

Научная статья

УДК 538.9:624.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-3-13

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ СИНТЕЗА ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ СТРУКТУР ДЕТАЛЕЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ИЗ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ СПЛАВА СИСТЕМЫ Co–Cr–Ni–W–Ta

И.А. Богачев¹, Д.И. Сухов¹, Н.А. Ходырев¹, С.Э. Куркин¹¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Изучены особенности сплавления поддерживающих структур деталей из металлопорошковой композиции сплава на основе системы Co–Cr–Ni–W–Ta, изготавливаемых методом селективного лазерного сплавления. В качестве основного типа поддержек, применяемых для печати большинства сложнопрофильных конструкций, для проведения исследований выбран блочный тип. Проведен анализ расширенных технологических параметров печати поддерживающих структур, включая задержки движения лазерного луча при изменении траектории сканирования, начала и конца печати треков, перехода между треками, определено их влияние на качество изготовления поддержек, а также выбран оптимальный режим печати.

Ключевые слова: сплав на основе кобальта, селективное лазерное сплавление, поддерживающие структуры, параметры процесса, схема сканирования, структура трека

Для цитирования: Богачев И.А., Сухов Д.И., Ходырев Н.А., Куркин С.Э. Исследование режимов синтеза поддерживающих структур деталей, получаемых методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-3-13.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE SUPPORTS STRUCTURES' PRINTING PARAMETERS FOR PARTS OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING OF METAL POWDER COMPOSITION OF THE Co–Cr–Ni–W–Ta ALLOY

Igor. A. Bogachev¹, Dmitry I. Sukhov¹, Nikita A. Khodyrev¹, Sergey E. Kurkin¹¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: Features of the supports structures' processing for parts made of a metal-powder composition based on the Co–Cr–Ni–W–Ta system, manufactured by selective laser melting method, have been studied. As the main type of supports used for printing various types of parts, the block type was selected for the research. The analysis of advanced technological parameters of printing support structures, including delays of the laser beam movement when changing the trajectory, the beginning and end of the tracks, the transition between the tracks were held. Influence of the parameters on the quality of manufacturing supports was determined and optimal parameters for printing supports were selected.

Keywords: cobalt-based alloy, selective laser melting, supports structures, process parameters, scanning scheme, track structure

For citation: Bogachev I.A., Sukhov D.I., Khodyrev N.A., Kurkin S.E. Investigation of the supports structures' printing parameters for parts obtained by selective laser melting of metal powder composition of the Co–Cr–Ni–W–Ta alloy. *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-3-13.

Введение

Аддитивные технологии, начав свое развитие как метод быстрого послойного прототипирования объектов с использованием пластиков и полимеров различной морфологии и составов, быстро нашли применение в различных областях промышленности, трансформировавшись в том числе под изготовление металлических деталей [1]. Несмотря на то, что данные технологии постоянно совершенствуются, определенные технологические проблемы, связанные с использованием материалов, возможностями оборудования, геометрическими ограничениями на изготавливаемые изделия, управлением и моделированием процессов, оказывают влияние на их развитие [2]. В настоящее время технологии послойного синтеза с применением металлических порошков занимают значительную долю рынка аддитивного производства. Самым распространенным методом аддитивных технологий является селективное лазерное сплавление (СЛС), заключающееся в послойном нанесении металлопорошковой композиции (МПК) и ее последующем выборочном сплавлении при помощи лазерного излучения в соответствии с текущим сечением 3D-модели [3].

Необходимость применения поддерживающих структур при изготовлении деталей методом послойного синтеза является одним из сложных аспектов аддитивного производства. Высокая плотность энергии лазерного излучения в методе СЛС, сконцентрированная в локальном объеме зоны сплавления, в сочетании с высокой скоростью кристаллизации синтезированного материала [4, 5] приводит к возникновению большого теплового градиента между различными областями изготавливаемой детали и может являться причиной высоких внутренних термических напряжений в материале [6, 7]. Последние могут вызывать деформации и искажение геометрической формы изделия, приводить к возникновению дефектов при отделении детали от платформы построения и к образованию трещин в процессе постобработки детали (рис. 1).



Рис. 1. Искажение геометрической формы деталей вследствие больших внутренних напряжений, а также при печати поверхностей под углом больше критического

Вместе с тем сама форма детали, в частности сложнопрофильных навесных элементов или наклонных стенок, расположенных под углом больше критического, также может способствовать искажению ее геометрии. Частично данная проблема решается применением специальных поддерживающих структур, которые подводят к критическим поверхностям детали и в процессе печати жестко соединяют их с плитой построения. В результате поддерживающие структуры работают как элемент теплоотвода, предохраняющий локальную область от перегрева, а также как бандаж, предотвращающий геометрические искажения детали в процессе печати [8]. Необходимость в поддерживающих структурах является одним из ограничивающих факторов метода СЛС. Они вносят дополнительные требования к геометрической форме изготавливаемых деталей, увеличивают время построения и последующие производственные затраты на их удаление и зачистку поверхности деталей, а также снижают качество поверхностей, к которым они подводились [9].

Поскольку поддерживающие структуры создают еще на этапе подготовки 3D-модели детали к процессу синтеза, важную роль в их эффективности играет правильное расположение, выбранный тип, параметры структуры и другие свойства, которые определяют на этапе их моделирования. Инструменты, позволяющие проводить это моделирование, крайне важны для аддитивного производства. Как правило, программное обеспечение, настроенное для работы с 3D-моделями под аддитивное производство, имеет достаточно широкий набор параметров и функций построения поддерживающих структур. Например, модуль генерации поддержек программы Materialise Magics имеет базу широкого спектра поддерживающих конструкций, включая самые распространенные и часто используемые блочные (рис. 2, а), контурные (рис. 2, б), линейные (рис. 2, в) и некоторые другие, менее используемые, виды поддержек [10].

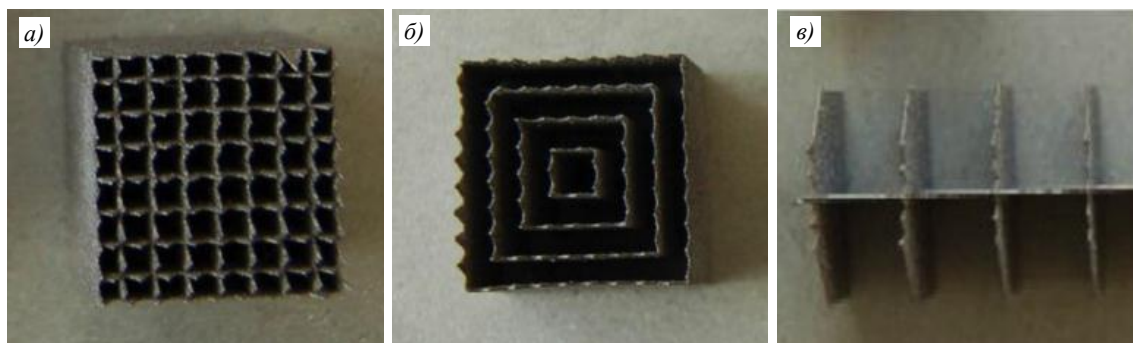


Рис. 2. Основные типы поддерживающих структур в методе селективного лазерного сплавления

Среди всех типов поддерживающих конструкций, показанных на рис. 2, наиболее распространенным для метода СЛС является блочный тип. Этот тип поддержек состоит из прямоугольных тонких стенок, взаимно перпендикулярно пересекающихся друг с другом, с заданным расстоянием между ними. Они могут иметь так называемые перфорации для облегчения конструкции, уменьшения количества используемого порошка и упрощения удаления порошка из массива поддержек, а также различные виды начальных и конечных областей, подходящих непосредственно к плите построения или самой детали, в виде сплошного массива, зубцов, пинов и т. д. В модуле генерации поддерживающих структур при моделировании эти поддержки задаются как плоскости нулевой толщины, которые установка СЛС при печати формирует в виде послойно наложенных друг на друга единичных треков. Режимы сканирования этих треков имеют существенные отличия от сканирования сечения основного материала или контура. При этом влияние расширенных параметров (тонких настроек) движения, поворота и задержек включения лазерного луча на поддержках выражено сильнее.

При учете указанных технологических особенностей цель работы – оптимизация режимов печати поддерживающих структур блочного типа для сплава на основе кобальта системы Co–Cr–Ni–W–Ta [11, 12]. Этот сплав является достаточно технологичным для использования в методе СЛС. Из жаропрочных сплавов, подобных рассматриваемому, изготавливают ответственные детали газотурбинного двигателя (ГТД) [13, 14]. Однако в сплаве при печати возникают значительные термические напряжения, что накладывает дополнительные требования к виду и режимам синтеза поддерживающих структур [15–17].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии получения деталей, полуфабрикатов и конструкций» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [18].

Материалы и методы

Для печати поддерживающих структур и образцов в работе использована МПК жаропрочного сплава на основе кобальта системы Co–Cr–Ni–W–Ta с рабочей температурой 1100 °С (фракции размером 10–63 мкм). Основа сплава состоит из следующих элементов, % (по массе): 49–53 Co; 20–30 Cr и 7–10 Ni. Углерод как основной упрочняющий элемент, образующий в структуре материала карбиды, содержится в сплаве в количестве до 0,25 % (по массе) [14]. Выплавку прутковых шихтовых заготовок проводили в вакуумной индукционной печи VIM150. Для снижения влияния вредных примесей и дополнительного раскисления при вакуумно-индукционной выплавке добавляли La и Mg в количествах, принятых в практике металлургии жаропрочных сплавов. Металлопорошковая композиция сплава получена методом газовой атомизации расплава на установке HERMIGA 10/100 VI. Рассев МПК по фракциям проводили с использованием ситового анализатора A20/4 на базе вибропривода ВП 50. Осуществляли также отделение тонкой фракции (<10 мкм) на газодинамическом сепараторе (классификаторе) установки HERMIGA.

Процесс СЛС проводили на установке Concept Laser M2 Cusing (Германия). Базовые параметры режима сплавления (скорость сканирования и мощность лазера) не меняли в ходе выполнения работы. Линейная плотность энергии при формировании трека составила 0,1 Дж/мм. Толщину слоя выбрали 30 мкм. Среди доступных для изменения тонких настроек построения поддерживающих структур на установке Concept Laser M2 Cusing определяющими являются те, которые характеризуют задержки движения и включения луча лазера при проходе заданного участка области сканирования и переходов от одного участка к другому. Описание основных настроек показано в таблице

Описание тонких настроек режима сплавления поддерживающих структур

Параметр	Описание
<i>Delay Beam On</i>	Задержка включения луча лазера в начале вектора экспозиции
<i>Delay Beam Off</i>	Задержка выключения луча лазера в конце вектора экспозиции
<i>Delay Corners</i>	Задержка движения луча лазера при повороте вектора экспозиции
<i>Jump Delay</i>	Задержка включения луча лазера при переходе от одного участка экспозиции к другому
<i>Mark Delay</i>	Задержка выключения луча лазера при переходе от одного участка экспозиции к другому

Задержки – это периоды (в мс) между включением или выключением лазера и ускорением или замедлением отклоняющих зеркал. Эти периоды имеют прямое влияние на структуру трека, поскольку векторы экспонирования активируют отклоняющие зеркала системы позиционирования луча, которые имеют физические ограничения по скорости изменения траектории, а включение и выключение лазерного луча при этом управляются источником излучения практически мгновенно и их работа должна быть синхронизирована. Эти задержки компенсируют отрицательные эффекты, которые могут возникнуть при ускорении и замедлении отклоняющих зеркал. Изменение продолжительности экспозиции при ускорении или замедлении, т. е. в начале или в конце вектора экспозиции, приводит к увеличению или уменьшению плотности энергии на единицу длины трека при постоянной мощности лазера. Поскольку начало и конец векторов экспонирования обычно находятся на конечных участках схемы сканирования, повышенное энерговыделение приводит к образованию наплывов, переплавов, задигов и других неоднородностей трека. Чтобы избежать этих эффектов, лазер следует включать только в том случае, если отклоняющие зеркала работают с заданной скоростью.

В качестве базовых значений параметров задержек, на основе которых сформирована сетка эксперимента, выбраны предустановленные значения установки Concept Laser M2 Cusing для штатного режима сплавления жаропрочных сплавов. Значения для параметров *Delay Beam On* и *Delay Beam Off* заданы в диапазоне от 0,1 до 2 мс, для параметра *Delay Corners* – от 0,1 до 3 мс, для параметров *Jump Delay* и *Mark Delay* – от 0,1 до 5 мс. Для оценки результатов фотографии образцов получены с использованием растровой электронной микроскопии на микроскопе Verios 460 XHR.

Результаты и обсуждение

Параметры задержки включения и выключения луча лазера в начале и в конце непрерывного участка схемы сканирования (*Delay Beam On* и *Delay Beam Off*) определяют форму и структуру трека на этих оконечных отрезках (рис. 3).

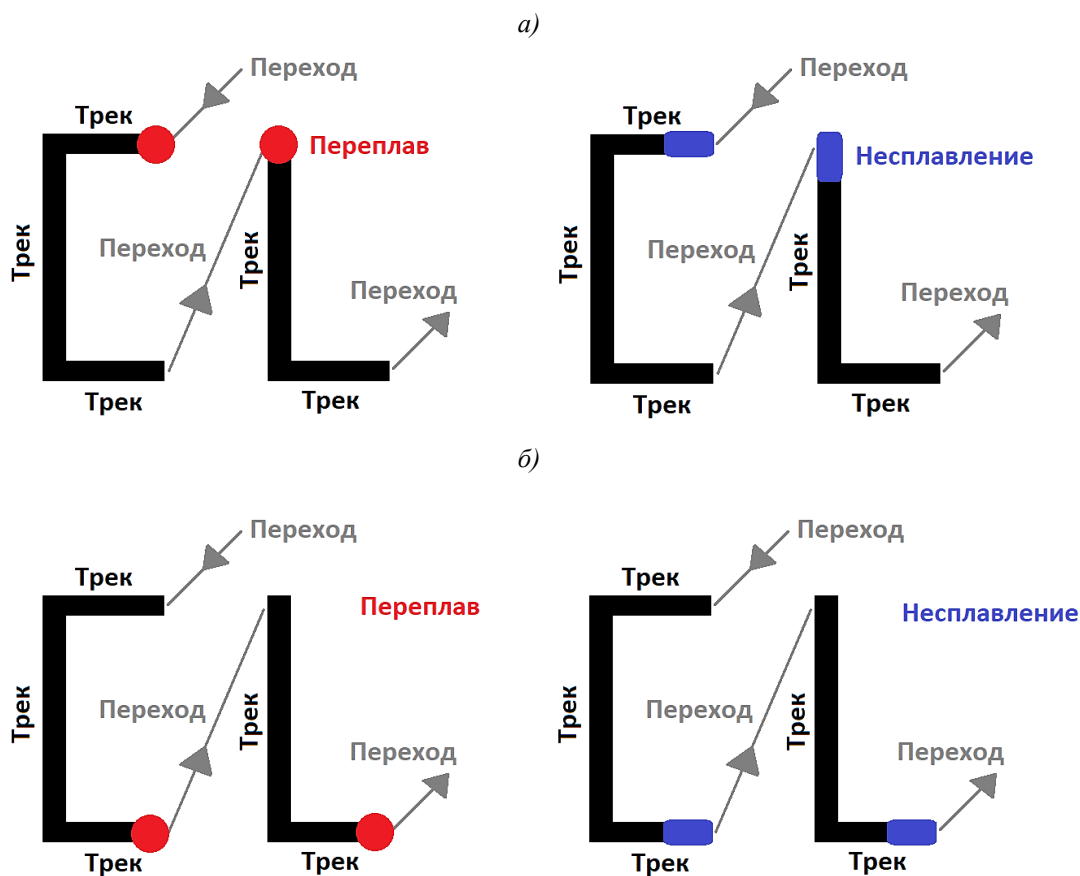


Рис. 3. Схема влияния задержек *Delay Beam On* (a) и *Delay Beam Off* (б) на структуру трека

При использовании данных схем задержки вектор экспонирования заданного участка блокируется отклоняющими зеркалами и лазерный луч включается с задержкой. Это означает, что первая часть вектора экспозиции не будет экспонироваться лазером. По окончании вектора экспозиции лазерный луч отключается с задержкой. Это означает, что отклоняющие зеркала больше не будут открываться при замедлении. Следовательно, последняя часть вектора экспозиции не будет экспонирована.

Анализ полученных образцов позволяет установить следующее: если значение параметра *Delay Beam On* мало, то на начальном отрезке непрерывного участка происходит переплавление, образуется наплыв металла, а толщина и высота трека увеличиваются, так как скорость движения луча лазера в этот момент времени еще не достигла

заданного значения, что влияет на процесс нанесения последующего слоя, нарушая его равномерность (рис. 4, *a*). При слишком большом значении этого параметра происходит неполное сплавление порошка в зоне воздействия пятна лазера, что приводит к существенной пористости данного отрезка трека и его разрушению при нанесении следующего слоя. Аналогичная картина наблюдается при изменении параметра *Delay Beam Off* с той лишь разницей, что он оказывает обратный эффект при увеличении и уменьшении значения (рис. 4, *б*).

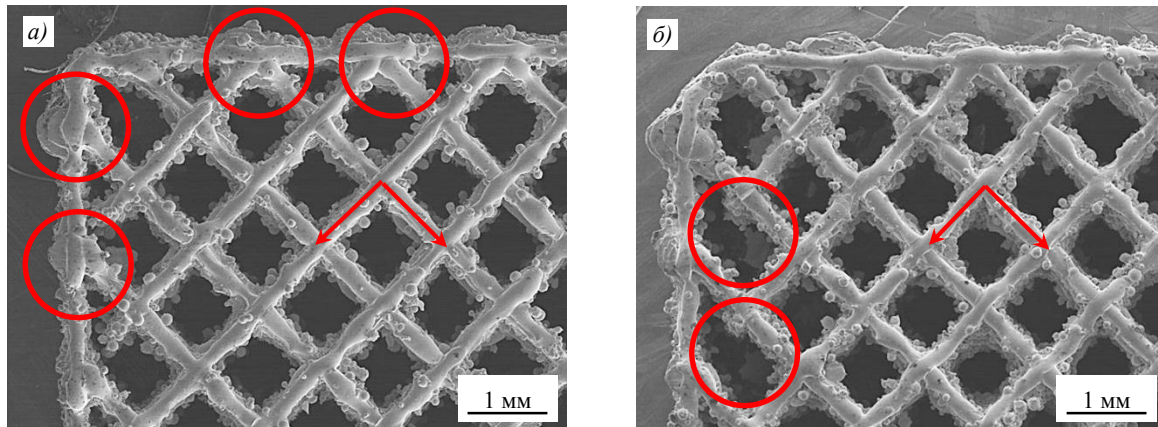


Рис. 4. Вид поддержек при малых значениях параметров *Delay Beam On* (*a*) и *Delay Beam Off* (*б*) (стрелками показаны направления движения луча при экспонировании)

Параметр задержки движения луча лазера при прохождении угловых отрезков непрерывного участка схемы сканирования при смене направления движения (*Delay Corners*) определяет в конечном итоге степень скругления этих областей (рис. 5).

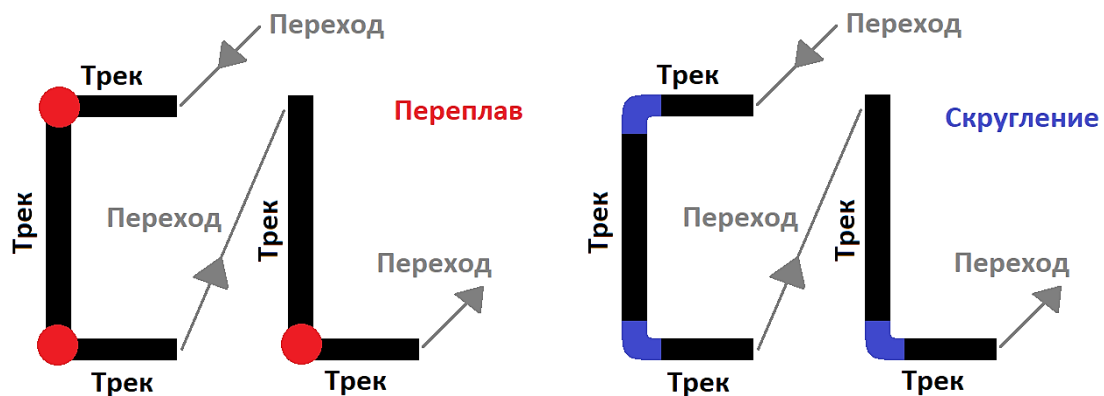


Рис. 5. Схема влияния задержки *Delay Corners* на структуру трека

Выявлено, что при уменьшении этого параметра радиус скругления отрезка при изменении направления трека увеличивается. При достаточно сильном скруглении это может оказывать влияние на геометрическое построение поддерживающих структур, а также на их целостность и способность выполнять свои функции в процессе печати детали (рис. 6, *a*; для наглядности сетка поддержек сделана с отступом от их контура). На выбранном типе поддержек этот эффект наилучшим образом наблюдается на контурном треке. Напротив, чрезмерное увеличение данного вида задержки приводит к переplаву и появлению наплыва металла, аналогичным в случае задержки включения и выключения луча лазера на оконечных отрезках непрерывного участка схемы сканирования, а также к схожим последствиям (рис. 6, *б*).

Другой эффект запаздывания отражающих зеркал возникает после большого скачка между двумя векторами экспозиции, т. е. после задержек включения и выключения луча лазера при переходе от одного непрерывного участка схемы сканирования к другому в начале следующего и в конце предыдущего участка (*Jump Delay* и *Mark Delay*), характеризующих четкость и соответствие границ участков схемы сканирования заданной программе (рис. 7). Для того чтобы перейти от конечного положения вектора экспозиции к начальному положению второго вектора экспозиции, отклоняющие зеркала перемещаются с максимальной скоростью. Отклоняющие зеркала будут колебаться, если произойдет резкое замедление в заданном положении. В том случае, если лазер включается сразу после достижения цели, колебания отклоняющего зеркала в начале вектора экспозиции могут привести к флуктуациям следа лазерного луча.

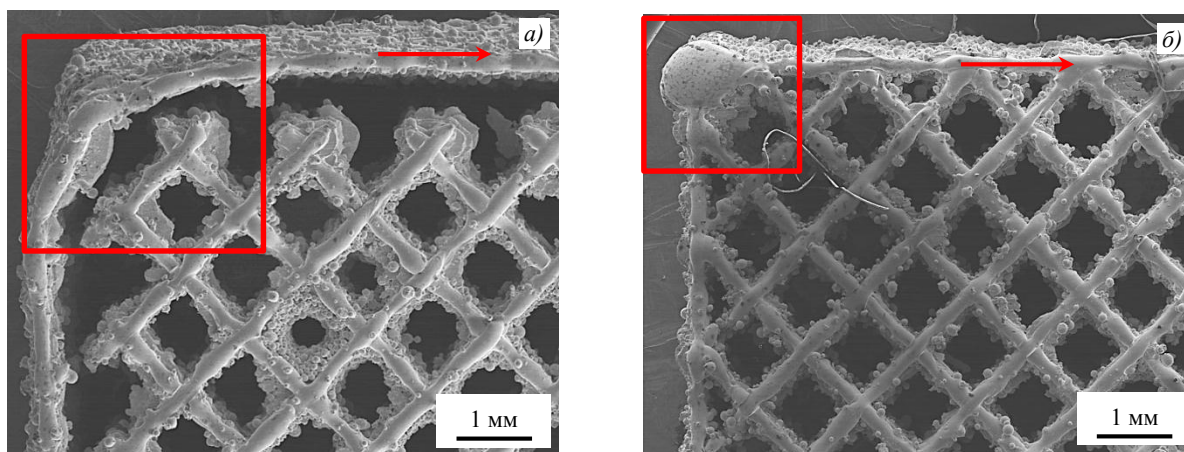


Рис. 6. Вид поддержек при слишком малом (а) и большом значениях (б) параметра *Delay Corners* (стрелками показаны направления движения луча при экспонировании)

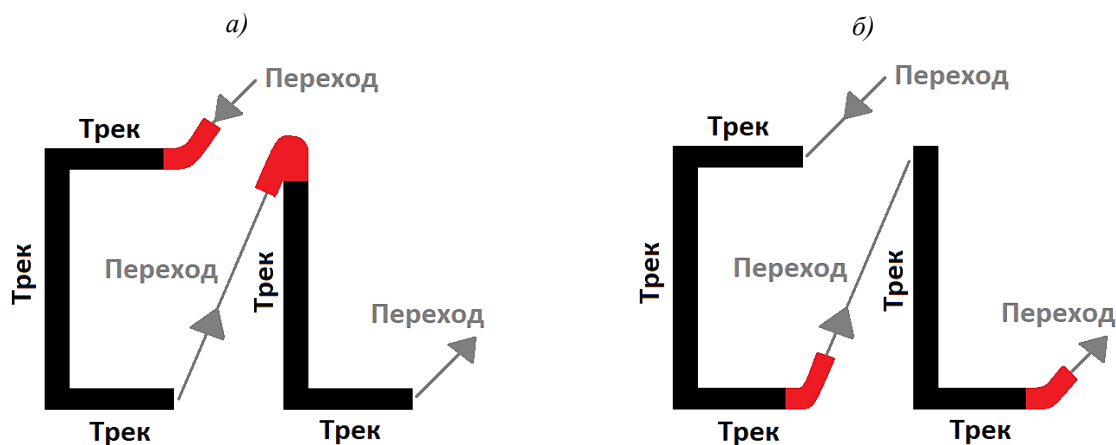


Рис. 7. Схема влияния задержек *Jump Delay* (а) и *Mark Delay* (б) на структуру трека

В том случае, если задержка *Jump Delay* слишком мала, лазер начинает работу еще до того момента, как сканатор успеет позиционировать луч в заданном месте. Это приводит к появлению «хвостов» у начальных участков трека, что в свою очередь может приводить к нарушению геометрической формы поддерживающих структур (рис. 8, б). Большая величина задержки приводит к появлению непроплавов. Напротив, при увеличении параметра задержки *Mark Delay* сканатор уже начинает переходить к другому участку схемы сканирования, в то время как луч лазера еще не выключен,

в результате «хвосты» возникают уже у конечных участков треков (рис. 8, *a*). Меньшая величина задержки в данном случае также приводит к появлению непроплавов.

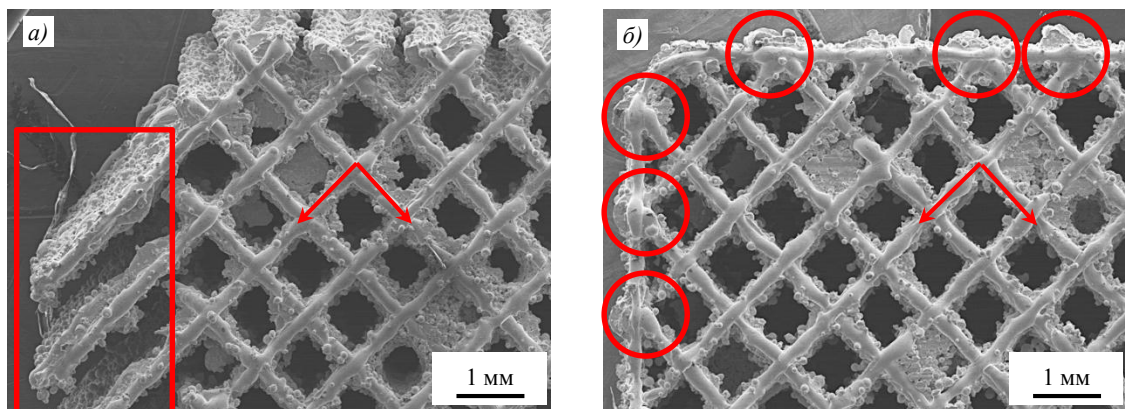


Рис. 8. Вид поддержек при слишком большом значении параметра *Mark Delay* (*a*) и слишком малом значении параметра *Jump Delay* (*б*) (стрелками показаны направления движения луча при экспонировании)

Таким образом, принимая во внимание определенные ранее зависимости влияния задержек движения лазерного луча, для параметров построения поддерживающих структур определены их оптимальные значения, позволяющие формировать поддержки деталей с четкой структурой и геометрической формой, гарантирующие стабильность процесса построения изделия (рис. 9). Для значения линейной плотности энергии при сплавлении трека 0,1 Дж/мм оптимальные диапазоны составят: 0,2–0,6 мс – для параметров *Delay Beam On* и *Delay Beam Off*; 0,1–0,4 мс – для *Delay Corners*; 0,2–0,9 мс – для *Jump Delay*; 0,3–1,0 мс – для *Mark Delay*.

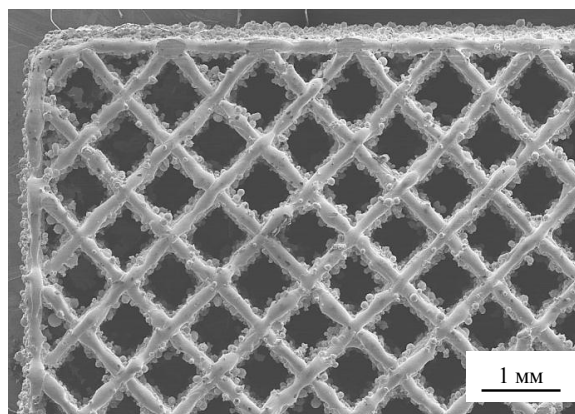


Рис. 9. Вид поддерживающих структур, напечатанных по оптимальному режиму

Следует отметить, что в работе не рассматривали использование схемы сканирования *SkyWriting*, в которой требуемые траектории для ускорения и замедления отклоняющего зеркала устанавливают до и после векторов экспозиции. Это означает, что все области с неравномерным движением остаются вне векторов экспозиции. Преимущество данной схемы заключается в том, что обрабатывается только фактическая длина определенного вектора экспозиции, при этом энергозатраты на единицу трека остаются постоянными в любой его точке. Влияние этой схемы наиболее выражено при сплавлении основного металла или контура, что не входило в область исследований данной работы.

Заключения

Изучены особенности СЛС поддерживающих структур из МПК сплава на основе системы Co–Cr–Ni–W–Ta применительно к их расширенным параметрам (задержкам) движения лазерного луча и системы позиционирования при изменении траектории сканирования, начала и конца печати треков, перехода между треками. Выявлено, что для исследованного блочного типа поддержек основное влияние на качество их изготовления оказывают параметры *Delay Beam On*, *Delay Beam Off*, *Delay Corners*, *Jump Delay* и *Mark Delay*.

Установлено, что чрезмерное уменьшение или увеличение этих задержек может приводить к нарушению структуры трека, выраженному в формировании наплывов металла, переплавах или непроплавах и разрушении целостности трека – в зависимости от характера влияния конкретного параметра. Так, наибольшее негативное влияние на целостность поддерживающих структур оказывают недостаточные задержки движения отклоняющих зеркал сканатора в начале или конце вектора экспозиции, когда энергозатраты на этих участках оказываются меньше заданного базовыми параметрами (скоростью сканирования и мощностью лазера), что приводит к недостаточному проплавлению порошка и разрушению этого участка трека, а также к потере связи с другими участками поддерживающих конструкций. В результате поддержка может перестать работать как единое целое, что снижает ее несущую способность, особенно в случае возникновения термических напряжений в изготавливаемой детали.

Определены оптимальные значения указанных параметров задержек для определенной плотности энергии при сплавлении трека, позволяющие формировать поддерживающие структуры деталей из сплава на основе системы Co–Cr–Ni–W–Ta с четкой структурой и геометрической формой, гарантирующие стабильность процесса построения детали.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Что такое инновации // Наука и жизнь. 2011. № 11. С. 16–21.
2. Каблов Е.Н. Доминанта национальной технологической инициативы. Проблемы ускорения развития аддитивных технологий в России // Металлы Евразии. 2017. № 3. С. 2–6.
3. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 222 с.
4. Богачев И.А., Сульянова Е.А., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование микроструктуры и свойств коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni, полученной методом селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-3-13.
5. Kruth J.-P., Badrossamay M., Yasa E. et al. Part and material properties in selective laser melting of metals // Proceedings of the 16th International Symposium of Electromachining. 2010. P. 3–14.
6. Mercelis P., Kruth J.-P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting // Rapid Prototyping Journal. 2006. Vol. 12. No. 5. P. 254–265.
7. Karpov I.D., Em V.T., Mazalov P.B., Sulyanova E.A. Characterisation of residual stresses by neutron diffraction at the research reactor IR-8 of NRC «Kurchatov Institute» // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1109. Art. 012046. DOI: 10.1088/1742-6596/1109/1/012046.
8. Yadroitsev I., Smurov I. Selective laser melting technology: from the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape // Physics Procedia. 2010. Vol. 5. P. 551–560.
9. Mumtaz K., Vora P., Hopkinson N. A method to eliminate anchors/supports from directly laser melted metal powder bed processes // Solid Freeform Fabrication Proceedings. 2011. P. 273–275.
10. Yasa E., Deckers J., Kruth J. The investigation of the influence of laser re-melting on density, surface quality and microstructure of selective laser melting parts // Rapid Prototyping Journal. 2011. Vol. 17. No. 5. P. 312–327.

11. Deshpande S. A Review on Appropriateness of Cobalt based Alloys and Super Alloys for Machining // *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2019. Vol. 8. Is. 01. P. 267–269.
12. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных установок / под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столлофа, У.К. Хагеля. М.: Металлургия, 1995. Кн 1. 384 с.
13. Мазалов П.Б., Сухов Д.И., Сулянова Е.А., Мазалов И.С. Жаропрочные сплавы на основе кобальта. *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (64). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.10.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-3-10.
14. Мазалов И.С., Мазалов П.Б., Сухов Д.И., Сулянова Е.А. Влияние параметров горячего изостатического прессования на структуру и свойства сплавов на основе кобальта, получаемых методом селективного лазерного сплавления // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.10.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-3-14.
15. Асланян Г.Г., Сухов Д.И., Мазалов П.Б., Сулянова Е.А. Фрактографическое исследование образцов сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta, полученных методом селективного лазерного сплавления // *Труды ВИАМ*. 2019. № 4 (76). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.08.2021). DOI: 0.18577/2307-6046-2019-0-4-3-10.
16. Coutsoradis D., Davin A., Lamberigts M. Cobalt-based Superalloys for Applications in Gas Turbines // *Materials Science and Engineering*. 1987. Vol. 88. P. 11–19.
17. Deshpande S. A Review on Appropriateness of Cobalt based Alloys and Super Alloys for Machining // *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2019. Vol. 8. Is. 01. P. 267–269.
18. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

Reference

1. Kablov E.N. What is innovation. *Nauka i zhizn*, 2011, no. 11, pp. 16–21.
2. Kablov E.N. The dominant feature of the national technology initiative. Problems of accelerating the development of additive technologies in Russia. *Metally Evrazii*, 2017, no. 3, pp. 2–6.
3. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N. Additive technologists in mechanical engineering. St. Petersburg: Publ. house of Polytech. University, 2013, 222 p.
4. Bogachev I.A., Sulyanova E.A., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Microstructure and properties investigations of Fe–Cr–Ni stainless steel obtained by selective laser melting. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 28, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-3-13.
5. Kruth J.-P., Badrossamay M., Yasa E. et al. Part and material properties in selective laser melting of metals. *Proceedings of the 16th International Symposium of Electromachining*, 2010, pp. 3–14.
6. Mercelis P., Kruth J.-P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 2006, vol. 12, no. 5, pp. 254–265.
7. Karpov I.D., Em V.T., Mazalov P.B., Sulyanova E.A. Characterisation of residual stresses by neutron diffraction at the research reactor IR-8 of NRC «Kurchatov Institute». *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1109, art. 012046. DOI: 10.1088/1742-6596/1109/1/012046.
8. Yadroitsev I., Smurov I. Selective laser melting technology: from the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape. *Physics Procedia*, 2010, vol. 5, pp. 551–560.
9. Mumtaz K., Vora P., Hopkinson N. A method to eliminate anchors/supports from directly laser melted metal powder bed processes. *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, 2011, pp. 273–275.
10. Yasa E., Deckers J., Kruth J. The investigation of the influence of laser re-melting on density, surface quality and microstructure of selective laser melting parts. *Rapid Prototyping Journal*, 2011, vol. 17, no. 5, pp. 312–327.
11. Deshpande S. A Review on Appropriateness of Cobalt based Alloys and Super Alloys for Machining. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2019, vol. 8, is. 01, pp. 267–269.

12. Superalloys II. Heat-resistant materials for aerospace and industrial installations. Ed. Ch.T. Sims, N.S. Stoloff, W.C. Hagel. Moscow: Metallurgy, 1995, book 1, 384 p.
13. Mazalov P.B., Suhov D.I., Sulyanova E.A., Mazalov I.S. Heat-resistant cobalt-based alloys. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 2, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-3-10.
14. Mazalov I.S., Mazalov P.B., Suhov D.I., Sulyanova E.A. Influence of hot isostatic pressing parameters on structure and properties of cobalt-based alloys obtained by selective laser melting. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 2, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-3-14.
15. Aslanian G.G., Sukhov D.I., Mazalov P.B., Sulyanova E.A. Fractographic study of Co–Cr–Ni–W–Ta alloy samples obtained by selective laser melting. *Trudy VIAM*, 2019, no. 4 (76), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 28, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-3-10.
16. Coutoradis D., Davin A., Lamberigts M. Cobalt-based Superalloys for Applications in Gas Turbines. *Materials Science and Engineering*, 1987, vol. 88, pp. 11–19.
17. Deshpande S. A Review on Appropriateness of Cobalt based Alloys and Super Alloys for Machining. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2019, vol. 8. Is. 01, pp. 267–269.
18. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

Информация об авторах

Богачев Игорь Александрович, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Сухов Дмитрий Игоревич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Ходырев Никита Алексеевич, начальник участка, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Куркин Сергей Эдуардович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Igor A. Bogachev, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Dmitry I. Sukhov, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Nikita A. Khodyrev, Head of production area, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Sergey E. Kurkin, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 20.07.2021; одобрена после рецензирования 04.08.2021; принята к публикации 04.08.2021.
 The article was submitted 20.07.2021; approved after reviewing 04.08.2021; accepted for publication 04.08.2021.