

Тезисы по статье «Исследование анизотропии шероховатости поверхности деталей, полученных селективным лазерным плавлением из Inconel 939, и последующей пескоструйной обработки как основы для планирования режимов лазерной полировки»

В работе рассматривается актуальная проблема финишной обработки деталей из жаропрочного никелевого сплава Inconel 939, изготовленных методом селективного лазерного плавления (СЛП). Высокая исходная шероховатость, достигающая значений Ra порядка 10–20 мкм на наклонных и боковых поверхностях, является серьёзным препятствием для внедрения аддитивных технологий в газотурбинном двигателестроении, поскольку приводит к концентрации напряжений, снижению усталостной прочности и ухудшению теплообменных характеристик. Традиционные методы механической и абразивной обработки часто неприменимы к сложнопрофильным деталям, поэтому перспективным решением считается комбинированная финишная обработка, включающая пескоструйную обработку с последующей лазерной полировкой переплавлением. Однако эффективность лазерной полировки напрямую зависит от исходного состояния поверхности, которое, в свою очередь, характеризуется выраженной анизотропией, обусловленной послойным принципом построения, геометрией лазерных треков и наличием межтрековых и межслоевых ступенек. Целью настоящей работы является исследование анизотропии шероховатости поверхности СЛП-деталей из сплава Inconel 939 и оценка влияния пескоструйной обработки на параметры шероховатости в различных направлениях для обоснования выбора стратегий последующей лазерной полировки.

В ходе экспериментальных исследований образцы, выращенные методом СЛП с толщиной слоя 50 мкм и шагом штриховки 90 мкм, подвергались профилометрированию контактным профилометром «Surtronic S Series» в трёх направлениях относительно треков лазерного сканирования: продольном (вдоль треков), поперечном (перпендикулярно трекам) и диагональном (под углом к трекам). Для отдельного анализа микрорельефа и макроволнистости использовались две длины отсечки: 0,25 мм (базовая длина 3 мм), позволяющая оценить собственно микрошероховатость, связанную с частицами порошка и микроваликами расплава, и 2,5 мм (базовая длина 5 мм), которая подчёркивает крупномасштабные неоднородности, обусловленные послойным построением и стратегией сканирования. После первичных измерений образцы подвергались пескоструйной обработке, после чего измерения повторялись в тех же точках и направлениях, что позволило количественно оценить снижение параметров Ra, Rz и Rq.

Результаты измерений выявили ярко выраженную анизотропию шероховатости исходных поверхностей. На всех исследованных участках минимальные значения параметров шероховатости зафиксированы при измерении в продольном направлении (вдоль треков), где R_a составлял от 0,90 до 1,30 мкм, а максимальные — в поперечном и диагональном направлениях, где R_a достигал 3,20–3,35 мкм, а R_z — 15–17 мкм. Такое различие объясняется тем, что при продольном измерении щуп профилометра перемещается параллельно валикам переплавленного материала, фиксируя лишь мелкомасштабные неровности самого валика, тогда как при поперечном или диагональном измерении щуп последовательно пересекает границы между соседними треками и межслоевыми ступеньками, что приводит к регистрации значительно более высоких пиков и впадин. Особенно сильно анизотропия выражена на наклонных поверхностях, где ступенчатый эффект максимален, а также наблюдается интенсивное налипание частично оплавленных частиц порошка.

Пескоструйная обработка привела к устойчивому снижению всех параметров шероховатости, однако величина этого снижения оказалась существенно неодинаковой в разных направлениях и на разных участках. Наибольшее абсолютное снижение R_a (на 2,21 мкм) достигнуто на наклонной поверхности в диагональном направлении, где исходная шероховатость была максимальной ($R_a = 3,35$ мкм). Напротив, на относительно гладком участке в продольном направлении снижение составило лишь 0,03 мкм (с 0,90 до 0,87 мкм). Параметр R_z продемонстрировал наиболее интенсивное абсолютное снижение, что согласуется с механизмом пескоструйной обработки, эффективно удаляющей единичные экстремальные выступы — частично сплавленные частицы порошка, сателлиты и выступающие межслоевые ступеньки. Характерной особенностью является минимальный эффект пескоструйной обработки в продольном направлении на всех участках, что объясняется отсутствием крупных выступающих элементов вдоль треков и режимом «плато», при котором абразивные частицы скользят по относительно гладкому профилю валика, не находя точек преимущественного приложения ударной энергии.

Сравнительный анализ измерений при разных длинах отсечки показал, что при увеличении L_c с 0,25 до 2,5 мм численные значения параметров R_a , R_z и R_q возрастают в 2,5–5 раз. Например, на одном из участков R_a при $L_c = 0,25$ мм составлял 0,97 мкм (продольное), 1,36 мкм (поперечное) и 2,76 мкм (диагональное), тогда как при $L_c = 2,5$ мм те же значения достигли 4,63; 6,07 и 7,35 мкм соответственно. При этом анизотропия сохраняется, но характер её несколько меняется: при короткой длине отсечки максимальные значения регистрируются в поперечном направлении, а при длинной — в диагональном, что указывает на суммарный вклад как микрорельефа, так и макроволнистой

структуры, причём диагональное направление оказывается наиболее чувствительным к крупномасштабным неоднородностям. Параметр Rz при $L_c = 2,5$ мм в диагональном направлении возростал с 6,7 до 35,9 мкм (более чем в 5 раз), что свидетельствует о пересечении щупом глубоких межтрековых впадин и локальных дефектов укладки порошка, которые при короткой отсечке частично отсекаются фильтром.

На основе полученных экспериментальных данных и их сопоставления с литературными результатами авторы делают вывод о прямой корреляции между исходной шероховатостью СЛП-поверхности и предельно достижимой шероховатостью после лазерной полировки. Показано, что при исходной шероховатости Ra порядка 9,5 мкм лазерная полировка позволяет достичь Ra 0,6 мкм, тогда как при Ra 68,0 мкм — лишь 11,0 мкм. Кроме того, эффективность лазерной полировки существенно зависит от ориентации сканирования лазерного пучка относительно преобладающих структур рельефа: шероховатость, измеренная параллельно направлению быстрого перемещения сканатора, стабильно ниже, чем в перпендикулярном направлении, благодаря более эффективному перераспределению расплава. С учётом того, что в настоящей работе шероховатость в разных направлениях и на разных сторонах детали различается в несколько раз (Ra от 0,87 до 3,35 мкм после пескоструйной обработки), стратегия лазерной полировки — прежде всего выбор направления и порядка сканирования — становится определяющим фактором для достижения равномерного качества поверхности. Рекомендуется для участков с повышенной шероховатостью в поперечном направлении ориентировать быстрое перемещение лазерного пятна перпендикулярно доминирующим неровностям, а также применять многопроходную обработку со сменой направления сканирования между проходами для выравнивания анизотропии и получения более изотропного рельефа. Полученные результаты могут служить основой для построения карт исходной шероховатости и обоснованного выбора комбинаций методов финишной обработки (пескоструйная, механическая, сухая электрополировка, лазерная полировка) с оптимизацией траекторий сканирования для каждой зоны детали, что в конечном итоге позволит повысить усталостную прочность и эксплуатационные характеристики аддитивно изготовленных компонентов газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов.