

КОЛЧАНОВА АННА ВЛАДИМИРОВНА

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВЫРАЩИВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОГО
СПЛАВА И КАРБИДА ТИТАНА МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО
ПЛАВЛЕНИЯ

2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



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

Научный руководитель:

Григорьянц Александр Григорьевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Дмитриев Александр Сергеевич
доктор технических наук,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»,
профессор Кафедры низких температур,

Петровский Виктор Николаевич
кандидат физико-математических наук,
Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ»,
Доцент Кафедры лазерной физики

Ведущая организация: **ПАО РКК «Энергия», г. Королёв, Московская обл.**

Защита состоится «___» _____ 2023 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 при Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7 (499) 267-09-63.

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

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.02,
кандидат технических наук, доцент



А.В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Современная промышленность устанавливает потребность в материалах с сочетанием таких свойств, которые не могут быть обеспечены обычными металлическими сплавами, керамическими или полимерными материалами. Комбинируя две или более физически различных фаз, можно получить композиты со свойствами, которые отличаются и, в ряде случаев, намного превосходят свойства компонентов по отдельности. Алюминиевые сплавы получили широкое распространение из-за низкой плотности и высокой коррозионной стойкости. Автомобильная, судостроительная и аэрокосмическая промышленность особенно заинтересованы в производстве композитов с алюминиевой металлической матрицей (КАММ), поскольку введение фазы армирования дает возможность производить компоненты с высоким отношением жесткости к массе. Перспектива использования алюминиевых композитов в этих областях в значительной степени зависит не только от свойств материала, но и от простоты его изготовления, обрабатываемости и возможности изготавливать из такого композита изделия требуемой геометрии. Типы армирующих компонентов определяются их механическими свойствами, химической и теплофизической совместимостью с матрицей. Карбид титана практически не взаимодействует химически с алюминием, кремнием или магнием, входящих в состав рассматриваемого алюминиевого сплава, имеет высокую твердость и модуль упругости, что выделяет его среди прочих карбидов или керамик, используемых для армирования.

Аддитивные технологии, в частности селективное лазерное плавление (СЛП), открывают потенциал для сочетания преимуществ, как методов литья, так и методов порошковой металлургии, принося дополнительные преимущества. Поскольку СЛП использует порошок в качестве исходного сырья, проблемы сегрегации сводятся к минимуму (по сравнению с обработкой расплава в большом объеме). Полное плавление лазером материала матрицы обеспечивает получение деталей с высокой плотностью, аналогичных литью. Высокая точность и разрешающая способность СЛП позволяет свести к минимуму трудоемкий процесс механической доработки изделия из композиционного материала. Наконец, СЛП характеризуется быстрым нагревом и охлаждением, и материал остается в расплавленном состоянии лишь очень короткое время. Это должно свести к минимуму любые реакции между упрочняющей фазой и алюминием. В тоже время термические циклы, характерные для лазерной обработки, обеспечивают формирование уникальных структур. В случае алюминиевых сплавов это приводит к повышению прочностных характеристик. Тем не менее, большое количество исследований

композитов, получаемых при СЛП, сводится лишь к измерению полученных свойств без глубокого изучения процесса формирования композита, факторов, влияющих на конечные свойства. Нет систематизации зависимости свойств от размеров, формы и концентрации армирующих частиц. Понимание этих процессов позволит правильно подходить к параметрам исходного материала, режимов выращивания, а также прогнозировать свойства изделий, в том числе для абсолютно новых комбинаций матрицы и армирующего элемента.

Цель работы: Разработка технологии формирования композиционного материала с алюминиевой матрицей, армированной карбидом титана в процессе выращивания изделий методом селективного лазерного плавления.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

1. Проведение расчета технологических параметров СЛП для материала алюминиевой матрицы и композиционных материалов на её основе с различным содержанием армирующих частиц TiC.
2. Экспериментальный анализ влияния концентрации частиц TiC неправильной формы заданного размерного диапазона на формируемую микроструктуру композита;
3. Разработка подхода к моделированию напряженно-деформированного состояния композиционного материала, сформированного в процессе селективного лазерного плавления;
4. Проведение численного расчета напряжений и деформаций в сформированном композиционном материале при различных формах, размерах и количестве армирующих элементов;
5. Анализ влияния размера, формы и концентрации частиц TiC на напряженно-деформированное состояние сформированного композита;
6. Анализ механических характеристик образцов композита с различным содержанием армирующих частиц и установление зависимости от сформированной структуры.
7. Разработка технологии выращивания изделий сложной геометрической формы методом СЛП с формированием композита на основе алюминиевого сплава, армированного частицами TiC с повышенными прочностными характеристиками, позволяющими снизить массу изделий, а также с повышенной износостойкостью для увеличения срока эксплуатации изделий.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Теоретически и экспериментально показано, что выращивание композиционного материала на основе сплава Al9Cu с включением TiC при удельной энергии излучения 80-90 Дж/мм³, скорости обработки 1400 мм/сек, с

постоянным шагом штриховки 80-85 мкм обеспечивает его максимальную прочность и плотность.

2. На основании микромеханического моделирования напряженного-деформированного состояния в формируемом при СЛП материале установлено, что частицы сферической формы оказывают меньшее влияние на напряженное состояние в композите, чем колотые, размер которых должен быть не более 10 мкм.

3. Установлено влияние концентрации армирующих частиц на микроструктуру и механические характеристики получаемого композиционного материала. Предел прочности и текучести возрастает с увеличением концентрации TiC до 5% за счёт измельчения зерна. Дальнейшее увеличение концентрации приводит к снижению механических характеристик из-за возрастающих внутренних напряжений и наличию концентраторов напряжений на острых краях колотых частиц TiC.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработаны рекомендации по выбору формы, размера и концентрации армирующих частиц TiC для формирования композиционного материала с матрицей из Ак9ч при СЛП.

2. На основе комплексного анализа влияния характеристик армирующих частиц на механические свойства определены режимы выращивания изделий с формированием композиционного материала с матрицей из алюминиевого сплава Ак9ч с добавлением колотых частиц карбида титана с размером от 1 до 10 мкм, при котором наблюдается увеличение предела прочности и микротвердости до значений 448,3 МПа и 140 кгс/мм², соответственно.

3. Разработана технология выращивания изделий из формируемого в процессе селективного лазерного плавления композиционного материала, представляющая интерес для предприятий аэрокосмической отрасли.

Методы исследования включали в себя стандартные теоретические и экспериментальные методы. Моделирование проводилось с использованием стандартных программных продуктов Digimat и Nastran. Все образцы из материала матрицы и из композиционной смеси порошков: кубические и образцы на механические испытания выращены в одинаковых условиях на отечественной установке для селективного лазерного плавления «СЛП-250», разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Исследования микрошлифов на микроструктуру и пористость, а также изломов образцов на разрыв проводилось на оптическом микроскопе Olympus GX53 и на электронном микроскопе Phenom Pharos. Пористость материала матрицы дополнительно измерялась на метрологическом компьютерном томографе GE PHOENIX V.

Достоверность подходов к численному моделированию процессов лазерного плавления подтверждается использованием современного верифицированного программного обеспечения и проверкой его применимости. В полученных результатах отсутствуют нефизические значения. Сравнение рассчитанных параметров с экспериментом показало хорошее соответствие. Полученные результаты обеспечиваются корректным применением основных положений естественных наук при проведении расчётных исследований, осуществлением измерений на поверенном оборудовании по стандартным методикам и использованием ранее проверенных принципов при создании новых испытательных приспособлений. Достоверность подтверждается экспериментальными данными, обработанными с помощью методов статистического анализа.

Апробация работы:

1. Научно-техническая конференция «Студенческая научная весна» (Москва, 2020)
2. VII Международная конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» (Москва, 2021)
3. Международная научная конференция «Современные материалы и передовые производственные технологии» (Санкт-Петербург, 2021)
4. XIV Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроение России» (Москва, 2021)
5. Доклады автора на научных семинарах кафедры «Лазерные технологии и оборудование» кафедры МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2018-2022гг.)

Публикации:

Основное содержание и результаты диссертационной работы изложены в 5-и статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 2-х статьях в журнале, индексируемом в базе данных SCOPUS.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, заключения, списка литературы из 121 наименования. Работа содержит 148 страниц машинописного текста, в том числе 24 таблицы и 57 рисунков.

В введении обоснована актуальность темы, указаны цель работы, научная новизна, практическая ценность работы, сведения об апробации работы и публикациях.

В Главе 1 проведен литературный обзор, посвященный анализу современного состояния исследований в области применения композиционных материалов с металлической матрицей в аддитивных технологиях, в частности при селективном лазерном плавлении, и их применения в промышленности.

Композиционные материалы представляют большой интерес, так как позволяют комбинировать полезные свойства входящих в состав композита элементов и расширять возможности изготовления изделий. Технология СЛП интересна тем, что композиционный материал формируется в процессе выращивания. Есть широкая возможность комбинировать состав исходного порошкового сырья для выращивания. Особое внимание уделено композитам с алюминиевой матрицей, армированной TiC. Карбид способен повысить механические характеристики, такие, как прочность, твердость и износостойкость. Формирование композита в процессе СЛП исследовано не полностью, и создает предпосылки для более глубоко изучения. Анализ технологий показал перспективность использования СЛП для решения задач получения готовых металлических изделий сложной формы.

Существующие исследования отечественных и зарубежных коллективов указывает на широкий интерес к изготовлению изделий сложной геометрии из композиционных материалов. Мировой и отечественный опыт внедрения аддитивных технологий в промышленность и недостаточная проработка процесса формирования композита в процессе СЛП указывают на актуальность проведения работ в данном направлении.

В Главе 2 проведен расчет параметров процесса селективного лазерного плавления образцов из матрицы – алюминиевого сплава Ак9ч, а также из композиционного материала с добавлением в матрицу частиц TiC. Данные расчеты положены в основу экспериментальной работы. Так как материал матрицы составляет большую часть композита, ключевым будет являться формирование матрицы при СЛП, и технологические параметры будут оптимизироваться именно под алюминиевый сплав Ак9ч. Частицы TiC вносят корректировки в режим, которые были учтены в расчетах. Рассчитано значение удельной энергии, необходимой для полного расплавления порошкового материала матрицы без плавления армирующих частиц, так как температура кипения матрицы из сплава Ак9ч на уровне 2500°C ниже температуры плавления карбида титана, составляющей 3260°C.

На основе расчета удельной энергии был спланирован эксперимент с варьированием технологических параметров процесса СЛП. Проведено исследование исходного порошкового материала будущего композита: сферический порошок сплава Ак9ч с размером 15-45 мкм и колотый порошок TiC с размером 1-10мкм. Проведены эксперименты на отечественном оборудовании СЛП-250 с внедрением армирующих частиц различной концентрации и исследовано влияние их концентрации на механические свойства полученного композита, исследована пористость, микротвердость и

связь формируемой микроструктуры (Рисунок 1) на механические характеристики композита.

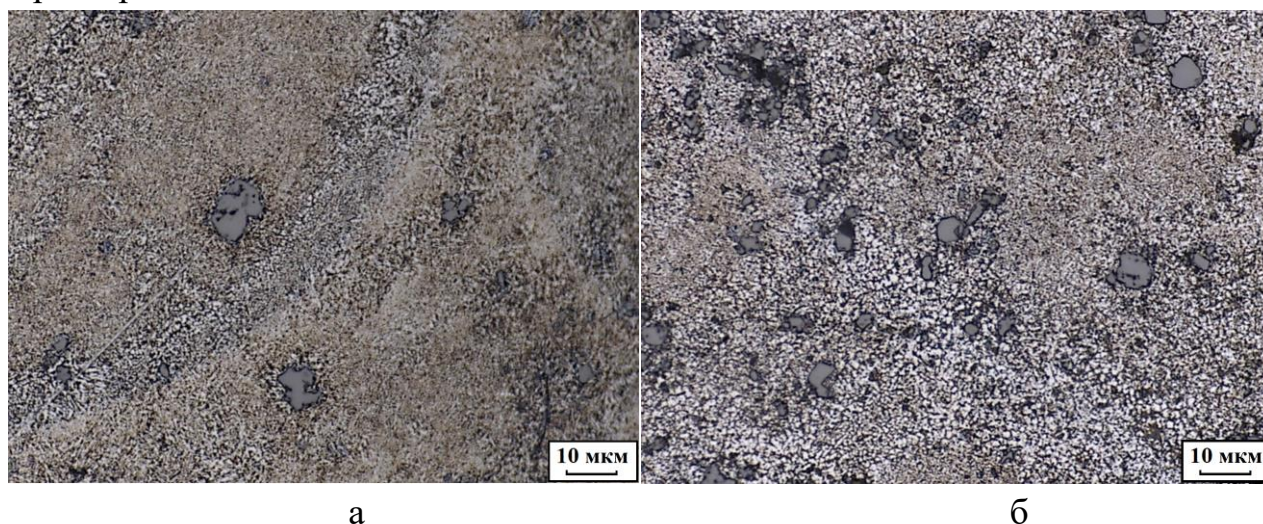


Рисунок 1

а) микроструктура образцов с 3% масс. TiC, б) микроструктура образцов с 7% масс. TiC

При концентрации TiC 5% достигнуто существенное повышение предела прочности с 385МПа до 433МПа и микротвердости со 120 кгс/мм² до 140 кгс/мм², объясняемые измельчением зерна не только жестким термическим циклом нагрева/охлаждения и прочностью самих армирующих частиц, но и зарождением мелких зерен вокруг армирующих частиц. Дальнейшее увеличение содержания армирующих частиц колотой формы приводит к дальнейшему увеличению объёмной доли измельченного зерна, но прочностные характеристики снижаются. Этот эффект может быть связан с повышенным уровнем остаточных напряжений, которые превалируют над упрочнением, и требует дальнейшего исследования, а также с увеличением концентраторов напряжений на острых краях колотых армирующих частиц.

На основе проведенных исследований определен оптимальный режим СЛП для изготовления изделий из композиционного материала Ак9ч+TiC, который приведен в Таблице 1.

Таблица 1

Технологический режим СЛП композита Ак9ч+TiC.

Мощность Р, Вт	Высота слоя L, мм	Шаг штриховки h, мм	Скорость v, мм/сек	Удельная энергия E, Дж/мм ³
145	0,02	0,085	1400	79,67

В Главе 3 рассмотрены существующие подходы к моделированию процесса СЛП и определен подходящий - вычислительный микромеханический метод, используемый для оценки напряженно-деформированного состояния

композиционных материалов. Метод адаптирован для селективного лазерного плавления.

При расчете напряженно-деформированного состояния рассматривается лишь небольшой объем композита, к которому прикладываются соответствующие тепловые нагрузки. Такой подход позволяет существенно сэкономить время расчета и определить значение напряжений, возникающих на границе раздела фаз матрицы и армирующего элемента. Конечной задачей является определение влияния концентрации, формы и размера армирующих элементов на возникающие напряжения и деформации в композите при СЛП в процессе остывания материала.

Этапы, связанные с микромеханическим моделированием, включают:

1. Моделирование представительного элемента объема.
2. Задание характеристик матрицы и включений.
3. Задание соответствующих граничных условий.
4. Задание условий нагружения.
5. Расчет и обработка результатов

На первом этапе осуществляется моделирование представительного элемента объема (ПЭО). Это компьютерная модель небольшого объема композиционного материала, которая обладает характерными чертами всего композита, такими как объемная доля, форма, размер, хаотичность распределения армирующих частиц в матрице.

Внешний вид некоторых ПЭО и характеристики конечноэлементной сетки приведены на Рисунке 2.

Механические свойства, такие как модуль Юнга, объемный модуль и модуль сдвига, предел текучести, предел прочности при растяжении, коэффициент Пуассона, показатель упрочнения и модуль упрочнения, определены для каждой фазы.

Специальный вид граничных условий используется для уменьшения области решения, если в исходной модели присутствует периодическая симметрия или повторяемость, как в случае композиционных материалов. Периодические условия задаются на противоположных сторонах ПЭО и определяют, что значение функций напряжений и деформаций по обе стороны границы полностью совпадает (четная периодичность). Каждый ПЭО в исследуемой области композиционного материала имеет одинаковые напряжения и деформации. Между соседними представительными элементами объема нет разделения, зазора или перекрытия. Граничные условия изменяются на каждом шаге расчёта при изменении температуры. Предыдущее состояние граничных условий перетекает на последующий шаг расчета, в результате

которого пересчитываются и граничные условия, которые перетекают на следующий шаг расчета, и так далее.

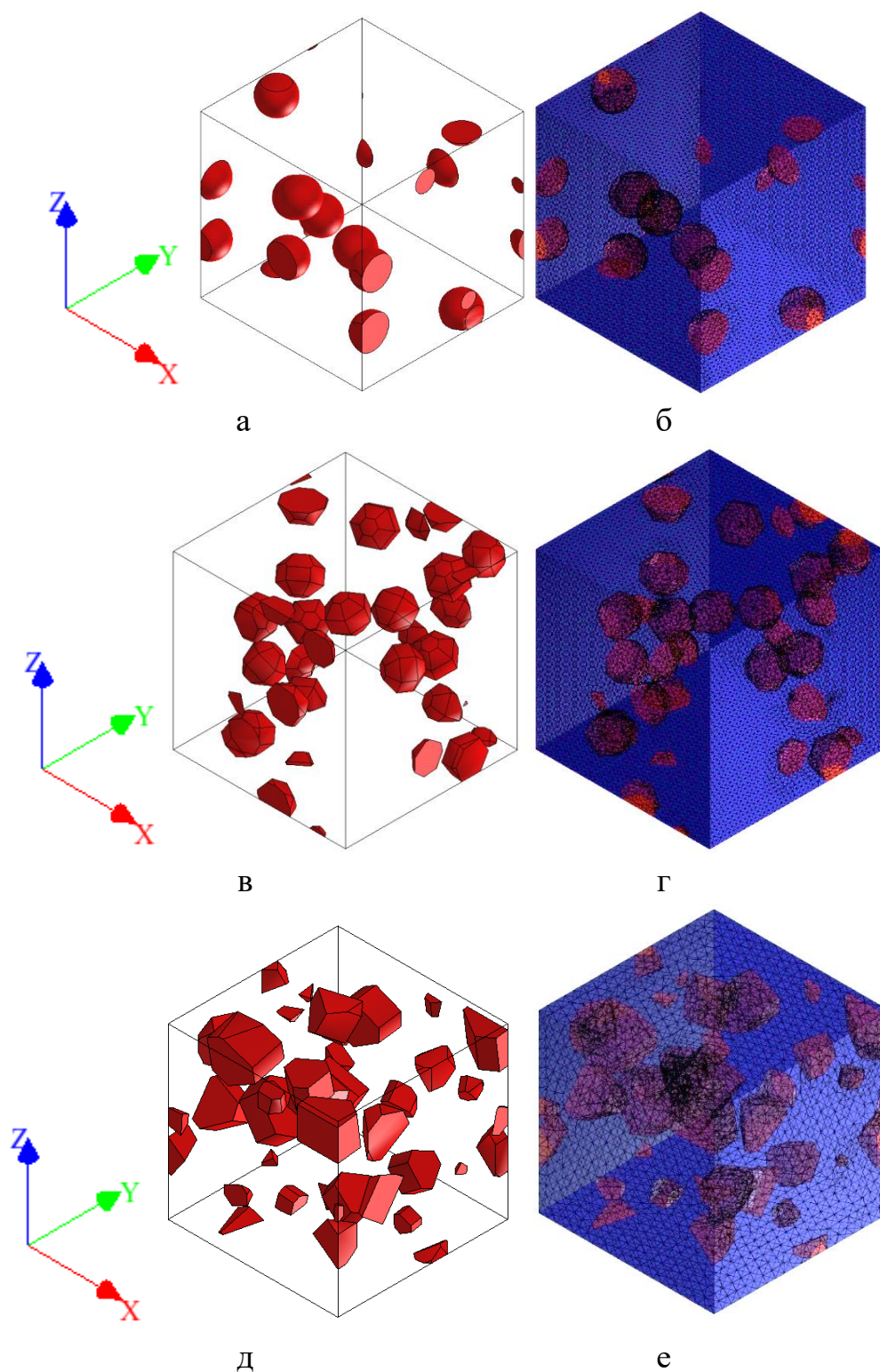


Рисунок 2

Пример ПЭО с частицами размером 5 мкм а) 5%TiC сферической формы, в) 10% TiC в форме икосаэдра, д) 15%TiC призматической формы и соответствующего разбиения на конечные элементы б) 5%TiC сферической формы, г) 10% TiC в форме икосаэдра, е) 15%TiC призматической формы.

Температурные напряжения возникают вследствие изменения неравномерного распределения температуры в исследуемой области. Это происходит из-за ограничения теплового расширения или сжатия в твердом теле. Тензор деформации в декартовых координатах для однородного и изотропного тела принимает простой вид:

$$\varepsilon_{ij} = \alpha T \delta_{ij}, \quad (1)$$

Величину α называют коэффициентом теплового расширения. В процессе СЛП при лазерном нагреве и остывании в твердом теле возникающие напряжения могут превысить значение предела текучести, возникает пластическая деформация. На сегодняшний день подавляющее большинство моделей пластичности, предлагаемых современными коммерческими расчётными комплексами, являются моделями типа течения. В рамках теорий типа течения тензор деформаций разделяется на упругую и пластическую составляющие.

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{\text{упр}} + \varepsilon_{ij}^{\text{пл}}, \quad (2)$$

При этом напряжения описываются однозначной функцией упругих деформаций:

$$\sigma_{ij}^{\text{упр}} = \sum_{kl} C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}^{\text{упр}}, \quad (3)$$

а приращения пластических деформаций или скоростей пластических деформаций зависят от напряжений.

Результаты расчетов напряжений в каждом узле конечного элемента приводятся по критерию Мизеса.

Для главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ напряжение по Мизесу выражается как:

$$\Sigma_{\text{МИЗЕС}} = \{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] / 2\}^{1/2}, \quad (4)$$

Теория утверждает, что пластичный материал начинает повреждаться в местах, где напряжение по Мизесу становится равным предельному напряжению. В большинстве случаев, предел текучести используется в качестве предельного напряжения.

$$\sigma_{\text{МИЗЕС}} \geq \sigma_T, \quad (5)$$

В расчетах учтена температурная зависимость коэффициента теплового расширения и модуля Юнга, так как можно неверно оценить рост напряжений в зоне охлаждения, и неверно интерпретировать результаты. Это особенно важно для материалов с широким температурным интервалом хрупкости (ТИХ).

Результаты расчетов показали, что частицы сферической формы оказывают меньшее влияние на напряженное состояние в композите. Отход от сферической формы, наличие углов и резких переходов в форме частиц увеличивают общий уровень напряжений в композите и образуют концентраторы напряжений (Рисунок 3), которые могут привести к образованию

трещин. Таким образом, необходимо стремиться к использованию именно сферических частиц, что может быть затруднено их производством.

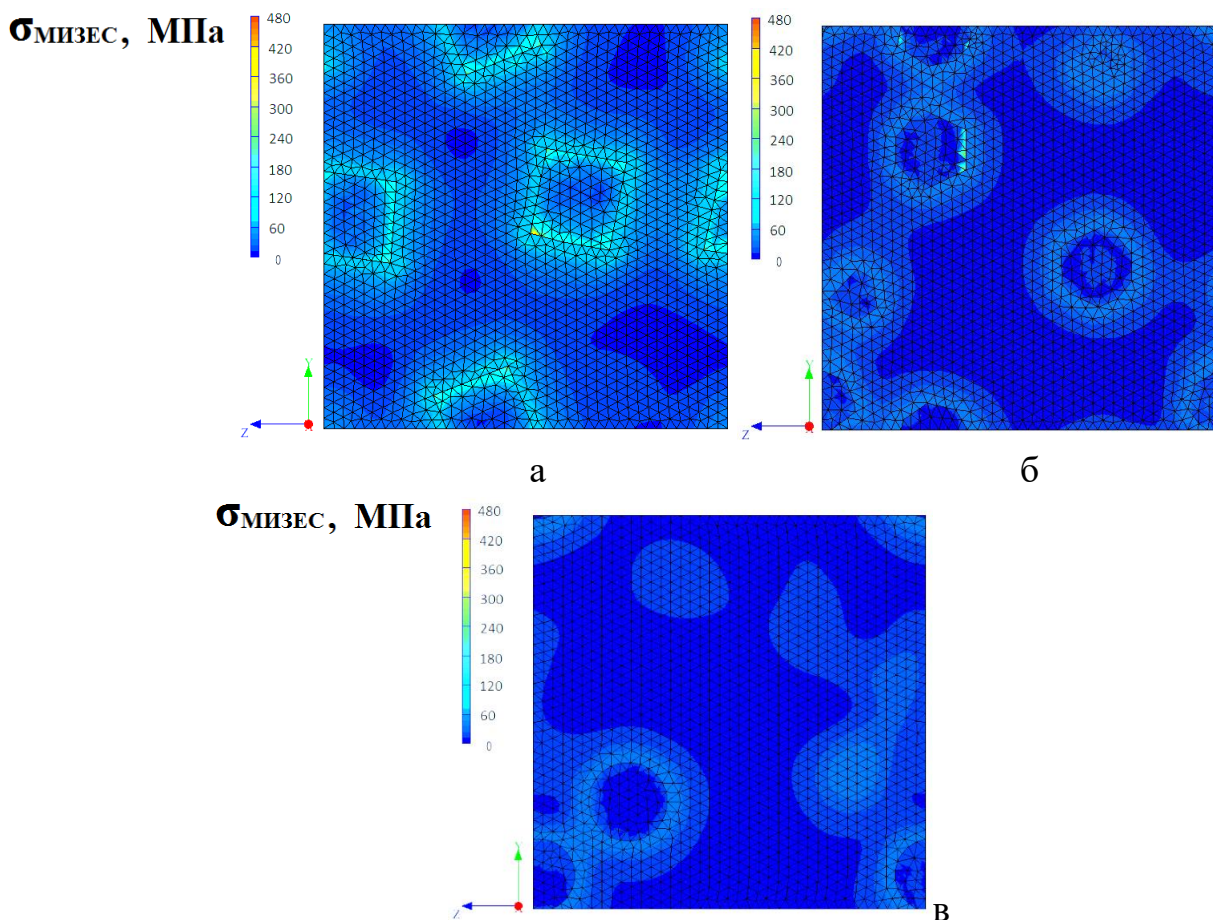


Рисунок 3.

Срез ПЭО с визуализацией напряжений, в зависимости от типа армирующих частиц: а) призматические, б) в форме икосаэдра, в) сферические

Увеличение размера армирующих частиц приводит к увеличению напряжений в материале матрицы и к снижению напряжений в самих армирующих частицах. Это объясняется разницей коэффициента термического расширения, величина которого у алюминия более чем в 2 раза выше, чем у карбида титана. Для безопасного использования колотых частиц рекомендуется ограничить размер частиц 10 мкм, чтобы не увеличивать значение напряжений в матрице, и снизить риск зарождения трещин.

Концентрация армирующих частиц по-разному влияет на напряжения в матрице и в самих частицах. В материале алюминиевой матрицы напряжения возрастают с увеличением концентрации армирующих частиц, но даже при массовой доле 15% составляют не более 16% от предела текучести материала. Возникшие внутренние напряжения негативно отразятся на прочностных характеристиках материала. Можно предположить, что наступают такие условия, определяемые неправильной формой, чрезмерной концентрацией и чрезмерным размером армирующих элементов, при которых негативный эффект

возникающих в композите остаточных напряжений будет превышать положительных эффект его упрочнения за счет измельчения зерна. В самих частицах уровень напряжений падает при увеличении концентрации частиц, так как меньший объем окружающей матрицы оказывает на них влияние. Графики расчетов напряжений для случая частиц в форме призмы, моделирующих частицы колотой формы, представлены на Рисунках 4 и 5

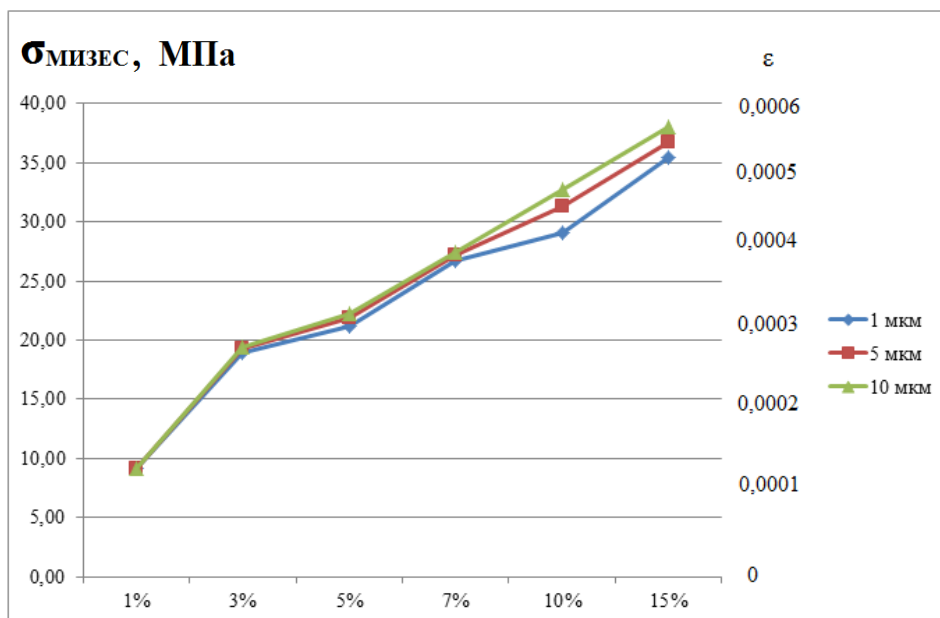


Рисунок 4.

Усреднённые напряжения и деформации в матрице, в зависимости от размера и массовой доли армирующих частиц в форме призмы

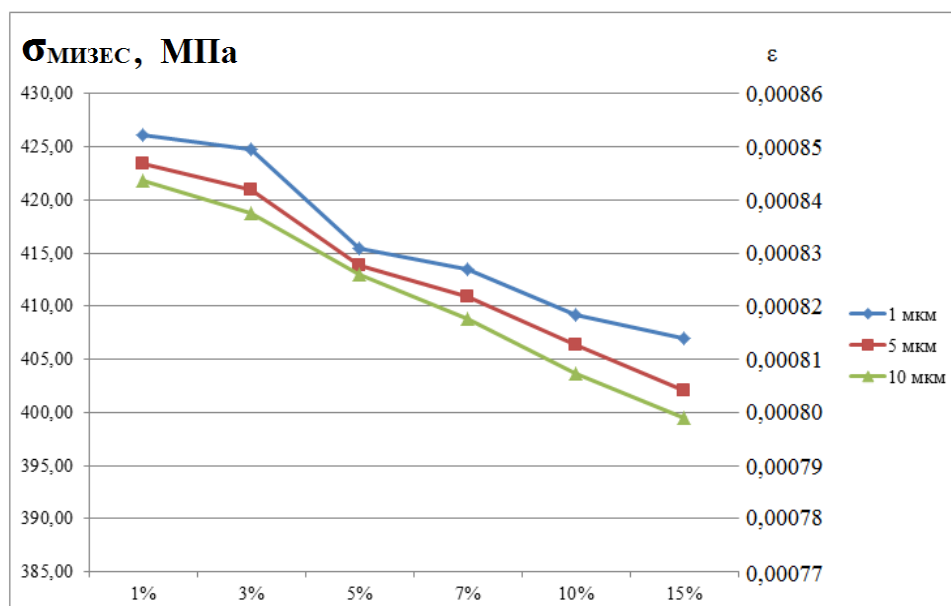


Рисунок 5.

Усреднённые напряжения в армирующих частицах, в зависимости от размера и массовой доли армирующих частиц в форме призмы

Также проведено исследования влияния наличия пор различной формы (Рисунок 6). Поры также по-разному влияют на уровень напряжений в компонентах композита. Увеличение объема пор приводит к незначительной релаксации напряжений в матрице. Однако, стоит понимать, что это снижает эффективную площадь сечения изделия, и приводит к падению прочностных характеристик.

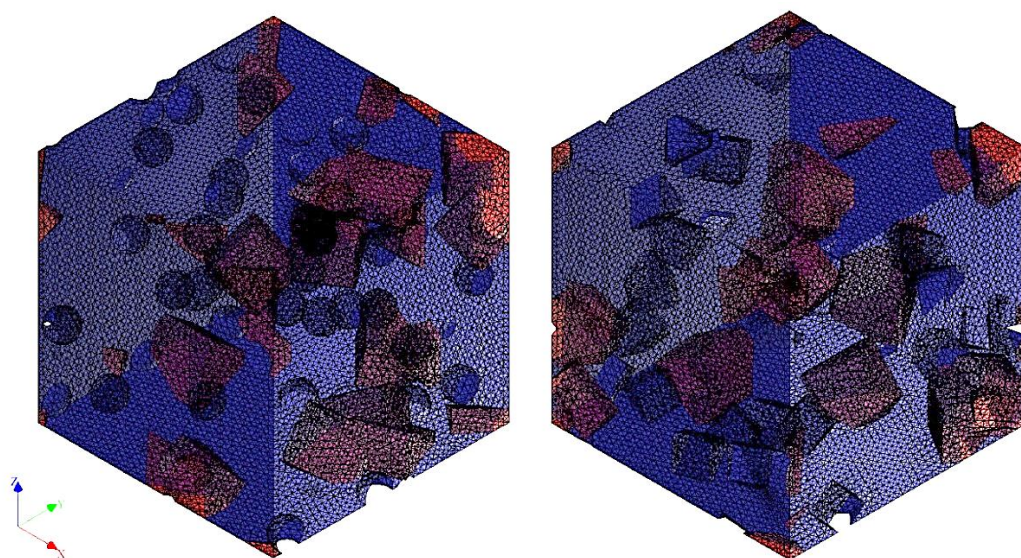


Рисунок 6.

Представительные элементы объема, разбитые на конечные элементы со сферическими порами (а) и с порами в форме призм (б)

Поры сферической формы оказывают большее влияние на снижение напряжений, чем поры неправильной формы. Поры неправильной формы образуют концентраторы напряжений в материале матрицы, зачастую превышающие среднее значение напряжений в материале. Таким образом можно констатировать, что в первую очередь стоит бороться с образованием пор неправильной формы из-за несплавления частиц порошка, так как при механическом нагружении поры выступают в роли концентраторов напряжений

В Главе 4 полученные выше результаты были заложены в разрабатываемую технологию изготовления изделий методом селективного лазерного плавления из композиционных материалов с алюминиевой матрицей, армированной карбидом титана.

Изделие, на котором происходила апробация разработанной технологии представляет собой кронштейн спортивного болида. Исходная геометрия кронштейна была переработана с применением топологической оптимизации.

Топологическая оптимизация – это процесс изменения геометрии детали с целью снижения ее массы при сохранении её эксплуатационных свойств, соблюдения условий прочности. Нередко добавляются требования

максимальной жесткости или ограничения максимальных перемещений, возникающих в процессе эксплуатации изделия.

При этом рассмотрены характеристики материала сплава Ак9ч и композита на основе Ак9ч, армированного TiC, полученные методами литья и СЛП.

Наилучшие результаты топологической оптимизации ожидаемо получены при использовании композита, сформированного методом СЛП с итоговой массой изделия в 139 г.

Рассмотрены варианты расположения одной детали в зоне построения, и максимальное заполнение рабочей области изделиями с различным расположением. Дана оценка времени выращивания изделий и выбран наиболее оптимальный вариант расположения деталей в зоне построения.

В результате проделанной работы были проведены расчеты оптимального расположения детали в зоне построения, с точки зрения скорости изготовления; для одной детали и для серии деталей. В расчёте учтено время нанесения слоев и время, необходимое для отделения подпорок от изделия.

На основе разработанных режимов технологии выращивания на отечественном комплексе СЛП-250 изготовлено изделие, представленное на Рисунке 7 из композиционного материала на базе алюминиевого сплава, армированного карбидом титана.



Рисунок 7

Выращенная методом СЛП деталь из композиционного сплава с оптимизированной геометрией детали на платформе с подпорками

Основные выводы по работе

1. Проведен расчет технологических параметров СЛП на основе уравнения баланса энергий и теплофизических свойств алюминиевой матрицы и композиционных материалов на её основе с различным содержанием армирующих частиц TiC.
2. Экспериментально показано влияние концентрации армирующих частиц неправильной формы заданного размерного диапазона на микроструктуру и механические характеристики КАММ. Предел прочности и текучести возрастает с увеличением концентрации TiC до 5% за счёт измельчения зерна. Дальнейшее увеличение концентрации приводит к снижению механических характеристик из-за возрастающих внутренних напряжений и наличия концентраторов напряжений на острых краях колотых частиц TiC.
3. На основе комплексного анализа влияния характеристик армирующих частиц на механические свойства определены режимы выращивания изделий с формированием композиционного материала с матрицей из алюминиевого сплава Ак9ч с добавлением колотых частиц карбида титана с размером от 1 до 15 мкм, при котором наблюдается увеличение предела прочности и микротвердости до значений 385,87 МПа и 120 кгс/мм² до значений 448,3 МПа и 140 кгс/мм², соответственно. При этом удельная прочность увеличилась со значения 145,28 кН·м/кг до 162,08 кН·м/кг.
4. На основании моделирования напряженного состояния в формируемом при СЛП композите установлены зависимости напряжений от формы, размера и концентрации армирующих частиц TiC, а также от наличия и объема пор в матрице алюминиевого сплава Ак9ч:
 - а) Частицы сферической формы оказывают меньшее влияние на напряженное состояние в композите. Отход от сферической формы, наличие углов и резких переходов в форме частиц увеличивают общий уровень напряжений в композите и образуют концентраторы напряжений, которые могут привести к образованию трещин. Таким образом, стоит стремиться к использованию именно сферических частиц и развивать их производство.
 - б) Увеличение размера частиц с 1 мкм до 10 мкм приводит к росту напряжений в материале матрицы и к незначительному снижению напряжений в самих армирующих частицах. Размер армирующих частиц следует ограничить 10 мкм, чтобы не вызывать дальнейший рост напряжений.

- в) В материале алюминиевой матрицы напряжения существенно возрастают с увеличением концентрации армирующих частиц, и при массовой доле 15% составляют не более 16% от предела текучести материала.
- г) Увеличение объема пор приводит к незначительной релаксации напряжений в матрице, но негативно скажутся на механических характеристиках. Так при пористости в 3% остаточные напряжения снижаются на 10%, однако прочность снижается на 12%
5. Разработана технология изготовления изделия из композиционного сплава с матрицей из алюминиевого сплава, армированного карбидом титана методом селективного лазерного плавления. При использовании частиц TiC колотой формы, разброс размера частиц необходимо ограничить 1-10 мкм. Рекомендуемая концентрация частиц TiC составляет 5% по массе. Рекомендуемые технологические параметры при высоте слоя 20 мкм: мощность лазерного излучения – 145 Вт, шаг штриховки - 85 мкм, скорость перемещения лазерного излучения - 1400 мм/сек.
6. Проведены расчеты времени изготовления топологически оптимизированных кронштейнов из исследованного композиционного материала, выбрано оптимальное, с точки зрения времени изготовления и трудозатрат на отделение подпорок, расположение изделий в камере построения.

В итоге на стыке трех современных направлений: аддитивные технологии, композиционные материалы и компьютерная топологическая оптимизация, разработана перспективная технология изготовления изделий, которая показала высокий практический результат. Такие результаты невозможно было бы достичь без использования цифровых технологий.

Список трудов

1. Перспективы применения лазерного наклёпа для повышения характеристик деталей, получаемых методом селективного лазерного плавления / А.В. Бурак [и др.] // Научные технологии в машиностроении 2018. №7. С. 32-37 (0,3 п.л./0,1 п.л.).
2. Получение композиционных изделий с металлической матрицей методом селективного лазерного плавления / А.В. Колчанова [и др.] // Сварочное производство. 2020. №11. С. 9-15. (0,35 п.л. / 0,1 п.л.).
3. Колчанова А. В. Выращивание изделий методом селективного лазерного плавления из композиционных материалов// Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна:

- Машиностроительные технологии»: материалы конференции, 6 – 10 апреля, 2020, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана. – М.: ООО «КванторФорм», 2020 (0,3 п.л./0,1 п.л.)
4. Колчанова А. В., Колчанов Д. С. Исследование механизма формирования композита на основе стали и TiC в процессе селективного лазерного плавления // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции, 6 – 10 апреля, 2020, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана. – М.: ООО «КванторФорм», 2020 (0,3 п.л./0,1 п.л.)
 5. Получение композиционных изделий с металлической матрицей методом селективного лазерного плавления / А.В. Колчанова [и др.] // Технология Машиностроения. 2020. №12. С. 5-11. (0,35 п.л. / 0,1 п.л.).
 6. Production of composite articles with a metal matrix by selective laser melting/ A.V. Kolchanova [et. al] // Welding International 2021 .- Vol. 35 , Issue 10-12 .- С. 397–402 (0,3 п.л./0,1 п.л.)
 7. Technological features of growing a combustion chamber of a liquid-propellant rocket engine by method of selective laser melting from AISI 316L steel/ A.V. Kolchanova [et. al] // Welding international 2021 – Vol. 35, Issue 10-12. –С. 415-420 (0,35 п.л./0,1 п.л.)
 8. Технологические особенности выращивания камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя методом селективного лазерного плавления из стали AISI 316L / А.В. Колчанова [и др.] // Сварочное производство. 2021. №4. С. 26-32. (0,35 п.л. / 0,1 п.л.).
 9. Колчанова А.В., Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С. Получение композиционных изделий с металлической матрицей методом селективного лазерного плавления// VII Международная конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» Москва, 7-8 октября 2021 года. С. 134-148. (0,75 п.л. / 0,3 п.л.).
 10. Колчанова А.В., Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С. Высокоточное моделирование термических напряжений для процесса селективного лазерного плавления композиционных материалов// Сборник докладов Четырнадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроение России». 2021. Том. 1. С. 327-337 (0,64 п. л. / 0,32 п. л.).
 11. Колчанова А.В., Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С. Формирование композиционного материала в процессе селективного лазерного плавления// Сборник тезисов Международной научной конференции «Современные материалы и передовые производственные технологии (СМППТ-2021)» 21–23 сентября 2021 года. С. 64-65 (0,1 п.л. / 0,04 п.л.).