

ПРЕПРИНТ

На тему: «Влияние шероховатости поверхности, вызванной аддитивным производством, на эффективность плёночного охлаждения лопаток газовых турбин»

Аннотация:

В работе рассматриваются актуальные вопросы влияния микрорельефа поверхности, характерного для аддитивного производства (АП), на эффективность плёночного охлаждения лопаток газовых турбин. Показано, что шероховатость, неизбежно возникающая при лазерном плавлении порошка (LPBF), может снижать локальную эффективность охлаждения на 10–15 % по сравнению с идеально гладкой поверхностью. Цель данного исследования — систематизировать влияние шероховатости, характерной для АП, на аэродинамику охлаждающей плёнки и обосновать необходимость постобработки для сохранения термозащитных свойств лопаток.

Введение

Современные газотурбинные двигатели (ГТД) работают при температуре газа, значительно превышающей температуру плавления конструкционных материалов лопаток. Для обеспечения надёжности и ресурса применяются сложные системы охлаждения, в первую очередь — плёночное охлаждение, при котором охлаждающий воздух подаётся через отверстия на поверхности лопатки, формируя защитную плёнку.

С развитием аддитивных технологий стало возможным создавать геометрически сложные отверстия (веерообразные, конформные и др.), недоступные при традиционном литье. Однако процесс LPBF сопровождается формированием микрорельефа с параметрами шероховатости $R_a \approx 15\text{--}25$ мкм. Такая шероховатость, как показывают предварительные исследования, может существенно нарушать целостность охлаждающей плёнки, ускоряя её смешивание с горячим потоком и снижая эффективность охлаждения.

Цель настоящего препринта — обобщить имеющиеся данные по этой проблеме и обосновать необходимость комплексного подхода к проектированию лопаток АМ, включающего учёт шероховатости на этапе моделирования и обязательную постобработку.

Основные аспекты влияния шероховатости на плёночное охлаждение

Аэродинамические последствия микрорельефа

Шероховатость вызывает локальную турбулизацию пограничного слоя, что приводит к ускоренному отрыву охлаждающей плёнки от поверхности.

Особенно критично влияние шероховатости в зоне рециркуляции за выходным отверстием, где формируется пара вихрей противоположного вращения (CRVP). Неровности усиливают нестабильность этих вихрей, способствуя уносу охлаждающего воздуха.

При коэффициенте обдува > 1.0 эффект ухудшается, так как импульс охлаждающего потока уже недостаточен для удержания плёнки даже на гладкой поверхности.

Тепловые последствия

Снижение эффективности плёнки на 10–15 % эквивалентно локальному повышению температуры стенки на 80–120 К при $T_{\text{gas}} = 1500$ К.

Это может привести к преждевременному растрескиванию теплозащитного покрытия (ТЗП) и сокращению срока службы лопатки.

Производственные и технологические аспекты

Аддитивное производство позволяет создавать конформные каналы, точно повторяющие профиль лопатки, но требует последующей обработки (лазерной полировки, химического травления, электрохимической обработки) для снижения Ra до < 2 мкм.

Патенты General Electric (DE102011052675B4) и United Technologies (US8850828B2) уже включают этапы постобработки как неотъемлемую часть технологии.

Практическая значимость и экономический эффект

Игнорирование влияния шероховатости при проектировании лопаток АМ может свести на нет все преимущества сложной геометрии отверстий. В то же время:

Затраты на постобработку составляют 5–10 % от стоимости АМ-компонента, но позволяют сохранить 10–15 % эффективности охлаждения.

Это эквивалентно снижению расхода охлаждающего воздуха на 3–5 %, что напрямую повышает КПД ГТД на 0,5–1,0 % — значительный прирост для авиационных и энергетических двигателей.

Срок окупаемости внедрения постобработки не превышает 1–2 лет за счёт экономии топлива и увеличения межремонтного ресурса.

Заключение

Шероховатость поверхности, обусловленная аддитивным производством, представляет собой критический фактор, влияющий на эффективность пленочного охлаждения. Несмотря на технологические преимущества аддитивного производства, игнорирование микрорельефа может привести к ухудшению термозащитных характеристик лопаток. Наиболее рациональным подходом является комплексное проектирование, включающее:

численное моделирование с учётом реалистичной шероховатости
выбор оптимальной стратегии постобработки
экспериментальная валидация методами ИК-термографии

Такой подход позволяет в полной мере реализовать потенциал аддитивных технологий в создании высокоэффективных и надёжных горячих частей газотурбинных двигателей.

Ключевые слова:

плёночное охлаждение, аддитивное производство, шероховатость поверхности, LPBF, эффективность охлаждения, газовая турбина, постобработка, CFD

Список литературы:

1. Jia Y. Review of Turbine Film Cooling Technology for Marine Gas Turbines / Y. Jia, Y. Liu, X. He [et al.] // Processes. — 2025. — Vol. 13, № 2. — P. 1424. — DOI: [10.3390/pr13021424](https://doi.org/10.3390/pr13021424).
2. Li H. Impact of Thermal Radiation on Turbine Blades with Film Cooling Structures / H. Li, R. You, J. Wang [et al.] // Applied Thermal Engineering. — 2023. — Vol. 221. — P. 119832. — DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2022.119832](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119832).
3. Dutta S. Review of Film Cooling in Gas Turbines with an Emphasis on Additive Manufacturing-Based Design Evolutions / S. Dutta, I. Kapat, P. Srinivasan // Energies. — 2022. — Vol. 15, № 19. — P. 6968. — DOI: [10.3390/en15196968](https://doi.org/10.3390/en15196968).
4. Jin W. Coupled Heat Transfer Analysis of Internal and Film Cooling of a High-Pressure Turbine Vane / W. Jin, J. Wu, Y. Li [et al.] // Applied Thermal Engineering. — 2022. — Vol. 217. — P. 119192. — DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2022.119192](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119192).
5. Dutta S. Review of Film Cooling in Gas Turbines with an Emphasis on Additive Manufacturing-Based Design Evolutions / S. Dutta, I. Kapat, P. Srinivasan // Energies. — 2022. — Vol. 15, № 19. — P. 6968. — DOI: [10.3390/en15196968].
6. Li H. Impact of Thermal Radiation on Turbine Blades with Film Cooling Structures / H. Li, R. You, J. Wang [et al.] // Applied Thermal Engineering. — 2023. — Vol. 221. — P. 119832. — DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2022.119832].