

УДК 621.91

Технологические особенности обработки лопаток компрессора газотурбинных установок

Малькова Людмила Дмитриевна

ldm@bmstu.ru

SPIN-код: 6076-1615

Никитин Алексей Сергеевич(*)

nikitinas@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены особенности изготовления лопаток компрессора газотурбинной установки на стадиях механической и электро-химической обработок. Выявлены проблемные аспекты, связанные с необходимостью локализации производства лопаток для плановой и аварийной замены отработавших импортных изделий. Приведены направления работы исследователей, обеспечивающие заданное качество лопаток, включая размерную точность, качество поверхностного слоя и способы контроля готовых изделий. Сформулированы приоритетные задачи научной деятельности.

Ключевые слова: лопатка компрессора газотурбинной установки, механическая обработка, фрезерование сложнопрофильной поверхности, локализация производства

Technological features of processing compressor blades of gas turbine engines

Malkova Lyudmila Dmitrievna

ldm@bmstu.ru

SPIN-code: 6076-1615

Nikitin Alexey Sergeevich(*)

nikitinas@student.bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The features of manufacturing compressor blades of a gas turbine installation at the stages of mechanical and electro-chemical treatments are considered. Problematic aspects related to the need to localize the production of blades for the planned and emergency replacement of spent imported products have been identified. The directions of the researchers' work that ensure the specified quality of the blades, including dimensional accuracy, surface layer quality and methods of control of finished products, are given. The priority tasks of scientific activity are formulated.

Keywords: compressor blade of a gas turbine unit, mechanical processing, milling of a complex surface, localization of production

Введение. Лопатки компрессора газотурбинных установок (ГТУ) являются одним из наиболее ответственных элементов, определяющих аэродинамические характеристики, КПД и надежность двигателей. В условиях ужесточения требований к энергоэффективности, экологичности и долговечности энергетического оборудования совершенствование технологий производства

лопаток приобретает особую значимость. Современные ГТУ работают в экстремальных условиях — при высоких температурах, давлениях и механических нагрузках, что предъявляет повышенные требования к материалам, точности и качеству поверхности лопаток [1, 2].

Особую значимость приобретает механическая обработка, включая фрезерование, шлифование и финишные операции. Развитие станков с ЧПУ и автоматизированного контроля позволяет достичь высокой точности, однако выбор оптимальных методов обработки, режимов резания и инструмента остается актуальной задачей. Поэтому определение стратегии и параметров обработки, обеспечивающих максимальную производительность и качество при изготовлении лопаток из труднообрабатываемых сплавов, таких, например, как титановые сплавы ВТ6 и ВТ8, должно стать целью современных исследований.

В настоящее время основными заказчиками газотурбинного оборудования в РФ являются такие компании, как «Газпром», «Лукойл» и другие. Крупные энергетические корпорации широко используют установки компаний Siemens и General Electric. В связи с уходом этих производителей из России возникла острая проблема с обеспечением работоспособности действующих систем, т. к. лопатки газотурбинных установок подлежат регулярному обновлению после выработки установленного ресурса. Поскольку значительное количество импортных турбин продолжает эксплуатироваться на российских ТЭЦ и ГТЭС, появляется критическая зависимость от поставок зарубежных компонентов, что, в свою очередь, определяет необходимость локализации производства расходных составляющих. Поэтому основной целью предлагаемых исследований является обеспечение энергобезопасности страны и бесперебойной работы энергетической инфраструктуры за счет решения актуальной проблемы разработки и оптимизации отечественных аналогов лопаток, технологий их изготовления и восстановления.

Проблемы, возникающие при обработке лопаток компрессора ГТУ. Изготовление лопаток компрессора газотурбинных установок — сложный процесс, требующий высокой точности и учитывающий жесткие эксплуатационные требования. Основные трудности связаны с особенностями конструкции лопаток, свойствами применяемых материалов и необходимостью обеспечения стабильного качества в серийном производстве.

Лопатки имеют сложный аэродинамический профиль с переменной толщиной и кривизной, что требует применения высокоточного оборудования, специализированной технологической оснастки и режущих инструментов. Особую сложность представляет обработка маложестких участков, где даже незначительные усилия резания приводят к деформациям и вибрациям. Это ухудшает качество поверхности и вызывает отклонения от заданного профиля, снижая аэродинамические характеристики. Проблема усугубляется тем, что условия работы лопаток — высокие температуры и нагрузки, провоцируют локальные разрушения изделия в местах любых дефектов, что является причиной преждевременного выхода его из строя.

Ключевой проблемой в производстве компрессорных лопаток газотурбинных установок является низкая производительность процесса механической обработки. В настоящее время изготовление лопаток связано с большими объемами фрезерования. Длительная обработка приводит к росту затрат на оборудование, энергоресурсы и трудозатраты, снижая общую экономическую эффективность производства.

Титановые сплавы и нержавеющие стали (например, ВТ6, 12Х18Н10Т), используемые для лопаток, обладают высокой прочностью и термостойкостью, но отличаются низкой обрабатываемостью. Это приводит к интенсивному износу режущих инструментов и, как следствие, их частой замене (большому расходу). Кроме того, значительное тепловыделение при резании вызывает термические деформации заготовки и инструмента, что усложняет соблюдение требуемых размерных допусков.

Традиционные методы (фрезерование, шлифование) требуют многоступенчатой обработки, что увеличивает основное технологическое время обработки и сроки производства в целом. Высокая стоимость и расход режущих инструментов дополнительно повышают издержки. Особенно сложна обработка труднодоступных участков и сложнопрофильных поверхностей. В связи с этим актуальны поиск альтернативных методов обработки и автоматизация рабочих процессов.

Требования к геометрической точности лопаток, достигающие уровня десятков микрон, определяют требования к методам и средствам контроля. Наиболее распространенные координатно-измерительные машины не всегда обеспечивают оперативность подготовки результата. Особенно сложен контроль поверхности в труднодоступных зонах и оценка остаточных напряжений, влияющих на усталостную прочность. При этом в условиях импортозамещения критически важна полная взаимозаменяемость с оригинальными деталями компаний-производителей газотурбинных установок (Siemens, General Electric), что требует строгой повторяемости геометрических и физико-механических характеристик в серийном производстве.

Механическая и термическая обработка может вызывать нежелательные изменения структуры материала (зоны повышенной твердости, остаточные напряжения), что снижает коррозионную стойкость и усталостную прочность. Ремонт поврежденных лопаток (лазерная наплавка, термообработка) также сопряжен с трудностями восстановления исходных свойств материала.

Таким образом, обработка лопаток компрессора газотурбинных установок представляет собой комплексную технологическую задачу, решение которой требует учета множества взаимосвязанных факторов.

Перспективные пути решения проблем изготовления лопаток компрессора ГТУ. Производство лопаток компрессора газотурбинных установок требует и разработки эффективного технологического процесса с обеспечением высокоточной обработки и внедрения инновационных исследовательских решений. В условиях растущих требований к надежности и энергоэффективности оборудования особое значение приобретают технологии,

обеспечивающие качественный скачок в изготовлении этих критически важных деталей [3–5].

Один из ключевых способов повышения точности — использование многокоординатных станков с ЧПУ. Они позволяют выполнять фрезерование, шлифование и полирование с сохранением технологической базы, минимизируя погрешности. Управление пятью и более осями обеспечивает точное воспроизведение сложной аэродинамической геометрии лопатки. Современные системы ЧПУ с адаптивным управлением также компенсируют деформации заготовки, что особенно важно при работе с жаропрочными сплавами.

Особого внимания требует разработка и совершенствование стратегий обработки сложнопрофильных поверхностей лопаток, исследование влияния различных траекторий движения инструмента (радиальных, контурных, адаптивных) на точность обработки и уровень возникающих деформаций заготовки, а также влияние направления резания на формирование микрорельефа обрабатываемой поверхности.

Важным направлением является комплексная оптимизация выбора режущих инструментов для обработки коррозионностойких сплавов на основе анализа эффективности работы различных типов фрез (торцевых, концевых, сферических) и их геометрических параметров и используемых покрытий. Значительного внимания требует разработка рациональных режимов резания, т. е. определение оптимальных сочетаний скорости резания, подачи и глубины резания для различных материалов лопаток.

Для повышения производительности применяют инструменты из сверхтвердых материалов (СТМ), таких как поликристаллический алмаз (PCD) и кубический нитрид бора (CBN). Эти материалы обладают высокой термостойкостью и износостойкостью, позволяя вести обработку на повышенных скоростях без потери точности. Например, алмазный инструмент обеспечивает чистоту поверхности до $Ra\ 0,2$, сокращая необходимость в дополнительной финишной обработке.

Высокоточная штамповка, включая изотермическую и горячую штамповку в закрытых штампах, позволяет получать заготовки с минимальными припусками. Использование прецизионных штампов с контролем температуры и усилия деформации снижает внутренние напряжения и повышает стабильность геометрии.

Среди перспективных технологий выделяются электрохимическая (ЭХО) и электроэрозионная (ЭЭО) обработка. ЭХО обеспечивает высокую производительность при работе с труднообрабатываемыми сплавами, исключая механические нагрузки, что особенно важно для тонкостенных лопаток. ЭЭО, в свою очередь, позволяет создавать сложные внутренние полости и охлаждающие каналы с точностью до 5–10 мкм. Комбинация этих методов с традиционной механической обработкой значительно расширяет технологические возможности.

Перспективное направление — внедрение цифровых двойников, которые моделируют процессы обработки, прогнозируют деформации и оптимизиру-

ют режимы резания. Это сокращает количество брака и время настройки оборудования. Интеграция систем машинного зрения и искусственного интеллекта позволяет контролировать геометрию в реальном времени, обеспечивая стабильное качество продукции.

Отдельная задача — разработка эффективных методов ремонта. Существующие технологии (лазерная наплавка, термообработка) не всегда восстанавливают исходные характеристики материала, что ограничивает повторное использование дорогостоящих деталей. Создание новых методов ремонта, обеспечивающих полное восстановление свойств, могло бы дать значительный экономический эффект.

Современное производство лопаток компрессора ГТУ переживает этап качественного преобразования, связанного с интеграцией традиционных методов и цифровых технологий. Комплексный подход, включающий инновационную обработку, автоматизацию, совершенствование инструментальных материалов и систем контроля, открывает новые возможности для повышения эффективности. Дальнейшее развитие этого направления требует консолидации усилий исследователей и междисциплинарного сотрудничества, что укрепит позиции отечественного машиностроения на мировом рынке.

Список источников

- [1] Гецов Л.Б. *Материалы и прочность деталей газовых турбин*. Рыбинск, ИД Газотурбинные технологии, 2010, 611 с.
- [2] Зысин Л.В. *Парогазовые и газотурбинные тепловые электростанции*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехн. ун-та, 2010, 368 с.
- [3] Кожина С.М. *Повышение эффективности обработки маложестких поверхностей проточной части лопаток и моноколес ГТД концевыми фрезами*. Дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2019, 320 с.
- [4] Сыщиков Д.Н. *Оптимизация технологических процессов изготовления лопаток турбины ГТД по количеству деталей в партии, запускаемой в производство, и заданной трудоемкостью их изготовления*. Дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2017, 147 с.
- [5] Гузев Д.А., Соколов Г.В., Жидяев А.Н. Методика повышения точности фрезерования пера лопатки компрессора ГТД на станках с ЧПУ. *Технология машиностроения*, 2020, № 8, с. 12–19.