

УДК 621.7

Особенности шероховатости деталей, полученных селективным лазерным плавлением, и анализ методов ее снижения

Гебеш Алина Владиславовна

gebesh@bmstu.ru

Мельникова Мария Александровна

maria.melnikova@bmstu.ru

Середина Варвара Александровна

seredina@bmstu.ru

Михайлова Анна Валерьевна

mikhailova@bmstu.ru

Фунтиков Владислав Анатольевич

vladislav.funt@bmstu.ru

Мельников Дмитрий Михайлович

melnkovd@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Представлены результаты анализа формирования шероховатости поверхностей деталей, полученных методом селективного лазерного плавления (СЛП), а также рассмотрены основные факторы, влияющие на параметры микрогеометрии в состоянии as-built (режимы процесса, свойства сплава, ориентация поверхности и особенности геометрии). Показано, что типичные значения параметров Ra, Rz и Rmax для алюминиевых, титановых, никелевых сплавов и нержавеющей сталей существенно превышают требования к ответственным изделиям и требуют применения последующей постобработки. Систематизированы и проанализированы методы снижения шероховатости, включающие механические (фрезерование, шлифование, абразивно-струйная и виброабразивная обработка), физико-химические (химическое травление, электрохимическая полировка) и лазерные технологии полировки, а также гибридные маршруты обработки. Показано, что комбинированные схемы постобработки позволяют, более чем на порядок, снизить шероховатость (до уровня Ra порядка десятых долей микрометра) при сохранении геометрической точности, что открывает возможности для широкого применения СЛП-деталей в машиностроении и авиации.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, аддитивное производство, шероховатость поверхности, постобработка, механическая обработка, электрохимическая полировка, лазерная полировка

Введение. Селективное лазерное плавление (СЛП) обеспечивает получение сложнопрофильных деталей из широкого спектра сплавов, однако одной из ключевых проблем технологии остается повышенная шероховатость поверхностей в состоянии as-built [1, 2]. Повышенные параметры шероховатости снижают усталостную прочность, коррозионную стойкость и точность сопряжения, что ограничивает применение СЛП-деталей в ответственных узлах [3, 4]. Актуальной задачей является количественное описание шероховатости в зависимости от режимов процесса и геометрии, а также анализ методов ее снижения.

Для типичных материалов аддитивного производства значения Ra и Sa после построения достигают 6–30 мкм и более, а R_{max} — десятков и сотен микрометров; при неблагоприятной ориентации поверхности Ra может превышать 50 мкм, а R_{max} — 300 мкм, что неприемлемо без постобработки [3, 5]. Оптимизация режимов СЛП (толщина слоя, энергия, стратегия сканирования) позволя-

ет снизить среднюю шероховатость до $Ra \approx 6\text{--}12$ мкм, но этого недостаточно для финишных поверхностей с $Ra < 1\text{--}2$ мкм, поэтому технологические параметры построения лишь ограниченно управляют шероховатостью, и необходима дополнительная обработка [3, 5].

Проведение измерений. Для оценки состояния поверхностей as-built и эффективности методов снижения шероховатости были выполнены контактные 2D-измерения и бесконтактные 3D-измерения образцов, изготовленных методом СЛП из сплава Inconel 718 при различных ориентациях и режимах построения. Контактные измерения проводились профилометром Surtronic S Series (Taylor Hobson) в соответствии с ГОСТ 2789–73 и ISO 4287 с использованием базовых длин $L_c = 0,25$ и $2,5$ мм и длины оценки $L_n = 3\text{--}5L_c$; регистрировались параметры Ra , Rz , $R_{\max}$ и Rq . Для локального анализа трехмерной микрогеометрии применялась оптическая система Sensofar (конфокальный/интерференционный режим) с объективом $20\times$, что позволило определять Sa , Sq , Sp , Sv , Sz , Ssk и Sku по ISO 25178.

Измерения показали, что при $L_c = 0,25$ мм для поверхностей as-built характерны значения Ra порядка $6\text{--}12$ мкм, Rz достигает $30\text{--}40$ мкм, а $R_{\max}$ — $40\text{--}50$ мкм, причем отношение $R_{\max}/Ra$ находится в диапазоне $6\text{--}8$, что свидетельствует о наличии отдельных высоких выступов и глубоких впадин. При увеличении базовой длины ($L_c = 2,5$ мм) фиксируется рост Rz до $80\text{--}120$ мкм и $R_{\max}$ до 200 мкм, тогда как Ra изменяется значительно слабее, что указывает на доминирование крупномасштабных неровностей, связанных со слоистой структурой построения и эффектом сфероидизации. 3D-измерения подтвердили диапазон $Sa \approx 5\text{--}20$ мкм и показали, что величины Sp и Sz существенно превосходят среднемасштабную шероховатость, а значения Ssk и Sku указывают на асимметричный рельеф с выраженными выступами, критичными для усталостной долговечности.

Сравнение серий образцов с различными режимами и ориентациями показало умеренное уменьшение Ra и Sa при оптимизации параметров СЛП, однако даже в наилучших режимах значения шероховатости остаются выше требований к высокоточным поверхностям и требуют применения последующей механической, химической, электрохимической или лазерной обработки.

Классификация методов снижения шероховатости. Методы снижения шероховатости СЛП-поверхностей условно разделяются на три группы: механические, физико-химические (в том числе химико-термические и электрохимические) и гибридные подходы [4].

Механическая обработка остается базовым инструментом доводки СЛП-деталей: при доступности зоны обработки возможно снижение Ra с десятков микрометров до $0,4\text{--}0,8$ мкм и ниже, в зависимости от инструмента и режимов. Для сплавов типа ВТ-6, Inconel 718 и нержавеющей сталей показано, что после фрезерования и шлифования Ra уменьшается примерно на порядок, а $R_{\max}$ — в $5\text{--}10$ раз; при многоступенчатой схеме шлифования и полировки достигается $Ra 0,05\text{--}0,20$ мкм, сопоставимое с традиционным производством. Абразивно-струйная и виброабразивная обработка более технологичны для сложной внешней геометрии и позволяют снизить Ra с $10\text{--}30$ мкм до 3--

8 мкм, но хуже контролируют геометрию и могут приводить к переокруглению кромок [4].

Химическое травление и полировка обеспечивают избирательное растворение выступов микрорельефа и частично сплавленных частиц; для алюминиевых и титановых сплавов Ra удастся снизить до 1–2 мкм, однако при длительной экспозиции возможно изменение размеров и образование поднутрений. Электрохимическая полировка (ЭХП) является одним из наиболее перспективных методов для деталей сложной формы: для сталей 316L и сплава ВТ-6 при оптимизации параметров ЭХП исходная шероховатость Sa порядка 6–16 мкм снижается до 0,5–1,0 мкм, включая внутренние каналы диаметром порядка миллиметров. В ряде работ Ra уменьшается с 8–10 мкм до 0,7–1,2 мкм без заметной потери геометрической точности и с одновременным ростом коррозионной стойкости [1–3].

Лазерная полировка основана на локальном переплавлении поверхностного слоя, при котором рельеф выравнивается за счет поверхностного натяжения расплава. Для сплавов ВТ-6 и никелевых суперсплавов показано, что при оптимальном выборе мощности, скорости и перекрытия дорожек Ra снижается с 10–20 мкм до 1–3 мкм при сохранении или повышении микротвердости поверхностного слоя и сглаживании слоистой структуры.

Наиболее глубокое снижение шероховатости достигается при комбинированном применении нескольких методов. Для сплава AlSi10Mg двухступенчатая схема «абразивно-струйная обработка + химическая/электрохимическая полировка» позволяет уменьшить Ra с исходных 8–19 мкм до 0,13–0,26 мкм, то есть более чем на порядок; аналогичный эффект показан для ВТ-6 и нержавеющей сталей, где сочетание «механическая обработка доступных поверхностей + ЭХП внутренних каналов» обеспечивает $Ra < 1$ мкм на большинстве функционально важных участков детали. Такие маршруты позволяют не только достичь требуемого уровня шероховатости ($Ra \leq 0,5–1,0$ мкм), но и стабилизировать качество по всей партии изделий, что важно для серийного применения СЛП-деталей.

Список источников

- [1] Мельникова М.А., Медведева Н.А., Голованова И.В. Промышленная революция 4.0 и вызовы образования для поколения Z. *Глобальные научные тенденции: интеграция и инновации. Междунар. науч.-практ. конф.: сб. ст.* Симферополь, Изд-во Типография «Ариал», 2025, с. 701–707.
- [2] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И., Третьяков Р.С. *Лазерные аддитивные технологии в машиностроении*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, 278 с.
- [3] Ramos J.A., Murphy J., Wood K., Bourell D.L., Beaman J.J. Surface roughness enhancement of indirect-SLS metal parts by laser surface polishing. *Konferenz-Einzelbericht: Solid Freeform Fabrication Proceedings, Proceedings of the SFF Symp.*, 2001, pp. 28–38.
- [4] Крансуцкая А.А., Лесниченко М.Р., Фунтиков В.А., Комшин А.С. Обеспечение аддитивных технологий в интересах развития промышленности. *Приборы*, 2022, № 10 (268), с. 39–44.
- [5] Johannes Preussner J., Oeser S., Pfeiffer W., Temmler A., Willenborg E. Microstructure and residual stresses of laser structured surfaces. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 996, pp. 1–7.