

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D07208 - «Аддитивное производство»

ӘБІЛЕЗОВА ҒАЗЕЛ САПАРҚЫЗЫ

на тему «Исследование влияния остаточных напряжений на механические характеристики деталей выращенных методом послойного синтеза»

Благодаря способности легко адаптироваться под любые задачи и максимально быстро запускать изделия сложной геометрии в производство при минимальных затратах 3D-печать активно внедряется в различные отрасли и находится в фокусе исследовательского внимания по всему миру. В настоящее время доступна целая гамма методов аддитивного изготовления изделий, однако наиболее распространённой и доступной технологией 3D-печати является метод послойного нанесения расплавленной нити полимера, или FDM (Fused Deposition Modeling-Моделирование наплавленного осаждения).

Одним из самых перспективных материалов, применяемых в FDM технологиях, является полифениленсульфон (ПФСн), который значительно превосходит свойства акрилонитрилбутадиенстирола (АБС), стиролбутадиен сополимера (СБС), ударопрочного полистирола (УПС), полилактида (ПЛА), полиэтилентерефталат-гликоля (ПЭТГ) и других, используемых в данном методе печати. Увеличивающаяся доля мирового потребления композитов в самых разнообразных отраслях также обуславливает настоящую потребность вовлечения в аддитивные технологии композиционных материалов, в частности армированного стекловолокном. Хорошо известно, что на формирование свойств полимерных изделий влияет не только структура материала, но и способ переработки. Накопленные к настоящему времени экспериментальные сведения по применению полимерных материалов в аддитивных технологиях показывают, что свойства изделий, полученных 3D-печатью, значительно уступают свойствам литьевых изделий, несмотря на то, что в отличие от традиционных методов переработки, 3D технологии позволяют регулировать большое количество параметров печати, которые могут оказывать значительное влияние на физико-механические свойства печатаемого объекта.

Новые возможности появились после разработки и внедрения 3D-оборудования и в машиностроительной отрасли. Пока еще не везде, но в целом ряде направлений аддитивные технологии начали быстро вытеснять традиционные методы производства. В машиностроении 3D-печать создает условия, позволяющие решать самые разные задачи эффективно, быстро и качественно. Среди этих задачи можно отметить следующие:

- разработка прототипов и изготовление новых компонентов и агрегатов (концепт-модели, тестовые образцы);
- создание более современных систем и/или их элементов;
- производство ремонта и/или замены старых деталей.

3D-оборудование на практике показало свою эффективность и возможности по производству более качественных и менее дорогих по себестоимости изделий.

Одним из факторов значительно влияющих на качество деталей произведенных аддитивной технологией, являются **остаточные напряжения**.

Несмотря на значительное развитие технологий и моделирования остаточные напряжения до сих пор являются малоизученным и трудноопределимыми, в особенности это касается анизотропных материалов. Наиболее это характерно в конструкциях полученных с помощью аддитивных технологий или в композитных материалах. В настоящее время композиты широко применяются во многих конструкциях, к которым предъявляются требования по массовой эффективности в авиастроении, в космической технике, в кораблестроении, в энергетике и т.д. При этом, ключевым моментом является правильный подход к исследованию остаточных напряжений. Большинство существующих конструкций, в которых эффективно применяются композиционные материалы, все-таки являются тонкостенными или сетчатыми, или представляют собой сэндвич панели с композитными несущими слоями и облегченными заполнителями. Расчету и проектированию таких изделий посвящено большое количество работ российских и зарубежных ученых. Как правило, композиционные материалы формуется при повышенных температурах и давлениях, после чего происходит их охлаждение до нормальной температуры. В результате процессов теплового расширения, а также с учетом различия термоупругих свойств компонентов, входящих в состав композиционных материалов могут возникать остаточные напряжения в деталях, которые впоследствии могут привести к снижению прочности композитов, нарушению структур армирования и изменению величин коэффициентов армирования, что снижает эксплуатационные характеристики деталей. В ряде случаев уровень остаточных напряжений в деталях оказывается настолько высоким, что уже в процессе хранения наблюдается растрескивание или разрушение материала. В результате постепенной релаксации остаточных напряжений происходит изменение размеров и искажение форм деталей. Остаточные напряжения в этом направлении могут достигать предела прочности и приводить к появлению трещин в полимерной матрице. Важным становится знание типа, расположения и величины остаточного напряжения в изделиях композиционных материалов. Поэтому развиваемые в настоящей диссертации сочетание методов *bridge curvature* (кривизна моста), оптического сканирования и конечно-элементный анализ обратной задачи теории упругости для определения остаточных напряжений в полимерах и дисперсно-наполненных композитах изделий **являются актуальными**.

Основной целью работы является исследование возможности достоверного определения остаточного НДС в напечатанных полимерных и композитных изделиях (напряженно-деформированного состояния) с применением сочетания методов bridge curvature (кривизна моста), оптического сканирования и конечно-элементного анализа обратной задачи теории упругости.

Согласно поставленным целям сформулированы следующие задачи:

- проведение испытаний и реализация метода bridge curvature (кривизна моста) для измерения деформаций на поверхностях образцов из полимера и стеклопластика;

- разработка и реализация методов решения обратных задачи теории упругости для оценки остаточных напряжений в исследуемых образцах;

- сопоставление результатов аналитических и численных методов, примененных для решения обратных задач теории упругости для оценки остаточных напряжений в исследуемых образцах;

- количественная оценка влияния технологий изготовления полимерных и композитных изделий на их прочность;

- количественная оценка влияние остаточных напряжений на прочность деталей из полимера и композита, изготовленных методом 3D печати.

Объектом исследования являются методы bridge curvature (кривизна моста) и оптического сканирования, применяемые для определения остаточных напряжений в полимерах и композиционных материалах.

Научные положения, выносимые на защиту:

- в ходе выполнения работы выявлены, математические закономерности описывающие изменения механических свойств ПЛА пластика и полимера стеклонаполненного композита TOTAL GF 10% (glass fiber) от технологических факторов 3D печати;

- выявлено влияние уровня и рода остаточных напряжений на механическую прочность напечатанных изделий.

Научная новизна работы определяется следующими результатами:

- разработана объединенная методика bridge curvature (кривизна моста), оптического сканирования и численного КЭ (конечно элементного) моделирования для решения обратных задачи механики и идентификации остаточного НДС исследуемых образцов;

- получены новые данные по остаточному НДС в исследованных образцах из полимера и стеклонаполненного композита;

- на основе компьютерного моделирования выявлены общие закономерности изменения механических свойств ПЛА пластика и полимера стеклонаполненного композита TOTAL GF 10% (glass fiber) на его основе в зависимости от процентного содержания твердых включений, формы частиц включений и их ориентации в матрице;

- установлены влияние технологических параметров процесса литья и 3D-печати на свойства готовых изделий;

- определены закономерности изменения физико-механических свойств напечатанных образцов из полимера и стеклонаполненного композита на его основе в зависимости от направления печати, межрастрового зазора и размеров растров образцов;
- определены закономерности возникновения остаточных напряжений в напечатанных изделиях и их влияние на общую прочность;
- установлены режимы 3D-печати, позволяющие напечатанным образцам не уступать по свойствам литьевым.

Достоверность полученных результатов, определяется примененными строгими методами механики деформированного твердого тела и апробированными методами экспериментальной механики. Численное моделирование проведено в динамической постановке в системе NASTRAN с использованием детализированных моделей изделий, высокоплотной сетки и эффектов конечных деформаций. Достоверность численных расчетов оценивалось путем варьирования размера конечноэлементной сетки, а также сопоставлением полученных решений с решением в рамках упрощённых аналитических моделей.

Теоретическая и практическая значимость. Выявленные закономерности изменения физико-механических характеристик полимера и его стеклонаполненного композита в зависимости от параметров печати позволяют решить очень важную проблему получения 3D- изделий с заданными свойствами с учетом их назначения и направления испытываемых нагрузок и одновременно содействовать дальнейшему развитию новой прогрессивной отрасли аддитивных технологий.

Был проведен трехфакторный эксперимент, обработка эксперимента показала влияние технологических факторов плотность заполнения, температура и толщина слоя на механические характеристики полимеров и композитов на их основе.

Были даны рекомендации по выбору технологических параметров печати ответственных деталей машиностроения из полимеров и композитов на их основе.

Предложенные новые методы определения остаточных напряжений позволяют получать полную картину напряженного состояния материала в исследуемых областях изделий, что может быть необходимым при валидации расчетных моделей остаточного НДС, уточнении критериев прочности и оценке качества выбранных технологических режимов изготовления изделий.

Апробация работы. Основные публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 1 научная работа в Международном журнале, индексируемом Scopus/ Web of Science, и 3 научные работы в изданиях, входящих в список статей в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан. Основные положения и научные результаты обсуждались на международных научно-практических конференциях, публиковались материалы конференции. Также в журнале,

входящем в российский индекс научного цитирования, опубликована 1 статья.

Статьи в журналах, входящих в базы Scopus и WOS: 1) Isametova, M., Abilezova G.S., Dishovsky. N., Velev, P. Development and verification of mechanical characteristics of a composite material made of a thermoplastic matrix and short glass fibers. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 5, Issue 12-113, 2021, pp.30–38, ISSN:1729-3774.

Список статей в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в области науки и высшего образования: 2) Исаметова М.Е., Абилезова Г.С., Карпеков Р.К., Ткаченко Д.Е. Исследование влияния конструкции центробежного колеса на напорные характеристики многоступенчатого насоса. Горный журнал Казахстана №9 (209) 2022, стр.28-34, ISSN 2227 – 4766.

3) Isametova M.E., Abilezova G.S., Akhmedov Kh.A. Computer simulation of liquid kinematics in a centrifugal pump and verification of calculation results with experimental data. Горный журнал Казахстана №11 (211) 2022, стр. 47 - 54, ISSN 2227 – 4766.

4) Isametova M.E., Abilezova G.S., Duisengali A.M., Tursynbayeva A.N. Application of rapid prototyping technology in pump engineering. Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ. Том 143 № 2, 2023, стр. 177-192, ISSN 2616-7263.

Список международных конференций: 5) Абилезова Г.С., Дуйсенгали А.М. Остаточные напряжения и методы измерения. «Сатпаевские чтения - 2020», том II, стр.134-138, ISBN 978-601-323-209-6.

6) Isametova M., Abilezova G. Study of the influence of the design of a centrifugal wheel on the pressure characteristics of a multistage pump. МАТЕС Web of Conferences 366, 01006 (2022) Power Transmissions 2022.

Список российских журналов: 7) Исаметова М.Е., Абилезова Г.С., Дуйсенгали А.М. Компьютерное моделирование композиционных материалов в среде digimat. «Вестник Российского Нового Университета», № 4/1, (№89), 2021, стр. 14-26, ISSN: 2414-9187.

Структура и объем работ. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Диссертация состоит из 117 страниц, 81 рисунков, 39 таблиц, 116 библиографических источников и 1 приложения.