, необходимости поиска компромисса между этими показателями технологичности. При этом составы с близкими значениями $W_{уд}$ могут иметь существенные различия значений динамической вязкости (так, например, было установлено что составы с $W_{уд}$ равными 1383,36 Дж/м³ и 1397,64 Дж/м³ имеют динамическую вязкость 34891,61 сПз и 43255,56 сПз соответственно), что позволяет варьировать показатели технологичности при сохранении заданных прочностных характеристик материала.

Обобщая результаты исследований, приведенных в настоящей Главе, можно сделать вывод об обоснованности положений о физическо-химических закономерностях формирования прочностных и технологических характеристик ДУПКМ (адгезионное взаимодействие упорядоченных слоев с наполнителем). Доказано, что предложенный критерий оценки $W_{уд}$, является информативным показателем, позволяющим решать задачи, связанные с выбором рационального состава ДУПКМ исходя из заданных прочностных характеристик проектируемого изделия.

Разработанные математические модели, представляющие собой комбинацию детерминированных и вероятностных моделей, позволяют на этапе подготовки производства осуществлять ускоренный выбор рационального состава материала в зависимости от конструкторских характеристик детали и технологических условий ее производства.

Глава 3 посвящена исследованиям, направленным на повышение эффективности технологической операции получения заготовки изделия из ДУПКМ. Значимость данной операции при производстве деталей определяется тем, что именно на этом этапе формируется заданный геометрический образ детали, однако технологические особенности ее реализации накладывают известные ограничения на процесс конструирования изделия (по толщине и высоте стенок). Данное положение связано с особенностями механики движения ДУПКМ между стенками технологической формы.

При разработке математической модели, описывающей течение ДУПКМ между стенками формы, была принята гипотеза о доминирующей роли

пристеночного слоя ДУПКМ, определяющего в конечном итоге высоту тонкостенного элемента конструкции (Рис. 10). Для данной расчетной схемы движение пристеночного слоя можно определить, используя уравнение Бингама для вязкопластического рабочего тела, учитывая при этом изменение вязкости ДУПКМ по времени вследствие его отверждения, подчиняемое экспоненциальной зависимости:

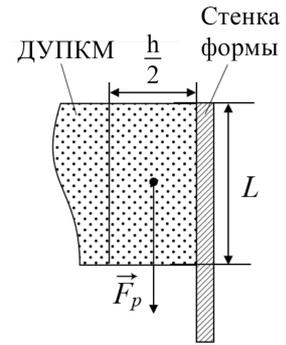


Рис. 10. Расчетная схема движения пристеночного слоя

$$\Phi \left(\frac{dx}{dt} \right) = \tau_p \cdot \operatorname{sgn} \left(\frac{dx}{dt} \right) + \eta \left(1 + A' e^{\frac{B \cdot t}{t_g}} \right) \frac{dx}{dt}, \quad (3)$$

где τ_p – предельное напряжение сдвига; η – начальная динамическая вязкость материала в неотвержденном состоянии, определяемая согласно методике, приведенной в Главе 2; A' , B – эмпирические коэффициенты; t – время; t_g – время гелеобразования.

В этом случае искомая высота формируемой стенки L :

$$L = \int_0^{t_g} \Phi^{-1} F_p^* dt, \quad (4)$$

$$\text{где } \Phi^{-1}(\tau) = \frac{1}{\eta_{\text{эфф.}} \left(1 + A e^{\frac{B \cdot t}{t_g}} \right)} \begin{cases} 0, & |\tau| < \tau_p \\ \tau - \tau_p, & \tau > \tau_p \\ \tau + \tau_p, & \tau < (-\tau_p) \end{cases},$$

τ – напряжение сдвига, τ_p – предельное напряжение сдвига, F_p^* – внешняя удельная результирующая сила, учитывающая влияние внешних воздействий.

Расчетная модель позволяет оценить роль внешних факторов F_p (технологического режима: вибрация и статическое давление) на высоту формируемых тонкостенных элементов конструкции детали:

$$F_p = \rho \frac{h}{2} \cdot (g + A \omega^2 \sin \omega t) + \frac{2 \Delta p}{h}, \quad (5)$$

где ρ – плотность ДУПКМ, $\frac{h}{2}$ – ширина пристеночного элемента, A – амплитуда колебаний, ω – частота колебаний, Δp – перепад давления.

На базе созданного программного продукта, проведено численное моделирование процесса, позволившее выявить влияние величины вибрационного ускорения $A \omega^2$ на высоту формируемой стенки детали в зависимости от времени t и состава ДУПКМ (Рис. 11).

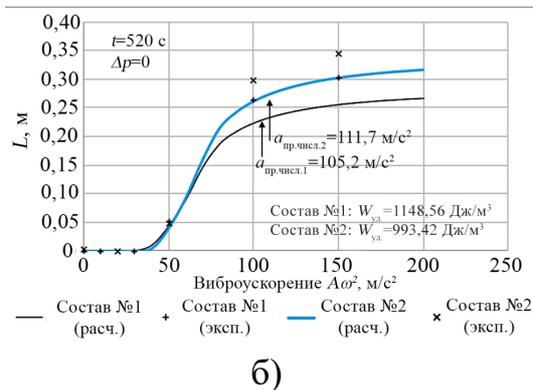
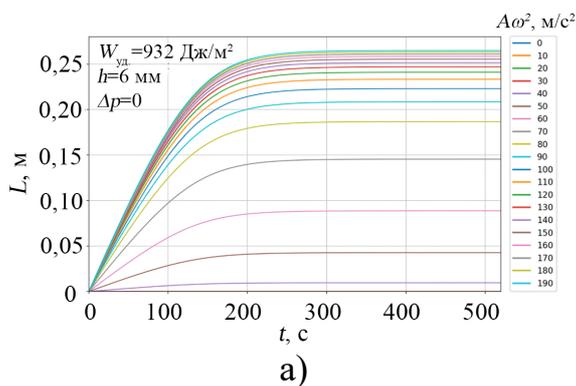


Рис.11. Зависимости высоты формируемой стенки от технологических режимов:

а – от $A\omega$ и t ; б – от $A\omega^2$ и $W_{уд}$.

Как следует из полученных данных, управляя режимом вибрационного нагружения $A\omega^2$ оснастки, можно обеспечивать повышение высоты формируемой стенки, причем эффективная длительность технологического процесса составляет 0,3 – 0,4 от времени желатинизации ДУПКМ. В свою очередь характер влияния вибрации на процесс получения заготовки определяет наличие для каждого случая некоторого эффективного значения виброускорения $a_{пр.}$, реализация которого обеспечивает максимальную высоту тонкостенного элемента конструкции.

Во второй части приводятся результаты экспериментальных исследований влияния технологических режимов вибрационного нагружения технологической формы на формирование тонкостенных элементов макетных образцов детали, целью проверки обоснованности основных теоретических положений. Использовалось стандартное технологическое оборудование применяемое на предприятии ООО «ФКМ» и специально разработанные макетные образцы формы, которые позволяли моделировать процесс изготовления стенок различной толщины (Рис. 12).

Изменяемыми параметрами являлись: состав ДУПКМ, толщина стенки заготовки h и режим вибровоздействия ($A\omega^2$); измеряемым параметром – высота формируемой стенки. В результате проведенных исследований было установлено близость экспериментальных и расчетных зависимостей, отражающих влияние технологического режима ($A\omega^2$) на высоту формируемой стенки, в том числе наличие эффективного режима нагружения $a_{эф.}$ (Рис. 11, б).

Расхождение по численным значениям эффективного режима нагружения $a_{эф.}$ между расчетными и экспериментальными значениями не

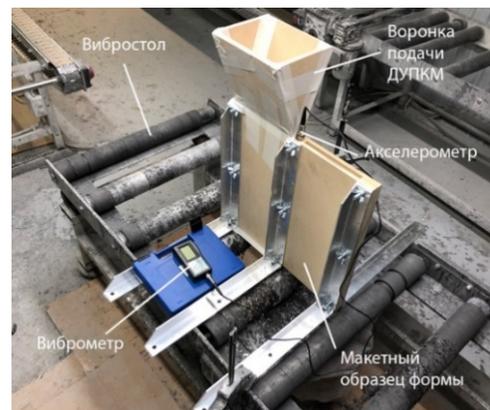


Рис. 12. Стенд для исследования влияния режимов вибрационного нагружения

превышали 33,3%, а соответствующие им значения высоты стенки были выше в среднем на 13,1%, что определяется принятыми допущениями.

Обобщая приведенные выше результаты математического моделирования, подтвержденные данными натуральных испытаний, можно сделать вывод о том, что разработанная математическая модель позволяет оценивать влияние технологического режима вибронгружения на высоту тонкостенных элементов конкретной конструкции. Математическую модель правомочно использовать при определении индивидуального значения $a_{эф}$ вибронгружения литейных форм с целью обеспечения максимальной высоты формируемой стенки, т. е. при разработке практических рекомендаций по выбору рациональных режимов выполнения данной технологической операции.

В Главе 4 приводятся результаты исследований, направленных на повышение эффективности механической обработки деталей из ДУПКМ. Обосновывается целесообразность ГАР при формировании элементов конструкции деталей вместо традиционного резания алмазным инструментом. В качестве критерия оценки рассматривалась производительность обработки и эксплуатационные показатели качества детали.

Определение эффективной производительности ГАР деталей из ДУПКМ. Специфика механической обработки деталей данного класса из ДУПКМ (формирование пазов и отверстий) определяет выбор подачи (S_m , м/мин) в качестве критерия производительности резания этого материала.

Тогда искомое значение эффективной подачи можно представить, как степенную функцию трех переменных, отражающих: механические свойства материала ($W_{уд.}$), конструктивные характеристики детали (глубина резания h) и технологический режим (рабочее давление резания p):

$$S_m = KW_{уд.}^x p^y h^z, \quad (6)$$

где K – поправочный коэффициент, x, y, z – степенные коэффициенты.

Численные значения коэффициентов K, x, y, z определялись на основании результатов экспериментов по исследованию процесса резания образцов ДУПКМ с различными $W_{уд.}$. На первом этапе, по результатам экспериментов, проводимых на системе ГАР Yuanhong YH2030 с использованием специальной оснастки и измерительного оборудования, находилась дискретная зависимость $h(S_m, W_{уд.}, p)$. На втором этапе настоящих исследований проводилась аппроксимация полученных результатов, позволившая определить искомое уравнение:

$$S_m = 3,34 \cdot 10^{-14} W^{-0,69} p^{1,69} h^{-0,93} \quad (7)$$

Полученные результаты сделали возможным проведение сравнительных тестов по оценке производительности механической обработки деталей из ДУПКМ методом ГАР и при фрезеровании концевыми алмазными фрезами (фрезы DJTOL диаметром 6 – 15 мм).

На Рис. 14 приведены результаты сравнительных тестов по оценке производительности механической обработки ДУПКМ методом ГАР и фрезерованием алмазным инструментом. Подача при фрезеровании определялась исходя из условия $T_{рез.} < T_{дес.}$. Как следует из анализа приведенных данных во всем диапазоне глубины резания высокая эффективность ГАР является очевидной.

Во второй части настоящей Главы приводятся результаты исследований влияния технологии механической обработки (фрезерование алмазными концевыми фрезами и ГАР) на эксплуатационные показатели, а именно на вибропрочность деталей из ДУПКМ. Выбор данного показателя в качестве критерия качества, определяется тем, что в результате вибрации происходит более 70% отказов деталей в машиностроении. Испытания проводились на деталях-представителях пластинчатой формы с размерами 200 мм x 10 мм x 8 мм по схеме «консольная балка на резонансной частоте». Регистрируемым параметром являлось количество циклов до разрушения. Общий вид стенда приведен на Рис. 15.

Как показали результаты экспериментов, технология механической обработки деталей-представителей из ДУПКМ методом ГАР по сравнению с фрезерованием алмазным инструментом обеспечивает повышение вибропрочности образцов на 19,5 – 25,7 %. При этом наиболее значимая эффективность ГАР по сравнению с фрезерованием имеет место при фрезеровании образцов на режимах при которых $T_{рез.} > T_{дес.}$ и меньшая при условиях $T_{рез.} < T_{дес.}$. Физическая обоснованность полученных результатов определяется деградационными процессами в поверхностных слоях деталей из ДУПКМ в результате действия температурного фактора. На это указывает и более высокая резонансная частота и динамика дрейфа АЧХ характерная для образцов ГАР по сравнению с образцами, полученными, методом фрезерования.



Рис.13. Инфракрасная термограмма зоны резания алмазной фрезой DJTOOL DMQX0620 диаметром 6 мм ($V_p=2,5$ м/с, $S_m=1$ м/мин, $t=8$ мм)

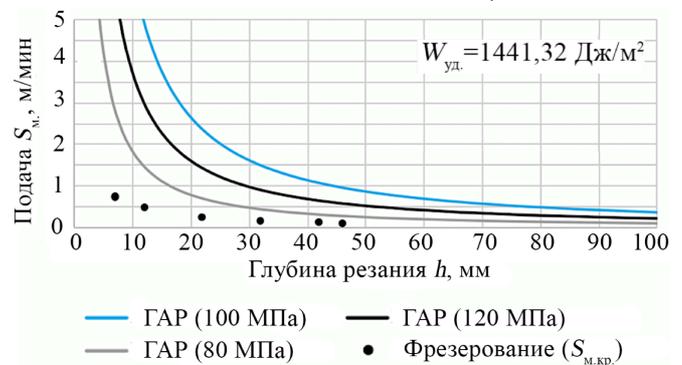


Рис.14. Значение эффективной подачи при резании алмазной фрезой ($V_p=2,5$ м/с) и ГАР

Обобщая результаты исследований, можно сделать вывод о том, что технология ГАР деталей из ДУПКМ обеспечивает как более высокую производительность обработки, так и формирование деталей с более высокими эксплуатационными характеристиками.

Глава 5 посвящена разработке инженерного обеспечения производства деталей из ДПКУМ. Структурно оно состоит из трех взаимосвязанных методик, направленных на совершенствование базовых технологических операций, а именно: процесса проектирования и изготовления деталей из ДУПКМ:

- методику выполнения технологических мероприятий на этапе подготовки производства, направленных на ускоренный выбор рационального состава материала исходя из заданных требований к показателям прочности, технологичности проектируемой детали.

- методику выбора технологических режимов вибрационного нагружения оснастки оборудования, исходя из заданных геометрических размеров тонкостенных элементов детали и состава материала.

- рекомендации по выбору технологических режимов ГАР деталей из ДУПКМ по критерию производительности, исходя из геометрических характеристик детали и свойств материала.

Основные выводы:

1. Проведенный анализ тенденций в конструировании базовых деталей машин особенностей их эксплуатации показал актуальность работ, направленных на разработку конструкторско-технологического обеспечения производства деталей из ДУПКМ.

2. Предложен принцип конструкторско-технологического обеспечения производства несущих деталей машиностроения из ДУПКМ, заключающийся в комплексном подходе отражающим, как закономерности выполнения технологического этапа подготовки производства, так и непосредственно базовых операций изготовления изделия (изготовления заготовки и ее механическая обработка).

3. Разработана математические модели прогнозирования прочностных и технологических характеристик деталей из ДУПКМ, базирующаяся на энергетическом подходе формирования адгезионных связей в структуре материала детали. Создан алгоритм выполнения технологических мероприятий на этапе подготовки производства, направленный на ускоренный выбор рационального состава материала, исходя из заданных требований к показателям прочности и технологичности проектируемой детали, что снижает трудоемкость подготовительного этапа производства изделий в 3 – 5 раз.



Рис. 15. Образец, закрепленный в оснастке с установленным акселерометром

4. Обосновано положение о доминирующей роли упорядоченного слоя, возникающего на границе раздела «твердое тело – связующее» в формировании прочностных и технологических характеристик деталей из ДУПКМ. Упрочнение обуславливается смыканием высокопрочных упорядоченных слоев, взаимодействие которых с наполнителем имеет адгезионный характер. Предложен критерий оценки прочности адгезионных связей ($W_{уд.}$) и методика его определения.

5. Разработана математическая модель, базирующаяся на физических закономерностях механики движения двухфазных (гетерогенных) сред, позволяющая оценивать влияние технологических режимов вибрационного нагружения технологической оснастки станка на формирование заданных геометрических размеров тонкостенных элементов детали в зависимости от состава материала. Экспериментально подтвержденные результаты численного моделирования позволили обосновать наличие индивидуальных эффективных режимов вибронагружения (значения виброускорения $A\omega^2$ и времени действия t), имеющих место быть при производстве каждой конкретной детали из ДУПКМ.

6. Доказана эффективность технологической операции ГАР при изготовлении деталей из ДУПКМ. Определены расчетные зависимости, позволяющие осуществлять выбор режимов ГАР деталей из ДУПКМ по критерию производительности, исходя из геометрических характеристик детали и свойств материала. Доказано, что применение ГАР по сравнению с традиционным резанием алмазным инструментом обеспечивает как повышение производительности обработки в 3 – 5 раз, так и повышение долговечности детали (вибропрочность исследуемых образцов повышалась на 19,5 – 25,7%).

7. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований сформировано инженерно-методическое обеспечение, реализация которого обеспечивает, как снижение трудоемкости подготовительного этапа подготовки производства (2 – 3 раза), так и повышение эффективности базовых технологических операций процесса изготовления ответственных деталей машиностроения из ДУПКМ.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Нотин И. А. Проблемы конструкторско-технологического проектирования изделий машиностроения на основе дисперсно-упрочненных полимерных композиционных материалов // Известия вузов. Машиностроение. 2018. №12 (705). С. 10-19 (0,6 п. л.)

2. Нотин И. А. Повышение эффективности подготовительного этапа изготовления деталей машин из дисперсно-упрочненных полимерных композиционных материалов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2018. №9 (87). С. 3-8 (0,35 п. л.)

3. Нотин И. А. Исследование адгезионных характеристик изолирующего покрытия на основе полиэфирной смолы марки 8952AFSZ // Нанотехнологии: разработка, применение - XXI век, 2018. №3. С. 45-49 (0,3 п. л.)

4. Нотин И. А., Киселев И. А., Синавчиан С. Н. Влияние метода механической обработки на усталостную прочность деталей машиностроения из дисперсно-упрочненных полимерных композиционных материалов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2019. №. 6. С. 12-16 (0,15 п. л. / 0,3 п. л.)

5. Notin, I. "On the Issue of Predicting the Strength Characteristics of Dispersed-Hardened Polymeric Composite Materials at the Design Stage of Engineering Products", Materials Science Forum, Vol. 951, P. 45-50, 2019 (0,35 п. л.)