

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

Смелов В.Г.¹, Митрянин А.В.²

¹Самарский университет, г. Самара,

²АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара, aleksander.mitryanin@yandex.ru

Ключевые слова: титановые сплавы, аддитивные технологии, компоненты аэрокосмической техники.

Одним из основных показателей качества изделий аэрокосмической техники, изготовленных из титановых сплавов при помощи аддитивных технологий, является обеспечение плотности, показателей удельной и усталостной прочности, жесткости, твердости, пластичности, точности, шероховатости, которые не должны уступать по своим значениям аналогичным показателям изделий, изготовленных традиционными методами: литья и механической обработки [1].

Прочность образцов изделий, изготовленных аддитивными технологиями, зависит не только от грануломорфометрических свойств и геометрических размеров частиц титанового порошкового материала, но и от формируемой в процессе лазерного воздействия на материал внутренней микроструктуры и наличия дефектов (пор, трещин, дополнительных включений, термических поволоков стенок), которые появляются, в том числе, в зависимости от выбранной стратегии и режимов обработки порошкового материала в каждом сплавляемом лазером слое [2]. Повышение прочности достигается контролем термического цикла процесса лазерного синтеза, при котором изменяются условия кристаллизации путем варьирования технологических режимов, термической обработки, легирования сплавов, внесения модификаторов в расплав и управлением фазовыми переходами [1,2].

Пористость образуется в результате захватывания газа ванной расплава при избыточном переплаве, или в результате непроплавления участков из-за недостатков энергии, причем это может быть вызвано как недостаточной мощностью, так и слишком большой скоростью сканирования [2,3]. Общая пористость и размер пор непрерывно возрастают с увеличением толщины слоя. На пористость влияет вид штриховки и перекрытия зон в процессе сплавления. Увеличение интервала сканирования приводит к уменьшению количества пор по сечению X-Y, увеличение объемной плотности энергии ведет к уменьшению количества пор по направлению X-Z. Наибольшее влияние на пористость изделий оказывает параметр плотности энергии, при малой плотности энергии пористость возникает из-за неполного плавления порошка ввиду недостаточного количества энергии лазерного излучения; при высокой плотности энергии возникает газовая пористость. Для снижения пористости необходимо оптимизировать процесс СЛС для каждого сплава индивидуально, с учетом свойств легирующих компонентов, размера порошка и типа защитной атмосферы.

Шероховатость синтезируемой поверхности зависит главным образом от комбинации технологических параметров процесса лазерного синтеза: мощности лазера, скорости сканирования, угла наклона детали от платформы построения [2]. Шероховатость увеличивается при увеличении толщины слоя и уменьшается при увеличении угла наклона. На толщину и шероховатость поверхностей существенно влияет ступенчатый метод выращивания деталей, а также угол расположения детали на платформе построения. С уменьшением угла наклона детали относительно платформы построения в плоскости X-Z уменьшается геометрическое разрешение и создается эффект лестницы, что увеличивает толщину образца, шероховатость поверхности и ее отклонение от заданного профиля. Уменьшение размеров сплавляемой зоны приводит к снижению шероховатости боковой поверхности изделий. Шероховатость поверхности находится в прямой зависимости от параметров технологических режимов и коррелирует с характером изменения пористости образцов. Степень приплавления

частиц в крайних слоях может быть разнообразной, частицы с минимальной величиной приплавания (размер частицы обычно от 18...80 мкм) могут значительно влиять на шероховатость поверхности и на геометрический размер [3]. Шероховатость поверхности также зависит от положения детали в рабочем пространстве, наименьшая шероховатость получается на вертикальных поверхностях. Чем больше поверхность отклоняется от вертикали, тем больше шероховатость.

Одной из ключевых технологий аддитивного производства, позволяющей изготавливать изделия аэрокосмической техники сложных форм, является технология селективного лазерного сплавления (СЛС). Образование в процессе сплавления частиц металлического порошка титанового сплава жидкой ванны расплава затрудняет процесс с точки зрения прогнозирования и контроля технологических параметров, обусловленный термокапиллярными эффектами и фазовыми превращениями [1]. Изучение поведения ванны расплава металлического порошка титанового сплава чрезвычайно важно, так как определяет морфологию поверхности, т.е. механические свойства и плотность конечного изделия. На характер поведения ванны расплава влияют: поверхностное натяжение, вязкость, смачиваемость, испарение, окисление, температура. Фактическое поведение ванны расплава отличается от теоретического за счет эффекта Марангони, вызывающего движение жидкости в силу неравномерности температур [1,2,4]. Неустойчивая ванна расплава, особенно на высокой скорости лазерного сканирования, увеличивает пористость и количество поверхностных дефектов.

Управление лазерным сплавлением осуществляется с помощью параметров, которые являются варьируемыми, т.е. определяемыми режимами обработки, способом подготовки порошка, и теплофизическими параметрами, зависящими от свойств конкретного металлического порошка или характеристик установки. К первой группе параметров относятся: мощность лазерного излучения, радиус лазерного пятна, скорость сканирования, шаг сканирования, коэффициент поглощения. Мощность подбирается исходя из температуры кипения материала порошка, формы и размера частиц порошка, оказывает определяющее значение на динамику плавления частиц. Эмпирически крайне сложно подобрать оптимальную мощность в совокупности с другими технологическими параметрами, необходима математическая и цифровая модель процесса СЛС, позволяющая определить количество жидкой фазы в порошковом слое. Стратегия лазерного сканирования оказывает влияние на степень распределения генерируемой мощности. Скорость сканирования определяет количество подведенной лазерной энергии, приходящейся в одну точку, то есть скорость кристаллизации, что влияет на формирование микроструктуры синтезируемого материала [2]. Коэффициент поглощения характеризует глубину проникновения излучения в порошковый слой и зависит от гранулометрического состава порошка и плотности насыпки. Данный параметр определяет окончательную пористость синтезируемого слоя. Коэффициент проникновения не является свободно изменяемым параметром, так как он зависит от способов подготовки порошка перед обработкой, от пористости среды. При высокой пористости среды наблюдается изменение транспортных характеристик вещества, что приводит к прогреву порошка на значительную глубину до момента достижения температуры плавления. В результате лазерный синтез трансформируется из метода локальной тепловой обработки поверхности в метод объемного нагрева. Нагрев до температур выше температуры плавления сопровождается началом подплавления поверхности частиц с образованием многочисленных связей между отдельными частицами [4]. За счет релаксации температурного поля при отводе тепла в подложку и высокой поверхностной энергии границы раздела жидкой и газообразной фаз течение жидкой фазы приводит к формированию связанной морфологии, т.е. сплавлению порошкового слоя. Зависимость транспортных характеристик от анизотропии, расположения и формы пор является предметом исследований [3-7]. Все эффекты и явления, возникающие при лазерном сплавлении частиц металлического порошка в значительной степени зависят от химического состава порошков, их теплофизических свойств и параметров обработки СЛС [2,4].

Таким образом, для управления множественными показателями качества (прочность, точность, плотность, шероховатость, жесткость и т.п.) необходимо разработать многокритериальные и многоцелевые модели СЛС, содержащие управляющие параметры лазерного синтеза, учитывающие теплофизические свойства титановых порошков. Адекватность математической модели необходимо проверить с помощью компьютерного моделирования процесса СЛС и последующей 3D-печати опытных образцов изделий аэрокосмической техники из титанового сплава. Моделирование процесса СЛС металлического порошка титанового сплава, взаимодействие лазерного луча с частицами металлического порошка, формирование ванны расплава и кристаллизация в сплавленном слое позволит спрогнозировать характер процесса СЛС и достигаемые в его результате механические свойства изделия аэрокосмической техники.

Список литературы

1. Williams J.C., Boyer R. R. Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components //Metals. 2020. Т. 10. №. 6. С. 705.
2. Liu S., Shin Y. C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review //Materials & Design. 2019. Т. 164. С. 107552.
3. Masuo H. et al. Influence of defects, surface roughness and HIP on the fatigue strength of Ti-6Al-4V manufactured by additive manufacturing // International Journal of Fatigue. 2018. Т. 117. С. 163-179.
4. Gupta A., Bennett C.J., Sun W. The role of defects and characterisation of tensile behaviour of EBM Additive manufactured Ti-6Al-4V: An experimental study at elevated temperature // Engineering Failure Analysis. 2021. Т. 120. С. 105–115.
5. Kakiuchi T. et al. Prediction of fatigue limit in additively manufactured Ti-6Al-4V alloy at elevated temperature // International Journal of Fatigue. 2019. Т. 126. С. 55–61.
6. Viespoli L.M. et al. Creep and high temperature fatigue performance of as build selective laser melted Ti-based 6Al-4V titanium alloy //Engineering Failure Analysis. 2020. Т. 111. С. 104–477.
7. Li P.H. et al. Thermomechanical response of 3D laser-deposited Ti–6Al–4V alloy over a wide range of strain rates and temperatures // Materials Science and Engineering: A. 2015. Т. 647. С. 34-42.

Сведения об авторах

Смелов Виталий Геннадиевич, канд. техн. наук, доцент. Область научных интересов: технологии производства ГТД, аддитивные технологии.

Митрянин Александр Валерьевич, аспирант. Область научных интересов: аддитивные технологии.

THE MAIN QUALITY INDICATORS OF TITANIUM SAMPLES OBTAINED BY ADDITIVE TECHNOLOGIES

Smelov V.G.¹, Mitryanin A.V.²

¹Samara National Research University, Samara, Russia,

²JSC Space-rocket Center Progress, Samara, Russia, aleksander.mitryanin@yandex.ru

Keywords: titanium alloys, additive technologies, aerospace components.

The article is devoted to the analysis of the influence of the construction parameters in the additive technology on the mechanical properties of samples.