

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХ. И ФИЗ.-ТЕХН. ОБРАБОТКИ

УДК 621.9:621.4.002.2

Д. В. ЗИНОВЬЕВ, Л. Б. УВАРОВ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФРЕЗЕРОВАНИЯ
ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД
С ПРИЛОЖЕНИЕМ ВДОЛЬ ПЕРА РАСТЯГИВАЮЩЕЙ СИЛЫ**

Рассматриваются вопросы повышения эффективности механической обработки маложе- стких лопаток газотурбинных двигателей. Предложен метод снижения упругих дефор- маций заготовки при механической обработке. Исследуются особенности применения пред- ложенного метода на станках с ЧПУ. *Лопатки ГТД; фрезерование проточной части; уп- ругие деформации пера*

ВВЕДЕНИЕ

В производстве газотурбинных двигателей авиационного, энергетического, транспортного назначения для гражданской и военной сферы нередко встречаются так называемые маложе- сткие детали. Так, в частности, лопатки ГТД (рис. 1) следует относить к таким деталям.



Рис. 1. Разнообразие конструкций лопаток

Обработка фрезерованием (рис. 2) на се- гдняшний день – единственный приемлемый метод обработки лопаток первых ступеней ком- прессоров (в особенности лопаток с бандажны- ми полками) [1]. Однако в отношении техноло- гии многокоординатного фрезерования лопаток существует комплекс факторов, сдерживающих стремление устанавливать желаемые режимы обработки и отрицательно влияющий на каче- ство изготавливаемых деталей.

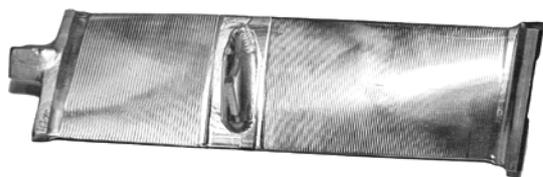


Рис. 2. Внешний вид фрезерованной лопатки

Во-первых, в производстве лопаток ком- прессора ГТД приходится сталкиваться с явле- нием размерной нестабильности (коробление или «поводки»). В производственных условиях, столкнувшись с размерной нестабильностью лопаток после фрезерования на станках с ЧПУ, часто прибегают к усредненной коррекции управляющей программы, что, по сути, соот- ветствует подналадке статической настройки оборудования, или увеличивают припуск на слесарно-полировальные операции. Во-вторых, особенностью лопаток как типа деталей являет- ся то, что они, как правило, не имеют развитых поверхностей для эффективной реализации принципа «шести точек», имеют такие кон- структорские базы, что зачастую проблематично следовать принципу «совмещения конструкторских, технологических и измерительных баз» с обеспечением достаточной жесткости и исключением при этом деформации закрепле- ния. При фрезеровании рабочих лопаток наи- более распространено закрепление за скосы хвостовика и поджим бобышки центром. В-третьих, также остро стоит вопрос о техноло- гическом обеспечении надежности технологи- ческих процессов и управлении стабильностью получения показателей качества при фрезеро- вании лопаток вследствие значительной дис- персии внешних возмущающих факторов (раз- брос по свойствам обрабатываемого и инстру- ментального материалов, точности заготовок, разброс распределения припуска по перу ло- патки, точность фрез, оснастки, оборудования и ряд других) и трудностей выявления превали- рующих из них.

Рассмотренные три основных блока особенностей технологических процессов механической обработки лопаток чрезвычайно рельефно проявляются при недостаточной жесткости технологической системы. В связи с этим исследование перемещений, совершаемых лопатками при взаимодействии с инструментом, и разработка метода повышения жесткости лопаток при обработке без ущерба производительности и качеству деталей, а также решение задач, сопряженных с данными вопросами, представляются на сегодняшний день весьма актуальными.

1. ФРЕЗЕРОВАНИЕ ЛОПАТОК ГТД В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТОЧНОЙ ЖЕСТКОСТИ ЗАГОТОВОК

Очевидно, трудно переоценить влияние упругих деформаций при обработке на качество изготовления, производительность и надежность технологического процесса. Причем можно утверждать, что суммарную жесткость системы СПИЗ будет определять именно лопатка как звено, обладающее наибольшей податливостью. Достижение требуемой точности и шероховатости лопаток зачастую затруднено из-за упругих деформаций заготовок. Причем под упругими деформациями понимаются как статические макроперемещения или отжимы, так и динамические, то есть вибрации.

В частности, отжимы в области кромок пера проявляются в виде утолщений в наиболее податливых местах детали. Другими словами, наблюдается неравномерный съем материала, что, в свою очередь, осложняет дальнейшую обработку (как при использовании шлифования, так при ручном полировании). Кроме того, в результате измерений отмечается эффект постепенного утолщения всего пера по длине в продольном направлении до определенного места (места максимальных прогибов), далее величина утолщения к торцу пера уменьшается.

Фрезерование лопаток зачастую сопровождается колебательными явлениями. Вибрации, происходящие при обработке, отрицательно сказываются на шероховатости поверхности лопаток. О ней можно судить по акустическим и тактильным (при касании элементов станка) ощущениям органов чувств, а также заметному ухудшению шероховатости. Последствия вибраций могут проявляться в виде глубоких волнообразных дроблений, когда рельеф поверхности включает в себя очень грубые места в форме борозд. В некоторых случаях последст-

вия вибраций могут привести к неисправимым дефектам деталей (рис. 3).

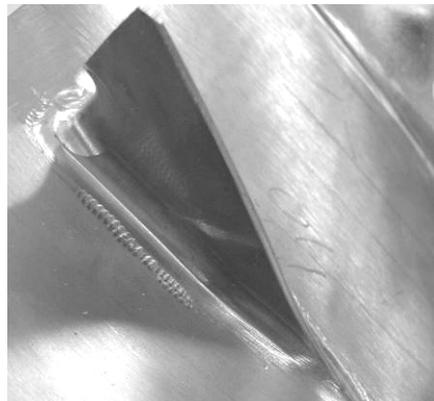


Рис. 3. Последствия вибраций при фрезеровании, вид после слесарно-полировальных работ

Доработка пера осуществляется, как правило, на слесарно-полировальных операциях, вручную. При этом значительно увеличивается трудоемкость изготовления, удлиняется цикл обработки, ухудшается управляемость технологическим процессом. Сокращение объемов ручной размерной полировки – важнейшая задача совершенствования технологии производства лопаток ГТД.

Зачастую при изучении перемещений в системе СПИЗ, где заготовкой является лопатка, статической жесткостью/податливостью остальных звеньев системы можно вполне пренебречь. В некоторых случаях жесткость лопаток находится в пределах $0,05 \dots 0,15 \cdot 10^7$ Н/м, что в 5–25 раз меньше жесткости инструмента вместе с инструментальной оснасткой, в 25–100 раз меньше жесткости приспособлений и в 50–200 раз меньше жесткости упругой системы станка. На основании данных открытой печати и производственного опыта можно констатировать отсутствие просто реализуемых решений, позволяющих добиться снижения величины упругих перемещений и размаха вибраций с целью достижения качества без ущерба производительности.

Известны различные способы снижения величины упругих перемещений и размаха вибраций при обработке различных деталей, в частности, лопаток. Это могут быть различные технические решения в области оснастки. Снижение величины упругих перемещений возможно также за счет снижения нагрузки, то есть силы резания. Однако эти способы не являются универсальными, а самое важное – все они так или иначе снижают производительность (либо за счет увеличения вспомога-

ного времени при применении дополнительной оснастки, либо за счет увеличения времени обработки из-за снижения режимов резания). Поэтому практически все они либо неприменимы в серийном технологическом процессе круговой фрезерной обработки лопаток по спиральной траектории, либо имеют незначительные возможности влиять на величины упругих деформаций и не всегда могут быть с успехом применены на практике.

В связи с ранее изложенным, предлагается фрезеровать лопатки с приложением растягивающей силы вдоль пера с целью повышения жесткости системы. Суть решения заключается в следующем. При установке в специальное станочное приспособление лопатка подвергается действию растягивающей силы, направленной вдоль пера и упруго ее деформирующей.

Бесспорно, существуют предпосылки для использования такого решения. Так, из прочностной динамики ГТД [2] известно, что на частоту собственных колебаний лопаток влияет центробежная сила от вращения ротора. Центробежная сила, стремящаяся вытянуть лопатку, изменяет напряженно-деформированное состояние лопатки. Поэтому частота собственных колебаний вращающейся лопатки становится выше, чем ее частота в неподвижном диске.

Из работ О. И. Драчева [3] известно о технологическом приеме токарной обработки маложестких деталей типа «вал», подвергнутых действию продольной растягивающей силы. При этом обоснованно утверждается, что с использованием данной схемы обработки увеличивается точность обработки без ущерба качеству деталей, а процесс резания протекает более стабильно (уровень вибраций снижается).

И действительно обратимся к ряду классических источников по теории упругости, прочности и устойчивости и строительной механике [4–5]. Так, из теории продольно-поперечного изгиба стержней известно, что изгиб исследуемого стержня (бруса) с приложением сжимающей силы увеличивается, а с приложением растягивающей уменьшается. При воздействии на стержень растягивающей силы он ведет себя подобно струне – чем больше растягивающая сила, тем трудней деформировать стержень в поперечном направлении и тем меньше размах вибраций (и выше частота собственных колебаний), создаваемых внешними возмущающими силами.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ЛОПАТОК В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗЕРАМИ

Поведение лопатки во время механической обработки обусловлено сложным, меняющимся со временем напряженно-деформированным состоянием, в котором она находится. Движущаяся поперек лопатки сосредоточенная нагрузка порождает изгибно-крутильные стесненные деформации лопатки. В процессе обработки толщина лопатки уменьшается, кроме того, при многокоординатном фрезеровании параметры резания непрерывно изменяются.

Прогибы лопатки от поперечной силы (вертикальной составляющей силы резания) определяются согласно зависимостям, выведенным на основе теории продольно-поперечного изгиба стержней [4–6] для случая, когда продольная сила растягивающая. Первый множитель в формуле отвечает за прогиб стержня от поперечной силы при данной схеме закрепления (один конец стержня заделан жестко, на другом – шарнирная опора), соответствующей реальному базированию лопатки. Вторым множителем учитывается влияние продольной растягивающей силы на величину деформации стержня.

$$f' = f \left(\frac{u - \operatorname{th} u}{\frac{1}{3}u^3} \right), \quad (1)$$

$$u = \sqrt{\frac{P_c l^2}{4EJ_\xi}}, \quad (2)$$

где f' – прогиб стержня с приложением растягивающей силы; f – прогиб стержня от поперечной силы; P_c – поперечная сила; l – длина стержня (высота пера лопатки); J_ξ – момент инерции поперечного сечения относительно главной оси ξ , параллельной хорде (J_ξ является минимальным моментом инерции сечения); E – модуль упругости материала лопатки, $\operatorname{th} u$ – тангенс гиперболический. Гиперболический тангенс есть отношение гиперболических синуса к косинусу:

$$(\operatorname{sh} u / \operatorname{ch} u) = (e^u - e^{-u} / e^u + e^{-u}).$$

Зависимость относительного максимального прогиба стержня (лопатки) от величины прикладываемой к торцу пера растягивающей силы приведена на рис. 4. Расчет производился для стержня с модулем упругости $E = 125$ ГПа (титановые сплавы), длиной $l = 300$ мм, моментом инерции J , соответствующим профилю пе-

ра шириной (хорда) $b = 66$ мм, с максимальной толщиной $C_{\max} = 4$ мм, стрелой прогиба $h = 3$ мм, при действии поперечной силы $P_c = 100$ Н. При нагрузке в 5000 Н (500 кгс) отмечается более чем двукратное уменьшение прогиба.

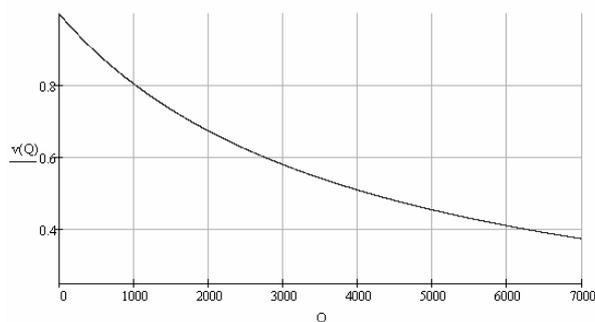


Рис. 4. Уменьшение изгибных деформаций стержня в зависимости от величины растягивающей силы

Момент инерции поперечного сечения является важнейшей характеристикой стержня, деформации которого исследуются. В данном случае используется формула для момента инерции профиля лопатки компрессора ГТД [3]:

$$J_{\xi} = 0,0405b C_{\max}^3 (1 + 0,88h^2/C_{\max}^2), \quad (3)$$

где b – хорда пера, C_{\max} – максимальная толщина профиля, h – стрела подъема средней линии профиля, характеризующая изогнутость.

Анализ напряженно-деформированного состояния проточной части лопатки при продольно-поперечном изгибе в САЕ-системах подтверждает результаты теоретических расчетов. Перемещения элементов лопатки исследовались при помощи конечно-элементного анализа. Использовались твердотельные модели с геометрией окончательно изготовленных лопаток. Определение деформаций лопаток методом конечных элементов является весьма точным, но имеет недостатки – малую универсальность и высокую трудоемкость.

Моделирование с привлечением метода конечных элементов НДС лопатки позволило также установить, что вследствие приложения вдоль пера лопатки растягивающих нагрузок происходит его деформация в сторону, противоположную естественной закрутке (рис. 5, для наглядности перемещения представлены в увеличенном масштабе, светло-серым цветом изображено исходное состояние).

Аналитически определить точную величину деформации лопатки при действии продольной растягивающей силы проблематично, так как

это требует учета нелинейности процесса, однако, обратившись к технической теории закрученных стержней [6], становится возможным приближенное математическое описание данного явления.

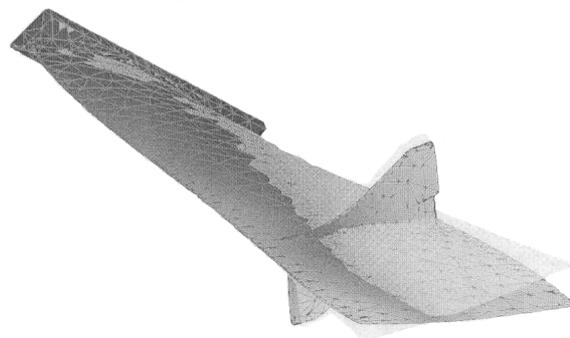


Рис. 5. Исследование НДС лопатки с помощью МКЭ при действии растягивающей силы

Напряжения, возникающие в закрученном стержне и стремящиеся его распрямить, изменяют начальную закрученность τ_0 .

$$\tau_0 = \frac{\alpha_i}{l}, \quad (4)$$

где α_i – угол закрутки стержня; l – длина стержня.

Так, для слабо закрученных стержней (например, лопаток):

$$\tau = -\frac{Q}{G \cdot F} \left(\frac{J_p}{T_0} - 1 \right) \tau_0, \quad (5)$$

где Q – растягивающая сила; G – модуль упругости на кручение; F – площадь поперечного сечения, $F = 0,693b C_{\max}$ [3]; J_p – полярный момент инерции поперечного сечения, $J_p = 0,0377b^3 C_{\max}^3$ [3]; T_0 – геометрическая жесткость профиля на кручение, $T_0 = 0,162b C_{\max}^3$ [3].

Как становится ясно из формул 4–5, величина деформации кручения пера в результате действия растягивающей силы зависит, прежде всего, от значения этой силы и начальной закрученности лопатки (угла закрутки и длины пера), а также от соотношения жесткостей на кручение и растяжение. Знак минус в формуле 5 указывает на направление крутильной деформации (против естественной закрутки).

В лабораторных условиях было экспериментально исследовано влияние продольной растягивающей силы на деформации лопаток от поперечных сосредоточенных нагрузок. Практические исследования качественно подтвердили результаты аналитического модели-

рования деформаций лопаток от поперечной силы с приложением растягивающей нагрузки.

С помощью динамометра и индикатора часового типа измерялась статическая жесткость окончательно обработанной лопатки в растянутом состоянии и в состоянии, когда центр поджимает бобышку. Анализ результатов измерений упругих деформаций лопаток позволяет сделать вывод о разнице в перемещениях от поперечной нагрузки, а следовательно, жесткости лопатки при различных схемах ее закрепления.

Максимальный прогиб в месте максимальной толщины профиля S_{\max} образуется в области 5–6-го сечений (область пера, находящаяся ниже антивибрационных полок) и с приложением растягивающей силы состоянии уменьшается в 1,8–2 раза по сравнению с традиционным закреплением. Деформация верхней части пера (над бандажными полками) уменьшается приблизительно в 6 раз. Деформации кромок с приложением растягивающей силы уменьшается в 1,2–1,5 раза в месте максимального прогиба, а на верхней части пера в 8,5 раз. Величина поперечной силы, перемещения от которой измерялись, составляла 50 и 100 Н (5 и 10 кгс).

Преследуя цель наиболее точного прогнозирования поведения лопатки во время конечного фрезерования аналитическими методами, следует учитывать ряд особенностей схематизации процесса деформации. Во-первых, перемещения элементов лопатки при воздействии сосредоточенной силы есть результат деформации изгиба и кручения (лишь при нахождении фрезы над осью лопатки можно пренебречь кручением). Во-вторых, обрабатываемую лопатку следует рассматривать как ступенчатый стержень (одна ступень – необработанная часть лопатки, другая – обработанная, при необходимости третья, моделирующая зону бандажных полок). В-третьих, площадь поперечных сечений (момент инерции) увеличивается от торца к корню пера. В-четвертых, необходимо учитывать влияние закрученности лопатки (суммарный угол закрутки пера) и изогнутости профиля при изгибе и кручении.

3. ПРИМЕНЕНИЕ РАСТЯГИВАЮЩЕЙ СИЛЫ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ЛОПАТОК НА СТАНКАХ С ЧПУ

В производственных условиях ОАО НПО «Сатурн» были проведены опытные работы по обработке проточной части лопаток опытного и серийного изделий. В первом случае обрабатывались статорные маложесткие лопатки средне-

го размера. Во втором случае с приложением вдоль пера растягивающей силы обрабатывались рабочие лопатки (материал – титановый сплав ВТ6) 1 ст. КНД ТРДД для истребителя СУ-35 на 5-координатном станке с синхронным вращением поворотных столов Stargaghecert НХ-251. При этом перо лопатки предварительно обрабатывается по спиральной траектории фрезой со сменными пластинками круглой формы, а окончательно – цельной твердосплавной конусной фрезой. Приложение растягивающей силы обеспечивалось специальной оснасткой (рис. 6). В первом случае использовалось приспособление рамочного типа. Во втором случае приспособление состояло из двух частей, а лопатка закреплялась за обработанные поверхности хвостовика типа «ласточкин хвост» и подвергалась растяжению за бобышку на торце пера.

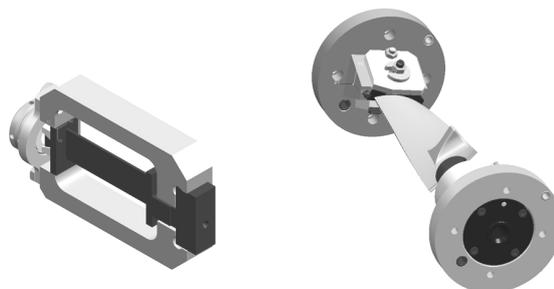


Рис. 6. Станочные приспособления для обработки лопаток с приложением растягивающей силы

Процесс фрезерования проходил устойчиво, признаков вибраций (посторонние звуки, шум, тряска элементов станка) не наблюдалось. После обработки был произведен осмотр режущего инструмента. Основные фрезы (с СМП круглой формы, цельные твердосплавные) показали более высокую стойкость, чем прежде. Это косвенно указывает на снижение интенсивности вибраций при обработке.

Измерение геометрии сечений лопаток после обработки показывает, что обработка с воздействием вдоль пера растягивающей силы положительно влияет на точность. Профили сечений лопаток, обработанных с приложением осевой растягивающей силы, имеют правильную форму в отличие от лопаток, обработанных обычным способом, имеющих утолщения в районе кромок пера. Профили сечений лопаток, обработанных с приложением вдоль пера растягивающей нагрузки, имеют меньший разброс отклонений, отклонения от сечения к сечению также минимальны.

Однако при измерении лопаток обнаружен разворот пера в сторону естественной закрутки сверх номинала, находящийся в допуске. Приложение растягивающей силы к сильно закрученному перу лопатки порождает внутренние напряжения, стремящиеся раскрутить лопатку. Лопатка, обработанная в подобном напряженном состоянии, после раскрепления деформируется, возвращаясь в исходное состояние. Величина разворота невелика (порядка 6–10 угловых минут) и может быть скомпенсирована коррекцией на станке с ЧПУ при условии стабилизации в определенном интервале за счет нормирования растягивающей силы.

Таким образом, можно утверждать, что фрезерование лопаток с приложением осевой растягивающей силы является резервом повышения производительности и качества обработки маложестких лопаток компрессора ГТД. При такой обработке можно достигнуть многократного повышения жесткости в наиболее податливых областях лопатки. Это означает появление возможности увеличить нагрузку на заготовку, то есть силу резания, что реализуется за счет существенного повышения режимов обработки (увеличения минутной подачи, ширины и глубины фрезерования). При этом лимитирующим фактором увеличения производительности становится прочность и износостойкость режущего инструмента, но не жесткость системы СПИЗ. Обработка с приложением растягивающей силы позволяет минимизировать влияние на точность обработки такого фактора, как упругие перемещения заготовки от силы резания. То есть становится возможным обработать лопатку с минимальным припуском под слесарно-полировальные операции и тем самым снизить долю ручного труда в изготовлении лопаток.

ВЫВОДЫ

1. Предложен технологический процесс фрезерования проточной части лопаток компрессора ГТД, внедрение которого в производство позволяет повысить точность изготовления рассматриваемых деталей, увеличить эффективность использования современного инструмента и оборудования, сократить объем ручного труда на финишных операциях.

2. Исследованы закономерности поведения лопаток при обработке с приложением вдоль пера растягивающей силы на теоретическом и практическом уровнях. Получены аналитические выражения, качественно подтверждаемые

численным моделированием с помощью МКЭ, экспериментами в лабораторных и производственных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Безъязычный, В. Ф.** Автоматизация технологии изготовления газотурбинных авиационных двигателей. Ч. 1 / В. Ф. Безъязычный, В. Н. Крылов, В. А. Полетаев и др. М.: Машиностроение, 2005. 556 с.
2. **Драчев, О. И.** Технология изготовления маложестких осесимметричных деталей / О. И. Драчев. М.: Политехника, 2005. 289 с.
3. **Динамика** авиационных газотурбинных двигателей / Под ред. И. А. Биргера, Б. Ф. Шорра. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
4. **Работнов, Ю. Н.** Механика деформируемого тела / Ю. Н. Работнов. М.: Наука, 1979, 744 с.: ил.
5. **Тимошенко, С. П.** Сопrotивление материалов. Т. 2. Более сложные вопросы теории и задачи / С. П. Тимошенко. М.: Наука, 1965.
6. Прочность, устойчивость, колебания. Т. 1 / Под общ. ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968. 381 с.

ОБ АВТОРАХ



Уваров Лев Борисович, проф. каф. технологии авиац. двигателей и общ. машиностроения РГАТА им. П. А. Соловьева. Дипл. инж.-мех. (РАТИ, 1971). Д-р техн. наук по технологии и оборуд. мех. и физ.-техн. обработки (РГАТА, 1998). Иссл. в обл. технологии электрохим. и мех. обработки лопаток ГТД.



Зиновьев Дмитрий Викторович, асп. той же каф. Дипл. спец.-инж. по технологии производства АД и ЭУ (РГАТА, 2007). Готовит дисс. в области обработки маложестких лопаток компрессора ГТД.