ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 20. Выпуск 2.

УДК 51(091)+519.6+539.4

DOI 10.22405/2226-8383-2019-20-2-488-498

**Математические модели нагрева и расплавления частиц
мелкодисперсного порошка**

Е. В. Ларкин, А. Н. Привалов

Ларкин Евгений Васильевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Тульский государственный университет. (г. Тула).

e-mail: elarkin@mail.ru

Привалов Александр Николаевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информатики и информационных технологий, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого. (г. Тула).

e-mail: privalov.61@mail.ru

Аннотация

По мере своего развития математическое моделирование находит всё новые и новые области применения, оставаясь эффективным инструментом, в том числе, инженерной деятельности. Математические модели проходят путь эволюционного развития, повышая адекватность по соответствию реальным физическим процессам. Одно из актуальных направлений математического моделирования связано с развивающимися технологиями аддитивного прототипирования. Например, при изготовлении изделий из металлических порошков методами аддитивных технологий, в частности, селективного лазерного плавления, одним из практических вопросов является подбор оптимальных параметров работы 3D- принтера. Решение задачи оптимизации x параметров работы 3D- принтера должно базироваться на математической модели процесса нагрева и расплавления частиц металла. В качестве базовой концепции моделирования использован подход, основанный на формировании и решении уравнения теплопроводности с краевыми условиями, учитывающими сферическую форму частицы, распределение энергии в поперечном сечении лазерного пучка и взаимное пространственное положение частицы и лазерного пучка. Отмечается, что для оценки структуры формируемых деталей подобный подход является избыточным, а алгоритм интегрирования уравнения в частных производных обладает высокой вычислительной сложностью. Для упрощения задачи анализа исходная микромодель трансформирована в макромоделю нагрева и расплавления, в которых распределение температуры по объёму частицы считается постоянным, а внешнее воздействие на частицу сводится к передаче тепла через поверхность шара, с верхней стороны - от лазерного луча к частице, а с нижней стороны - от частицы к окружающей среде. Для макромоделю получены временные диаграммы нарастания температуры и накопленной внутренней энергии частицы во времени. Сделан вывод о возможности разбиения пространства вокруг частицы на зоны: полного и неполного расплавления, а также зону нагрева, недостаточного для расплавления. Показано, что наличие подобных зон приводит к рыхлости структуры формируемых на 3D-принтере деталей.

Ключевые слова: аддитивные технологии, лазерный нагрев, уравнение теплопроводности, микромодель, макромодель, временные диаграммы нагрева-расплавления.

Библиография: 19 названий.

Для цитирования:

Е. В. Ларкин, А. Н. Привалов. Математические модели нагрева и расплавления частиц мелкодисперсного порошка // Чебышевский сборник. 2019. Т. 20, вып. 2, С. 488–498.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 20. No. 2.

UDC 51(091)+519.6+539.4

DOI 10.22405/2226-8383-2019-20-2-488-498

Mathematical models of heating and melting of particles of fine-dispersed powder

E. V. Larkin, A. N. Privalov

Larkin Eugene Vasilyevich — doctor of technical science, professor, head of chair, Tula State University. (Tula).

e-mail: elarkin@mail.ru

Privalov Alexander Nikolaevich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Informatics and Information Technologies, Tula State Pedagogical University. L.N. Tolstoy. (Tula).

e-mail: privalov.61@mail.ru

Abstract

As it develops, mathematical modeling finds more and more new areas of application, remaining an effective tool, including engineering. Mathematical models go the way of evolutionary development, increasing the adequacy in accordance with real physical processes. One of the relevant areas of mathematical modeling is associated with the developing technologies of additive prototyping. For example, in the manufacture of products from metal powders by the methods of additive technologies, in particular, selective laser melting, one of the practical issues is the selection of optimal parameters for the 3D printer. The solution to the optimization problem of the 3D printer operation parameters should be based on a mathematical model of the process of heating and melting of metal particles. An approach based on the formation and solution of the heat equation with boundary conditions that take into account the spherical shape of the particle, the energy distribution in the cross section of the laser beam, and the relative spatial position of the particle and the laser beam is used as the basic concept of modeling. It is noted that to assess the structure of the formed parts, this approach is redundant, and the algorithm for integrating the partial differential equation has high computational complexity. To simplify the analysis task, the initial micromodel is transformed into heating and melting macromodels in which the temperature distribution over the volume of the particle is considered constant, and the external effect on the particle is reduced to heat transfer through the surface of the ball, from the upper side from the laser beam to the particle, and from the lower side - from particle to environment. For the macromodel, we obtained time diagrams of the temperature increase and the accumulated internal particle energy in time. It is concluded that it is possible to divide the space around the particle into zones: complete and incomplete melting, as well as a heating zone insufficient for melting. It is shown that the presence of such zones leads to the friability of the structure of the parts formed on the 3D printer. **Keywords:** additive technology, laser heating, heat conduction equation, micro-model, macro-model, heating-melting timing charts.

Keywords: additive technologies, laser heating, thermal conductivity equation, micromodel, macromodel, time diagrams of heating-melting.

Bibliography: 19 titles.

For citation:

E. V. Larkin, A. N. Privalov, 2019, "Mathematical models of heating and melting of particles of fine-dispersed powder", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 20, no. 2, pp. 488–498.

1. Введение

Аддитивные технологии изготовления деталей, основанные на послойном лазерном наплавлении частиц мелкодисперсных порошков металлов, в настоящее время распространены достаточно широко [1, 2, 3, 4, 7, 8]. Практическая реализация подобных технологий, например, для стали 07X18H12M2, связана с установлением оптимальных режимов функционирования лазера 3D-принтера, осуществляющего нагрев частиц до температуры плавления и последующее их плавление [1, 2], что обеспечивает, в конечном итоге, требуемые прочностные характеристики изготавливаемых деталей, и позволяет экономить дорогостоящее сырье.

Для решения задачи оптимизации необходима математическая модель, позволяющая за приемлемое время оценить эффективность предлагаемых технических решений. Общепринятый подход к математическому моделированию процесса нагрева и расплавления металлического порошка основан на исследовании распространения тепла внутри частицы при ее нагреве и фазовом превращении [5, 6]. Реализация подобного подхода связана с интегрированием уравнений в частных производных, что в свою очередь, требует значительных вычислительных ресурсов, и поэтому малоприменимы для практической инженерии. В том случае, если результатом оптимизации является настройка 3D-принтера под конкретный материал с известными свойствами, требуется упрощенная модель, позволяющая оперативно варьировать параметры установки. Инженерные подходы к моделированию, позволяющие оптимизировать аддитивный технологический процесс, в настоящее время развиты недостаточно, что обуславливает важность и актуальность настоящей работы.

2. Микромодель нагрева частицы

Расчетная схема для определения температуры частицы порошка приведена на рис. 1 а, где показана частица в виде шара радиусом R , в ортогональном пространстве $xOyz$, центр O которого связан с центром шара, ось z совпадает с направлением падения на шар лазерного луча, а оси x и y образуют с осью z правую систему координат. Вследствие того, что шар представляет собой точечно-симметричное симметричное тело, без нарушения общности можно считать, что центр пучка электромагнитного излучения, формируемого лазерной системой, смещен вдоль оси x относительно оси z на величину d [9].

Распространение тепла при нагревании шарообразной частицы лазерным лучом в пределах одного фазового состояния (твердого, или жидкого) описывается с помощью дифференциального уравнения теплопроводности [10]

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \frac{\alpha}{c\rho} \nabla^2 T(x, y, z, t), \forall x, y, z \in (x^2 + y^2 + z^2 \leq R^2), \quad (1)$$

где $T(x, y, z, t)$ - распределение температуры по объему частицы в момент времени t в градусах Кельвина; x, y, z - пространственные координаты; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ - дифференциальный оператор Лапласа; α - коэффициент теплопроводности, характеризующий скорость выравнивания температуры в неравномерно нагретой частице; c - удельная теплоемкость материала частицы; ρ - плотность материала частицы; t - время; R - радиус шара.

Распределение энергии $w(x', y)$ по площади сечения лазерного пучка с эффективным радиусом r определяется конструкцией и режимом функционирования лазера (рис. 1 б). Лазерный пучок, направленный сверху вниз вдоль координаты z , нагревает верхнюю полусферу частицы, откуда тепло распространяется по всему ее объему. При этом лучи пучка частично отражаются, от поверхности частицы, а частично поглощаются частицей.

Рис. 1. Расчетная схема для определения температуры частицы (а) и распределение энергии в лазерном луче (b)

Количество поглощенной энергии зависит от свойств поверхности частицы и от углов падения лучей лазерного пучка на поверхность,

$$\tilde{w}(x, y) = \{1 - k_r[\varphi(x, y)]\} \cdot w(x - b, y, t), \quad (2)$$

где b - расстояние от оси z до центра лазерного пучка; $\varphi(x, y)$ - угол падения луча на поверхность шара в точке с координатами x, y ; $k_r[\varphi(x, y)]$ - коэффициент отражения;

$$\varphi(x, y) = \arccos \frac{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}}{R}. \quad (3)$$

При импульсном нагреве частиц, с прямым фронтом и прямым срезом импульса [10]

$$w(x', y, t) = w(x', y) [\eta(t) - \eta(t - \theta)]. \quad (4)$$

где $w(x', y)$ - распределение энергии в лазерном пучке; $\eta(t)$ - единичная функция Хевисайда; θ - длительность импульса;

Распределение температуры внутри шара после начала воздействия лазерного излучения определяется за счет интегрирования уравнения в частных производных (1) при начальных условиях

$$T_0(x, y, z) = T_0 = \text{const}_{x,y,z}, \quad \forall x, y, z \in [(x^2, y^2, z^2) \leq R^2], \quad (5)$$

и граничных условиях теплообмена с окружающей средой на верхней и нижней полусферах [11]

$$q_L(x, y, z, t) = \frac{1}{\beta} \cdot [T_L^+(x, y, z, t) - T_L^-(x, y, z, t)], \quad x, y, \sqrt{R^2 - x^2 - y^2} \geq 0 \quad (6)$$

$$q_e(x, y, z, t) = \frac{1}{\beta} \cdot [T_e^+(x, y, z, t) - T_e^-(x, y, z, t)], \quad x, y, \sqrt{R^2 - x^2 - y^2} \leq 0; \quad (7)$$

где $q_L(x, y, z, t)$ - удельный тепловой поток, поступающий от лазерного источника, через единицу площади поверхности в единицу времени; $q_e(x, y, z, t)$ - удельный тепловой поток, рассеиваемый в окружающем пространстве через единицу площади поверхности в момент времени t ; β - термическое сопротивление материала частицы; $T_L^+(x, y, z, t)$ - температура в точке падения лазерного луча, определяемая по методике, приведенной в [12], с. 80., $T_L^-(x, y, z, t)$ - температура в той же точке внутри шара; $T_e^+(x, y, z, t)$, $T_e^-(x, y, z, t)$ - температура в точке с координатами x, y, z вне и внутри шара, соответственно.

Микроанализ процесса нагрева частицы лазерным лучом, проведенный с помощью интегрирования уравнения (1) в частных производных [13] с начальными условиями (5) и граничными условиями (6), (7), дает подробную информацию о состоянии частицы с момента нагревания до текущего момента, включая распределение температуры по объему. Зачастую подобная информация является избыточной, поскольку для формирования детали на 3D-принтере существенно важным является ответ на вопрос, какой процент массы частицы изменил фазовое состояние. Для ответа на этот вопрос достаточно свести микроанализ процесса к макроанализу, рассматривая состояние частицы в целом.

3. Макромодель нагрева и расплавления частицы

Если определять распределение температуры по объему частицы не требуется, то

$$\nabla^2 T(x, y, z, t) = 0.$$

В этом случае $T_L^-(x, y, z, t) = T_e^-(x, y, z, t) = T(t)$ и (1) преобразуется в

$$C \frac{dT(t)}{dt} = Q_L(t) + Q_e(t), \quad (8)$$

где $Q_L(t)$, $Q_e(t)$ - общее количество тепла, поступающего через верхнюю и нижнюю полусферы, соответственно; $Q_e(t)$ - общее количество тепла, поступающего через верхнюю полусферу; $! = \frac{4}{3}\pi R^3 c\rho$ - теплоемкость шарообразной частицы; $T(t)$ - температура частицы.

Теплопередача осуществляется по нормали к поверхности, поэтому как $Q_L(t)$, так и $Q_e(t)$, должно определяться интегрированием (6), (7) по площади поверхности шара:

$$Q_L(t) = \frac{1}{\beta} \cdot \iint_{S_1} T_L^+(x, y, z, t) dS_1 - \frac{2\pi R^2}{\beta} T(t), \forall x, y, z \in (x^2 + y^2 + z^2 = R^2, z > 0); \quad (9)$$

$$Q_e(t) = \frac{1}{\beta} \cdot \iint_{S_2} T_e^+(x, y, z, t) dS_2 - \frac{2\pi R^2}{\beta} T(t), \forall x, y, z \in (x^2 + y^2 + z^2 = R^2, z < 0). \quad (10)$$

Подставляя (10) и (11) в (8), будем иметь:

$$\xi \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = k_1 \cdot \iint_{S_1} T_L^+(x, y, z, t) dS_1 + k_2 \cdot \iint_{S_2} T_e^+(x, y, z, t) dS_2, \quad (11)$$

где $\xi = \frac{c\rho\beta R}{3}$ - постоянная времени нагрева/охлаждения частицы в целом; $k_1 = k_2 = \frac{1}{4\pi\beta R^2}$ - коэффициенты передачи тепла от верхней и нижней полусфер, соответственно; $T(t)$, $T_L^+(x, y, z, t)$, $T_e^+(x, y, z, t)$ - изменяющиеся по времени температуры частицы и ее поверхностей в точках теплообмена в градусах Кельвина.

Решение (11) для случая, если $T_L^+(x, y, z, t)$ и $T_e^+(x, y, z, t)$ за время импульсного воздействия θ меняется мало, имеет вид экспоненты.

Следует подчеркнуть, что выражение (11) получено для нагрева без фазового преобразования частицы, которое сопровождается поглощением скрытой теплоты плавления, вследствие чего температура в квазистационарной системе в течение некоторого периода должна оставаться постоянной. При лазерном плавлении, когда продолжительность нагрева составляет микросекунды, величина перегрева относительно точки термодинамического равновесия существенно возрастает и реальная температура плавления металла может быть много выше равновесной. Так, в [14] показано, что при лазерном плавлении ниобия величина перегрева достигает 300-500 градусов Кельвина и зависит от длительности и плотности энергии в импульсе. На кривой нагрева при плавлении фиксируется максимальное значение температуры,

после чего наблюдается ее снижение, и затем вновь повышение [15, 16, 17]. Для описания изменения фазового состояния частицы в контексте решаемой задачи достаточно построить самую грубую модель, при которой изменение фазы вещества частицы протекает при неизменной температуре:

$$\frac{dQ_m(t)}{dt} = k_m \cdot \left[\iint_{S_1} T_L^+(x, y, z, t) dS_1 + \iint_{S_2} T_e^+(x, y, z, t) dS_2 \right], \quad (12)$$

где $Q_m(t)$ - приращение внутренней энергии частицы, обусловленное фазовым переходом; k_m - коэффициент пропорциональности.

Изменение внутренней энергии для случая, если $T_L^+(x, y, z, t)$ и $T_e^+(x, y, z, t)$ в течение времени импульсного воздействия θ меняется мало, имеет вид наклонной прямой, угол наклона которой определяется разностью величин удельных тепловых потоков: поступающего от лазерного источника и рассеиваемого в пространстве. Количество тепла, необходимого для полного расплавления частицы, определяется зависимостью

$$\Delta Q_m = Q_{m2} - Q_{m1} = \frac{4\pi R^3 \rho c_m}{3} \Big|_{T=T_m}, \quad (13)$$

где Q_{m1} - внутренняя энергия, накопленная в частице при ее нагреве до температуры плавления; Q_{m2} - внутренняя энергия, накопленная в частице при ее нагреве до температуры плавления и выдержке при этой температуре до полного расплавления частицы; ρ - плотность материала частицы; A_m - удельная теплота плавления; T_m - температура плавления.

По зависимости (13) может быть определен процент M массы частицы, перешедшей в жидкую фазу, при неполном ее расплавлении:

$$M = \frac{Q_{m3} - Q_{m1}}{Q_{m2} - Q_{m1}} \cdot 100\%, \quad Q_{m1} \leq Q_{m3} \leq Q_{m2}, \quad (14)$$

где Q_{m3} - внутренняя энергия, накопленная в частице при неполном ее расплавлении.

Графики изменения температуры и энтальпии показаны на диаграммах (рис. 2).

Рис. 2. Диаграммы нарастания температуры и энтальпии частицы

На рис. 2 использованы следующие обозначения: T - температура частицы в целом; T_m - температура плавления; Q - накопленная внутренняя энергия частицы; t_{i1} - время нагрева до температуры плавления; t_{i2} - время до полного расплавления частицы; $i \in \{1, 2, 3, 4\}$. На первом и втором графиках показаны диаграммы нарастания температуры и теплоты, накопленной в частице. Диаграмма 1 (пунктирная линия), определяет случай, когда ось лазерного

луча совпадает с центром шара. В этом случае скорость нарастания температуры частицы T до точки плавления T_f максимальна, и частица нагревается до указанной температуры за время t_{11} . Далее температура не меняется, и в частице постепенно осуществляется фазовый переход, при котором твердая субстанция преобразуется в жидкость. В момент t_{12} весь объем шара превращается в каплю, после чего температура жидкости начинает снова возрастать по экспоненте.

Диаграмма 2 (сплошная линия), определяет случай, когда ось лазерного луча смещена относительно центра шара, но еще находится в зоне гарантированного расплавления частицы. Частица нагревается до температуры плавления за время t_{21} , а до полного расплавления - за время t_{22} . Диаграмма 3, показанная точечной линией, определяет нарастание температуры и накопленной теплоты в частице, попавшей в зону неполного расплавления. Температура частицы возрастает до величины T_f за время t_{31} . Далее частица за счет накопления теплоты расплавляется, но не полностью, поэтому момент времени t_{31} на этой диаграмме не показан. И наконец, на диаграмме 4 штрихпунктирной линией показан нагрев частицы, если она лежит вне зоны расплавления.

При функционировании 3D принтера частица и лазерный пучок занимают случайное положение друг относительно друга (рис. 3).

Рис. 3. Зоны фазовых состояний частиц (а) и вид материала детали (b)

В зависимости от взаиморасположения, частица может расплавиться полностью (зона 1), частично (зона 2), или не расплавиться совсем (зона 3), что показано на рис. 3 а. В результате спекания частиц формируется субстанция [18], структура которой показана на рис. 3 б. Как следует из рисунка, наличие трех типов взаиморасположения частиц, расположенных хаотично в объеме, и лазерного пучка, при спекании приводит к появлению в структуре пустот, не заполненных материалом частицы.

На рис. 4 показан вертикально выращенный с помощью аддитивной технологии образец для проведения механических испытаний из стали 07X18H12M2 (а) и структура его верхнего (b) и нижнего (c) торцов [19].

Рис. 4. Структура образца из стали 07X18H12M2

Как следует из рис. 4, пористость нижнего торца (куда стекает расплавленная сталь) ниже, чем пористость верхнего торца (откуда сталь стекает). Кроме того, на верхнем торце отчетливо видна структура следа от перемещения лазерного луча.

4. Заключение

Предложенная математическая макромодель нагрева и расплавления частицы мелкодисперсного порошка, полученная из микромоделей лазерного нагрева частицы, на примере стали 07X18H12M2, является ключевой в разработке инженерного подхода к оптимизации параметров функционирования 3D-принтера при практической реализации аддитивных технологий изготовления деталей. Дальнейшее развитие этой тематики должно проводиться в направлении эмпирического уточнения температуры поверхности частицы в точке падения лазерного луча на поверхность частицы и определения параметров зон в зависимости от настроек 3D-принтера.

Исследования были проведены при поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» по теме: «Разработка прототипа инженерного программного обеспечения на основе высокопроизводительных вычислений для оценки механических характеристик изделия, изготовленного с использованием аддитивных технологий (методом селективного лазерного спекания) с учетом стратегии изготовления изделия» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0271.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении. Пособие для инженеров. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». 2015. - 220 с.
2. Волежжанин И.А., Макаров В.Н., Холодников Ю.В. Аддитивные технологии использования композитов при производстве горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2017. - № 6. С. 32 - 38.
3. Olakanmi E.O., Cochrane R.F., Dalgarno K.W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties // Progress in Materials Science. - Vol. 74. - October 2015. - P. 401 - 477.
4. Travyanov A. Ya. et. al. Study of mechanical properties of cellular structures from 03Kh16N15M3 stainless steel depending on parameters of an elementary cell. Chernye Metally. 2018. No. 10. pp. 59–64.
5. Petrovsky P. V. et. al. Dependence of structure and properties of 03Kh16N15M3 on the geometry of cellular structures obtained by the selective laser melting method. Chernye Metally. 2019. No. 3. pp. 49-53.
6. Travyanov A. Ya., Dub A. V., Petrovsky P. V. et. al. Study of mechanical properties of cellular structures from 03Kh16N15MZ stainless steel depending on parameters of an elementary cell. Chernye Metally. 2018. No. 10. pp. 59–63.
7. Петровский П.В., Чеверикин В.В., Соколов П.Ю. и др. Зависимость структуры и свойств стали 03X16H15M3 от геометрии ячеистых структур, полученных методом селективного лазерного плавления // Черные металлы. 2019. № 3. С. 49-53.
8. Масайло Д.В., Попович А.А., Орлов А.В. и др. Исследование структуры и механических характеристик образцов, полученных газопорошковой лазерной наплавкой и селективным лазерным плавлением из сфероидизирующего порошка на основе железа // Черные металлы. 2019. № 4. С. 73-77.

9. Шишковский И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. – М.: Физматлит, 2009. – 424 с.
10. Orfanidis S.J. Introduction to signal processing. - Prentice Hall Inc. NY, USA, 1996. 790 p.
11. Handbook of Physics / Editors: W. Benenson, J.W. Harns, H. Stocker, H. Lotz. N.Y., USA. Springer Verlag, 2002. Pp. LVIII, 1190.
12. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. - М.: Машиностроение, 1989. - 301 с.
13. Akimenko T.A., Dunaev V.A., Larkin E.V. Computer Simulation of the Surface heating process by the movable laser // V International Workshop on Mathematical Models and their Applications 2016. Krasnoyarsk, Russia. IOF Conf. Series. Matherial science and Engeneering 2017.Vol. 173. N. UNSP 012002.
14. Smurov I. Pyrometry applications in laser machining // Proc. of SPIE. - 2001. - Vol. 4147. - P. 55 - 66.
15. Яковлев Е. Б. Перегрев твердых тел при плавлении // Изв. АН СССР. Сер. физ. - 1989. - Т. 53. - № 3. - С. 591—594.
16. Яковлев Е.Б., Вейко В.П. Особенности плавления металлов при лазерном нагревании // HT вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2005. - Т. 21. - С. 52 - 56.
17. Яковлев Е.Б., Свирина В.В., Сергаева О.Н.. Особенности плавления металлов при действии ультракоротких лазерных импульсов // Изв. вузов. Приборостроение. - 2010. - Т. 53. - № 4. - С. 57 - 62.
18. Selective laser melting of a novel Sc and Zr modified Al-6.2 Mg alloy: Processing, microstructure, and properties // R. Li, M. Wang, T. Yuan, Bo Song, C. Chen, K. Zhou, P. Cao. Powder Technology. - Vol. 319. - 2017. - P. 117–128.
19. Разработка прототипа инженерного программного обеспечения (ИПО) на основе высокопроизводительных вычислений для оценки механических характеристик изделия, изготовленного с использованием аддитивных технологий (методом селективного лазерного спекания) с учетом стратегии изготовления изделия. Отчет о прикладных научных исследованиях и экспериментальных разработках // Под ред. В.И.Горбачева. № гос. рег. AAAA-A18-118010990073-5. Тула: Тул. гос. пед ун-т им. Л.Н.Толстого, 2017. - 790 с.

REFERENCES

1. Zelenko M.A., Nagaytsev M.V., Dovbysh V.M., 2015, Additive technology in mechanical engineering. A manual for engineer, SSC RF FSUE “NAMI”, Russia.
2. Volegzhanin I.A., Makarov V.N., Kholodnikov Y.V., 2017, “Additive technologies for the use of composites in the production of mining machines”, Mining Information and Analytical Bulletin, no. 6, pp. 32–38.
3. Olakanmi E.O., Cochrane R.F., Dalgarno K.W., 2015, “A review on selective laser sinter-ing / melting (SLS / SLM) of aluminum alloy powders: Processing, microstructure, and properties”, Progress in Materials Science, vol.74, pp. 401–477.

4. Travyanov A. Ya., 2018, "Study of mechanical properties of cellular structures from 03Kh16N15M3 stainless steel depending on parameters of an elementary cell", *Chernye Metally*, no. 10, pp. 59–64.
5. Petrovsky P. V., 2019, "Dependence of structure and properties of 03Kh16N15M3 on the geometry of cellular structures obtained by the selective laser melting method", *Chernye Metally*, no. 3, pp. 49–53.
6. Travyanov A. Ya., Dub A. V., Petrovsky P. V., 2018, "Study of mechanical properties of cellular structures from 03Kh16N15MZ stainless steel depending on parameters of an elementary cell", *Chernye Metally*, no. 10, pp. 59–63.
7. Petrovsky P.V., Cheverikin V.V., Sokolov P.Yu., 2019, "Dependence of the structure and properties of 03Kh16N15M3 steel on the geometry of cellular structures obtained by the method of selective laser melting", *Ferrous metals*, no. 3, pp. 49–53.
8. Masailo D.V., Popovich A.A., Orlov A.V., 2019, "Study of the structure and mechanical characteristics of samples obtained by gas-powder laser surfacing and selective laser melting from a spheroidizing powder based on iron", *Ferrous metals*, no 4, pp. 73–77.
9. Shishkovsky I.V., 2009, *Laser synthesis of functional gradient mesostructures and bulk products*, Fizmatlit, Russia.
10. Orfanidis S.J., 1996, *Introduction to signal processing*, Prentice Hall Inc., NY, USA.
11. Benenson W., Harns J.W., Stocker H., Lotz H., 2002, *Handbook of Physics*, Springer Verlag, N.Y., USA.
12. Grigoryants A.G., 1989, *Fundamentals of laser processing of materials*, Mechanical Engineering, Russia.
13. Akimenko T.A., Dunaev V.A., Larkin E.V., "Computer Simulation of the Surface heat-ing process by the movable laser", *Trudy V International Workshop "on Mathematical Models and their Applications" (IOF Conf. Series. "Matherial science and Engeneering")*. Krasnoyarsk, 2016, vol. 173.
14. Smurov I., 2001, "Pyrometry applications in laser machining", *Proc. of SPIE*, vol. 4147, pp. 55–66.
15. Yakovlev, E. B., 1989, "Overheating of solids during melting", *Izv. USSR Academy of Sciences. Ser. physical*, vol. 53, no. 3, pp. 591 – 59
16. Yakovlev E.B., Veiko V.P., 2005, "Features of metal melting during laser heating", *NT Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, val. 21, pp. 52–56.
17. Yakovlev E.B., Svirina V.V., Sergaeva O.N., 2010, "Features of melting of metals under the action of ultrashort laser pulses", *Izv. universities. Instrument making*, vol. 53, no. 4, pp. 57–62.
18. Li R., Wang M., Yuan T., Song Bo, Chen C., Zhou K., Cao P., 2017, "Selective laser melting of a novel Sc and Zr modified Al-6.2 Mg alloy: Processing, microstructure, and properties", *Powder Technology*, vol. 319, pp. 117–128.
19. Gorbachev V.I., 2017, *Development of a prototype of engineering software (IPO) based on high-performance computing to assess the mechanical characteristics of products manufactured using additive technologies (selective laser sintering), taking into account the manufacturing*

strategy of the product. Report on applied scientific research and experimental development, Tula state ped. un-t them. L.N. Tolstoy, Tula.

Получено 18.03.2019 г.

Принято в печать 12.07.2019 г.