

М261788

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

КОТЕЛЬНИКОВ Арнольд Ильич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ
РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ЛОПАТОК СТАЦИОНАРНЫХ ТУРБИН
КРУГОВЫМ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ**

(05.02.08 — Технология машиностроения)

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище
им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —
кандидат технических наук, доцент Мамаев В. С.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Васильев Д. Т.,
кандидат технических наук, доцент Рождественский Л. А.

Ведущее предприятие — Ленинградский металлический за-
вод им. XXII съезда КПСС.

Автореферат разослан « » 1975 г.

Защита диссертации состоится « » 1975 г.
на заседании Совета факультета «Автоматизация и механизаци-
я производства» МВТУ им. Баумана по адресу: Москва,
107005, 2-я Бауманская ул.

Ваши отзы- веренные
печатью, про

С диссерт- ке МВТУ
им. Н. Э. Ба

Ученый с в Ю. А.
доктор те

М 261788

1261788

Планом девятой пятилетки предусмотрен ввод в действие новых мощностей электростанций на 65-67 млн квт, что обеспечивает в первую очередь развитие тяжелой индустрии - фундамента экономического могущества страны. Основной прирост производства электроэнергии идет за счет строительства тепловых и атомных электростанций, основой которых являются паровые и газовые турбины, мощность которых достигла 800 Мвт и продолжает быстро расти. Наиболее массовыми и ответственными деталями турбин, определяющими надежность их работы, являются лопатки, которые вследствие своих конструктивно-технологических особенностей (сложность форм, малая жесткость, высокая точность, применение дорогих и дефицитных материалов) занимают особое место среди деталей турбин.

Основные трудности при обработке лопаток представляет получение формы и размеров профильной части, окончательная обработка которых в настоящее время производится в основном вручную. Одной из главных причин такого положения является малая точность предварительной обработки профиля. В связи с созданием централизованного производства лопаток и внедрением принципиально новых методов их обработки вопросы разработки регламентированных технологических процессов, обеспечивающих изготовление качественной продукции при обеспечении высокой точности, производительности и достаточно низкой себестоимости приобретают особо важное значение.

Наиболее перспективным методом предварительной механической обработки профиля, обеспечивающим решение указанных задач, является метод кругового фрезерования. Однако этот метод в настоящее время недостаточно освоен и изучен. В связи с этим в данной работе поставлена цель исследовать точность обработки рабочей части крупных лопаток турбин круговым фрезерованием.

При проведении исследований теоретически проанализирована схема метода обработки, определены действующие факторы, влияющие на точность. Произведена статистическая оценка точности кругового фрезерования. Путем экспериментальных и теоретических исследований найдены основные зависимости для определения первичных погрешностей обработки и проведено их суммирование. При исследованиях использовались современные контрольно-измерительные



приспособления применяемые на производстве, проектор профилей итальянской фирмы "Микротехника", инструментальные микроскопы, профилограф-профилометр модели "Калибр-202", а также тензотрические и другие устройства и приспособления созданные для исследований. При обработке результатов измерений использовалась ЭЦМ "Минск-2".

Данные, полученные в результате проведенной работы являются новым материалом по точности кругового фрезерования, полученным путем применения теоретических основ технологии машиностроения к решению практических задач. Они являются нормативными и служат основой для разработки отраслевых ГТМ.

Материалы диссертации докладывались на научных семинарах кафедры "Технология механосборочного производства МВТУ им. Баумана и отражены в статьях.

Работа выполнена в объеме 191 страницы, в том числе 101 рисунок и 104 наименования литературных источников.

В первой главе работы дана общая характеристика современного состояния лопаточного производства и методов обработки крупных лопаток. Производство лопаток характеризуется большой трудоемкостью, которая составляет от 30 до 60% общей трудоемкости изготовления турбины. Рост единичной мощности турбин обуславливает значительное увеличение количества крупных лопаток, механическая обработка которых особенно трудна. Средний коэффициент использования металла при производстве лопаток 0,18-0,25, а для всей турбины он составляет 0,5-0,62. В общей трудоемкости обработки лопаток 70-90% занимают операции обработки профиля и финишной обработки. Сложность обработки профильной части крупных лопаток вызывается тем, что они при длине рабочей части более 1000 мм и ширине свыше 100 мм имеют максимальную толщину профиля в головной части около 3 мм, причем допуски на профиль рабочей части составляют около 0,1 мм, а угол закрутки головного сечения относительно хвостового свыше 70°. Кроме того, поверхности профиля имеют сложную криволинейную форму и шероховатость поверхности не ниже 8-го класса. Большие припуски на обработку, составляющие до 10-12 мм на сторону дополнительно увеличивают трудоемкость обработки лопаток.

Наиболее сложным вопросом при обработке лопаток ввиду ука-

занных особенностей является получение заданной точности обработки. В мировой практике изготовления лопаток в настоящее время применяются раздельный а также круговой методы обработки профиля рабочей части крупных лопаток. При раздельной обработке внутренний и наружный профиль обрабатывается на разных операциях и, как правило, различными методами, например, внутренний - на строгальных, а наружный - на фрезерных станках. Односторонняя обработка приводит к короблению лопаток, а переустановка их для обработки на разных станках вносит дополнительные погрешности. При круговой схеме лопатка закрепляется в двух синхронно вращающихся приводах за хвостовую и головную части и обрабатывается поперечными строчками. Полная обработка профиля происходит за одну установку. Благодаря этому уменьшается коробление, повышается точность обработки и снижается припуск на окончательную обработку и создаются условия для механизированной финишной обработки. В связи с указанными достоинствами станки данного типа, несмотря на относительно более высокую стоимость, все шире внедряются на турбостроительных заводах.

Для осуществления указанной выше цели были поставлены следующие задачи:

1. Оценить точность обработки рабочей части лопаток круговым фрезерованием методами статистического анализа.

2. Определить экспериментальным и расчетно-аналитическим путем первичные погрешности, возникающие при обработке профиля лопаток.

3. Обосновать точность обработки и выявить возможности ее повышения.

Статистические и экспериментальные исследования проводились в технологической лаборатории и экспериментальном цехе Ленинградского завода турбинных лопаток, цехе механической обработки лопаток Ленинградского металлического завода и в лаборатории кафедры технологии механосборочного производства МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Во второй главе проводится анализ точности метода кругового фрезерования. Для кругового фрезерования суммарная погрешность обработки может быть представлена следующей зависимостью:

$$\Delta = f(\Delta_y, \varepsilon, \Delta_n, \Delta_u, \Delta_{ик}, \Delta_T, \Sigma \Delta_{\phi}, \Delta_{он}, \Delta_k, \Delta_{ек}, \Delta_{сл}),$$

где Δ_y – погрешность, вызываемая упругими деформациями технологической системы; ε – погрешность установки заготовки в приспособление; Δ_n – погрешность настройки станка; Δ_u – погрешность, вызываемая неравным износом инструмента; $\Delta_{ик}$ – погрешность изготовления и заточки комплекта инструмента для многшпиндельных станков; $\Sigma \Delta_{\phi}$ – суммарная погрешность формы вследствие геометрических неточностей станка и неравномерной жесткости технологической системы; Δ_T – погрешность, вызываемая тепловыми деформациями технологической системы; $\Delta_{он}$ – погрешность, вызываемая остаточными напряжениями, возникающими в процессе получения заготовок, термической и механической их обработки; Δ_k – погрешность изготовления копиров; $\Delta_{ек}$ – погрешность установки и закрепления копира; $\Delta_{сл}$ – погрешности следящей копировальной системы.

При обработке крупных лопаток на величину погрешности Δ_y наибольшее влияние оказывает жесткость лопатки, которая вследствие сложной геометрической формы профиля изменяется на различных участках по длине лопатки от 250 до 4000 кгс/мм (для лопатки 29 ступени турбины К-300-240). Колебания размеров заготовок и перераспределение припуска из-за погрешностей установки и неточностей обработки базовых поверхностей приводят при обработке к изменению глубины резания и действующих сил, в результате чего появляются погрешности размеров и формы в продольном и поперечном направлениях. Максимальная величина этой погрешности будет в сечениях, расположенных примерно посередине между опорами лопатки. Так, для той же лопатки после обработки внутреннего профиля при приложении силы 40 кгс, что соответствует случаю обработки с глубиной резания 4 мм, деформация в сечении между опорами составляет 0,1–0,14 мм. Кроме того, при круговом фрезеровании имеет место значительное изменение углов контакта инструмента с заготовкой и линейных скоростей точек обрабатываемого профиля, что вызывает изменение сил резания при обходе фрезой контура сечения и является причиной погрешностей формы профиля.

Погрешность ε при круговом фрезеровании лопаток зависит не только от взаимного смещения установочной и измерительной баз, но и от погрешностей формы и взаимного расположения установочных

поверхностей, так как лопатки устанавливаются не на одну поверхность, а на комплекс поверхностей хвоста и бобышки. Однако из-за того, что обработка двусторонняя, погрешность установки не оказывает влияния на размеры профиля поперечного сечения, а вызывает только погрешности взаимного расположения поверхностей профиля относительно базовых поверхностей. Точность размеров профиля определяется только настроечным размером и положением осей вращения заготовок. Погрешность настройки Δ_n , погрешности вследствие неточностей изготовления режущего инструмента и его размерного износа $\Delta_{и}$ и $\Delta_{ик}$, а также вследствие геометрических неточностей станков $\Sigma \Delta_{\phi}$ при обработке на станках данного типа ввиду их кинематической сложности, большого времени обработки крупных лопаток и многшпиндельной компоновки станков оказывают значительное влияние на точность. Погрешность вследствие тепловых деформаций технологической системы Δ_T вследствие хорошего отвода стружки, очень малой площади контакта инструмента с заготовкой при большой площади поверхности заготовки мала. Большую величину имеет погрешность вследствие тепловых деформаций фрезерных оправок. Но так как обработка ведется методом пробного прохода, продолжительность которого составляет 20-25 мин, то инструмент и оправки приходят в состояние теплового баланса уже в период настройки станка и в дальнейшем это влияние не сказывается на точности обработки. Погрешности вследствие влияния остаточных напряжений Δ_{σ} вызывают коробление лопаток, наибольшая величина которого наблюдается при черновом строгании профиля, черновом фрезеровании и шлифовании наружного профиля. Общая величина коробления 4-6 мм. При круговом фрезеровании поперечными строчками величина коробления значительно снижается и поэтому при той же точности изготовления заготовок припуск на обработку может быть значительно снижен. Погрешность связанная с неточностью изготовления копира Δ_K определяется исходя из допусков на его изготовление. Погрешность установки и закрепления копира $\Delta_{\epsilon K}$ влияет аналогично погрешности установки детали, однако эти неточности, как и погрешности следующей системы $\Delta_{\epsilon L}$ передаются на все позиции станка.

Оценка суммарной погрешности обработки проводилась путем статистического анализа. Определялась точность выполнения раз-

меров максимальной толщины профиля $S_{\max}$ и толщины выходной кромки $\delta_{\text{вых}}$ по всем расчетным сечениям у партии из 50 лопаток 29 ступени и такой же партии лопаток 39 ступени турбины К-300-240, которые обрабатывались на двух станках СТ-215 при скорости резания 31,4 м/мин., строчечной подаче 1,6 мм на оборот заготовки, круговой подаче 0,2 мм на зуб при охлаждении сульфидрезолом. Измерения производились при помощи приспособлений шаблонного типа и индикаторных скоб и на проекторе профилей итальянской фирмы "Микротехника". Обработка результатов измерений производилась на ЭЦМ "Минск-2". Ниже приведены статистические характеристики размеров профиля поперечного сечения лопатки 39 ступени для трех сечений.

сечение лопатки	Размеры профиля лопатки									
	$S_{\max}$					$\delta_{\text{вых}}$				
	δ	$\delta_{\text{в}}$	x_n	$\bar{x}$	x_{δ}	δ	$\delta_{\text{в}}$	x_n	$\bar{x}$	x_{δ}
хвостовое	0,17	0,20	-0,65	0,51	-0,37	0,12	0,14	0,02	0,02	0,02
среднее	0,18	0,21	0,05	0,07	0,09	0,14	0,14	0,17	0,10	0,08
головное	0,17	0,20	-0,04	-0,03	-0,02	0,12	0,14	0,19	0,15	0,11

Значения верхней и нижней границ $\bar{x}$ и верхней границы δ получены при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$. На основе этих данных показывается, что величина поля рассеивания в 2-3 раза шире поля технологического допуска, т.е. заданная точность обработки не выдерживается. При обработке данных замеров заготовок поля рассеивания также шире заданных полей допусков. Расчетная величина коэффициента уменьшения погрешностей $K_y = \Delta_{\text{дет}} / \Delta_{\text{заг}}$ значительно меньше фактической. Это говорит о том, что при данных условиях не может быть достигнута заданная точность обработки.

Обработка результатов измерений размеров заготовок после штамповки и после кругового фрезерования показали наличие между этими размерами тесной прямолинейной корреляционной связи ($r \approx 0,9$), что говорит о значимости влияния отклонений размеров заготовок на размеры обрабатываемой детали. Следовательно, повышая точность заготовок можно добиться значительного повышения точности последующей механической обработки.

В третьей главе исследуется влияние на точность обработки профиля лопаток неточностей изготовления режущего инструмента и его геометрии, а также образование шероховатости

поверхности при круговом фрезеровании в зависимости от геометрии заготовки и инструмента с целью изыскания возможностей ее уменьшения. С этой целью проводился анализ технических требований на изготовление фрез путем расчета размерных цепей, контроль точности и качества заточки и характера износа с помощью специального приспособления. По данным измерений определялась величина ΔH , характеризующая разность размеров зубьев заточенных фрез. Определение шероховатости производилось с помощью профилографа-профилометра "Калибр-202", а углов наклона образующих профиля χ к продольной оси с помощью специального приспособления.

Погрешности из-за неточностей изготовления инструмента имеют существенное значение в связи с тем, что станки для кругового фрезерования имеют многопозиционную компоновку. В условиях централизованного производства, при котором предусмотрена предварительная механическая обработка на таких станках, потребуется обеспечить высокое качество изготовления и заточки большого количества фрез. Установлено влияние на точность профиля формы и размеров отдельных элементов инструмента и базирования фрез, а также влияние технологии их заточки. При определении точности заточки проводились измерения нескольких комплектов фрез, применяемых на станке 5Т-215. Установлено, что разность высот отдельных зубьев превышает 200 мкм. Эти погрешности вместе с биением фрез вызывают периодические погрешности формы в поперечном сечении.

Велика также разность размеров калибрующих конусов фрез комплекта, что вызывает рассеивание размеров лопаток на разных позициях станка. При настройке станка без учета разницы в размерах инструмента может быть получен брак. Кроме того, влияние изменения размеров фрез при заточке сказывается в том, что с увеличением ее увеличивается разность размеров калибрующих конусов фрез и копирного ролика, что вызывает необходимость перемещения последнего для корректирования настроечного размера. В результате происходит смещение центровд копирного ролика и фрез из-за чего искажаются форма и размеры поперечного сечения лопаток. Изучение качества заточки режущих кромок производилось путем визуального наблюдения и фотографирования зубьев фрез после заточки и после обработки профиля лопаток.

Установлено, что имеют место мелкие дефекты заточки: сколы, неровности и округление режущих кромок, неполная обработка. Это приводит к повышенному износу таких зубьев, в результате чего при переточках приходится снимать больше металла на всех фрезях комплекта. Это уменьшает количество возможных переточек и увеличивает затраты на инструмент. Износ по задней грани протекает неравномерно. Наибольшая его величина наблюдается в месте перехода от заборных к торцовым кромкам. По направлению к калибрующей кромке она постепенно уменьшается и остается примерно одинаковой по всей ее длине. При этом наблюдается округление режущих кромок, а в местах перехода от торцовых к заборным кромкам, кроме того, имеет место пластическая деформация зубьев.

На образование шероховатости при круговом фрезеровании существенное влияние оказывает кинематика резания. При обработке применяют либо фрезы с заточкой режущей части в виде заборного и калибрующего конусов, либо фрезы, заточенные по дуге окружности. Если заточка произведена по первому варианту, то на образование остаточных гребешков после обработки оказывает особенно сильное влияние геометрия профильной части лопатки, так как на различных ее участках различны углы наклона продольных образующих профиля к оси лопатки, в то время как образующая конуса калибрующей части фрезы параллельна продольной оси лопатки. Тогда высота остаточных гребешков выразится зависимостью:

$$h = S_{\text{стр}} (1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{ctg} \varphi) \cdot \sin \gamma,$$

где h — высота остаточных гребешков; $S_{\text{стр}}$ — строчечная подача в мм на оборот заготовки; γ — угол наклона продольных образующих профиля к оси лопатки; φ — угол наклона образующих конуса заборной части фрезы к продольной оси лопатки. Для расчета по приведенной формуле были определены расчетом и с помощью специального приспособления углы наклона γ продольных образующих профиля к оси лопатки. Установлено, что при данной схеме обработки и геометрии инструмента уменьшение шероховатости может быть достигнуто только за счет уменьшения строчечной подачи, что снижает производительность. Из-за различных углов имеет место неравномерная высота остаточных гребешков в продольном и поперечном направлениях, что может быть причиной образования погрешностей формы в случае последующей обработки ленточным шлифованием. Если режущая часть фрезы заточена по дуге окружности, то при радиусе более 4 мм, при строчечной подаче до 3 мм на оборот

высота остаточных гребешков уменьшается в 1,1-1,3 раза. При этом изменение углов наклона образующих к оси лопатки почти не сказывается на высоте остаточных гребешков.

В четвертой главе рассматривается влияние на точность обработки профиля лопаток размерного износа инструмента. Измерения величины размерного износа в производственных условиях производились с помощью тех же методов и приспособлений, что и при исследовании точности заточки. Измерения производились по-комплектно. Исследования проводились при скорости резания 26 м/мин., глубине резания 6-10 мм, строчечной подаче 1,6 мм на оборот заготовки и круговой подаче 1 об/мин., подаче на зуб 0,2 мм при охлаждении сульфидрезолом. Установлено, что некоторые фрезы и комплекты фрез изнашиваются значительно меньше других, что объясняется разным качеством заточки и термообработки, разницей в величине снимаемого припуска и твердости материала заготовок и фрез. Неравномерность износа фрез приводит к рассеиванию размеров обрабатываемых заготовок на различных позициях.

Для уменьшения неравномерности износа фрез в комплекте необходимо весь технологический процесс изготовления инструмента, начиная с получения заготовок строить с учетом прохождения всех операций механической и термической обработки комплектами, по числу шпинделей применяемого станка. При этом режимы механической и термической обработки должны быть строго регламентированы, что не всегда соблюдается, несмотря на то, что в чертежах имеются соответствующие требования. Так не выдерживаются заданные чертежом твердость и балл карбидной неоднородности (на 2-3 балла). Эмпирическая кривая распределения величин размерного износа зубьев близка к кривой полунормального закона. При этом поле рассеивания величин размерного износа достигает 135 мкм и погрешности размеров профиля поперечного сечения составляет 270 мкм или более половины межоперационного допуска.

Для поверхностей сложной формы, когда определить путь инструмента в металле довольно сложно, целесообразно определять износ в зависимости от площади обработанной поверхности. Получены зависимости для приближенного определения площади обработанной поверхности. Однако при определении износа в зависимости от площади следует иметь в виду, что при колебаниях величины припуска она почти не изменяется, в отличие от пути резания. Поэтому

оценку износа в зависимости от площади поверхности следует использовать в тех случаях, когда припуски невелики. Путь резания на участке внутреннего профиля одного радиуса

$$l_{вн} = \frac{R_{инс} \cdot R_{вн} \cdot \varphi_{вн}}{S_2} \left[\pi - \arccos \cos \frac{(R_{вн} - R_{инс})^2 + R_{инс}^2 - (R_{вн} - t)^2}{2(R_{вн} - R_{инс})R_{инс}} \right],$$

где $R_{инс}$ — радиус инструмента; $R_{вн}$ — радиус участка профиля сечения лопатки; t — глубина резания; S_2 — подача на зуб. Подобным образом определяется путь резания на участке радиуса наружного профиля. Длина пути резания при обходе всего периметра поперечного сечения определяется как сумма этих длин по всем его участкам. Полная длина пути резания определится с учетом строчечной подачи и длины обработки.

При исследовании влияния на величину относительного износа режимов резания проводились опыты на образцах из сталей IX1ПФ и 2Х13Ш. Фрезерование выполнялось однозубой фрезой. Определение величин размерного износа производилось методом ускоренных стойкостных испытаний. Выявлялось влияние на величину размерного износа скорости резания, подачи на зуб, глубины резания, строчечной подачи. Обработка производилась попутным фрезерованием. Критерий затупления был принят равным 50 мкм. Скорость резания изменялась от 20 до 50 м/мин., подача на зуб от 0,15 до 0,4 мм, глубина резания от 1 до 5 мм и строчечная подача от 1 до 3 мм. Измерение величин размерного износа производилось с помощью специального приспособления. Силы резания измерялись при помощи комплекта тензометрической аппаратуры, включающей динамометрический стол конструкции МВТУ, блок питания, осциллограф Н-700, фильтр и усилитель УТ-4. Образцы вырезались из хвостовиков лопаток.

Деформация от возрастания сил резания определялась как разность ее деформаций под действием сил резания, действующей в данном сечении и сил резания в самом начале обработки, т.е. острым инструментом. Силы резания при затуплении инструмента в допустимых пределах возрастают в 1,5–3 раза. В результате исследования получены данные по величинам размерного износа и обобщенные зависимости стойкости от режимов резания при круговом фрезеровании, которые могут быть использованы при разработке технологических процессов. Получены графики зависимости составляющих сил резания от затупления фрез по задней грани и рассчи-

таны вызываемые ими деформации лопаток.

В п я т о й главе приводится анализ влияния на точность обработки профиля погрешностей установки инструмента на размер и геометрических неточностей станков. Станки для кругового фрезерования работают на полуавтоматическом цикле, однако установка инструмента на размер производится по методу пробного прохода. При установке инструмента на размер для достижения заданной точности измеряют размеры максимальной толщины профиля $S_{\max}$ и толщины выходной кромки $W_{\text{вых}}$. При этом отклонения расположения калибрующих конусов всех фрез и копирного ролика в горизонтальной плоскости как и в вертикальной должны быть минимальны, так как при смещениях фрез относительно копирного ролика происходит смещение их центроид относительно друг друга и кроме отклонений размеров профиля поперечного сечения возникает также искажение формы профиля поперечного сечения.

Данная погрешность при круговом фрезеровании включает погрешность измерения при настройке и погрешность регулирования положения копирного ролика относительно фрез $\Delta_{\text{рег}}$. Погрешность установки инструмента на размер $\Delta_{\text{н}}$ определялась путем измерений размеров $S_{\max}$ и $W_{\text{вых}}$ партии из 50 лопаток (по десять штук с каждого шпинделя), а погрешность измерения $\Delta_{\text{изм}}$ путем многократных измерений тех же размеров у одной лопатки. При исследовании погрешности регулирования производилось многократное перемещение копирного ролика в вертикальном направлении и возвращение в прежнее положение с установкой того же деления лимба.

Статистическая оценка погрешности показала, что закон распределения близок к нормальному, кривая распределения имеет некоторую асимметрию в сторону увеличения размеров $S_{\max}$ и $W_{\text{вых}}$. Это объясняется тем, что рабочий при установке инструмента на размер стремится держаться ближе к верхнему предельному размеру. Значения среднеквадратических отклонений для $S_{\max}$ 0,1 мм, для $W_{\text{вых}}$ 0,043 мм. Для $\Delta_{\text{рег}}$ погрешность сопоставима с ценой деления лимба вертикального перемещения копирного ролика. На величину погрешности измерения оказывают влияние факторы, связанные с несовершенством измерительных средств, формой профиля и способа задания размеров профиля поперечного сечения лопаток: погрешность установки скобы по нормали к профилю, неточность из-за смещения скобы в направле-

ний продольной оси лопатки и перекося ее в этом направлении, неточности из-за влияния шероховатости обработанной поверхности, неопределенность места измерения, неточности из-за различной силы прижатия измерительного стержня скобы к лопатке. Статистический анализ погрешности измерения показал, что имеет место отклонение от нормального закона, что говорит о нестабильности замеров. Рассеивание размеров в одном сечении при измерении разными контрролерами достигают 0,2 мм при цене деления индикатора скобы 0,01 мм. Для уменьшения этой погрешности разработана конструкция скобы для измерения размера $b_{\text{в.к.}}$ у которой наконечник индикатора всегда располагается на расстоянии от выходной кромки, равном ее радиусу, обеспечивающая стабильную точность замеров в пределах 0,02–0,03 мм. Это дает возможность снизить погрешность установки инструмента на размер в 2–5 раз. При исследовании влияния геометрических неточностей, выявлено, что наибольшее влияние на точность профиля оказывают погрешности взаимного расположения фрезерных шпинделей и приводов лопаток в вертикальной плоскости, которые непосредственно влияют на размеры профиля лопаток. Неточности взаимного расположения фрезерных шпинделей в горизонтальной плоскости также оказывают значительное влияние на точность размеров профиля поперечного сечения. Величина погрешности в этом случае зависит от величины смещения δ оси лопатки относительно оси фрезы и углов α между вертикалью и нормалью к профилю в точке касания инструмента с заготовкой, а также расстояния входной и выходной кромок от продольной оси лопатки. При повороте копира вокруг продольной оси изменяются углы давления копируемого ролика на копир. Эти углы достигают наибольшего значения на кромках, в результате чего копировальная система вносит на этих участках профиля наибольшие погрешности. Максимальные величины погрешностей размеров профиля от всех рассмотренных геометрических неточностей имеют место на кромках и достигают величин $\sim 0,2$ мм.

В шестой главе рассматривается вопрос суммирования погрешностей обработки на основе проведенных исследований, а также приводится расчет экономической эффективности. Для расчета суммарной погрешности получена зависимость вида:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_y^2 + \Delta_n^2 + 3\Delta_u^2 + \Delta_{uk}^2 + \sum \Delta_f^2 + \Delta_k^2 + 3\Delta_{cl}^2}$$

Результаты, полученные аналитическим методом дают возможность производить достаточно достоверные точностные расчеты на стадии проектирования технологических процессов.

На основе проведенных исследований приводятся данные для корректировки размеров копиров с учетом размерного износа и изменения упругих откатов при возрастании сил резания с износом инструмента, а также коробления лопаток.

В данной главе выявляются также пути получения экономической эффективности. Наибольший эффект дает уменьшение припуска за счет меньшего коробления лопаток, а также уменьшение числа операций в технологическом процессе. Расчеты показали, что может быть получена экономическая эффективность около 100 тыс.руб. в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Статистический анализ точности кругового фрезерования в сравнении с методами раздельной обработки показал, что точность его выше в 1,2-1,5 раза за счет самого метода, совмещения ряда переходов, уменьшения влияния остаточных напряжений и др. Вместе с тем современное состояние производства и при применении метода кругового фрезерования не обеспечивает получение заданной точности и погрешности выдерживаемых размеров превышают заданные в 2-3 раза. Вследствие этого увеличивается объем ручных доводочных работ, возникают погрешности формы профиля и ухудшается качество поверхностного слоя лопаток.

2. На основе аналитических и экспериментальных исследований первичных погрешностей выявлено, что величины отдельных погрешностей сопоставимы с величиной технологического межоперационного допуска, а некоторые превышают ее. При этом установлена доля отдельных погрешностей в общей погрешности. Так Δ_y составляет 20-30%, $\Delta_{\text{ш}}$ 25-28%, $\Delta_{\text{ш}}$ 9-14%, $\Delta_{\text{шк}}$ 10-15%, $\Sigma \Delta_{\text{ф}}$ 17-22%, $\Delta_{\text{к}}$ 5-8%, $\Delta_{\text{сл}}$ 4-7%.

3. Установлено, что причинами таких больших значений отдельных погрешностей являются неравномерность и большая величина припуска, неравномерная жесткость лопаток по отдельным сечениям, несовершенство конструкции лонетов, неточности измерений, значительные отклонения размеров фрез в комплекте, сравнительно большие величины некоторых геометрических неточностей станка и др.

4. Для повышения точности обработки рекомендуются следующие мероприятия:

а) повышение точности заготовок. Коэффициент корреляции

размеров заготовок после штамповки и после фрезерования составил $2 \pm 0,9$;

б) повышение точности комплекта фрез устанавливаемых на все рабочие позиции станка путем совершенствования технологии их изготовления, в том числе применения специальных заточных полуавтоматов;

в) корректировка размеров копиров в продольном и поперечном направлениях;

г) уменьшение погрешности установки инструмента на размер путем повышения точности измерения при настройке и корректирования размеров лопаток на отдельных позициях;

5. Данные, полученные на основе статистических и расчетно-аналитических исследований являются нормативным материалом и используются при разработке отраслевых РТМ для расчетов на точность технологических процессов изготовления турбинных лопаток.

6. Экономический эффект от применения метода кругового фрезерования при использовании результатов исследований в соответствии с проведенными расчетами на производственную программу Ленинградского металлического завода составит 32 тыс. руб. в год. С учетом экономии металла при уменьшении припусков при круговом фрезеровании экономический эффект может составить 99 тыс. руб. в год. С учетом перспективы увеличения программы при централизованном производстве лопаток на ЛЭТИ будет иметь место соответствующее увеличение экономического эффекта по сравнению с действующим производством.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Мамаев В.С., Котельников А.И. "К исследованию погрешностей обработки из-за геометрических неточностей станков при круговом фрезеровании профиля турбинных лопаток". Известия ВУЗов. Машиностроение, №11, 1973.

2. Мамаев В.С., Котельников А.И. "Размерный износ инструмента при обработке рабочей части крупных турбинных лопаток". Энергомашиностроение, №11, 1973.

МВТУ
им. Н. С. Баумана
Библиотека