

В диссертационный совет 24.2.417.01,
созданный на базе ФГБОУ ВО «Тульский
государственный университет»
300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора Бауровой Натальи Ивановны
на диссертационную работу Потапова Андрея Алексеевича на тему:
«Конструкторско-технологическое обоснование режимов FDM-печати изделий
с заданными характеристиками», представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности
2.5.6. Технология машиностроение

1. Актуальность темы диссертации

Среди различных методов 3D-печати, метод FDM (Fused-Deposition Modeling) является самым популярным, благодаря способности легко адаптироваться под конкретные задачи и в короткие сроки запускать в производство изделия сложной геометрии при минимальных затратах. FDM-печать позволяет изготавливать изделия с разной степенью заполнения, тем самым варьируя массу изделия и физико-механические свойства.

В настоящее время реализация потенциальных возможностей FDM-печати сдерживается из-за отсутствия конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати и постобработки в достаточной степени учитывающей особенности этого метода: отсутствуют методики, позволяющие прогнозировать характеристики конечного продукта в зависимости от режимов FDM-печати и оптимизировать конструкции изделий с целью уменьшения их материалоемкости при обеспечении заданных характеристик. В связи с этим разработка конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками, включающего разработку и оптимизацию конструкций, выбор материалов, определение технологических схем, режимов печати и последующей дополнительной обработки, является актуальной научно-технической задачей, позволяющей не только решить указанные проблемы, но и расширить область применения FDM-печати.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Целью диссертационной работы является повышение эффективности изготовления изделий с заданными характеристиками путем разработки конструкторско-технологически обоснованных режимов FDM-печати, позволяющих уменьшить материалоемкость изделий за счет оценки достижения заданных характеристик с использованием полученных аналитических и регрессионных зависимостей физико-механических свойств изделий от степени заполнения, температуры, скорости печати и высоты слоя.

Выбранная цель диссертации соответствует содержанию проведенных исследований. В работе проведено комплексное решение заявленных соискателем задач для достижения поставленной цели. На основании проведенного анализа современного состояния технологий производства изделий с заданными характеристиками, возможностей и особенностей FDM-печати и методов постобработки, разработана структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати, обеспечивающих уменьшение материалоемкости изделий при гарантированном обеспечении заданных характеристик. Разработан способ определения фактических значений характеристик изделия с использованием моделей микромеханики, позволяющих определить эффективные значения физико-механических свойств при различных степенях заполнения. Подобраны и обоснованы рациональные технологические режимы FDM-печати с использованием многофакторного эксперимента в виде нелинейных уравнений регрессии для зависимостей свойств изделия от температуры и скорости печати, а также высоты слоя. Результаты диссертационного исследования использованы при создании инновационных вентиляционных систем в ООО «ИВЕНС», г. Москва.

3. Научная новизна, практическая значимость и достоверность результатов диссертации

Достоверность и обоснованность полученных автором результатов не вызывает сомнений и обусловлена корректностью постановки задач, обоснованным использованием теоретических зависимостей, использованием современных методов компьютерного моделирования, а также практическим использованием результатов исследований на производстве. Положения, выносимые на защиту получены с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics, прошедшим проверку на адекватность при решении большого числа научно-технических задач. По материалам диссертации

опубликовано 14 научных работ, из них 3 статьи – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России; 4 статьи – в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Web of Science и Scopus; 5 статей – в других изданиях и материалах конференций; получены 2 свидетельства на программы для ЭВМ.

Научную новизну результатов проведенных исследований составляют:

1. Разработанная структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати, обеспечивающих уменьшение материалоемкости изделий с заданными характеристиками.

2. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния изотропного и ортотропного материалов при разной степени заполнения и полученные в результате моделирования аналитические зависимости эффективных физико-механических свойств от степени заполнения и перекрытия слоев.

3. Установленные путем проведения планируемого многофакторного эксперимента закономерности влияния параметров FDM-печати на физико-механические свойства изделия, выраженные в виде статистически обоснованных уравнений регрессии и позволяющие определять рациональные параметры FDM-печати в зависимости от технических требований к изделию.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния постобработки на физико-механические свойства изделий, изготовленных методом FDM-печати.

5. Результаты экспериментальной проверки эффективности промышленного изделия с заданными характеристиками.

Результатами диссертации, имеющими научную и практическую значимость, являются: обоснование конструкторско-технологических режимов FDM-печати, позволяющих уменьшить материалоемкость изделий путем оценки достижения заданных характеристик с использованием полученных аналитических и регрессионных зависимостей физико-механических свойств изделий от степени заполнения, температуры, скорости печати и высоты слоя.

4. Оценка структуры, содержания и степени завершенности диссертационного исследования

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы из 161 наименования; общий объем – 181 страница машинописного текста, включая 104 рисунка, 33 таблицы и 2 Приложения.

Содержание диссертации соответствует п.5 «Методы проектирования и

оптимизации технологических процессов» и п.10 «Цифровые технологические процессы и производства в машиностроении» Паспорта научной специальности 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки).

Во *введении* обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи исследования, определены объект и предмет, приведены положения, выносимые на защиту, обладающие научной новизной и практической значимостью.

В *первой главе* содержатся материалы обзора современного состояния аддитивных технологий. Установлено, что FDM-печать является наиболее подходящей по соотношению возможностей и доступности для производства изделий с заданными характеристиками, поскольку позволяет изготовить изделие целиком или по частям для последующей сборки, а также осуществлять печать при разной степени заполнения. Рассмотрены современные исследования о влиянии параметров FDM-печати на физико-механические характеристики готового изделия. Проведен анализ исследований в области постобработки образцов, изготовленных методом FDM-печати. На основе проведенного анализа определены основные задачи исследования, направленные на разработку конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками.

Во *второй главе* разработана структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками. Предложенная структура включает оптимизацию конструкций, выбор материалов, определение технологических схем, режимов печати и последующей дополнительной обработки, а также позволяет уменьшать материалоемкость изделия при обеспечении заданных характеристик. Разработанная структура может быть использована как в инженерных расчетах при проектировании изделий с заданными характеристиками, так и для выбора рациональных режимов FDM-печати – с целью уменьшения материалоемкости изделий при гарантированном обеспечении заданных характеристик.

В *третьей главе* разработан способ определения фактических характеристик изделия при FDM-печати, базирующийся на предложенных моделях микромеханики для изотропного и ортотропного материала и позволяющий определить зависимости эффективных характеристик материала изделия от степени заполнения внутреннего объема, а также оптимальное заполнение при уменьшении массы изделий до 50% при достижении заданных характеристик. Результаты моделирования и проверочные эксперименты

показали, что погрешность изотропной модели составляет 30%, поэтому данная модель может быть применима только для экспресс-оценки эффективных характеристик материала при различных значениях степени заполнения. Погрешность ортотропной модели составляет 7%, и она может использоваться для оценки эффективных характеристик при различных значениях степени заполнения.

В *четвертой главе* проведены экспериментальные исследования влияния параметров FDM-печати на основные свойства изделия и получены уравнения регрессии, позволяющие определять рациональные параметры FDM-печати в зависимости от технических требований к изделию. Проведенные исследования позволили оценить влияние технологических параметров процесса FDM-печати на физико-механические и конструктивные свойства образцов и обоснованно принять их в качестве обобщенных параметров процесса в функции критерия качества изделия. Проведены исследования термических и реологических характеристик, физико-механических свойств экспериментальных образцов. Изложены методики применения объемной термической постобработки в дисперсной среде (гипс, тальк, соль), в замкнутой форме, вакуумном пакете, в комбинации с давлением.

В *пятой главе* разработана структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками, которая использована при разработке технологии FDM-печати рабочего колеса вентилятора. В соответствии с разработанной структурой оптимизирована конструкция, выбран материал, определены рациональные режимы печати и метод постобработки рабочего колеса вентилятора, что позволило уменьшить материалоемкость на 50%.

Оформление диссертации соответствует предъявляемым требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011. Иллюстративный материал соответствует требованиям ГОСТ 2.105-95.

Последовательность выполнения задач построена в четкой логике, обеспечивая достижение поставленной в диссертационной работе цели. Результаты и выводы диссертации соответствуют излагаемому материалу, что свидетельствует о решении поставленных задач.

Содержание автореферата в полной степени отражает содержание диссертации, содержит основные результаты и выводы работы.

5. Замечания и вопросы по диссертации

Несмотря на общую положительную оценку диссертационного исследования, необходимо обратить внимание автора на имеющиеся замечания.

1. При теоретическом определении эффективных характеристик при различных степенях заполнения не проведен анализ влияния типа внутреннего заполнения.

2. В работе не приведены результаты исследования реологических свойств филамента, что позволило бы более точно определить режимы FDM-печати и постобработки.

3. В диссертации недостаточно четко описана предложенная теоретико-экспериментальная методика определения фактических значений характеристик изделий при различных степенях заполнения.

4. Неясно, почему в четвертой главе диссертации представлены два варианта экспериментальных исследований, достаточно было бы ограничиться либо многофакторным планом, либо планом Бокса-Бенкена.

5. В пятой главе при применении разработанного конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати следовало бы более детально описать процедуру постобработки рабочего колеса вентилятора.

6. В диссертации имеются орфографические ошибки и погрешности в оформлении.

Указанные выше замечания не влияют на общую положительную оценку рассматриваемой диссертационной работы, поскольку они не снижают значимости результатов исследования.

6. Заключение о соответствии диссертации критериями, установленным Положением о присуждении ученых степеней

Диссертация Потапова Андрея Алексеевича ««Конструкторско-технологическое обоснование режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками» выполнена на актуальную тему и является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научно-технической задачи разработки конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками, включающего разработку и оптимизацию конструкций, выбор материалов, определение технологических схем, режимов печати и последующей дополнительной обработки, имеющей важное значение в области аддитивных технологий и существенное значение для изготовления изделий с заданными характеристиками методом FDM-печати.

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу Потапова Андрея Алексеевича на тему «Конструкторско-технологическое обоснование режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности специальность 2.5.6. Технология машиностроения

Актуальность темы диссертационной работы

Моделирование методом послойного наплавления (FDM) – технология аддитивного производства, широко используется при создании трехмерных моделей, в том числе и изделий сложной формы, при создании прототипов и в промышленном производстве. Несмотря на ряд неоспоримых преимуществ аддитивных технологий по сравнению с традиционными технологическими методами, существуют ограничения, которые сдерживают применение технологий 3D-печати. Эти ограничения связаны как с выбором материалов для печати, так и с важной проблемой, ограничивающих реализацию потенциальных возможностей FDM-печати, которой является отсутствие конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати и постобработки, а также оптимизации конструкций изделий с целью уменьшения их материалоемкости при обеспечении заданных характеристик. Кроме того, в настоящее время отсутствует достаточно четко отработанные технологические режимы и рекомендации для производства изделий со стабильными свойствами, структурой и формой. Эти задачи требуется решать с учётом конкретно выбранных материалов, тщательно изучать технологические характеристики режимов печати, находить взаимосвязь этих характеристик со свойствами полученных материалов и изделий из них. Среди известных на сегодняшний день методов 3D-печати метод FDM (Fused-Deposition Modeling) является самым популярным в мире. Всё сказанное выше подтверждает **несомненную актуальность выбранного автором диссертации направления исследований**, связанного с разработкой конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками, включающего разработку и оптимизацию конструкций, выбор материалов, определение технологических схем, режимов печати и последующей дополнительной обработки.

Краткое рассмотрение содержания диссертации

Диссертация представлена на 181 страницах машинописного текста, включает 104 рисунка, содержит 33 таблицы, состоит из введения, пяти глав, обсуждения результатов, заключения и списка литературы (161 наименование). Остановимся на краткой характеристике содержания отдельных глав.

Во введении обоснованы актуальность выбранного направления исследования, сформулированы цели и задачи исследования, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, выносимые на защиту научные положения, степень достоверности полученных результатов, сведения об апробации результатов.

Глава 1 (обзор литературы). Анализ современного состояния технологии производства изделий с заданными характеристиками.

В главе 1 указывается, что важнейшим направлением в машиностроении является поиск рациональных технологических решений, направленный на усложнение геометрии изделий, уменьшения их массы и размеров, повышения точности размеров и характеристик их эксплуатационных свойств. Автором выполнен обзор и анализ литературы в области современного состояния технологии производства изделий с требуемыми эксплуатационными характеристиками. Проанализированы достоинства и недостатки традиционных методов изготовления изделий (механическая обработка, литье, прессование) и показано, что приведенные выше методы обладают рядом ограничений в процессах обработки изделий, являются недостаточно материалоемкими, зачастую требуют проектирования и изготовления специальной техоснастки. Отмечено, что аддитивные технологии широко используются для изготовления изделий с заданными характеристиками, которые затруднительно, а в ряде случаев и невозможно изготовить с применением традиционных технологий. Указано, что основными преимуществами аддитивных технологий являются: отсутствие требований к изготовлению сложной инструментальной оснастки (например, литейной формы); повышение эффективности изготовления изделий и уменьшения материалоемкости за счет оптимизации конструкции; использования материалов с требуемыми функциональными свойствами; возможность существенно сократить число технологических операций при изготовлении изделия с заданными характеристиками. Автор обосновывает выбор метода FDM (Fused-Deposition Modeling) для выполнения поставленной в работе цели и задач тем, что с применением этой технологии может быть решён достаточно широкий круг задач, особенно при изготовлении изделий сложной геометрии, что существенно сокращает сроки их производства при минимальных затратах. Так как при применении технологии FDM-печати решающее влияние на механические свойства и технологичность оказывает выбор материала, автор в обзоре литературных источников останавливается и на рассмотрении свойств наиболее распространенных материалов, используемых в качестве

термопластичных матриц. Важной частью главы 1 является выделение наиболее значимых технологических параметров процесса FDM-печати, к которым автор обоснованно относит следующие: угол наклона раstra; ориентация печати; процент заполнения. Эти параметры, по мнению автора, являются ключевыми, оказывающими наибольшее влияние на механические свойства образцов. В настоящее время отсутствуют научно обоснованные зависимости, позволяющие подобрать рациональные режимы печати в зависимости от технических требований к изделию. Логичным переходом в рассмотрении технологий методов FDM-печати являются процессы, связанные с дополнительной обработкой изделий, которые приводят к улучшению физико-механических свойств изделий. Грамотно выбранные методы дополнительной обработки в ряде случаев позволяют приблизить физико-механические характеристики изделий, изготовленных методом FDM, к изделиям, изготовленным методами литья и прессования. Анализируя научно-техническую информацию, автор констатирует, что научные публикации, посвященные применению методов постобработки, в основном разработаны только для образцов простой формы. Автор отмечает актуальность разработки технологии постобработки, направленной непосредственно на реальные изделия. Из обзора литературных источников автор диссертационной работы делает вполне обоснованный вывод, что одной из проблем, ограничивающих реализацию потенциальных возможностей FDM-печати, является отсутствие конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати и постобработки с целью уменьшения их материалоемкости при обеспечении заданных характеристик. Материал, изложенный в литературном обзоре, дает достаточно полное представление о проводимых в настоящее время научных исследованиях, технологических решениях и проблемах, связанных с вопросами аддитивных технологий, в частности технологиями 3D печати. Выполненный анализ научно-технической литературы позволил правильно и обоснованно сформулировать научные и прикладные задачи, выбрать материалы и явился базой для последующего обоснования и развития научной стороны диссертационной работы. Несмотря на положительную оценку проведенного автором анализа научной литературы возникли незначительные замечания, которые будут сформулированы ниже.

Глава 2. Структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками. Автор начал решать поставленные в работе задачи с разработки структуры конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками, в связи, с чем выделил необходимость решения следующих задач: выбор материала для FDM-печати; оценка

свойств исходного материала; улучшение свойств исходного материала; формирование конструкции изделия с учетом специфики FDM-печати; уменьшение массы изделия путем изменения степени заполнения внутреннего объема с учетом технических требований к изделию. Данная структура выглядит логично и обоснованно и включает в себя выбор материала, рациональный выбор конструкции и внутреннего заполнения с учетом специфики FDM-печати, проведение моделирования и расчетов оценки достижения заданных характеристик. Далее автор последовательно рассматривает указанные требования для конструкторского обоснования режимов FDM-печати.

При рассмотрении вопроса о качестве исходного материала для печати автор выделяет следующие термические характеристики: температуру стеклования; температуру кристаллизации; температуру плавления; начальную температуру деструкции; конечную температуру деструкции; показатель текучести расплава. Также в работе анализируется применение метода ДСК для корректной оценки этих характеристик.

По результатам работ, проведенных во второй главе, автором разработана структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий, обеспечивающих уменьшение материалоемкости изделий при обеспечении требуемых характеристик; разработана структура конструкторского и технологического обоснования режимов FDM-печати. Сделаны выводы, что для реализации разработанной структуры конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками необходимы следующие исследования: моделирование и расчеты по определению эффективных характеристик изделия для FDM-печати при разной степени заполнения; построение регрессионных зависимостей физико-механических свойств от параметров печати; исследование влияния постобработки на физико-механические свойства изделия.

Глава 3. Конструкторское обоснование FDM-печати изделий с заданными характеристиками.

В третьей главе проведено моделирование и исследование эффективных характеристик изотропного и ортотропного материалов в зависимости от степени заполнения V. Моделирование проведено с использованием численного метода в пакете программ COMSOL Multiphysics. Можно считать обоснованным принятые при моделировании допущения, состоящие в том, что материал имеет периодически повторяющуюся структуру. В работе выделены три эффективные упругие характеристики изотропного материала: E – эффективный модуль упругости (модуль Юнга); μ – эффективный коэффициент Пуассона; G – эффективный модуль сдвига. Расчет этих характеристик при различной степени заполнения проводился, используя модель со

сферическим включением. Полученные распределения механических напряжений для различных значений степени заполнения для изотропного материала позволили автору перейти к оценке коэффициента концентрации напряжений и к выводу, что при малых степенях заполнения предельное значение коэффициента концентрации напряжений наибольшее (стремится к 3), а при больших степенях заполнения концентрация напряжений мала (коэффициент концентрации напряжений принят равным 1).

Более близка к реальным анизотропным структурам модель, образующимся при FDM-печати ортотропная модель, имитирующая слои при FDM-печати при чередующемся их направлении 0° и 90° . Эффективные упругие характеристики ортотропного материала характеризовались шестью параметрами: E_{11} , E_{33} , G_{12} , G_{23} , μ_{21} , μ_{31} – коэффициенты Пуассона в соответствующих направлениях. В результате численного решения были получены эффективные характеристики ортотропного материала в зависимости от степени заполнения: модули упругости, модули сдвига, коэффициенты Пуассона. По результатам моделирования в работе получены аналитические зависимости эффективных характеристик ортотропного материала при разной степени заполнения. Также проведены оценки влияния величины перекрытия слоев на эффективные характеристики и из сравнения экспериментальных и расчетных результатов сделано заключение, что перекрытие слоев при FDM-печати составляет 0,1h, или 10 %. Для оценки точности разработанных моделей были проведены эксперименты на образцах из АБС-пластика. Анализ экспериментальных результатов показал, что ортотропная модель может быть применима для расчетов эффективных характеристик материала при разных значениях степени заполнения.

Глава 4. Технологическое обоснование режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками.

Большим достоинством работы является то, что значительная её часть посвящена экспериментальным исследованиям, что позволило автору подтвердить и реализовать разработанную структуру технологических режимов FDM-печати. Проведённый большой объём экспериментальных исследований позволил автору также установить регрессионные зависимости физико-механических свойств изделий от параметров процесса печати, позволяющих уменьшить материалоемкость изделия при достижении заданных характеристик. Факторами качества изготавливаемого изделия достаточно обоснованно приняты следующие характеристики: предел прочности на растяжение, модуль упругости, плотность, пористость, время печати. Для определения более точной зависимости регрессионные модели были получены по двум методам: с

использованием полного факторного эксперимента для трех факторов, состоящего из 27 экспериментов; с использованием трехуровневого плана Вох-Бейнкен для трех факторов, состоящего из 15 экспериментов. Показано, целесообразнее использование модели, построенной по плану Вох-Бейнкен, что является важным результатом для экономии времени и материала при печати. Проведенные исследования позволили оценить влияние технологических параметров процесса FDM-печати на свойства образцов и обоснованно принять их в качестве обобщенных параметров процесса в функции критерия качества изделия. Несомненно, важным является результат, полученный в работе, что если критериальными требованиями являются механические характеристики и низкая пористость, рекомендуются следующие режимы печати: $T=225^{\circ}\text{C}$; $V=50\text{мм/с}$; $h=0,1\text{мм}$. Если критериальным требованием является производительность, то рекомендуются следующие режимы печати: $T=225^{\circ}\text{C}$; $V=50\text{мм/с}$; $h=0,3\text{мм}$, при условии, что выполняется требование по механическим свойствам.

В этой же главе проведены исследования влияния постобработки на физико-механические свойства изделия. На основе проведенных в работе экспериментальных исследований и анализа литературы исследований автором сформулированы рекомендации по выбору метода постобработки для реальных изделий. Показано, что рассмотренные технологии термической постобработки образцов, полученных методом FDM-печати, являются перспективными для улучшения физико-механических свойств (прочности на растяжение и пористости). Метод постобработки в дисперсной среде, состоящей из гипсового порошка, является наиболее целесообразным для постобработки изделий сложной формы.

Глава 5. Практическая реализация диссертационного исследования. Логичным завершением диссертационной работы являются исследования, проведенные в данной главе, которая посвящена применению разработанной структуры конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками при разработке конструкции и технологии «рабочее колесо вентилятора». В работе деталь вентилятора изготавливалась по двум методам: с использованием базовой структуры FDM-печати и с использованием разработанной структуры обоснования режимов FDM-печати. Были предложены три варианта конструкции, подобран материал и проведено моделирование напряженно-деформированного состояния с использованием полученных в работе результатов, что позволили определить рациональные режимы процесса FDM-печати и постобработки,

которые позволили увеличить производительность на 70 % и уменьшить используемый материал на 50 %, при соблюдении технических требований.

Научная новизна работы

Научные результаты работы сформулированы в диссертации и автореферате. Кратко их можно обобщить следующим образом:

- выявлена взаимосвязь и представлено обоснование конструкторско-технологических режимов FDM-печати, позволяющих уменьшить материалоемкость изделий путем расчёта требуемых характеристик изделия, полученного с применением технологии FDM-печати;
- получены аналитические зависимости эксплуатационных свойств изделий от степени заполнения, температуры, скорости печати и высоты слоя.
- разработаны теоретические подходы к обоснованию конструкторско-технологических режимов FDM-печати изделий с требуемыми эксплуатационными характеристиками.
- Эти результаты также могут служить основой при разработке теоретических основ прогнозирования свойств изделий, полученных методом FDM.

Практическая значимость результатов работы практическая значимость заключается в разработке практических рекомендаций технологических режимов FDM-печати для получения изделий с требуемыми характеристиками. В результате применения разработанной структуры конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати была оптимизирована конструкция изделия, подобран материал и параметры печати, изготовлены изделия с меньшей массой, удовлетворяющие предъявляемым требованиям. На основе данных, полученных в ходе экспериментальных исследований, разработаны рекомендации по улучшению физико-механических свойств изделий с заданными характеристиками, изготовленных методом FDM-печати.

Полученные сведения являются, несомненно, новыми и важными для рассматриваемой области технологии полимеров и композитов, т.к. позволяют создавать изделия с использованием требуемых материалов и обладающие необходимыми эксплуатационными свойствами. Полученные результаты могут служить методологической основой для формирования новых ГОСТов на изделия, изготовленные на 3D-принтерах.

Достоверность полученных результатов. Полученные в работе данные обосновываются и подтверждаются: применением правильно выбранных, как методологических подходов, так и методов исследования; статистической обработкой представленных результатов; соответствием полученных результатов, существующим представлениям в области исследований структуры и свойств полимерных и полимерных композиционных материалов. Все вышесказанное, несомненно, можно отнести к достоинствам работы.

Основные вопросы и замечания по работе следующие:

При общей положительной оценке диссертации имеются отдельные вопросы и замечания:

1. Представляется, что Глава 1 была бы более информативна, если бы автор уделил больше внимания вопросам, связанным с особенностями структуры исследуемого полимерного материала АБС пластика, адгезионного взаимодействия матрица-наполнитель для выбранных материалов;
2. Автор говорит о АБС пластике, как об аморфном материале. Как объясняется введение такой характеристики, как температура кристаллизации?
3. Представляется не удачным термин «микромеханическое моделирование».
4. Результаты «микромеханического моделирования» (таблица 7, стр. 78, текст диссертации) представлены в виде величин с точностью до 8-ого знака после запятой. Такая точность величин не может быть достигнута ввиду большого количества допущений, принятых при составлении модели.
5. Сегодня ABS пластик - этот популярный термопласт в чистом виде уже не очень интересен. На современных производствах имеет смысл использовать композиты ABS со свойствами, усиленными за счет добавок других полимеров или волокон. Можно ли распространить подходы, модели и выводы, сделанные в диссертационной работе на композиты на основе ABS пластика?
6. Требуется структурного объяснения вывод, что при малых степенях заполнения значение коэффициента концентрации напряжений наибольшее, а при больших степенях заполнения концентрация напряжений мала (принят равным 1). Какие физические или структурные объяснения могут быть положены в основу этого положения?
7. В основу моделирования свойств материала автором положены подходы, принятые в теории упругости, т.е. предполагается, что материал является упругим. В какой-то степени, это подтверждено в работе отсутствием остаточного компонента деформации (глава 4) в диапазоне малых деформаций. Известно, что полимерные материалы

проявляют выраженные вязко-упругие свойства. Какие изменения надо ввести в разработанный подход для расширения его использования на полимерные материалы?

8. Требуется пояснения следующий результат. Автором по результатам численного моделирования получены аналитические зависимости эффективного модуля упругости от степени заполнения (рисунок 39, текст диссертации), показывающие возрастание этой величины. Но если материал, начиная с определённых значений коэффициента заполнения, образует сплошной каркас, то модуль упругости должен зависеть только от свойств материала и не зависеть от количества пустот.

9. Требуется пояснения и ссылки на источник информации рисунок 32 (текст диссертации), на котором представлена взаимосвязь степени заполнения, массы и характеристик изделия.

10. На рисунках 59, 60 по оси ординат ошибочно использован термин «нагрузка», а не «напряжение».

11. На рисунках 61–70 (текст диссертации) приведены параметрические поверхности, построенные по разработанным регрессионным зависимостям для различных параметров процесса FDM-печати. Однако анализу этих зависимостей автор не отводит должного внимания.

Сделанные замечания не снижают научной ценности работы, не ставят под сомнение ее результаты и выводы.

Общая оценка выполненных диссертантом исследований и работы в целом

Оценивая работу в целом, следует сказать, что высказанные замечания не имеют принципиального значения и не перечеркивают положительной оценки диссертации Потапова А.А. Основные научные результаты диссертации опубликованы в научной печати и доложены на научно-технических конференциях. Статьи, тезисы докладов по материалам диссертации перечислены в автореферате. Диссертация тщательно оформлена и имеет правильный стиль изложения. Автореферат по содержанию отвечает тексту диссертации.

Общее заключение о диссертационной работе следующее:

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.5.6. Технология машиностроения по п.3 «Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения»; п.5 «Методы проектирования и оптимизации технологических процессов».

По актуальности темы исследования, степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций диссертация «Конструкторско-технологическое обоснование режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 №842 (в действующей редакции), т.к. является научно-квалификационной работой в области технологии и переработки полимеров и композитов, в которой на основании установленной взаимосвязи технологических режимов и эксплуатационных свойств изделий из конструкционных полимеров и композитов на их основе, решена научно-техническая задача, направленная на совершенствование технологии получения изделий из полимерных материалов, методом FDM-печати, что крайне востребовано при производстве сложных изделий конструкционного назначения в различных высокотехнологичных отраслях экономики, а ее автор, Потапов Андрей Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6. «Технология машиностроения».

Официальный оппонент,
заведующий кафедрой
инженерного материаловедения
и метрологии ФГБОУ ВО
«Санкт-Петербургский
государственный университет
промышленных технологий и дизайна»,
доктор технических наук
по специальности 05.19.01
Материаловедение производств
текстильной и легкой
промышленности, профессор

Цобкалло Екатерина Сергеевна

5.02.2025

191186, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, д. 18.
тел.: +7 (812) 315-75-25
E-mail: tsobkallo@mail.ru
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
промышленных технологий и дизайна»



Цобкалло Е.С.
Семко Е.А.
«Санкт-Петербургский государственный
университет промышленных технологий и дизайна»