

М338304

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

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

На правах рукописи

САРБАНОВ Советбек Талгарбекович

АНАЛИЗ СТРУКТУР ОПЕРАЦИИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕ-
НИЯ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ

Специальность 05.02.08 - Технология машиностроения

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

С С С Р

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

На правах рукописи

САРБАНОВ Советбек Талгарбекович

АНАЛИЗ СТРУКТУР ОПЕРАЦИЙ ФРЕЗЕРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕ-
НИЯ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ

Специальность 05.02.08 - Технология машиностроения

17338304 p
НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1338304

Сарбанов С. Т. Анализ струк

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва

1978

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

Научный руководитель - Заслуженный деятель науки и
техники РСФСР, доктор техни-
ческих наук, профессор
КОРСАКОВ В.С.

Официальные оппоненты -доктор технических наук, профессор
НИКИФОРОВ А.Д.
кандидат технических наук,
доцент УСОВ Б.А.

Ведущее предприятие - НИО "ОРИСТАНДИПРОМ"

Защита диссертации состоится 4 июня 1979 г.
на заседании специализированного Совета по технологии машино-
строения шифр К-053.15.15 МВТУ имени Н.Э.Баумана по адресу:
107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ
имени Н.Э.Баумана.

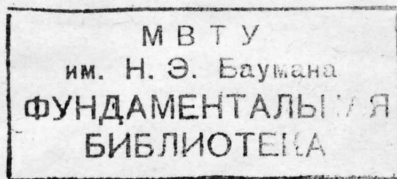
Ваши отзывы и предложения на автореферат в двух экзем-
плях, заверенных печатью, просим направить по указанному адре-
су.

Автореферат разослан "16" апреля 1979 г.

Ученый секретарь Совета
К.Т.Н., доцент

Милеряков

МИЛЕРЯКОВ Р.К.



Актуальность проблемы. Высокая трудоемкость и себестоимость формообразования поверхностей сложнопрофилированных деталей машиностроения определяют актуальность выбранного направления исследований.

Основополагающей задачей десятой пятилетки является всемерное повышение эффективности и качества изготовления продукции машиностроения за счет комплексной автоматизации и механизации технологических процессов.

Несмотря на большое многообразие методов формообразования, обработка со снятием стружки остается наиболее распространенной в технологии производства таких изделий, как рабочие лопатки паровых турбин, лопастные решетки гидроприводов, кулачки и коноиды металлорежущих станков, специальные детали.

Автоматизация серийного производства указанных деталей осуществляется путем внедрения копировально-фрезерных станков и станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Технологические схемы формообразования сложных поверхностей на указанных типах оборудования, одни и те же, различаются только способы обеспечения требуемого закона перемещений исполнительных органов.

Как показывают производственные наблюдения, проведенные на ряде заводов, несмотря на опережающее развитие станков с ЧПУ в производстве деталей сложной формы, удельный вес копировальных станков сохраняется значительным, что требует поиска новых путей совершенствования технологии сложного формообразования.

Объектом технологического совершенствования в данной диссертации является структура технологической операции, под которой подразумевается многоуровневая организация операции, вид взаимодействия ее элементов.

До настоящего времени известно мало работ по структурным методам исследования операций фрезерования сложных поверхностей и практически нет литературных источников, повествующих возможности математического описания и построения рациональной операции формообразования сложнопрофилированных деталей машиностроения.

Совершенствование технологии обработки сложных поверхностей приобретает особую актуальность в связи с высокой стои-

мостью программного оборудования, наличием дополнительных резервов повышения точности и производительности обработки, обусловленных преимуществами системы ЧПУ, а также тем, что к концу следующей пятилетки половина станков, выпущенных отечественной станкостроительной промышленностью, будет оснащена системами ЧПУ.

Цель исследования. Системный анализ технологических факторов, определяющих структуру операции фрезерования сложных поверхностей концевым инструментом на станках с ЧПУ вертикальной компоновки и разработка на этой основе методики построения рациональной операции сложного формообразования, обеспечивающей достижение заданной точности обработки при максимальной производительности.

Методы исследования. Теоретические исследования базируются на элементах высшей математики, теории сложных систем, теории множеств и комбинаторики, сопротивления материалов и научных основ технологии машиностроения с привлечением для расчетов современных электронно-вычислительных машин (ЭВМ). Экспериментальные исследования проводились в лаборатории кафедры "Технологии механосборочного производства" МВТУ им. Н.Э.Баумана и на опытном участке цеха лопатных решеток машиностроительного завода в использовании современной регистрирующей и измерительной аппаратуры на станках моделей 6Н13Ф3 и 6Р13Ф3.

Научная новизна. Данная работа характеризуется новизной по своей постановке касательно формообразования сложнопрофилированных деталей. Научная значимость ее заключается в выборе факторов, определяющих структуры операции строчечного фрезерования сложных поверхностей, их последующей формализации и математическом описании всех возможных структур, используемых для получения конкретной поверхности. Выявлена связь структуры операции с точностью обработки, и на ее основе разработана методика построения рациональной операции, обеспечивающая максимальную производительность при достижении заданной конструктором точности. Указаны условия рационального использования станков с ЧПУ, пути и резервы повышения производительности обработки деталей сложной формы.

Практическая ценность. Основные результаты работы используются при проектировании операции профилеобразования лопаток

лопастных решеток на Калужском машиностроительном заводе. В частности, спроектированная и внедренная операция позволила уменьшить основное технологическое время на 10-15%, вспомогательное время - в 3 раза, поле рассеивания выполняемых размеров в 3,5 раза. Разработаны необходимые рекомендации по подготовке управляющей программы. Основные положения и выводы исследований могут быть распространены на обработку любых поверхностей различными способами фрезерования.

Апробация работы. Основные разделы диссертации докладывались на научных семинарах кафедры "Технология механосборочного производства" МВТУ им. Н.Э.Баумана, на краткосрочном семинаре "Прогрессивные технологические процессы в механосборочном производстве, направленные на повышение производительности труда и качества изделий", Ленинград, май, 1977 г., на Всесоюзном семинаре "Технологические методы повышения качества машин", Фрунзе, май, 1978 г., на Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемные вопросы автоматизации производства", Рига, декабрь, 1978 г.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 130 страницах машинописного текста, включающих введение, пять глав, выводы по главам и общие выводы. Содержит 15 таблиц, 68 рисунков и списков литературы из 112 наименований.

В первой главе проведен анализ методов обработки сложнопрофилированных деталей машиностроения, основанный на литературных источниках и производственных материалах, отражены состояние и перспективы механической обработки сложных поверхностей на фрезерных станках с ЧПУ вертикальной компоновки, обоснована цель исследования и намечены конкретные задачи для ее реализации.

Производственные наблюдения, проведенные на заводах, практикующих обработку сложнопрофилированных деталей, показали, что на формообразование сложных поверхностей приходится 50-60% от суммарной трудоемкости механической обработки. Процентный состав используемого при этом оборудования распределен следующим образом: фрезерные станки с ЧПУ составляют около 10%, копировально-фрезерные станки - более 20%, фрезерные станки с кинематической настройкой - 5% от общего станочного парка.

Способ фрезерования определяется прежде всего геометрией обрабатываемой поверхности. В связи с этим автор приводит

уточненную систематизацию геометрических элементов сложнопрофилированных деталей, которая позволяет избежать ряд неопределенностей и неясностей, присущих ранее известным классификаторам. Соответственно способы фрезерования могут различаться по единственно важному критерию, а именно: наличие или отсутствие физического аналога обрабатываемой поверхности.

Показано, что наиболее универсальным способом фрезерования сложных поверхностей является строчечная обработка. В связи с этим на основании анализа литературы и производственных данных приводятся основные закономерности рассматриваемого способа формообразования. Принимается во внимание обработка концевым инструментом с различной формой режущей части: прямолинейной (плоский торец), сферической и вогнутой торовой. Указаны способы геометрических расчетов, позволяющие определить все необходимые технологические величины строчечного фрезерования.

Установлена многовариантность обработки любой конкретной поверхности, что подтверждает правомерность поставленной цели исследования. Соответственно в диссертации намечены следующие задачи: 1) выбор технологических факторов, определяющих структуру операции формообразования; 2) математическое описание возможных структур операций фрезерования сложных поверхностей; 3) выявление связи структуры операции с точностью и производительностью обработки; 4) разработка методики выбора рациональной операции профилеобразования, позволяющей получить заданную точность размеров и формы сложнопрофилированных деталей при максимальной производительности обработки; 5) аналитические и экспериментальные исследования, подтверждающие основные положения разработанной методики на примере фрезерования профиля лопаток лопастных решеток гидроприводов; 6) выявление дополнительных резервов повышения эффективности процесса резания, заключающихся в предсказании управляющей программы путем задания переменной минутной подачи вдоль обрабатываемого контура; 7) определение целесообразной области использования станков с ЧПУ и копировально-фрезерных станков, применяемых при обработке сложнопрофилированных деталей; 8) технико-экономический анализ результатов исследований.

Во второй главе излагается структурный метод исследования операции фрезерования сложных поверхностей на станках с ЧПУ. Указано, что из принципиально возможных путей повышения

точности и производительности обработки наиболее прогрессивным является развитие структур операций известных способов фрезерования. Выполненные ранее работы Шаумяна Г.А., Чарико Д.В., Полуянова В.Т. и др. носят обобщенный характер и не могут учесть особенностей процесса строчечного фрезерования, поэтому автор показывает принципы системного подхода к данной обработке. Факторы, определяющие структуру операции фрезерования сложных поверхностей, находятся во взаимодействии и взаимосвязи. Замечено, что любая конкретная структура обладает однозначностью. Это обстоятельство позволяет осуществить ее формализацию, для чего достаточно присвоить каждому признаку структуры операции формообразования математический символ и воспользоваться некоторыми правилами теории множеств и комбинаторики.

Пусть имеются технологические факторы $x_1, x_2, \dots, x_n$ (это могут быть вид обрабатываемой поверхности, форма режущей части фрезы, направление и траектория движения инструмента и т.д.) и организационно-технологические факторы $y_1, y_2, \dots, y_m$ (например, число позиций станка, количество используемых инструментов, порядок их втупления в работу и т.д.). Тогда, задав им K различных признаков, можно любой элемент системы представить в виде символов: $x_j^{i_j}$ и $y_\ell^{i_\ell}$, где $j = 1, 2, \dots, n$; $\ell = 1, 2, \dots, m$; $i_j = 1, 2, \dots, K$. При этом множества признаков выражаются формулами:

(I)

$$F_j = \{x_j^1, x_j^2, \dots, x_j^{i_j}, \dots, x_j^{K_j}\},$$

$$P_\ell = \{y_\ell^1, y_\ell^2, \dots, y_\ell^{i_\ell}, \dots, y_\ell^{K_\ell}\}.$$

Соответственно множества вариантов структур операций равны прямым произведениям множеств (I):

(2)

$$Z_1(x) = \prod_{j=1}^n F_j = F_1 \times F_2 \times \dots \times F_n,$$

$$Z_2(y) = \prod_{\ell=1}^m P_\ell = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_m.$$

Полученные множества имеют дискретную организацию, причем любая структура операции определяется комбинацией признаков:

(3)

$$(x^{i_1}, x^{i_2}, \dots, x^{i_n}) = z_1(x) \in Z_1(x),$$

$$(y_1^{i_1}, y_2^{i_2}, \dots, y_m^{i_m}) = z_2(y) \in Z_2(y),$$

а общее число возможных структур составляет:

$$N_1 = \prod_{j=1}^n K_j; \quad N_2 = \prod_{e=1}^m K_e. \quad (4)$$

Функции $Z_1(x)$ и $Z_2(y)$ не зависят друг от друга, поэтому суммарное количество реализуемых структур можно найти их перемножением;

$$Z(x, y) = Z_1(x) \times Z_2(y). \quad (5)$$

Среди этого числа содержатся невозможные или практически мало используемые комбинационные сочетания факторов и их признаков, поэтому для наглядности в диссертации приводятся структурно-компоновочные матрицы.

При фрезеровании конкретной поверхности необходимо решить вопрос выбора рациональной структуры операции. Задача выбора структуры операции формообразования заключается в поиске такого $z^*(x)$, который обращает в максимум (минимум) целевую функцию $Q = q[z(x)]$, т.е.

$$\max_{z \in Z} (\min) \{Q\} = \max_{z \in Z} (\min) \{q[z(x)]\} = q[z^*(x)]. \quad (6)$$

Вариационный принцип, используемый при выборе рациональной структуры операции, заключается в переборе всех возможных схем формообразования сложной поверхности по критерию максимальной цикловой производительности Q_u (минимального оперативного времени t_{on}):

$$Q_u = \frac{1}{t_o + t_s} = \frac{1}{t_{on}}. \quad (7)$$

Основное технологическое время t_o выражает связь между точностью и производительностью:

$$t_o = \frac{L}{S_m}, \quad (8)$$

где L - расчетная длина резания; S_m - минимальная подача инструмента вдоль контура. Расчетная длина резания при строчечном

фрезеровании определяется числом строчек (проходов) необходимых для получения заданной поверхности.

В свою очередь минутная подача зависит от величины подачи на зуб фрезы S_z , влияющей на динамику процесса:

$$P_v = C \cdot F_N^\alpha \cdot S_z^\beta, \quad (9)$$

где P_v - нормальная составляющая результирующей силы резания; C - постоянный коэффициент; F_N - площадь поперечного среза металла в плоскости перпендикулярной направлению подачи; α , β - показатели степени, получаемые эмпирически.

С другой стороны доминирующее значение погрешностей от упругих отжатий технологической системы в суммарной погрешности обработки при фрезеровании концевыми фрезами позволяет написать:

$$P_v = \frac{y}{\omega}, \quad (10)$$

где y - упругие перемещения технологической системы; ω - ее податливость.

Тогда из формул (8) и (9) получаем:

$$S_z = \sqrt[\beta]{\frac{y}{\omega \cdot C \cdot F_N^\alpha}}. \quad (11)$$

Уравнение (11) указывает, на функциональную связь между S_z , y и F_N при прочих равных условиях. Соответственно любая структура операции может характеризоваться их определенными значениями.

В диссертации представлены формулы, позволяющие рассчитать требуемые значения поперечных площадей среза F_N для различных инструментов.

Произведен анализ состава вспомогательного времени t_s , показывающий способы вычисления его элементов для каждой структуры операции фрезерования сложных поверхностей.

Описана блок-схема алгоритма выбора рациональной структуры операции, обеспечивающей максимальную цикловую производительность при достижении заданной точности. Данный алгоритм иллюстрируется примером обработки конкретной линейчатой поверхности. Подтверждено, что в равных условиях пятикоординатная обработка плоским торцом концевой фрезы выгоднее трехкоордин-

имости, известные из теории резания, приобретают очень грозный вид, включающие много дублирующих друг друга членов-множителей после их преобразования, заключающегося: 1) во введении эффективной глубины резания, учитывающей переменность кривизны обрабатываемой сложной поверхности; 2) в корректировке величины подачи периферийной точки инструмента по сравнению с подачей центра фрезы; 3) в точном координировании места приложения силы резания к инструменту.

Изложенное предопределило планирование дробного факторного эксперимента 2^{5-1} , результатом которого стало уравнение регрессии, выражающее в более компактной форме нормальную составляющую силы резания:

$$P_v = 656 \cdot \frac{t}{D} \cdot S_z^{0.74} \cdot z \cdot B, \quad (H), \quad (I4)$$

где 656 - коэффициент, полученный при обработке образцов из стали 20 концевыми фрезами из материала P6M5; z - число зубьев инструмента; B - ширина фрезерования; D - диаметр концевой фрезы; t - глубина резания.

Анализ уравнения (I4) показал на существование прямой пропорциональности в $P_v = f\left(\frac{t}{D}\right)$ и $P_v = f(F_N)$, т.к. в нашем случае $F_N = t \cdot B$. В диссертации приводятся соответствующие графики указанных зависимостей.

Отмечено влияние износа геометрии режущего инструмента на возрастание нормальной составляющей силы резания. При достижении допустимой величины износа по задней грани режущей кромки (фаска износа $h_3 = 0,3$ мм) сила резания может возрасти ~ в 3,3 раза по сравнению с первоначальным значением. Этот рост учитывается введением коэффициента возрастания усилия резания:

$$K_{P_v} = \frac{P_{v_0} + \Delta P_{v_u}}{P_{v_0}}, \quad (I5)$$

где P_{v_0} - сила резания в начале обработки ($h_3 = 0$); ΔP_{v_u} - дополнительная сила резания, возникающая вследствие износа инструмента.

Экспериментальные исследования, проведенные в МВТУ им. Н.Э.Баумана позволили получить уравнение регрессии $K_{P_v} = f(t, S_z, v, L, \sigma_8)$, где v - скорость резания,

натной обработки сферическим торцом; при этом скорость возрастания площади среза F_N меньше скорости убывания величины подачи на зуб фрезы S_z .

Производится сравнение структур операций формообразования профиля лопаток лопастных решеток и выбирается рациональная с точки зрения производительности.

Указываются направления совершенствования технологии обработки данных деталей путем проведения технологических и организационных мероприятий.

В третьей главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований точности обработки сложных поверхностей концевыми фрезами.

Указано, что суммарная погрешность обработки складывается из погрешностей подготовки и преобразования программы и погрешностей технологической системы. Последние выражаются функциональной зависимостью:

$$\Delta_{тс} = f(\Delta_y, \epsilon, \Delta_n, \Delta_u, \sum \Delta_{\phi}, \Delta T), \quad (12)$$

где Δ_y - погрешности от упругих отжатий технологической системы; ϵ - погрешности установки заготовки; Δ_u - погрешности от износа инструмента; Δ_n - погрешности настройки фрезы на выполняемый размер; $\sum \Delta_{\phi}$ - сумма погрешностей формы из-за геометрических неточностей станка и переменной жесткости технологической системы в процессе обработки; ΔT - погрешности от тепловых деформаций технологической системы.

На долю $\Delta_{тс}$ приходится до 0,6 от величины допуска на выполняемый размер.

Анализ баланса погрешностей технологической системы показывает, что доминирующими в ней являются погрешности от упругих деформаций, достигающие:

$$\Delta_y = (0,3 \div 0,5) \cdot \Delta_{тс}. \quad (13)$$

Упругие отжатия технологической системы определяются силой резания и податливостью технологической системы. Поэтому возникает задача нахождения законов изменения силы резания и податливости наиболее слабых звеньев технологической системы вдоль обрабатываемого контура.

Интерес вызывает составляющая сила резания, направленная по нормали к фрезеруемому профилю. Эмпирически силовые зави-

L - длина обработки; σ_B - механические свойства обрабатываемого материала, которое справедливо для фрезерования с постоянными режимами резания. При формообразовании сложных поверхностей любую из них можно разбить на конечное число участков, где режимы неизменны. Следовательно, согласно принципу суперпозиции:

$$K_{Pv\Sigma} = \prod_{i=1}^n K_{Pv_i} = K_{Pv_1} \cdot K_{Pv_2} \cdot \dots \cdot K_{Pv_n}, \quad (I6)$$

где n - число элементарных участков.

В диссертации выполнены теоретические и экспериментальные исследования податливости технологической системы. Доказано, что самыми слабыми звеньями технологической системы являются инструмент и заготовка, и если вопросами жесткости концевых фрез занимались многие исследователи, то расчет жесткости заготовки - проблема сугубо индивидуальная.

На примере лопаток лопастных решеток обосновано применение для расчетов геометрических характеристик их сечений метода Чебышева П.Л., который обладает незначительной ошибкой по сравнению с численным интегрированием ($\sim 2-3\%$), но существенно снижает трудоемкость вычислительных операций. Недостающие геометрические характеристики определяются экспериментально (например, моменты инерции кручения). Данная методика расчета упругих отжатий реализована на ЭВМ.

Наконец, предложена методика назначения рациональных режимов обработки, обеспечивающая максимальную производительность при заданной точности выполняемых размеров и формы. Это задача математического программирования, ограничениями в которой являются следующие выражения:

$$\begin{aligned} n_{\min} &\leq n_i \leq n_{\max}, \\ n_i &\leq \frac{1000}{\pi} \cdot \frac{C_v \cdot D^{q_v-1}}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S_{z_i}^{y_v} \cdot z^{p_v} \cdot B^{u_v}}, \\ n_i &\leq \frac{402 \cdot 60 \cdot N_3 \cdot n}{C \cdot t^{x_p} \cdot S_{z_i}^{y_p}}, \\ S_{z_i} &\leq \sqrt[0.74]{\frac{[y] \cdot D}{\omega \cdot \mu \cdot 656 \cdot z \cdot B \cdot t \cdot K_{Pv}}}, \\ \frac{S_{M \min}}{n_i \cdot z} &\leq S_{z_i} \leq \frac{S_{M \max}}{n_i \cdot z}, \end{aligned} \quad (I7)$$

где T - стойкость инструмента; n_i - частота вращения фрезы; N_3 - мощность электродвигателя главного движения; η - его КПД; M - динамический коэффициент, учитывающий несоответствие статистической и динамической жесткостей технологической системы; $m, q_v, k_v, x_v, y_v, p_v, u_v$ - нормативные коэффициенты и показатели степени. Данная задача решается с помощью ЭВМ.

С целью установления количественной оценки погрешностей обработки были проведены производственные испытания, которые показали, что введение предсказания управляющей программы путем целенаправленного изменения минутной подачи позволило уменьшить поле рассеивания выполняемых размеров в 3,5 раза ($\Delta_{const} = 87 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$; $\Delta_{var} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$).

Также исследованы отклонения формы в вертикальном сечении заготовки. Установлено значительное уменьшение этой погрешности в сечениях, где податливости заготовок и инструмента соразмерны.

В четвертой главе приведены результаты исследований производительности обработки сложных поверхностей.

Прежде всего проанализированы пути повышения производительности фрезерования технологическими методами. Сравнительная характеристика формообразования конкретной поверхности лопасти лопастной решетки с постоянной минутной подачей (копировальное оборудование) и переменной минутной подачей (станок с ЧПУ) вдоль обрабатываемого контура позволяет сделать вывод о том, что основное технологическое время во втором случае уменьшается на 10-15% (в среднем) при обработке 10 типоразмеров указанных сложнопрофилированных деталей. Приводятся графики изменений отклонений формы при обеих сравнительных схемах обработки. Вследствие того, что станок с ЧПУ имеет ступенчатое изменение подачи, возникает проблема нахождения опорных точек траектории, в которых необходимо осуществлять переход от одной ступени подачи к следующей. Поэтому во всех точках траектории движения фрезы приходится корректировать значение S_z по паспорту станка, округляя расчетную величину S_m до ближайшей меньшей.

Предложены пути сокращения вспомогательного времени и подготовительно-заключительного времени.

Приведены теоретические расчеты и производственная проверка затрат вспомогательного времени на операцию. Указаны резервы

повышения производительности и точности формообразования, достигаемые дополнением типовой модели станка с ЧПУ поворотным столом, управляемым от программноносителя. Этим обеспечивается сокращение времени холостых перемещений исполнительных органов станка (в среднем на 6-13 минут на одну лопастную решетку), снижение трудоемкости подготовки управляющей программы, идентичность условий резания всех профилей лопаток, принадлежащих конкретной лопастной решетке, повышение точности обработки.

Внедрение станков с ЧПУ, оснащенных револьверными головками, меняет технологический процесс не только самого формообразования, но и весь производственный цикл. Возникает возможность концентрации операций, новые технологические возможности программного оборудования сокращают число переходов. При обработке лопастных решеток шесть операций заменяется одной выполняемой за один установ на станке модели 6Р1ЗР4З. За счет устранения времени на транспортировку со станка на станок, пролеживания заготовок между операциями производственный процесс становится непрерывным, а сама обработка экономичной. Таким образом организационные мероприятия изменяют структуру операции сложного формообразования и влияют на эффективность процесса резания.

В пятой главе дан технико-экономический анализ проведенных исследований, указаны основные преимущества предлагаемой структуры операции фрезерования профилей лопаток.

В связи с тем, что широко применяются как копировальные станки, так и станки с ЧПУ, возникает необходимость назначения целесообразной области использования этих типов оборудования. С точки зрения затрат на технологическую подготовку производства (стоимости копира и управляющей программы) данный вопрос решается в зависимости от размера партии обрабатываемых заготовок ($N_0 = 12$ шт.).

Также анализируются основные положения разработанных методик и их экономический, технический и социальный эффекты. Первый показатель эффективности процесса формообразования потребовал расчетного подтверждения. Расчет по минимуму приведенных затрат позволил учесть все основные преимущества новой технологии. Материал сопровождается конкретными формулами и цифрами.

Общие выводы.

1. Опережающее развитие станков с ЧПУ при сохранении большого удельного веса копировального оборудования в технологии механической обработки сложнопрофилированных деталей машиностроения обосновывает выбор направления исследования, касающегося проектирования рациональной операции фрезерования сложной поверхности.

2. Анализ основных закономерностей строчечного способа фрезерования – наиболее универсального способа формообразования сложных поверхностей – позволяет раскрыть многоуровневую структурную организацию операции, выявить взаимосвязь и взаимовлияние факторов сложной технологической системы.

3. Все многообразие факторов, определяющих структуры операций практически может быть сведено к двум группам: технологическим и организационно-технологическим, непосредственно влияющим на точность и производительность обработки. Дискретность и однозначность факторов дает возможность произвести их формализацию с целью математического описания структур операций сложного формообразования.

4. Разработанная методика выбора рациональной структуры операции профилеобразования обеспечивает достижение заданной точности обработки при максимальной цикловой производительности, обладает широкой степенью обобщения и справедлива для любых способов фрезерования сложных поверхностей, что подтверждено на примере обработки профилей лопаток лопастных решеток.

5. Для дальнейшего совершенствования технологии обработки сложнопрофилированных деталей машиностроения на станках с ЧПУ выявлены дополнительные резервы, заключающиеся в назначении переменной подачи инструмента вдоль обрабатываемого контура, концентрации операций, ускорении холостых перемещений исполнительных органов станка, расширении технологических возможностей оборудования. Проведение этих мероприятий позволяет уменьшить штучное время обработки – на 30-40%, поле рассеивания выполненных размеров – в 3,5 раза.

6. Переменность жесткости системы "инструмент-заготовка" обуславливает наличие отклонений формы в вертикальном сечении обрабатываемой поверхности при концевом фрезеровании цилиндрической частью инструмента. Для уменьшения указанных отклонений

формы необходимо выравнивать суммарную жесткость фрезы и заготовки в различных сечениях обработки. В частности, отклонения формы уменьшаются в 6+8 раз.

7. Разработка прогрессивных структур операций сложного формообразования с использованием современных ЭВМ освобождает технолога от большой расчетной работы и позволяет найти наилучшее решение с минимальными затратами.

8. Результаты исследования— необходимые рекомендации и методики— используются технологическим бюро ЧПУ машиностроительного завода при проектировании операций фрезерования профилей лопастных решеток. Внедрение новой технологии повышает производительность обработки, позволяет ввести много-станочное обслуживание, улучшить культуру производства и получить условный годовой экономический эффект не менее 7700 рублей на всю программу выпуска указанных деталей.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Корсаков В.С., Мельников Г.Н., Сарбанов С.Т., Хмара М.Ф. Расширение технологических возможностей станков с ЧПУ при обработке деталей сложной формы.—Тезисы краткосрочного семинара "Прогрессивные технологические процессы в механосборочном производстве, направленные на повышение производительности труда и качества изделий". Л. ЛДЧТП, 1977, с. 42—44.

2. Корсаков В.С., Мельников Г.Н., Сарбанов С.Т. Вопросы жесткости при фрезеровании сложнопрофилированных деталей на станках с ЧПУ.—Тезисы Всесоюзного семинара "Технологические методы повышения качества машин". Фрунзе, ФПИ, 1978, с. 28.

3. Корсаков В.С., Сарбанов С.Т. Направления совершенствования технологий обработки сложнопрофилированных деталей.—"Известия вузов. Машиностроение", 1978, № 6, с. 133—137.

4. Сарбанов С.Т. Методика определения упругих отжатий нежестких деталей сложной формы.—"Известия вузов. Машиностроение", 1978, № II, с. 140—143.

5. Корсаков В.С., Мельников Г.Н., Сарбанов С.Т. Разработка прогрессивных структур операций фрезерования деталей сложной формы.—Тезисы Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемные вопросы автоматизации производства". Рига, ВСНТО, 1978, с. 12—13.