

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №10 (148). С.20-29.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №10 (148). P. 20-29.

Научная статья  
УДК 621.791.9  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-29

### Моделирование процесса селективного лазерного плавления в аддитивном производстве

Александр Григорьевич Григорьянц, Д.Т.Н.  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
mt12@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** В статье рассмотрены возможности теоретического анализа на основе численного моделирования сложных процессов аддитивного производства методом селективного лазерного плавления. Рассмотрены методы высокоточного моделирования формирования единичной ванны расплава с учетом геометрии сформированного порошкового слоя, распределения энергии в пятне, эффектов переотражения луча, силы отдачи паров, эффекта Марангони и механизмов денудации. Были проведены экспериментальные исследования выращивания образцов из медного порошка БрХ с частицами размером 20...50 мкм методом селективного лазерного плавления с использованием излучения волоконного лазера непрерывного действия длиной волны 1,064 мкм. В том числе выполнены эксперименты в условиях полного совпадения условий и режимов выращивания с расчетной моделью. Для оценки точности системы моделирования сопоставлялись размеры области плавления и морфология поверхности дорожки расплава. Представленная расчетная модель использована при разработке технологии выращивания изделий из порошков медных сплавов методом селективного лазерного плавления. Также представлены исследования в области моделирования напряженно-деформированного состояния в сформированном в процессе СЛП композиционном материале, состоящего из матрицы сплава Ас9С, армированной частицами карбида титана. Были выполнены расчеты для установления влияния формы (сфера, икосаэдр, призма), размеров (1,0 мкм; 5,0 мкм; 10 мкм) и концентрации по массе (1,0 %; 3,0 %; 5,0 %; 7,0 %; 10 %; 15 %), а также с учетом наличия пор различной формы. Результаты расчетов сопоставлены с результатами экспериментов. Численные модели с последующей экспериментальной апробацией оптимального варианта позволяют многократно сократить затраты времени для разработки новых сложных и многообещающих аддитивных технологий.

**Ключевые слова:** лазерные технологии, аддитивные технологии, лазер, порошок, селективное лазерное плавление

**Для цитирования:** Григорьянц А.Г. Моделирование процесса селективного лазерного плавления в аддитивном производстве // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 10 (148). С. 20–29. doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-29

### Modeling of the selective laser melting process in additive manufacturing

Alexander G. Grigoryants, D.Eng.  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
mt12@bmstu.ru

**Abstract.** The possibilities of theoretical analysis based on numerical modeling of complex processes of additive manufacturing by selective laser melting method are viewed. Methods of high-precision modeling of the formation of a single melt bath are discussed, taking into account the geometry of the formed powder layer, the energy distribution in the spot, the effects of ray re-reflection, the vapor recoil force, the Marangoni effect and denudation mechanisms. Experimental studies on the cultivation of samples from BrX copper powder with particles of 20...50 microns in size by selective laser melting using continuous fiber laser radiation with a wavelength of 1.064 microns were carried out. In particular, all the experiments were carried out under conditions when growing conditions and modes are completely coincident with the calculated model. To assess the accuracy of the modeling system, the dimensions of the melting region and the morphology of the surface of the melt were compared. The presented computational model was used in the development of technology for growing products from copper alloy powders using selective laser melting method. Research in the field of modeling the stress-strain state in a composite material formed in the SLP process, consisting of an Ak9ch alloy matrix reinforced with titanium carbide particles, is also presented. Calculations were performed to identify the influence of shape (sphere, icosahedron, prism), size (1,0 microns; 5,0 microns; 10 microns) and mass concentration (1,0 %; 3,0 %; 5,0 %; 7,0 %; 10 %; 15 %), taking into account the presence of pores of various shapes. The results of calculations are compared with the results of experiments. Numerical models with subsequent experimental approbation of the optimal variant make it possible to significantly reduce the time spent for the development of new complex and promising additive technologies.

**Keywords:** laser technologies, additive technologies, laser, powder, selective laser melting

**For citation:** Grigoryants A.G. Modeling of the selective laser melting process in additive manufacturing / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 10 (148). P. 20–29. doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-29

## Введение

При селективном лазерном плавлении происходят сложные физические процессы плавления, формирование расплавленной ванны, испарение, кристаллизация, остывание, происходящие с высокими скоростями. Исследование таких динамических процессов, происходящих в малых объемах металла, экспериментальными методами весьма затруднительно и, зачастую невозможно. В связи с этим в последние годы все чаще обращаются к моделированию процесса в численном виде с использованием современных вычислительных средств и программного продукта.

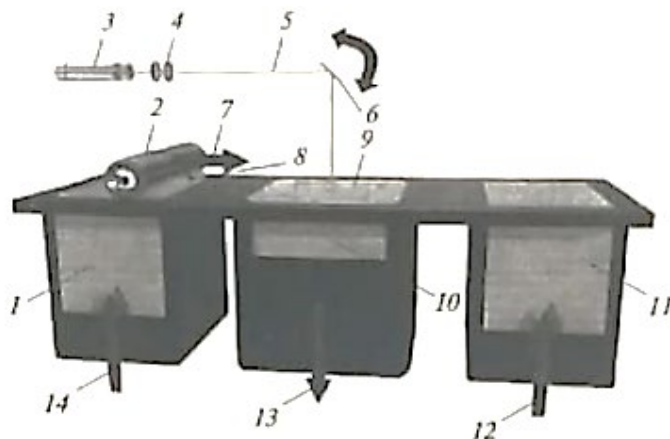
Методы численного моделирования в настоящее время характеризуются быстрым развитием, возможностью учета в расчетной модели процессов плавления и кристаллизации, распределения плотности мощности лазерного излучения, переотражения излучения, испарения металла, силы давления отдачи паров расплавленного металла, усадку при затвердевании. При этом в расчетной модели с использованием метода дискретных элементов рассматриваются сложные процессы взаимодействия частиц порошка при формировании порошкового слоя [1]. При моделировании реального процесса в модели проводится дискретизация пространства и времени,

закрывающаяся в том, что геометрия порошкового слоя разбивается на расчетные ячейки, а время процесса – на расчетные временные интервалы [2].

## Методы исследования и обсуждения

Моделирование процесса реализовано с использованием программного обеспечения FLOW3D, предназначенного для изучения сложных явлений теплопереноса при лазерном воздействии, таких как теплопередача, массоперенос, испарение, кристаллизация. На начальном этапе для описания взаимодействия частиц порошка при формировании порошкового слоя использовался метод дискретных элементов.

Моделирование формирования порошкового слоя соответствует принятой в установках селективного лазерного плавления (СЛП), выпускаемых Московским центром лазерных технологий, схеме технологического процесса (рис. 1) [3]. Определенный объем частиц порошка высыпается в бункер выращивания и распределяется по камере построения, форма и геометрические размеры которой задаются с последующим выравниванием с помощью приспособления – так называемого разравнивающего «ножа»



**Рис. 1. Установка с бункерной схемой подачи порошка:**

1, 11 – бункеры питателя; 2 – разравнивающий ролик; 3 – лазер; 4 – линзы; 5 – лазерный луч; 6 – сканирующая линза; 7 – направление движения валика; 8 – свежий порошок; 9 – изделие; 10 – камера построения; 12, 14 – направление движения бункера-питателя; 13 – направление движения детали

**Fig. 1. Installation with a hopper flow pattern of powder supply:**

1, 11 – feeder bins; 2 – leveling rolling element; 3 – laser; 4 – lenses; 5 – laser beam; 6 – scanning lens; 7 – direction of rolling element movement; 8 – fresh powder; 9 – product; 10 – construction chamber; 12, 14 – direction of feeder bin movement; 13 – direction of the part movement

Метод дискретных элементов позволяет описать взаимодействие частиц порошка при формировании порошкового слоя и рассчитать движение большого количества частиц, определить траекторию движения, скорость и силы, действующие на частицы [4]. Расчет физических параметров в каждом узле расчетной сетки проводится методом конечных элементов. В расчетной модели отслеживаются и определяются фазовые переходы между твердой и жидкой фазами, а также фазовые переходы жидкость – пар для учета испарения и конденсации.

В расчетной модели используются все современные достижения и математические представления многообразных физических процессов, происходящих при формировании единичной дорожки под воздействием лазерного излучения на порошковые материалы [5]. Представленный перечень физических процессов охватывает теплоперенос в твердой и жидкой фазах, фазовый переход жидкость – пар, испарение материала с формированием парогазового канала и кинжального проплавления, фазовый переход из жидкого состояния в твердое [6]. При этом моделируется лазерный источник с учетом реального распределения интенсивности излучения, вводятся условия преотражения лазерного излучения в порошковым слое.

Совокупное представление основных физических процессов сводится к математической модели в виде следующих дифференциальных уравнений.

Уравнение теплопроводности с математическим представлением процессов в каждом элементарном объеме тела:

- поглощение тепловой энергии при нагреве или выделении тепловой энергии при охлаждении;
- прохождение теплового потока через элементарный объем тела;
- выделение или поглощение теплоты за счет действия внутренних источников или стоков теплоты.

Уравнения теплопереноса в жидкой фазе определяются для элементарного объема в виде совокупности следующих составляющих:

- уравнение неразрывности или сплошности среды;
- уравнение переноса энергии в текучей среде – уравнение Фурье-Кирхгофа;
- уравнение переноса импульса в текучей среде – уравнение Навье-Стокса;
- уравнение фазового перехода жидкость – пар определяется уравнением Клапейрона-Менделеева;
- уравнение давления испарения материала моделируется на основе уравнения кривой давления насыщенных паров.

– уравнение фазового перехода из жидкого состояния в твердое – модель объемной усадки, основанная на решении уравнений энергии и определении конечной формы затвердевающего объема материала.

Для получения результатов построена численная модель, описывающая процесс селективного лазерного плавления с использованием основополагающих физических уравнений для оценки взаимодействия частиц порошка между собой при формировании слоя, воздействия лазерного излучения на порошковый материал с учетом переотражения в порошковом слое, учет состояний материала в твердой и жидкой фазах. Высокая точность расчетов обеспечивается представлением расчетной области в виде нескольких миллионов ячеек. При этом типичное время вычисления для моделирования одной

дорожки составляет десятки часов на современных процессорах. Следует особо подчеркнуть, что анализ условий формирования единичной дорожки является основой технологического процесса селективного лазерного плавления при изготовлении изделий.

Представленная расчетная модель использована при разработке технологии выращивания изделий из порошков медных сплавов методом селективного лазерного плавления [7].

Использовалась трёхмерная модель расчётной области для процесса селективного лазерного плавления. В качестве подложки использована нержавеющая сталь марки AISI316L с дополнительным подогревом в 250 °С для уменьшения оттока теплоты из зоны обработки. Лазерное излучение перемещается по поверхности порошкового слоя с заданной скоростью (рис. 2).

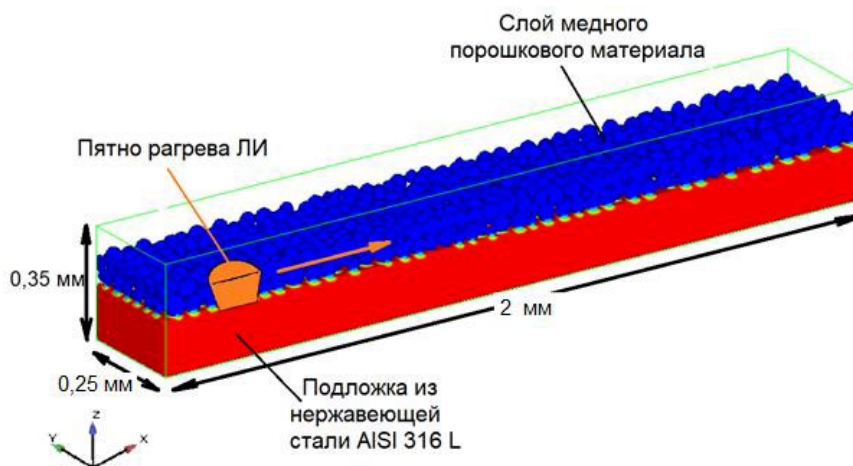


Рис. 2. Трёхмерная модель расчетной области для процесса селективного лазерного плавления

Fig. 2. Three-dimensional model of the computational domain for the process of selective laser melting

Для повышения точности расчета использована мелкая расчетная сетка с размером 3,5 мкм, а для участков, удаленных от зон термического воздействия, для уменьшения вычислительных затрат времени использована более глубокая сетка с размером 5,0 мкм. Общее количество расчетных элементов составляло 2,7 миллиона ячеек. Ориентировочное время вычислений для моделирования одной дорожки составляет порядка 36 ч с использованием процессора AMD Ryzen Threadripper с оперативной памятью 128 Гб.

Были проведены экспериментальные исследования выращивания образцов из медного порошка БрХ с частицами размером

20...50 мкм методом селективного лазерного плавления с использованием излучения волоконного лазера непрерывного действия длиной волны 1,064 мкм. В том числе выполнены эксперименты в условиях полного совпадения условий и режимов выращивания с расчетной моделью, основа которой была рассмотрена выше. Для оценки точности системы моделирования сопоставлялись размеры области плавления и морфология поверхности дорожки расплава.

Наглядное сопоставление результатов моделирования и эксперимента представлено на рис. 3.

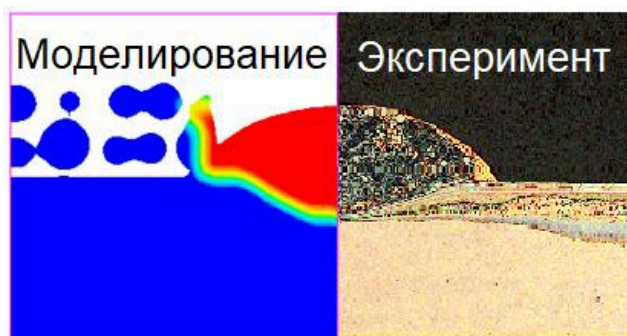


Рис. 3. Сопоставление результатов эксперимента и численного моделирования

Fig. 3. Comparison of experimental results and numerical modeling

Поперечные сечения ванны сплавления совпадают, т. е. получены одинаковые результаты, как по ширине, так и по высоте оплавленной зоны, что видно из рис. 3.

В процессе селективного лазерного плавления благодаря высокой концентрации энергии лазерного излучения происходит плавление порошка в ванне расплава и перегрев жидкой ванны, где при температурах  $T > T_{пл}$  происходит испарение материала.

Важным представляется установить, какая степень влияния испарения на конечные показатели выращенного слоя, в первую очередь на его размеры, и есть ли необходимость в учете этого сложного явления в расчетах. Для этого проведено сопоставление результатов расчетов для двух моделей, в одной из которых испарение не учитывалось, а во второй расчет проводился с учетом испарения. Сопоставление этих двух результатов расчетов проведено на рис. 4.

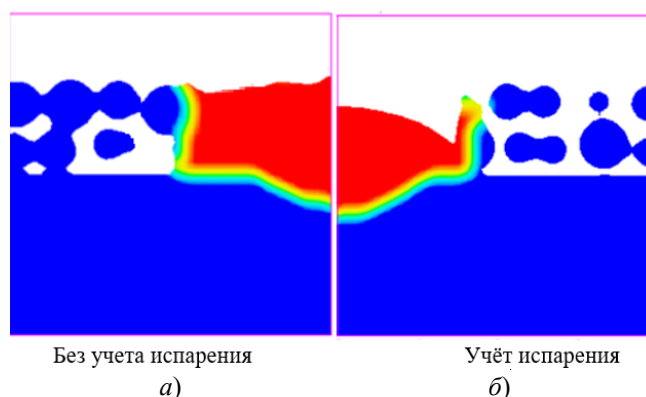


Рис. 4. Поперечное сечение ванны расплава:

*a* – широкая ванна расплава с незначительным сплавлением с подложкой, при пренебрежении испарением; *б* – ванна расплава овальной формы с ярко выраженным глубоким проплавлением

Fig. 4. Cross-section of the melt bath:

*a* – a wide melt bath with slight fusion with the substrate, neglecting evaporation; *b* – oval shaped melt bath with pronounced deep penetration (melting)

Отсутствие испарения в расчетной модели приводит к увеличению ширины ванны расплава и уменьшению сплавления с подложкой (см. рис. 4). Учет испарения означает появление парогазового канала и образование кинжального проплавления. При испарении также

происходит уменьшение теплосодержания ванны расплава, что наглядно демонстрируют расчетные данные на рис. 5 при сопоставлении объемов ванны расплава в моделях без учета испарения и с учетом испарения.

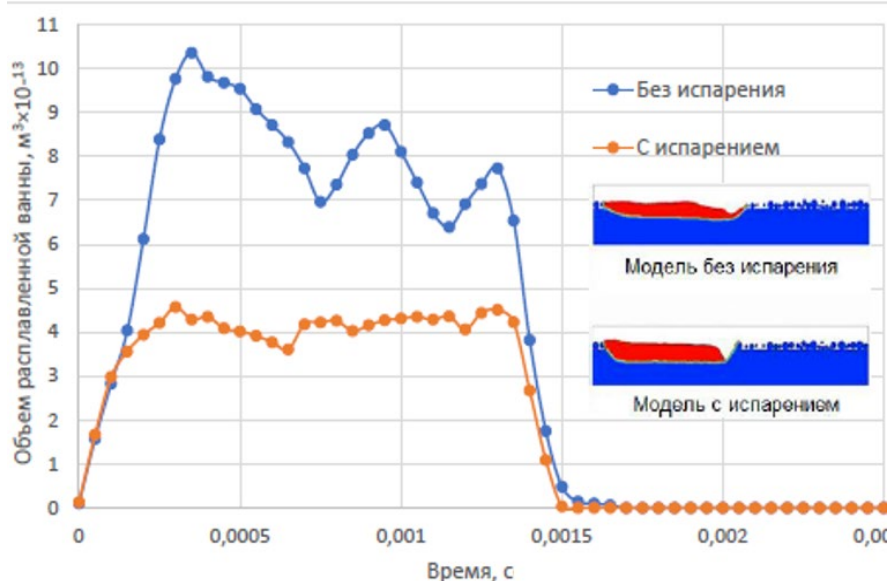


Рис. 5. Сравнение объемов ванны расплава для двух случаев

Fig. 5. Comparison of the volumes of the melt bath for two cases

Результаты расчета дают возможность получить профиль выращиваемой дорожки, который влияет на стабильность формирования единичного слоя и последующих стадий процесса выращивания.

Рассмотренные результаты компьютерного моделирования процесса нагрева, расплавления и формирования жидкой ванны при воздействии лазерного излучения на порошковый материал, последующей кристаллизации при охлаждении с учетом современных сложных представлений физических процессов позволяют глубоко раскрыть механизм селективного лазерного плавления. Компьютерное моделирование позволяет значительно сократить и частично заменить дорогостоящие экспериментальные исследования, направленные в основном на анализ конечных результатов и требующие значительных затрат и длительности исследований. Это особенно важно при разработке технологии выращивания новых материалов, ранее не использованных в селективном лазерном плавлении, а также применении разнообразных новаторских решений для повышения качества и производительности процесса.

Рассмотренные выше модели с высокой точностью моделируют процесс выращивания дорожки методом селективного лазерного плавления в численном виде с использованием современных вычислительных средств. Однако при исследовании композиционных

материалов с микроскопическими включениями такие подходы не способны отразить поведение материала в объемах, соизмеримых с размерами армирующих частиц. Поэтому была поставлена задача численного расчета напряжений и деформаций с использованием микромеханических методов. В этих методах рассматривается микрообъем материала, существенно меньший, чем размер единичной дорожки, к которому прикладывают соответствующие тепловые нагрузки. В микромеханических моделях учитывается состав, объемная доля, распределение, морфология и размер армирующих включений наряду с упругими и пластическими характеристиками матрицы и армирующих частиц. В настоящее время микромеханическое моделирование представляет собой наиболее надежный расчетный анализ, в котором взаимосвязаны структура и свойства матрицы и армирующей частицы в композиционном материале [8].

В работе [9] представлены результаты расчетного моделирования напряженного состояния в зависимости от формы, размера и концентрации армирующих частиц TiC, а также от наличия и объема пор в матрице алюминиевого сплава Al9ч.

Расположение частиц, их геометрия носят случайный характер и имитируются при построении представительного объема элемента. Для решения задач микромеханики использовано программное обеспечение Digimat,

разработанное для многоячеечного моделирования композитов с металлической матрицей, армированных частицами. При генерации представительного элемента объема распределение армирующих частиц в объеме матрицы определяется алгоритмом случайной последовательности адсорбцией, в котором частицы с заданным размером и формой случайным образом вводятся в объем. В этой программе могут быть сгенерированы представительные элементы объема с различным размером и содержанием частиц TiC.

Выполнено исследование влияния формы (сфера, икосаэдр, призма), размера (1,0 мкм; 5,0 мкм; 10 мкм) и массовой концентрации (1,0 %; 3,0 %; 5,0 %; 7,0 %; 10 %; 15 %) армирующих частиц на напряжения и деформации в композиционном материале в процессе селективного лазерного плавления.

Наглядный вид некоторых представительных объемов и характеристики конечно-элементной сетки представлены на рис. 6.

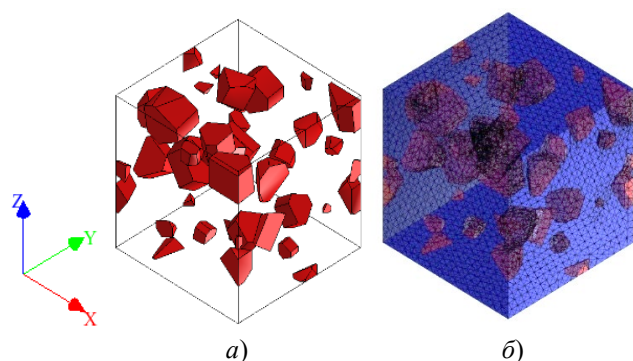


Рис. 6. Пример представительных элементов объема с частицами размером 5,0 мкм 15% TiC (а) призматической формы и соответствующего разбиения на конечные элементы и 15% TiC (б)

Fig. 6. Example of representative volume elements with particles of 5,0 microns in size 15% TiC (a) of a prismatic shape and the corresponding finite element division and 15% TiC (b)

В расчет вводятся соответствующие граничные условия в виде механических и термических нагрузок, которые устанавливаются решением задачи механики сплошной среды [10]. Были выполнены расчеты для всех представительных элементов объема для установления влияния формы (сфера, икосаэдр, призма), размеров (1,0 мкм; 5,0 мкм; 10 мкм) и

концентрации по массе (1,0 %; 3,0 %; 5,0 %; 7,0 %; 10 %; 15 %). Результаты расчетов позволили установить, что во всех рассмотренных случаях напряжения не достигали предельных значений ни в материале матрицы, ни в армирующих частицах. Но следует отметить, что во всех этих случаях моделирование проведено для идеальных условий отсутствия таких дефектов, как поры и несплавления. Как и следовало ожидать, наибольшая концентрация напряжений на участках границы раздела фаз матрицы и армирующих элементов.

В качестве примера на рис. 7 представлены результаты расчетов для одного из представительных элементов.

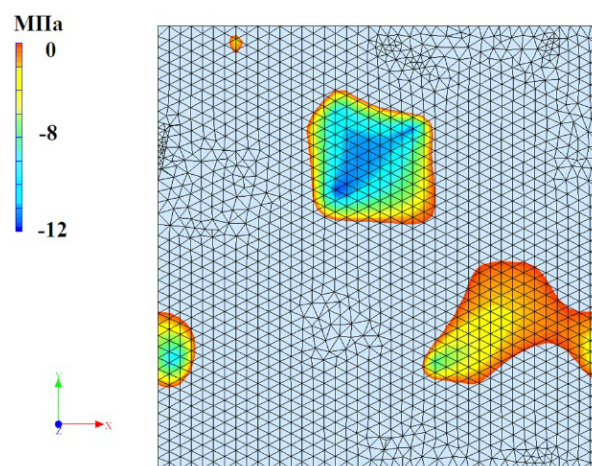


Рис. 7. Распределение растягивающих напряжений

Fig. 7. Tension stress distribution

Из представленных на рис. 7 результатов расчетов наглядно видно, что в материале матрицы возникают как растягивающие, так и сжимающие напряжения в зависимости от удаления от армирующих частиц. В армирующих частицах наблюдаются сжимающие напряжения. Особенно важно, что растягивающие напряжения существенно ниже предела текучести и не могут приводить к разрушению матрицы Ак9ч при отсутствии дефектов.

Важным представляется установление закономерностей формирования напряженного состояния в зависимости от размеров армирующих частиц их концентрации. Для алюминиевой матрицы рост размеров армирующих частиц (1,0 мкм; 5,0 мкм; 10 мкм) приводит к незначительному росту напряжений (рис. 8), тогда как для армирующих частиц влияние размеров сказывается в большей степени (рис. 9).

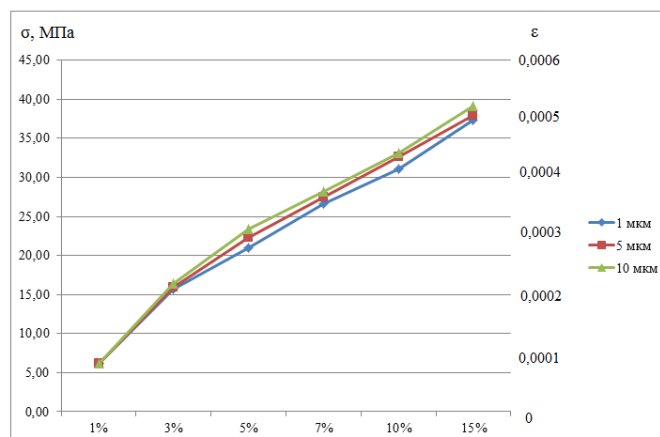


Рис. 8. Усредненные (эквивалентные) значения напряжений и деформаций в матрице в зависимости от размера и массовой доли армирующих частиц сферической формы

Fig. 8. Averaged (equivalent) values of stresses and deformations in the matrix depending on the size and mass fraction of spherical reinforcing particles

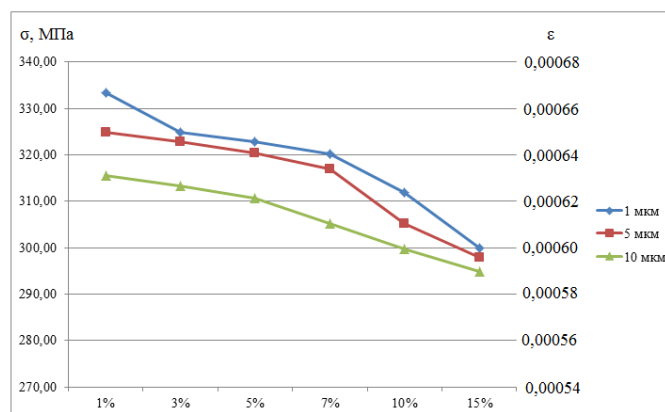


Рис. 9. Усредненные (эквивалентные) значения напряжений и деформаций в армирующих частицах в зависимости от размера и массовой доли армирующих частиц сферической формы

Fig. 9. Averaged (equivalent) values of stresses and deformations in reinforcing particles depending on spherical reinforcing particles fraction of mass and size

Увеличение концентрации армирующих частиц TiC приводит к значительному росту напряжений в алюминиевой матрице (см. рис. 8), но в самих армирующих частицах уровень напряжений снижается (см. рис. 9).

Теоретическая модель процесса селективного лазерного плавления практически полностью адекватна реализуемому процессу выращивания реальных металлических объектов из порошковых материалов. Благодаря этому возрастает значимость многочисленных результатов анализа расчетных результатов. Практический интерес представляет сопоставление результатов анализа напряженного состояния для армирующих частиц TiC, имеющих менее благоприятную форму, чем сфера, т. е. с большей концентрацией напряжений. Установлено, что размер частицы незначительно влияет на напряженное состояние, тогда как концентрация частиц

приводит к существенному увеличению напряжений в матрице при одновременном снижении напряжений в армирующих частицах.

Сопоставление результатов расчета для армирующих частиц, имеющих форму сферы и форму икосаэдра, показывают, что основные закономерности образования напряжений и деформаций подобны. Однако вследствие увеличенной концентрации напряжений в острых ребрах армирующих частиц, имеющих форму икосаэдра, уровень напряжений в армирующих частицах значительно выше. Этим самым повышается вероятность образования трещин, а также могут быть понижены механические свойства композиционного материала по сравнению с армированием частицами сферической формы.

Наибольший интерес представляют результаты расчетов напряженно-деформированного состояния при выращивании



композиционного материала с матрицей из алюминиевого сплава Аk9ч, армированной частицами TiC призматической формы с различными размерами и концентрацией в матрице. Этот случай наиболее близок к реальной технологии, т. к. колотые частицы карбида титана, использованные в исследованиях, имеют приблизительно призматическую форму.

Анализ и сопоставление напряженно-деформированного состояния при выращивании композиционного материала с матрицей из алюминиевого сплава, армированного частицами TiC, имеющих форму сферы, икосаэдра и призмы, наглядно указывают на значительное влияние формы частиц на напряжения и деформации. Подтвердилось соображение, что более острые кромки и углы колотых армированных частиц TiC являются концентраторами напряжений. Поэтому полученные в расчетах значения напряжений для призматической формы армирующих частиц значительно выше, чем для сферических. Промежуточные значения напряжений получены для частиц, имеющих форму икосаэдра. Таким образом, появляется возможность существенного снижения напряжений и деформаций при выращивании деталей и изделий из

композиционных материалов за счет использования сферических армирующих частиц карбида титана и развитием соответствующей производственной базы.

Для оценки влияния пор на формирование напряженно-деформированного состояния при выращивании композиционного материала необходимо ввести в модель предварительного элемента объема пустоты заданного размера и формы. За основу был принят рассмотренный выше расчет напряжений и деформации при выращивании композита на основе матрицы из алюминиевого сплава Аk9ч с армирующими частицами TiC. Моделирование выполнено для случая с армирующими частицами размером 5,0 мкм в форме призмы с концентрацией 10 %. Были выбраны для расчетов три значения пористости – 0,5 %; 1,0 %; 3,0 %. То есть пористость выше 3,0 % не рассматривается, т. к. в большинстве случаев пригодные детали должны иметь пористость не выше 3,0 %.

Результаты расчета в пористом представителем элементе объема с двумя видами пор в форме призмы и в сферической форме представлены на рис. 10.

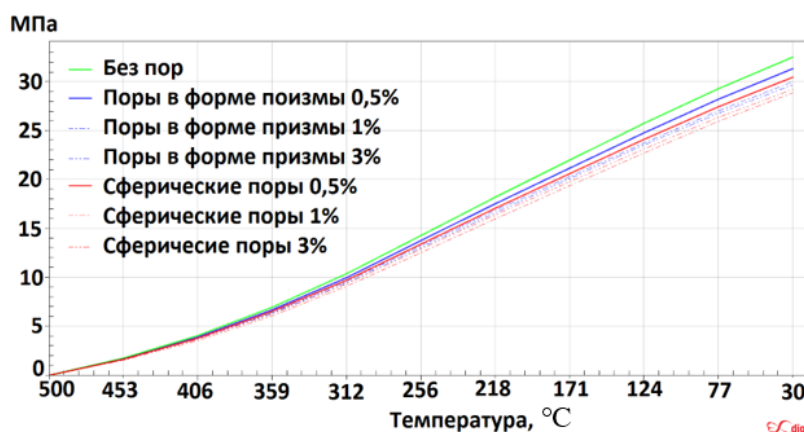


Рис. 10. Результаты расчётов напряжений в пористом компоненте

Fig. 10. Results of stress calculations in a porous component

Полученные результаты показывают, что поры незначительно влияют на напряжения, лишь немного снижаются напряжения с увеличением объема пор.

### Заключение

Представленные выше некоторые результаты теоретического анализа сложных процессов

выращивания методом селективного лазерного плавления демонстрирует неограниченные возможности численного моделирования аддитивных технологий. Предварительные расчетные данные с последующей экспериментальной апробацией позволяют многократно сократить затраты времени для разработки и оптимизации новых сложных и многообещающих технологий аддитивного производства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Bikas H., Stavroponlos P., Chryssolouris G.** Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 83 (1) p. 389–405.
2. **Multi-physics** modeling of single / multiple-track defect mechanisms in electron beam selective melting / W. Yan [et al.]. *Acta Mater.* 2017. 134. P. 324–333.
3. **Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С., Дренин А.А.** Установка для селективного лазерного плавления металлических порошков // IV международная конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее», март 2018. С. 221–234.
4. **Finite** element modelling of a particle size on the stress strain curve of near beta titanium alloy / Srinivasu G. [et al.]. *Materials and Design.* 2013. 46. P. 8–15
5. **Tian Y., Yang L., Zhao D., Huang Y., Pan J.** Numerical analysis of powder bed generation and single track forming for selective laser melting of SS316L stainless steel // *Journal of Manufacturing Processes*, No. 58, October 2020. pp. 964–974.
6. **Smith J.W., Xiong W.T., Yan S., Lin P.K., Cheng P.K., Kafka O.L., Wagner G.J., Cao J., Liu W.K.** Linking process, structure, property and performance for metal-based additive manufacturing: computational approaches with experimental support // *Compt. Mech.*, Vol. 5, No. 57, 2016. pp. 583–610.
7. **Влияние** основных параметров процесса селективного лазерного плавления на стабильность формирования единичных дорожек при выращивании изделий из медных сплавов / А.А. Дренин [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, Т.6, № 711, 2019. С. 20–29.
8. **Simulation** of anisotropic load transfer and stress distribution in Si C/Al composites subieted to tensile loaing / Zhang J.F [et al.]. *Mechanics of Materials.* 2018. 122, p. 96–103.
9. **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. Т. 1. С. 327–337.
10. **Kouznetsova V.** Computational homogenization for the multi-scale analysis of multi-phase materials. Phd Thesis 1 Research Tu/e/Graduation Tu/e. Mechanical Engineering, Technische Universiteit Eindhoven. 2022, 135 p.

REFERENCES

1. Bikas H., Stavroponlos P., Chryssolouris G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 83 (1) p. 389–405.
2. Multi-physics modeling of single / multiple-track defect mechanisms in electron beam selective melting / W. Yan [et al.]. *Acta Mater.* 2017. 134. P. 324–333.
3. Grigoryants A.G., Kolchanov D.S., Drenin A.A. Installation for selective laser melting of metallic powders // *Proceedings of the IV-th International Conference «Additive technologies: Present and future»*, March 2018, pp. 221–234.
4. Finite element modelling of a particle size on the stress strain curve of near beta titanium alloy / Srinivasu G. [et al.]. *Materials and Design.* 2013. 46. P. 8–15
5. Tian Y., Yang L., Zhao D., Huang Y., Pan J. Numerical analysis of powder bed generation and single track forming for selective laser melting of SS316L stainless steel // *Journal of Manufacturing Processes*, No. 58, October 2020. pp. 964–974.
6. Smith J.W., Xiong W.T., Yan S., Lin P.K., Cheng P.K., Kafka O.L., Wagner G.J., Cao J., Liu W.K. Linking process, structure, property and performance for metal-based additive manufacturing: computational approaches with experimental support // *Compt. Mech.*, Vol. 5, No. 57, 2016. pp. 583–610.
7. Influence of the main parameters of the selective laser melting process on the stability of the formation of single tracks when growing copper alloy products / A.A. Drenin [et al.] // *Bulletin of higher educational institutions. Mechanical Engineering*, Vol.6, No. 711, 2019. pp. 20–29.
8. Simulation of anisotropic load transfer and stress distribution in Si C/Al composites subieted to tensile loaing / Zhang J.F [et al.]. *Mechanics of Materials.* 2018. 122, p. 96–103.
9. Kolchanova A.V., Grigoryants A.G., Kolchanov D.S. High-precision modeling of thermal stresses for the process of selective laser melting of composite materials // *Conference proceedings of the Fourteenth All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists (with international participation) «The future of machine building in Russia»*, 2021, vol. 1, pp. 327–337.
10. Kouznetsova V. Computational homogenization for the multi-scale analysis of multi-phase materials. Phd Thesis 1 Research Tu/e/Graduation Tu/e. Mechanical Engineering, Technische Universiteit Eindhoven. 2022, 135 p.

Статья поступила в редакцию 15.09.2023; одобрена после рецензирования 20.09.2023; принята к публикации 26.09.2023.

The article was submitted 15.09.2023; approved after reviewing 20.09.2023; assepted for publication 26.09.2023.