

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТУ.

Никитин Алексей Сергеевич

Аспирант 1 курса,

кафедра "Инструментальная техника и технологии"

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Л. Д. Малькова, Кандидат наук, Доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра "Инструментальная техника и технологии".

Процесс фрезерования лопаток газотурбинных установок (ГТУ) представляет собой сложную многофакторную задачу, от эффективности которой напрямую зависят производительность серийного производства и эксплуатационная надежность готовых изделий. Сложность обработки обусловлена использованием труднообрабатываемых материалов (коррозионностойкие и титановые сплавы), тонкостенной геометрией пера, а также высокими требованиями к точности профиля и качеству поверхностного слоя. В связи с этим возникает необходимость систематизации всех факторов, определяющих границы протекания процесса и возможности управления им.

В работе предложена классификация, разделяющая все множество факторов на две основные группы: лимитирующие, которые задают жесткие рамки и ограничения процесса, и регулирующие, которые позволяют управлять процессом в рамках этих ограничений. Лимитирующая группа формирует поле допустимых решений для технолога и включает конструкторские, технологические, производственные и физические ограничения. Конструкторские ограничения закладываются уже на этапе проектирования лопатки: тонкостенное перо, сложный аэродинамический профиль, жесткие допуски на размеры и низкая шероховатость ($Ra\ 0,4-0,8\ \mu\text{м}$) вынуждают применять многопроходные стратегии обработки. Технологические ограничения связаны с низкой жесткостью самой детали, вызывающей вибрации и упругие деформации под действием сил резания, что требует снижения режимов, а также с противоречием между высокими требованиями к шероховатости и риском прижогов и наклепа на тонкостенных участках. Производственные ограничения определяются возможностями оборудования — его динамической жесткостью, мощностью шпинделя, износом направляющих; недостаточный технический уровень станка не позволяет выдерживать допуски на тонкостенных элементах. Физические ограничения обусловлены неизбежными термомеханическими явлениями: значительное тепловыделение при обработке коррозионностойких сплавов с низкой теплопроводностью приводит к локальному разупрочнению, окислению и образованию микротрещин, что критически влияет на усталостную прочность лопатки.

Регулирующая группа факторов представляет собой инструменты управления процессом и охватывает режущий инструмент, заготовку, оснастку, станок и технологию. Выбор режущего инструмента для обработки титановых сплавов должен отдаваться мелкодисперсным твердосплавным фрезам, а наличие износостойких покрытий (TiAlN , AlCrN) повышает стойкость инструмента, хотя на финишных операциях от покрытий лучше отказаться, чтобы сохранить остроту режущей кромки. Применение составных фрез на черновых этапах экономически целесообразно, тогда как для чистовой обработки предпочтительнее цельный инструмент, обеспечивающий высокую точность. Заготовка определяет величину снимаемого припуска и схему базирования; после термообработки ее твердость возрастает до 32 HRC, что требует повышенной прочности режущей кромки и высокой жесткости технологической системы. Оснастка вносит погрешность в виде биения инструмента, поэтому для чистовых операций необходимы высокоточные цанги

(биение до 0,005 мм), а оснастка для закрепления заготовки должна обладать максимальной жесткостью для гашения вибраций и повторяемостью установки. Станочная система влияет на процесс через стабильность ЧПУ и тепловые деформации: программное сглаживание траектории предотвращает микроостановки инструмента, ухудшающие шероховатость, а системы термокомпенсации позволяют корректировать угловые и линейные смещения шпинделя, вызванные нагревом. Технология обработки включает проектирование маршрута с минимальным числом переустановок, выбор режимов резания и траекторий движения инструмента. Ключевым параметром является подача на зуб: ее увеличение вдвое повышает шероховатость в 1,5 раза и силу резания в 1,8 раза. При фрезеровании тонкостенного пера жесткость системы СПИД (станок— приспособление—инструмент—деталь) и стратегия обработки (строчная или спиральная) определяют величину деформации, которая не должна превышать допуск на изготовление.

Непосредственно процесс резания характеризуется сложным переплетением термомеханических и трибологических явлений. Из-за низкой теплопроводности обрабатываемых сплавов до 90% тепла концентрируется в инструменте, что стимулирует диффузионный износ и образование наростов на режущей кромке. Периодическое изменение площади среза вызывает автоколебания, поэтому для стабильности необходимо обеспечивать постоянство толщины срезаемой стружки. Высокие контактные напряжения и температуры активизируют адгезию и диффузию между материалом инструмента и заготовки, что ускоряет износ и может приводить к вырывам зерен на рабочем профиле лопатки. Интенсивная пластическая деформация при фрезеровании вызывает наклеп поверхностного слоя, делая его более хрупким и склонным к микротрещинообразованию.

Таким образом, эффективное фрезерование лопаток ГТУ возможно только при системном учете лимитирующих и регулирующих факторов. Лимитирующие факторы задают границы допустимых параметров, а регулирующие позволяют технологу управлять процессом в этих границах для достижения баланса между точностью, качеством поверхности и производительностью. Представленная классификация может служить теоретической основой для оптимизации технологических процессов и разработки методик назначения режимов резания в серийном производстве лопаток.

Литература

1. Пономарев Борис Борисович, Пайкин Дмитрий Борисович Выбор оптимальных параметров стратегий фрезерования поверхностей сложной формы // Вестник ИрГТУ. 2010. №6 (46). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-optimalnyh-parametrov-strategiy-frezerovaniya-poverhnostey-slozhnoy-formy> (дата обращения: 21.03.2026).
2. Крылов, И. В. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей ГТД на основе применения инструмента с покрытием : специальность 05.02.08 "Технология машиностроения" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Крылов Илья Владимирович. – Рыбинск, 2006. – 18 с. – EDN NJYXUF.
3. Полетаев В. А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей [Текст] / В. А. Полетаев. — М. : Машиностроение, 2006. — 255 с. : ил. — (Библиотека технолога). — ISBN 5-217-03340-1.