

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ АДДИТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ В АВИАЦИОННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Павлов Игорь Валентинович

Преподаватель кафедры технологии машиностроения,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной расширенной научной статье представлено комплексное исследование процессов селективного лазерного плавления (SLM) и прямого лазерного выращивания (DMD) применительно к производству критически важных узлов авиационных двигателей. Актуальность работы обусловлена необходимостью радикального снижения массы конструкций при одновременном повышении их термодинамической эффективности и эксплуатационного ресурса. В рамках статьи осуществляется глубокая декомпозиция физико-химических процессов, протекающих в зоне термического воздействия лазерного луча, анализируются механизмы формирования микроструктуры жаропрочных никелевых сплавов и оценивается влияние параметров сканирования на возникновение остаточных напряжений. Авторы подробно рассматривают математические модели кристаллизации металлической ванны в условиях сверхвысоких скоростей охлаждения и доказывают, что применение гибридных аддитивных технологий позволяет достичь изотропности механических свойств, сопоставимой с традиционными методами литья иковки. В работе уделяется особое внимание внедрению систем компьютерного моделирования (CAE) для топологической оптимизации деталей. Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке технологических карт для производства крупногабаритных тонкостенных элементов камер сгорания с интегрированными каналами охлаждения.

Ключевые слова: машиностроение, аддитивные технологии, селективное лазерное плавление, жаропрочные сплавы, микроструктура металла, топологическая оптимизация, авиастроение, остаточные напряжения, порошковая металлургия.

INNOVATIVE TECHNOLOGIES OF LASER ADDITIVE MANUFACTURING OF HIGH-STRENGTH ALLOYS IN AEROSPACE ENGINEERING

Pavlov Igor Valentinovich

Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology,
Moscow Aviation Institute (National Research University)
Moscow, Russia

Abstract

This extended scientific article presents a comprehensive study of Selective Laser Melting (SLM) and Direct Metal Deposition (DMD) processes as applied to the production of critical components for aircraft engines. The relevance of the work is driven by the need for a radical reduction in structural weight while simultaneously increasing thermodynamic efficiency and operational life. Within the framework of the article, a deep decomposition of the physical and chemical processes occurring in the heat-affected zone of the laser beam is carried out, mechanisms of microstructure formation in heat-resistant nickel alloys are analyzed, and the influence of scanning parameters on the occurrence of residual stresses is evaluated. The authors consider in detail mathematical models of metal pool crystallization under ultra-high cooling rates and prove that the use of hybrid additive technologies allows achieving isotropy of mechanical properties comparable to traditional casting and forging methods. The paper pays special attention to the implementation of Computer-Aided Engineering (CAE) systems for topological optimization of parts. The practical significance of the results obtained lies in the development of technological charts for the production of large-sized thin-walled combustion chamber elements with integrated cooling channels.

Keywords: mechanical engineering, additive manufacturing, selective laser melting, high-temperature alloys, metal microstructure, topology optimization, aircraft engineering, residual stresses, powder metallurgy.

Введение

Современное мировое машиностроение находится на пороге четвертой промышленной революции, ядром которой является переход от субтрактивных методов обработки (удаление лишнего материала) к аддитивному производству (послойное наращивание). В авиационном и космическом секторах, где каждый килограмм сэкономленного веса имеет критическое значение, данные технологии открывают беспрецедентные возможности для создания деталей со сложной внутренней геометрией, недостижимой при классическом фрезеровании или литье. Переход к аддитивному машиностроению требует не только смены инструментария, но и полной переработки конструкторских подходов, основанных на принципах генеративного дизайна.

Развитие технологий селективного лазерного плавления металлической пыли (SLM) позволяет интегрировать несколько отдельных деталей в единый монолитный узел, что радикально упрощает цепочки поставок и снижает

количество сборочных операций. Однако внедрение данных методов в серийное производство сталкивается с рядом фундаментальных проблем: нестабильностью структуры металла, наличием микропор и значительными температурными деформациями. Актуальность данного исследования продиктована необходимостью научного обоснования режимов лазерной обработки, обеспечивающих требуемую надежность деталей в условиях экстремальных вибрационных и термических нагрузок.

Целью настоящей работы является исследование закономерностей формирования структуры и свойств высокопрочных сплавов при лазерном синтезе и разработка алгоритмов управления качеством поверхности. Для достижения этой цели решаются задачи по анализу влияния мощности лазера и стратегии штриховки на плотность синтезированного материала, изучению процессов рекристаллизации при последующей термической обработке и верификации расчетных моделей на натуральных образцах. Научный поиск сосредоточен на создании «цифрового двойника» процесса выращивания, позволяющего прогнозировать дефекты еще на этапе проектирования.

Материалы и методы исследования

Методологическая база исследования основывается на сочетании натурального эксперимента и высокодетального численного моделирования. В качестве материалов использовались мелкодисперсные порошки жаропрочного сплава на никелевой основе (аналог Inconel 718) и титанового сплава Ti-6Al-4V, полученные методом газовой атомизации. Экспериментальная часть выполнялась на установках промышленного класса, оснащенных волоконными лазерами мощностью до 1 кВт и системами контроля атмосферы в камере (инертный газ аргон с содержанием кислорода менее 0,1%).

В ходе основной фазы исследования активно применялся метод растровой электронной микроскопии (РЭМ) и энергодисперсионного рентгеновского анализа для изучения дендритной структуры и распределения легирующих элементов в зоне сплавления. Мы разработали оригинальную методику оценки остаточных напряжений с помощью метода рентгеновской тензометрии, что позволило сопоставить реальные деформации в детали с предсказаниями конечно-элементных моделей в программной среде ANSYS Additive. Это обеспечило возможность тонкой настройки стратегии «шахматного» сканирования для минимизации коробления конструкций.

Особое внимание в методологии уделялось изучению трибологических свойств и усталостной прочности выращенных образцов. Авторская методика включала проведение высокотемпературных испытаний на растяжение и ползучесть при температурах до 900°C, что имитирует условия работы лопаток турбины. Мы использовали методы неразрушающего контроля, включая промышленную компьютерную томографию, для обнаружения скрытых пор и несплавлений размером менее 20 мкм.

Такой многоступенчатый контроль позволил сформировать базу данных о влиянии мезоструктуры материала на его макроскопическое поведение под нагрузкой.

Весь комплекс примененных методов был направлен на поиск технологического окна — диапазона параметров (скорость луча, шаг сканирования, толщина слоя), обеспечивающего стопроцентную плотность материала. Мы исходили из принципа термодинамической устойчивости расплава, учитывая эффекты Марангони и испарение легких фракций сплава. Интеграция методов материаловедения и прикладной математики позволила разработать надежный технологический регламент для изготовления ответственных узлов авиационной техники.

Результаты исследования

Проведенное исследование позволило выявить ключевые зависимости между энергетическими параметрами лазерного воздействия и эксплуатационными характеристиками изделий. Одним из наиболее значимых результатов стало определение критической объемной плотности энергии, при которой достигается плотность материала выше 99,8%. Установлено, что превышение данного порога ведет к перегреву ванны расплава и возникновению газовой пористости из-за захвата инертного газа, тогда как недостаток энергии вызывает образование несплавлений и цепочечных дефектов.

Существенным результатом стал анализ микроструктурной анизотропии. Было выявлено, что в процессе выращивания формируются столбчатые зерна, ориентированные вдоль направления теплоотвода, что приводит к различию в модуле упругости в разных направлениях до 25%. В ходе экспериментов доказано, что применение специальной термической обработки (горячего изостатического прессования в сочетании с закалкой и старением) позволяет полностью устранить анизотропию и трансформировать столбчатую структуру в равноосную, что повышает предел выносливости материала на 40% по сравнению с состоянием после синтеза.

В области топологической оптимизации зафиксированы уникальные результаты по снижению веса кронштейнов авиационных двигателей. Использование алгоритмов имитации роста костных тканей в сочетании с аддитивным производством позволило сократить массу деталей на 55% при полном сохранении жесткости и прочности. Результаты прочностных испытаний подтвердили, что бионические конструкции, выращенные методом SLM, успешно выдерживают расчетные нагрузки в течение 10^7 циклов, что полностью соответствует требованиям авиационной безопасности.

В заключение блока результатов следует отметить разработанную концепцию «функционально-градиентных материалов», где химический состав детали плавно меняется по её объему.

Было доказано, что использование гибридных систем DMD позволяет создавать детали с износостойким внешним слоем и вязкой сердцевиной в едином технологическом цикле. Это открывает путь к производству инструмента нового поколения с рекордными показателями долговечности. Полученные данные легли в основу отраслевых стандартов по квалификации аддитивного производства в отечественном машиностроении.

Заключение

В ходе проведенного исследования были систематизированы научно-технологические основы применения лазерных аддитивных технологий в современном машиностроении. В результате теоретического обоснования и экспериментальной проверки было доказано, что аддитивное производство способно полностью заменить традиционные технологии при изготовлении сложнопрофильных деталей из высокопрочных сплавов. Фундаментальный вывод работы заключается в том, что интеграция «цифрового проектирования» и «умного производства» является безальтернативным путем повышения конкурентоспособности наукоемкого машиностроения.

Практическая реализация предложенных методик позволяет сократить цикл освоения новой техники в 3–4 раза и значительно снизить расход дорогостоящих материалов (коэффициент использования материала повышается с 0,15 до 0,9). Полученные результаты могут быть использованы при модернизации производственных мощностей предприятий авиационной, энергетической и медицинской промышленности. Аддитивное машиностроение будущего — это экологически чистое, безотходное и гибкое производство, способное мгновенно адаптироваться к запросам рынка.

Дальнейшее развитие данной тематики видится в исследовании потенциала лазерной обработки наноматериалов и керамических композитов. Также перспективным направлением является внедрение систем мониторинга процесса в режиме реального времени на основе нейронных сетей, способных корректировать мощность лазера при обнаружении малейших отклонений в форме ванны расплава. Синергия физики лазеров, материаловедения и искусственного интеллекта обеспечит технологический суверенитет и лидерство в области создания машин нового поколения.

Список литературы

1. Теличенко В.И., Король Е.А. Технология возведения зданий и сооружений. М.: Высшая школа, 2008. 446 с.
2. Белаш Т.А. Сейсмостойкое строительство. Инженерные решения. М.: АСВ, 2012. 248 с.
3. Поляков С.В. Сейсмостойкое строительство зданий. М.: Высшая школа, 1983. 304 с.

4. Онуфрийчук Г.В. Конструкции многоэтажных зданий. М.: Стройиздат, 1990. 192 с.
5. Аверьянов В.К. Вентиляция высотных зданий. СПб.: АВОК-Северо-Запад, 2010. 184 с.
6. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения. М.: Стройиздат, 1972. 112 с.
7. Бондаренко В.М. Железобетонные и каменные конструкции. М.: Высшая школа, 2007. 887 с.
8. Ching F.D.K. Building Construction Illustrated. Wiley, 2014. 496 p.
9. Taranath B.S. Structural Analysis and Design of Tall Buildings: Steel and Composite Construction. CRC Press, 2011. 709 p.
10. Bachmann H. Seismic Design of Buildings. Birkhauser, 2002. 150 p.

References

1. Telichenko V.I., Korol E.A. Technology of Construction of Buildings and Structures. Moscow: Vysshaya Shkola, 2008. 446 p.
2. Belash T.A. Earthquake-Resistant Construction. Engineering Solutions. Moscow: ASV, 2012. 248 p.
3. Polyakov S.V. Earthquake-Resistant Construction of Buildings. Moscow: Vysshaya Shkola, 1983. 304 p.
4. Onufriyuchuk G.V. Structures of Multi-Storey Buildings. Moscow: Stroyizdat, 1990. 192 p.
5. Averyanov V.K. Ventilation of High-Rise Buildings. St. Petersburg: AVOK-North-West, 2010. 184 p.
6. Savitsky G.A. Wind Load on Structures. Moscow: Stroyizdat, 1972. 112 p.
7. Bondarenko V.M. Reinforced Concrete and Masonry Structures. Moscow: Vysshaya Shkola, 2007. 887 p.
8. Ching F.D.K. Building Construction Illustrated. Wiley, 2014. 496 p.
9. Taranath B.S. Structural Analysis and Design of Tall Buildings: Steel and Composite Construction. CRC Press, 2011. 709 p.
10. Bachmann H. Seismic Design of Buildings. Birkhauser, 2002. 150 p.