

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА SLM НА ФОРМИРОВАНИЕ ЕДИНИЧНОГО СЛОЯ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА INCONEL 718*

С.В. Аджамский^{1,2}, А.А. Кононенко^{2,3}

¹Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара.

49000, г. Днепр, просп. Гагарина, 72. E-mail: pk_dnu@i.ua

²LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 49000, г. Днепр, ул. Рыбинская, 144. E-mail: info@alt-print.com

³Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

49000, г. Днепр, пл. Академика Стародубова, 1. E-mail: office.isi@nas.gov.ua

В работе выполнен анализ разновидностей аддитивных технологий, их преимущества и недостатки. Более подробно изложены эксперименты по выборочному лазерному плавлению (SLM) с целью обеспечения требуемой микроструктуры синтезированного материала. Экспериментально установлены режимы, обеспечивающие стабильную печать единичного слоя. Определены оптимальные значения скорости сканирования, мощности лазера для сплава Inconel 718. Библиогр. 12, рис. 6.

Ключевые слова: процесс SLM, сплав Inconel 718, мощность лазера, единичный трек, удельная объемная энергия, максимальная плотность слоя

Аддитивные технологии – обобщенное наименование группы технологий, которые предполагают изготовление изделий по цифровым моделям методом послойного добавления материала. При этом получение изделия происходит шаг за шагом, посредством формирования слоя материала, его отверждения или фиксации в соответствии с данными 3D модели и соединении с предыдущим слоем. В качестве источника энергии может выступать электронный или лазерный луч.

Есть различные аддитивные производственные процессы, такие как выборочное лазерное плавление, прямое лазерное осаждение, электронно-лучевое плавление, подача проволоки, моделирование осаждения формы, ультразвуковое уплотнение, вихревое переплетение и свободная форма трения для изготовления металлических компонентов.

В первую очередь интерес к аддитивным технологиям и непосредственной печати или выращиванию металлических деталей, в качестве альтернативы традиционным технологиям, возник в авиации, космической промышленности, медицине и энергетическом машиностроении. При этом основным движущим фактором являлась экономическая целесообразность. Особенно это касается единичных сложных изделий, производство которых традиционными методами оказывается существенно дороже, чем посредством аддитивных технологий.

Преимущества аддитивных технологий:

- улучшенные свойства готовой продукции. Благодаря послойному построению, изделия име-

ют уникальный набор свойств. Например, детали, созданные на металлическом 3D-принтере по своим механическим свойствам, плотности, остаточным напряжениям и другим свойствам превосходят аналоги, полученные с помощью литья или механической обработки;

- большая экономия сырья. Аддитивные технологии используют практически то количество материала, которое нужно для производства изделия. Тогда как при традиционных способах изготовления потери сырья могут составлять до 80...85 %. Построение происходит с помощью послойного добавления в «тело» изделия необходимого количества материала. 97...99 % незадействованного при построении порошка после просеивания пригодно к повторному использованию. 3...9 % материала, задействованного на построение подержек, утилизируется вместе с некондиционным несплавленным порошком, не прошедшим операцию просеивания;

- возможность изготовления изделий со сложной геометрией. Оборудование для аддитивных технологий позволяет изготавливать предметы, которые невозможно получить другим способом. Например, деталь внутри детали. Или очень сложные системы охлаждения на основе сетчатых конструкций (этого не получить ни литьем, ни штамповкой);

- мобильность производства и ускорение обмена данными. В основе аддитивных технологий лежит компьютерная модель будущего из-

*По материалам доклада, представленного на IX международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов», 9–13 сентября 2019 г., г. Одесса.

© С.В. Аджамский, А.А. Кононенко, 2020

деля, которую можно передать в считанные минуты на другой конец мира — и сразу начать производство;

- высокая точность и повторяемость;
- сокращает цикл научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, обеспечивая создание сложнопрофильных деталей без использования оснастки;
- позволяет уменьшить массу за счет создания объектов с внутренними полостями;
- технология позволяет работать с широким ассортиментом металлопорошковых композиций: нержавеющей и инструментальными сталями, алюминием, титаном, никелевыми, кобальт-хромовыми, медными сплавами, и многими другими.

Аддитивные технологии также имеют и некоторые недостатки, в частности:

- качество поверхности изделий, их размерная точность и минимальная толщина элементов в значительной степени зависят от конкретного метода и технологических параметров процесса;
- необходимость изготовления вместе с деталью поддерживающих конструкций с последующим их удалением;
- зависимость структуры и свойств от направления выращивания, конкретной технологии и оборудования;
- ограниченные размеры изделий (ограничивается рабочей камерой или областью оборудования).

Однако несмотря на эти недостатки, удобство использования аддитивных технологий подтверждено многочисленными исследованиями и применениями в реальных областях промышленности.

Метод выборочного лазерного плавления (SLM) – инновационная технология производства сложных изделий посредством лазерного плавления металлического порошка по математическим 3D моделям. Данный процесс успешно заменяет традиционные методы производства, так как физико-механические свойства изделий, построенных по технологии SLM, зачастую превосходят свойства изделий, изготовленных по традицион-

ным технологиям, поэтому эта технология является одной из самых популярных и успешных с использованием порошка.

При выборочном лазерном плавлении соединение металлического порошка достигается путем плавления и затвердевания небольшого объема материала в дорожке с использованием одного или нескольких мощных лазеров. Другими словами, лазерный луч сканирует слой порошка и плавит частицы порошка под пучком и создает небольшую ванну расплавленного металла и тонкий трек затвердевшего металла позади. При повторении одиночных треков с четко определенным перекрытием (расстояние между треками), создается слой поперечного сечения. При повторении этого послойного осаждения строится вся деталь. Управляет работой установки и всего процесса компьютер, на котором загруженная математическая модель проходит несколько стадий подготовки с созданием поддерживающих структур, траекторий и методик сканирования лучом каждого сгенерированного слоя модели, настройки технологического процесса для работы с тем или иным выбранным материалом и т. п. Процесс построения изделий происходит в камере SLM машины, заполненной инертным газом – аргоном или азотом в зависимости от типа порошка, из которого происходит построение, при ламинарном его течении. Допустимое содержание кислорода – менее 0,15 %. Практически полное отсутствие кислорода позволяет избежать окисления расходного материала, что делает возможной печать такими материалами, как алюминий и титан.

Слои в зависимости от геометрии разбиваются на зоны, каждой зоне присваивается индивидуальный идентификатор, согласно которому строятся траектории движения и устанавливаются параметры лазерного луча. Данные идентификаторы можно разнести на три основные группы: нижний слой (down-skin), внутренний слой (in-skin), верхний слой (up-skin) (рис. 1, а). При этом в каждой группе создаются свои подгруппы: заливка (hatches), контур (border), постконтур (fill border) как показано на рис. 1, б.

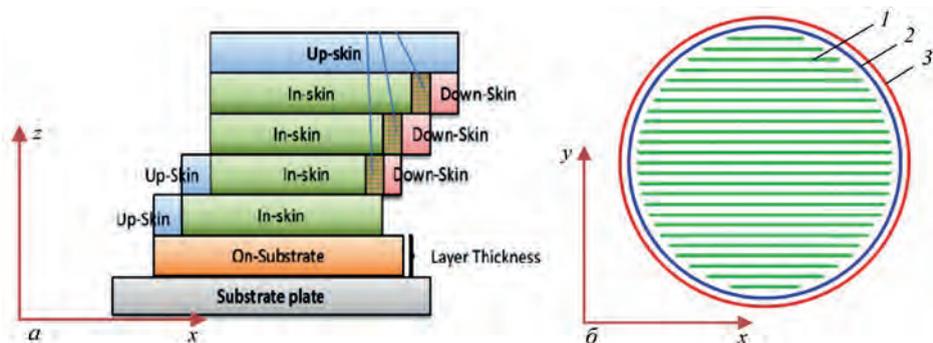


Рис. 1. Формирование слоев в направлении роста детали (а), подгруппы треков (б): 1 – заливка; 2 – постконтур; 3 – контур

Перемещение луча лазера осуществляется с помощью системы зеркал на быстродействующем приводе, однако, одной из проблем технической стороны процесса является обеспечение стабильности диаметра пятна лазерного луча. Диаметр пятна определяется как диаметр в перетяжке пучка, который составляет 86,5 % общей мощности и соответствует диаметру пучка $1/e^2$ в рабочей плоскости для гауссовых пучков. Он зависит от источника света (длина волны лазера и качество сопряженного лазерного луча), а также от апертуры и фокусного расстояния сканирующей системы. В результате формируется криволинейная фокусная поверхность, радиус которой соответствует фокусному расстоянию системы. Существует принципиально два разных подхода к решению этой проблемы: применение корректирующих F-Theta линз и управление перемещением лазера по оси z.

С материаловедческой точки зрения проблемой SLM-технологии является обеспечение требуемой микроструктуры синтезированного материала, уменьшение пористости получаемого материала, характерной для данной технологии. Значения пористости зависят от используемого материала, параметров режима сплавления, качества исходного порошка и т. д. Значения пористости для алюминиевых сплавов могут достигать 4...5 %, для титановых сплавов – до 2 %, для сталей и никелевых сплавов – менее 0,2 %. В изделиях, полученных по технологии выборочного лазерного плавления, могут присутствовать дефекты. Главным образом это поры и микротрещины.

Существует два типа пор: поры круглой формы и поры неправильной формы (отсутствие слияния) [1]. Круглые поры образуются по таким основным причинам: газы атмосферы абсорбированные расплавленной ванной, и газ, смешанный с порошком, который не успевает высвободиться из расплавленной ванны до затвердевания. Пузырьки газа в жидкости имеют сферическую форму, которую они сохраняют и после затвердевания металла [2, 3]. Другой причиной является захват газа внутри частиц порошка в процессе распыления газа [4]. Однако основным дефектом является неправильная пора, которая образуется из-за нестабильной формы расплавленной ванны или в результате недостаточного проплавления порошкового слоя. В результате в местах, где частицы расплавились не полностью, либо не произошло слияния расплавленных частиц порошка с ранее обработанным слоем образуются плоские поры, расположенные перпендикулярно направлению выращивания [2, 5–7]. Поры второго вида оказывают значительно большее влияние на меха-

нические свойства материала вследствие их большего размера, а также их плоской формы [3, 5]. Для уменьшения пористости в конечных изделиях ответственного назначения применяется горячее изостатическое прессование, во многих случаях позволяющее существенно повысить качество изделий после SLM [8].

Большая мощность и локализованность источника нагрева и высокая скорость его перемещения способствуют образованию больших тепловых градиентов в металле после построения методом SLM. Хотя эти тепловые градиенты напрямую влияют на образующуюся микроструктуру металла, они также способствуют образованию высоких термических напряжений, которые могут быть достаточно большими и приводить к короблению изделий, а также изменению их механических свойств. Остаточные напряжения, обычно, не учитываются напрямую, а рассматриваются как скрытый параметр, а иногда и не учитываются вовсе.

Эти дефекты оказывают существенное влияние на механические свойства, такие как пластичность при испытании на растяжение, вязкость разрушения и усталостная прочность. Для получения качественных изделий необходимо подбирать параметры изготовления таким образом, чтобы свести к минимуму образующиеся несплошности в металле. Структура и свойства конечного изделия, полученного методом выборочного лазерного плавления, зависят от большого количества технологических параметров. На сегодняшний день выделяют до 120 различных факторов, влияющих на качество и эксплуатационные характеристики получаемых объектов [9, 10]. Разнообразие влияющих факторов показывает сложность физических процессов, протекающих при SLM, и необходимость научно обоснованного выбора оптимальных значений основных технологических параметров. Среди наиболее важных из них можно назвать мощность лазерного излучения, скорость сканирования лазерного луча по поверхности порошка, толщину насыпанного слоя порошка, расстояние между проплавленными треками, диаметр фокусного пятна лазера, стратегию плавления, т. е. траекторию движения лазерного луча, а также химический состав, структуру и дисперсность исходного порошка.

Пористость считается одной из главных проблем объектов, получаемых методом SLM. Однако обеспечив постоянство геометрических характеристик каждого отдельного трека, таких как ширина, высота, диаметр и его хорошую адгезию с предыдущим слоем, которая определяется глубиной проплавления, возможно получение объектов с пористостью менее 1 %.

Треки с постоянной геометрической формой, без разрывов по всей длине и с проплавлением в подложку называется стабильным. Для получения объектов с минимальной пористостью требуется кристаллизация стабильных треков.

На первом этапе изучалось влияние следующих параметров: мощность лазера и скорость его перемещения на размеры и форму единичных треков. Данный набор варьируемых параметров был выбран ввиду их непосредственного вклада в объемную плотность энергии и вследствие возможности их одновременного варьирования при изготовлении набора образцов. При этом интервалы варьирования параметров составляли: для мощности лазера – 50...400 Вт с шагом 30 Вт, для скорости лазера – 450...1000 мм/с с шагом 50 мм/с. При этом толщина наносимого порошкового слоя составляла 50 мкм.

Был проанализирован внешний вид и геометрические параметры единичных треков, полученные в ходе эксперимента. При малой мощности не происходило сплавления порошка с подложкой. При большой скорости сканирования наблюдали эффект образования шариков или комков. При большой мощности расплав кипит и давление его пара вызывает искажение спекаемых дорожек. Исследовали микроструктуру поперечного сечения единичных треков. По результатам эксперимента были установлены режимы, обеспечивающие формирование ванн расплава оптимальной геометрии: глубина зоны плавления должна превышать толщину слоя примерно в полтора – два раза, соотношение глубины к ширине трека должно быть на уровне от 1 до 1,5:

$$P = 110 \text{ Вт}, V = 450 \dots 500 \text{ мм/с};$$

$$P = 140 \text{ Вт}, V = 600 \dots 700 \text{ мм/с};$$

$$P = 170 \text{ Вт}, V = 600 \dots 700 \text{ мм/с};$$

$$P = 200 \text{ Вт}, V = 650 \dots 800 \text{ мм/с};$$

$$P = 230 \text{ Вт}, V = 800 \dots 950 \text{ мм/с}.$$

В литературе, для оценки энергетического вклада источника нагрева, используется объемная плотность энергии, поскольку она позволяет учесть вклад основных технологических параметров выборочного лазерного плавления и их влияние на сплавляемый материал [11, 12]. Для расчета объемной плотности энергии использовано следующее уравнение:

$$E = P / (Vdt), \quad (1)$$

где E – плотность энергии, Дж/мм³; P – мощность лазера, Вт; V – скорость сканирования лазером, мм/с; d – толщина слоя, мм; t – расстояние между проходами лазера, мм.

Плотность энергии должна быть такой, чтобы обеспечить полное переплавление порошка и его сплавление с подложкой. Однако, как видно из приведенных данных, удельная объемная энергия указанных режимов при расчете для интервала между треками 0,1 мм и толщине слоя 50 мкм изменяется в широком диапазоне: от 44 до 61 Дж/мм³. Кроме того, при создании единичного слоя происходит перекрытие соседних треков, в результате чего расплавленная ванна создаваемого трека получает дополнительное термическое воздействие от остывающего металла предыдущего трека, что будет влиять на его геометрию, свойства и структурообразование. В эксперименте были рассчитаны режимы с удельной объемной энергией на 30 % меньше оптимальных для единичных треков.

Цель эксперимента: уточнить режимы, обеспечивающие стабильную качественную печать единичного слоя и объемных образцов для соблюдения оптимальности геометрии ванн треков в единичных слоях и минимальной пористости в объемных образцах.

В эксперименте создавали единичные слои из шести единичных треков, напечатанных с интервалом 0,1 по траектории zig-zag. Единичные слои, изготовленные по рассчитанным режимам с энергией, уменьшенной относительно оптимальных для единичных треков имели нестабильную форму. Особенно это было выражено для первого трека. При увеличении удельной объемной энергии внешне треки имели стабильную форму. Были выполнены микроструктурные исследования в поперечном сечении образцов. На рисунках можно видеть, что при уровне энергии 28...33 Дж/мм³ количества энергии оказывалось недостаточно для качественного перекрытия соседних треков (рис. 2), а при уровне удельной энергии выше 48...50 Дж/мм³ глубина проплавления соседних треков становилась неравномерной (рис. 3).

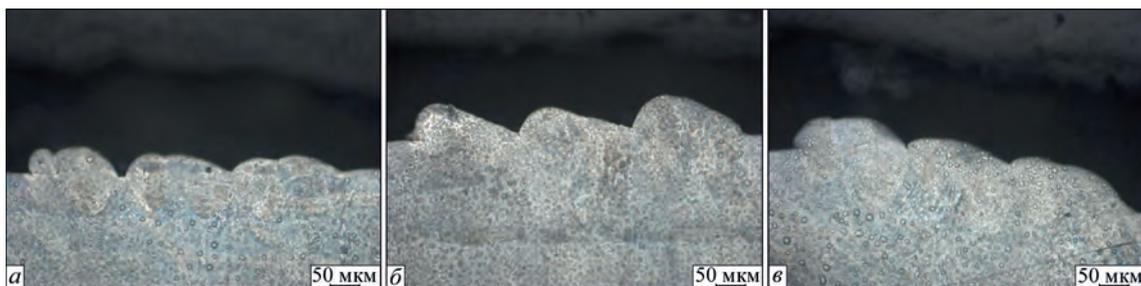


Рис. 2. Микроструктура единичного слоя при мощности лазера 140 Вт и скорости сканирования: а – 1000 мм/с ($E = 28$ Дж/мм³); б – 950 мм/с ($E = 31$ Дж/мм³); в – 850 мм/с ($E = 33$ Дж/мм³)



Рис. 3. Микроструктура єдиного слоя при мощності лазера 200 Вт і швидкості сканування: а – 800 мм/с ($E = 50$ Дж/мм³); б – 750 мм/с ($E = 53$ Дж/мм³); в – 700 мм/с ($E = 57$ Дж/мм³)

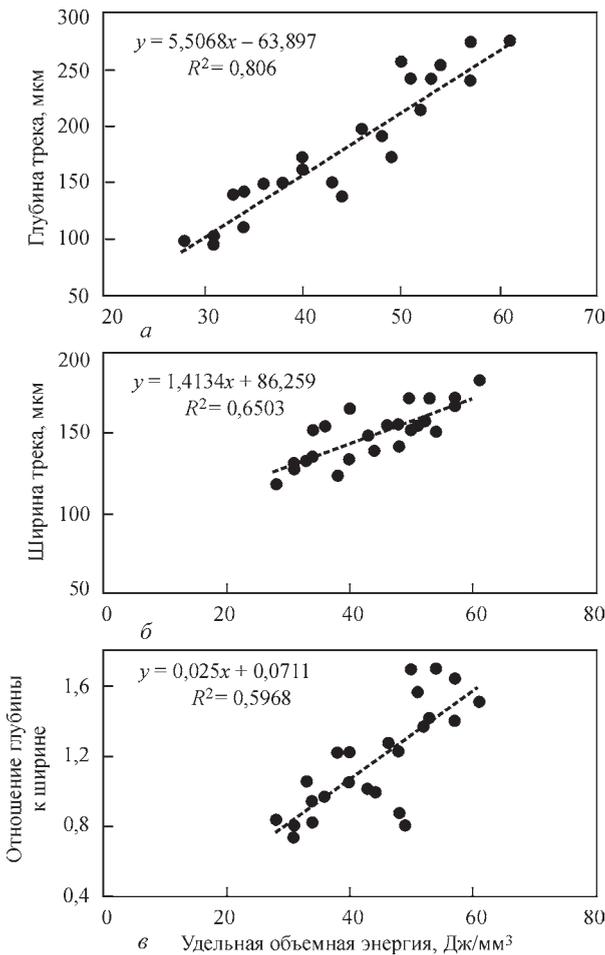


Рис. 4. Геометричні параметри трека в єдиному слой при різному рівні удельної об'ємної енергії

Після кристалізації трека поряд з ним є області, обедненні порошком. Поєтому при плавленні сусіднього трека було використано менше кількість порошку, що привело

к зменшенню його висоти. Крім того, коефіцієнти поглинання і відбиття лазерного випромінювання у порошку і переплавленого матеріалу значимо відрізняються, що оказало додаткове впливання на фізику процесу.

В роботі визначали середню глибину і ширину трека в єдиному слой. На рис. 4 наведені результати дослідження. Встановлено функціональна залежність глибини трека від удельної об'ємної енергії з достаточним рівнем коефіцієнта достовірності апроксимації. Отримано рівняння, з допомогою якого був визначений оптимальний рівень енергії, необхідний для забезпечення проплавлення на величину не більше двох слой. Він склав 39 Дж/мм³.

Для цього рівня енергії середнє співвідношення глибини к ширині треків знаходиться на оптимальному рівні. На рис. 5 показана микроструктура єдиничних слой з оптимальним рівнем енергії, перекриття сусідніх треків і їх глибина проплавлення рівномірні.

При аналізі об'ємних образців, виготовлених по таким же режимам, як і єдиничні слой, підтверджується висновок про оптимальний рівень удельної об'ємної енергії 38...40 Дж/мм³. Показано, що при більшому рівні енергії реалізуються умови глибокого проплавлення, а при меншій об'ємної енергії не забезпечується гарантованого перекриття сусідніх треків (рис. 6).

Однак нашими попередніми дослідженнями для єдиничних треків було встановлено, що інтенсивність впливання швидкості сканування на їх геометричні параметри суттєво вище, ніж потужності лазера. А одного і того ж рівня об'є-



Рис. 5. Микроструктура єдиного слоя при мощності лазера 170 Вт і швидкості сканування: а – 900 мм/с ($E = 38$ Дж/мм³); б – 850 мм/с ($E = 40$ Дж/мм³); в – 700 мм/с ($E = 48$ Дж/мм³)



Рис. 6. Микроструктура объемных образцов, изготовленных при различных уровнях объемной мощности лазера

емной энергии можно достигать различным сочетанием мощности лазера и скорости сканирования. Установлению предпочтительного способа достижения оптимального уровня подводимой энергии будут посвящены дальнейшие исследования.

Выводы

- В результате исследований определены оптимальные значения скорости сканирования, мощности лазера для сплава Inconel 718 с точки зрения получения стабильного единичного трека при условии формирования ванны расплава глубиной до двух слоев.

- Уточнены оптимальные режимы процесса для сплава Inconel 718 для получения единичных слоев с геометрией треков, соответствующей заданным условиям: средняя глубина треков до двух слоев, среднее соотношение глубины к ширине трека – до 1,5.

- Установлена зависимость средней глубины трека единичного слоя от удельной объемной энергии, установлен оптимальный уровень данной характеристики.

- Подтверждены результаты по оптимальному уровню удельной объемной энергии, полученные

при исследовании единичных слоев на объемных образцах: при реализации оптимальных режимов получены образцы максимальной плотности.

Список литературы/References

1. Thijs L., Verhaeghe F., Craeghs T. et al. (2010) A study of the micro-structural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Acta Mater.*, 58, 9, 3303–3312.
2. Simonelli M., Tse Y.Y., Tuck C. (2014) Effect of the build orientation on the Mechanical Properties and Fracture Modes of SLM Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*, 616, 1–11.
3. Frazier W.E. (2014) Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 6, 1917–1928.
4. Parimi L.L., R.G.A., Clark D., Attallah M.M. (2014) Microstructural and texture development in direct laser fabricated IN718. *Mater. Charact.*, 89, 102–111.
5. Wu M.W., Lai P.H., Chen J.K. (2016) Anisotropy in the impact toughness of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 650, 295–299.
6. Chlebus E. et al. (2011) Microstructure and mechanical behaviour of Ti-6Al-7Nb alloy produced by selective laser melting. *Materials Characterization*, 62, 5, 488–495.
7. Vilaro T., Colin C., Bartout J.D. As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42, 10, 3190–3199.
8. Qiu C., Adkins N.J.E., Attallah M.M. (2013) Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*, 578, 230–239.
9. Santos E.C. et al. (2006) Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 1459–1468.
10. Zakiev S. et al. (2006) Modelling of the thermal processes that occur during laser sintering of reacting powder compositions. *Appl. Phys. A*, 84, 123–129.
11. Meier H., Haberland C. (2008) Experimental studies on selective laser melting of metallic parts. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 39, 9, 665–670. DOI: 10.1002/mawe.200800327
12. Islam M., Purtonen T., Piili H. (2013) Temperature profile and imaging analysis of laser additive. *Physics Procedia*, 41, 828–835.

ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ SLM НА ФОРМУВАННЯ ОДИНИЧНОГО ШАРУ З ЖАРОМІЦНОГО НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ INCONEL 718

С.В. Аджамський^{1,2}, Г.А. Кононенко^{2,3}

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, 49000, м. Дніпро, просп. Гагаріна, 72. E-mail: pk_dnu@i.ua

²LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 49000, м. Дніпро, вул. Рибінська, 144. E-mail: info@alt-print.com

³Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, 49000, м. Дніпро, пл. Академіка Стародубова, 1. E-mail: office.isi@nas.gov.ua

В роботі виконано аналіз різновидів адитивних технологій, їх переваги та недоліки. Більш детально викладені експерименти з вибіркового лазерного плавлення (SLM) з метою забезпечення необхідної мікроструктури синтезованого матеріалу. Експериментально встановлено режими, що забезпечують стабільний друк одиничного шару. Визначено оптимальні значення швидкості сканування, потужності лазера для сплаву Inconel 718. Бібліогр. 12, рис. 6.

Ключові слова: процес SLM, сплав Inconel 718, потужність лазера, одиничний трек, питома об'ємна енергія, максимальна щільність шару

REGULARITIES OF INFLUENCE OF SLM PROCESS PARAMETERS ON THE FORMATION OF SINGLE LAYER FROM THE HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY INCONEL 718

S.V. Adjamsky^{1,2} G.A. Kononenko^{2,3}

¹Oles Honchar Dnipro National University, 72 Gagarin Ave., 49000, Dnipro, Ukraine. E-mail: pk_dnu@i.ua

²LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 144 Rybinskaya Str., 49000, Dnipro, Ukraine. E-mail: infor@alt-print.com

³Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the NAS of Ukraine. 1 Starodubov Sq., 49000, Dnipro, Ukraine. E-mail: office@isi@nas.ua

In the work the varieties of additive technologies, their advantages and disadvantages were analyzed. The experiments on selective laser melting (SLM) are described in more detail in order to provide the required microstructure of the synthesized material. The modes that provide stable printing of a single layer were experimentally established. The optimal values of scanning speed and laser power for the alloy Inconel 718 were determined. 12 Ref., 6 Fig.

Keywords: process SLM, alloy Inconel 718, laser power, single track, specific volume energy, maximum layer density

Поступила в редакцію
29.10.2019