

Вывод. Экспериментально была получена возможность элементарного анализа легкоплавкого галлия в атмосфере воздуха. Однако оценка относительного количества вещества оказывается невозможна так как в пиках интенсивности резонансных линий наблюдается провал, вызванный влиянием явления самопоглощения. Для корректировки полученных результатов была разработана методика управления плотностью мощности лазерного излучения. Получено, что при изменении расстояния между выходным отверстием лазера и предметным столиком спектрометра увеличивается площадь лазерного пятна на

поверхности образца. Увеличение площади лазерного пятна приводит к уменьшению плотности мощности лазерного излучения. При уменьшении плотности мощности влияние самопоглощения ослабевает, линии выравниваются, появляются линии галлия и вольфрама, ранее находившиеся на уровне шума.

Литература

1. Miziolek, A. W. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS): Fundamentals and Applications / A. W. Miziolek, V. Palleschi, I. Schechter. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 620 p.

УДК 539.534.9:669

ПРИМЕНЕНИЕ SLM-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ АВИАКОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Есман Д. Ю.¹, Федорцев Р. В.¹, Сафонов В. В.²

¹Белорусский национальный технический университет

²УП «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО»

Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассматриваются ключевые технологические проблемы при использовании технологии Selective Laser Melting (SLM) для изготовления корпусных деталей авиакосмических аппаратов. Выделены основные ограничения существующих SLM-систем: деформация тонкостенных деталей, усадка после термообработки, снижение качества при повторном использовании порошка, пористость, частое засорение фильтров и проблемы герметичности рабочей камеры, низкая скорость печати и риски, связанные с безопасностью работы с металлическими порошками. Предложены технологические решения для устранения указанных проблем, включая адаптивное сканирование, предварительный нагрев платформы, цифровая компенсация усадки, многолучевая лазерная архитектура и изменение толщины слоя в процессе печати, самоочищающиеся фильтры с вибрационной очисткой, композитное уплотнение камеры, оптимизация энергетической плотности и контроль дефектов.

Ключевые слова: аддитивное производство, авиакосмическая промышленность, корпусные детали, толщина слоя, пористость.

APPLICATION OF SLM TECHNOLOGY FOR THE MANUFACTURING OF BODY PARTS OF AEROSPACE VEHICLES

Yesman D. Y.¹, Fiodartsau R. V.¹, Safonov V. V.²

¹Belarusian National Technical University

²UE "NTC "LEMT" BelOMO"

Minsk, Belarus

Abstract. The paper considers the key technological problems when using Selective Laser Melting (SLM) technology for the manufacture of body parts of aerospace vehicles. The main limitations of existing SLM systems are identified: deformation of thin-walled parts, shrinkage after heat treatment, reduced quality when reusing powder, porosity, frequent clogging of filters and problems with the tightness of the working chamber, low flow rate and risks associated with the safety of working with metal powders. Technological solutions have been proposed to address these issues, including adaptive scanning, platform preheating, digital shrinkage compensation, multi-beam laser architecture and layer thickness variation during printing, self-cleaning filters with vibration cleaning, composite chamber sealing, energy density optimization and defect control.

Keywords: additive manufacturing, aerospace industry, body parts, layer thickness, porosity.

Адрес для переписки: Есман Д. Ю., ул. Берута 17/128, г. Минск 220074, Республика Беларусь
e-mail: edaniil800@gmail.com

В условиях стремительного развития аэрокосмической отрасли возрастает потребность в легких, прочных и геометрически сложных корпусных деталях, способных выдерживать экстремальные нагрузки и температурные перепады. Технология селективного лазерного плавления (SLM) представляет собой перспективный

инструмент для производства таких компонентов, обеспечивая высокую степень конструкционной свободы и плотность материала. Однако при масштабировании процессов SLM для серийного изготовления корпусных элементов выявляется ряд критических ограничений [1]. Деформация тонкостенных элементов. При толщине стенок

менее 1 мм локальные температурные градиенты вызывают накопление остаточных напряжений и искривление деталей.

Возможные решения: предварительный подогрев платформы до 200–400 °С для снижения перепада температур; оптимизация конструкции поддержек с учетом зон концентрации напряжений, сканирование с изменяемой мощностью лазера и перекрестными штрихами для равномерного распределения тепла [2].

Усадка после термостабилизации. Многоступенчатая термообработка (отжиг, HIP) может приводить к линейной усадке до 0,5 %, что недопустимо при допуске $\pm 0,05$ мм.

Возможные решения: цифровая компенсация усадки, через корректировку размерной модели; изотермические режимы HIP (давление 100–150 МПа, температура до 900 °С) для равномерного снятия напряжений и выравнивания усадки по всему объему; плавные многозонные температурные циклы вместо одномоментного нагрева.

Повторное использование порошка. Многократное циклирование и просеивание приводит к накоплению оксидных включений и изменению распределения частиц, что ухудшает сплавление.

Возможные решения: ультразвуковая регенерация порошка с удалением адсорбированных оксидов; смешение свежего и регенерированного порошка в отношении не более 20 % «отработки» для сохранения стабильности параметров печати; внедрение контроля морфологии (лазерная дифракция) и отсева частиц превышающих размер 45 мкм.

Пористость готовых деталей. Неполное переплавление и нестабильный газовый поток могут давать пористость 0,1–1 % объема, что критично для герметичности корпусов.

Возможные решения: мониторинг пирометрами и высокоскоростными камерами с автоматической коррекцией мощности лазера; последующая HIP-обработка при давлении в 100 МПа для устранения оставшейся пористости; детальное исследование энергетической плотности на основе DOE-методики для каждой зоны детали [2].

Скорость печати. Однолучевые SLM-системы ограничены скоростью ~1 200 мм/с, что удлиняет время производства крупных корпусов до десятков часов.

Возможные решения: многолучевые волоконные лазеры (2–4 луча) и применение микроембранированных зеркальных сканеров с частотой управления более 50 кГц для параллелизма процессов; адаптивная толщина слоя (20–60 мкм) в зависимости от критичности геометрии масштабирования; модульная сборка крупногабаритных рам с объединенным контролем параметров сканирования.

Взрывоопасность порошков. Алюминиевые и магниевые сплавы образуют взрывоопасные взвеси при влажности более 1 % и механическом истирании.

Возможные решения: герметичная подача порошка с климат-контролем влажности; применение двойной системы фильтрации и инертизации (Ar/N_2) с автоматическим переключением; установка датчика концентрации взвешенных частиц и аварийная остановка процесса при достижении порога.

Засорение фильтров и герметичность камеры. Неплотности камер приводят к утечкам газа и засорению фильтров каждые 50–100 ч, что снижает качество продувки и печати.

Возможные решения: самоочищающиеся фильтры с обратным продувом и вибровоздействием; уплотнения из керамико-полимерных композитов, устойчивых к абразивному износу; непрерывный мониторинг перепада давления и автоматическая чистка без прерывания печати.

С целью внедрения SLM технологии в производство конструктивных элементов авиакосмических аппаратов, которые должны соответствовать высоким требованиям, актуальным является разработка новой SLM-системы, в которой будут решены существующих проблем. Разрабатываемая система имеет: активный зональный нагрев каждого сегмента слоя для равномерного управления температурами и снижения напряжений; многолучевую лазерную систему с гибридными керамическими приводами для динамического перераспределения мощности; интегрированный модуль ультразвуковой регенерации порошка без выноса из производственной ячейки; систему самоочищающихся фильтров с обратным потоком защитного газа и вибростимуляцией элементов; *In situ* контроль микроструктуры с нейросетевой корректировкой параметров для минимизации дефектов.

Разработка указанной установки позволит улучшить геометрические допуски, пористость менее и ускорит производство корпусных элементов. Интеграция *adaptive-scan* и *active-heat* модулей обеспечит минимальные остаточные напряжения без дополнительной термообработки. Перспективы включают масштабирование на фюзеляжи ракетных ступеней и соединение с автоматизированными сборочными линиями для модульного производства космических аппаратов.

Литература

1. Surface and property characterization of selective laser-melted Ti-6Al-4V alloy after laser polishing / J. Li [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 128, №. 1. – P. 703–714.
2. The effect of SLM process parameters on density, hardness, tensile strength and surface quality of Ti-6Al-4V / A. M. Khorasani [et al.] // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 25. – P. 176–186.
3. Najmon, J. C. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry / J. C. Najmon, S. Raeisi, A. Tovar // Additive Manufacturing for the Aerospace Industry. – 2019. – P. 7–31.