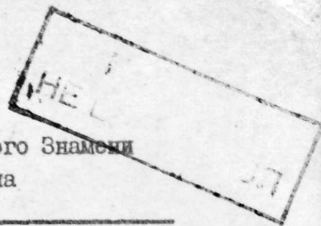


M358442



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

На правах рукописи

КРАВЧЕНКО ИГОРЬ ИГОРЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ОБРАБОТКИ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ ПЛОСКОСТЕЙ КОРПУС-
НЫХ ДЕТАЛЕЙ (НА ПРИМЕРЕ ОБРАБОТКИ НА МНОГО-
ОПЕРАЦИОННЫХ СТАНКАХ)

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

Автореферат диссертации
на соискание ученой сте-
пени кандидата техниче-
ских наук

На правах рукописи

КРАВЧЕНКО ИГОРЬ ИГОРЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ОБРАБОТКИ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ ПЛОСКОСТЕЙ КОРПУС-
НЫХ ДЕТАЛЕЙ (НА ПРИМЕРЕ ОБРАБОТКИ НА МНОГО-
ОПЕРАЦИОННЫХ СТАНКАХ)

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана

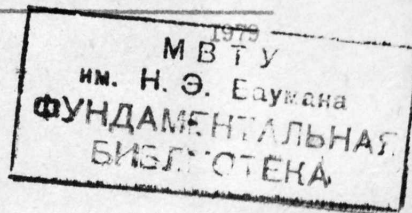


1358442

Кравченко И. И. Исследования

Автореферат диссертации
на соискание ученой сте-
пени кандидата техниче-
ских наук

Москва



Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.
Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
КАПУСТИН Н.М.

Официальные оппоненты- доктор технических наук, профессор
СИЗЕНОВ Л.К.
кандидат технических наук
УСОВ Б.А.

Ведущее предприятие - указано в решении специализированного
Совета

Защита диссертации состоится "17" марта 1980 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.

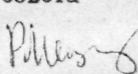
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ имени
Н.Э.Баумана.

Ваши отзывы и предложения на автореферат в двух экземплярах,
заверенных печатью, просим направить по указанному адресу.

Автореферат разослан "18" января 1980 г.

Ученый секретарь Совета

к.т.н., доцент



МЕНДЕРЯКОВ Р.К.

Тип. МВТУ

Заказ № 6

Тираж 100 экз.

Дата разрешения к печати 29. 12. 79 г.

Л28173

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Современный этап развития производства характеризуется увеличением количества выпускаемой продукции, повышенными требованиями к ее качеству и надежности. Эксплуатационные качества машин и изделий в значительной степени определяются точностью обработки плоских поверхностей корпусных деталей. Обработка плоскостей торцовым фрезерованием вызывает в общем цикле изготовления детали значительные затраты труда, причем, часто точность и производительность этого вида механической обработки не отвечает современным требованиям производства. Проблеме точности обработки плоскостей исследователями уделялось мало внимания в силу определенных сложностей, характеризующих этот процесс. Результаты немногочисленных исследований по точности торцового фрезерования носят частный характер и справедливы, в своем большинстве, для универсальных фрезерных станков. Широкое распространение станков с ЧПУ и многооперационных станков ставит перед исследователями проблему повышения точности и производительности обработки корпусных деталей на этих станках. Опыт применения многооперационных станков с ЧПУ в промышленности показывает, что в большинстве случаев практически на эти станки перенесены технологические процессы универсального оборудования, что существенно сокращает рентабельность производства.

Одним из методов повышения экономической эффективности использования многооперационных станков является оптимизация проектируемых технологических операций. Основные трудности проектирования оптимальных вариантов станочной операции заключаются в отсутствии количественных связей между параметрами, характеризующими точность, производительность и экономичность обработки плоскостей, в слабой их формализации, а также сложности самих расчетов.

Цель работы. Исследование точности и производительности обработки плоскостей корпусных деталей для проектирования оптимальных операций фрезерования на многооперационных станках с ЧПУ.

Методы исследования. Применялись теоретические методы и экспериментальные исследования: методы исследования операций; математической статистики; расчетно-статистический метод исследования точности; теория производительности рабочих машин и теория резания металлов; экспериментальные исследования проводились в лаборатории кафедры "Технология механосборочного производства"

МВТУ им. Н.Э.Баумана и в производственных условиях на многооперационных станках с использованием современной регистрирующей и измерительной аппаратуры.

Научная новизна. Выявлены и исследованы закономерности возникновения погрешностей при торцовом фрезеровании плоскостей корпусных деталей. Разработана методика и модель расчета точности размера, формы и расположения плоскостей в условиях анизотропной жесткости технологической системы. Методика базируется на исследовании векторных полей отклонений точек реальной поверхности от номинального положения. Разработаны оптимизационные математические модели нахождения плана и последовательности обработки поверхностей на основе принципа динамического программирования.

Практическая ценность. Результаты работы используются в промышленности при проектировании операций обработки корпусных деталей. Разработанные алгоритмы и программы на алгоритмических языках Фортран-IV и Ассемблер для ЭВМ серии ЕС на основе оптимизационных математических моделей повышают качество технологических решений. Реализация программ в производственных условиях позволила снизить технологическую себестоимость на 10-12%, повысить производительность на 16-20% при обеспечении заданной точности обработки плоскостей торцовым фрезерованием на многооперационных станках.

Научные положения диссертации были использованы в учебном процессе: созданы лабораторные работы по курсу "Автоматизация проектирования технологических процессов", читаемых студентам специальности 0501 в МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Апробация работы. Основные разделы работы доложены на научных семинарах кафедры "Технология механосборочного производства" МВТУ им. Н.Э.Баумана 1974-1979г.г., на Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности программного управления в машиностроении", Ташкент, ТашПИ 1974г., на IV Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции "Научные основы автоматизации производственных процессов в машиностроении и приборостроении", Москва, МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1975г., на республиканской научно-технической конференции "Усовершенствование технологической подготовки производства машиностроительных и приборостроительных предприятий с применением средств вычислительной техники", Таллин, ТПИ, 1979г.

Объем работы. Диссертация, изложенная на 139 страницах машинописного текста, включает введение, пять глав, выводы по главам и общие выводы. Содержит 17 таблиц, 67 рисунков и список литературы из 113 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Состояние проблемы и постановка задачи исследования.

Анализ основных результатов по точности обработки плоскостей торцовым фрезерованием, основанный на литературных источниках и производственных материалах, показывает, что немногочисленные исследования, выполненные в этой области, не содержат достаточно систематизированных данных, необходимых для решения точностных задач обработки плоскостей. Расчетные зависимости для определения отклонений формы, размера и взаимного расположения плоскостей носят частный характер и в большинстве случаев не отражают связи точности с условиями обработки. Показано, что в имеющихся методиках расчета точности обработки плоскостей (работы Калинина М.А., Смирнова И.Н., Тыминского Ю.Г., Шманева В.А. и других) в недостаточной степени учитываются закономерности процесса торцового фрезерования. Существующие нормативы по режимам мало увязаны с обеспечением заданной точности обработки плоскостей корпусных деталей, особенно при использовании станков с ЧПУ. В имеющихся работах не раскрыты особенности обработки плоскостей корпусных деталей на поворотных столах, которыми оснащены многооперационные станки, что существенно затрудняет проектирование оптимальных операций.

Проанализированы основные направления в проектировании технологических процессов при обработке деталей на станках с ЧПУ. В результате анализа выявлено, что существующие методики автоматической подготовки управляющих программ в своем большинстве базируются на закономерностях построения операций универсального оборудования. Проектирование оптимальных станочных операций на основе математического моделирования является одним из перспективных направлений САПР. Оптимизации при технологическом проектировании посвящена обширная литература. Следует отметить работы Горанского Г.К., Гаврилова А.Н., Гильмана А.М., Капустина Н.М., Сизенова Л.К., Соломенцева Ю.М. и других. Методика оптимизации операций, предложенная в настоящей работе, в полной мере отражает принятый подход и является развитием работ, выполненных в МВТУ им. Н.Э. Баумана, МАИ, МОССТАНКИНЕ, Дальневосточном и Таглинском

политехнических институтах и других организациях.

Проведенный анализ и указанная цель данной работы позволили сформулировать основные задачи исследования следующим образом:

1. Выявить и исследовать закономерности образования отклонений формы, размера и расположения при обработке плоскостей торцовым фрезерованием на многооперационных станках.
2. Разработать методику и математическую модель расчета отклонений формы, размера и расположения при обработке плоскостей в условиях анизотропной жесткости технологической системы, учитывающую взаимосвязь параметров точности, производительности и экономичности обработки.
3. Провести экспериментальную проверку математической модели расчета отклонений формы, размера и расположения плоскостей.
4. Разработать математические модели нахождения плана и последовательности обработки плоскостей.
5. Определить технико-экономическую эффективность результатов исследований.

В качестве объекта исследования выбрана фрезерная операция обработки плоскостей корпусных деталей на многооперационных станках горизонтальной компоновки шпинделя. Разработанные научные положения иллюстрируются на примере обработки корпусных деталей, установленных на поворотном столе многооперационного станка модели MC 12-250.

Глава 2. Теоретическое исследование точности обработки плоскостей на многооперационных станках.

Установлено, что среди факторов, влияющих на точность обработки плоскостей корпусных деталей, доминирующими являются упругие деформации элементов технологической системы. Величина и направление упругих деформаций определяется переменными в процессе обработки силами резания и неравномерностью податливости узлов станка. По результатам ранее выполненных исследований (работы Кудина В.А., Решетова Д.Н., Комиссарова В.И. и других) установлены следующие свойства технологической системы: 1. Векторы сил не коллинеарны векторам вызываемых ими упругих перемещений узлов станка; 2. Эпюры упругих отжатий при нагружении узла силой, постоянной по модулю, но переменной по направлению в одной координатной плоскости, значительно отличаются от окружностей; 3. Аппроксимация эпюр отжатий эллипсами (в пределах 95% доверительного интервала) позволяет выделить направления, соответствующие максимальной и минимальной их величине, которые не совпадают с направлениями

координат станка. В свою очередь это служит причиной возникновения податливостей, характеризующих взаимное влияние по каждой из пар координатных осей.

Для определения величин и направлений упругих перемещений элементов технологической системы с указанными выше свойствами была рассмотрена модель в виде линейной системы с 6-ю степенями свободы, упругие свойства которой подчиняются закону Гука. Рассматривая потенциальную энергию линейной упругой системы, получаем систему линейных уравнений, определяющих упругие перемещения узлов станка по координатным осям:

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= P_x W_{xx} + P_y W_{xy} + P_z W_{xz} + M_{\theta_1} W_{x\theta_1} + M_{\theta_2} W_{x\theta_2} + M_{\theta_3} W_{x\theta_3} \\ \Delta Y &= P_x W_{xy} + P_y W_{yy} + P_z W_{yz} + M_{\theta_1} W_{y\theta_1} + M_{\theta_2} W_{y\theta_2} + M_{\theta_3} W_{y\theta_3} \\ \Delta Z &= P_x W_{xz} + P_y W_{yz} + P_z W_{zz} + M_{\theta_1} W_{z\theta_1} + M_{\theta_2} W_{z\theta_2} + M_{\theta_3} W_{z\theta_3} \\ \Delta \theta_1 &= P_x W_{x\theta_1} + P_y W_{y\theta_1} + P_z W_{z\theta_1} + M_{\theta_1} W_{\theta_1\theta_1} + M_{\theta_2} W_{\theta_1\theta_2} + M_{\theta_3} W_{\theta_1\theta_3} \\ \Delta \theta_2 &= P_x W_{x\theta_2} + P_y W_{y\theta_2} + P_z W_{z\theta_2} + M_{\theta_1} W_{\theta_1\theta_2} + M_{\theta_2} W_{\theta_2\theta_2} + M_{\theta_3} W_{\theta_2\theta_3} \\ \Delta \theta_3 &= P_x W_{x\theta_3} + P_y W_{y\theta_3} + P_z W_{z\theta_3} + M_{\theta_1} W_{\theta_1\theta_3} + M_{\theta_2} W_{\theta_2\theta_3} + M_{\theta_3} W_{\theta_3\theta_3} \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

где P_x, P_y, P_z — проекции силы P на координатные оси X, Y, Z ; $M_{\theta_1}, M_{\theta_2}, M_{\theta_3}$ — моменты сил P_x, P_y, P_z относительно координатных осей; W_{xx}, W_{yy}, W_{zz} — податливости узла станка вдоль осей X, Y, Z ; $W_{\theta_1\theta_1}, W_{\theta_1\theta_2}, W_{\theta_1\theta_3}$ — крутильные податливости узла станка; $W_{xy}, W_{x\theta_1}, W_{y\theta_2}, \dots, W_{\theta_2\theta_3}$ — податливости, характеризующие взаимное влияние по каждой из пар координатных осей.

Предварительные исследования показали, что при обработке плоскостей корпусных деталей на многооперационных станках горизонтальной компоновки отклонения формы, размера и расположения плоскости есть функция двух угловых и одного линейного перемещений торцевой фрезы $\Delta \theta_1, \Delta \theta_2, \Delta Z$ и поворотного стола $\Delta \theta'_1, \Delta \theta'_2, \Delta Z'$, которые при незначительном влиянии упругой деформации станины станка можно рассматривать и суммировать как независимые, т.е. $\Delta Z = f_1(\Delta \theta_1, \Delta \theta_2, \Delta Z_1) + f_2(\Delta \theta'_1, \Delta \theta'_2, \Delta Z'_1)$.

Установлено, что для оценки ΔZ целесообразно построить векторное поле Φ отклонений m точек реальной поверхности от номинального положения, заданного геометрической поверхностью. Вектор, построенный в каждой точке обрабатываемой плоскости, равен сумме векторов упругих перемещений торцевой фрезы и поворотного стола (заготовки):

$$\Delta \bar{Z}i = \Delta \bar{Z}i_{\text{шп}} + \Delta \bar{Z}i_{\text{см}}. \quad (2)$$

Преобразования координат точек, принадлежащих торцовой фрезе и обрабатываемой заготовке, путем их умножения на две матрицы преобразования (поворота) дают значения составляющих формул(2):

$$\left. \begin{aligned} \Delta \bar{Z}i_{\text{шп}} &= \Delta \bar{Z}i - \chi_i \Delta \theta_2 + \Delta \theta_2 \chi_i \\ \Delta \bar{Z}i_{\text{см}} &= \Delta \bar{Z}'_i + \chi'_i \Delta \theta'_2 + \Delta \theta'_2 \chi'_i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где χ_i, χ'_i - координаты точки, принадлежащей торцовой фрезе;

χ'_i, χ'_i - координаты точки, принадлежащей обрабатываемой заготовке; $\Delta \bar{Z}_i$ - линейные перемещения торцовой фрезы вдоль оси $\bar{Z}$; $\Delta \bar{Z}'_i$ - линейные перемещения заготовки вдоль оси $\bar{Z}'$.

Торцовое фрезерование характеризуется переменной величиной дуги контакта фрезы с детали на участках входа и выхода фрезы, переменным числом зубьев, участвующих в работе, что, соответственно, приводит к значительным колебаниям сил резания и, как следствие, к переменным упругим деформациям. Исследованиями установлено, что величина составляющих сил резания на каждом работающем зубе зависит от места его расположения на дуге контакта с деталью. Следовательно, рассматривая мгновенное положение k -го зуба, проходящего через заданную точку поверхности, можно определить расположение на дуге контакта всех остальных работающих зубьев и значения составляющих сил резания. Для нахождения суммарного вектора отклонений каждой i -ой точки реальной поверхности от номинального положения [см.(2)] определяли: положение фрезы на конкретном участке обработки, количество работающих зубьев, их угловые координаты и действующие силы резания. Полученное таким образом векторное поле отклонений для конкретной плоскости позволяет определить погрешности ее обработки в результате упругих деформаций технологической системы.

Для отсчета отклонений формы, согласно стандарту СЭВ СТ 301-76, нами выбрана средняя плоскость. Векторное поле Φ отклонений точек реальной поверхности служит исходной информацией для нахождения уравнения регрессии, определяющего положение средней плоскости. Значения коэффициентов регрессии $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ получаем, определяя (с помощью ЭВМ) минимальную остаточную сумму квадратов отклонений точек реальной поверхности от средней плоскости. Если уравнение полученной средней плоскости

$$\hat{z} = \beta_0 + \beta_1(x - \bar{x}) + \beta_2(y - \bar{y}), \quad (4)$$

где $\bar{x}, \bar{y}$ - средние значения координат рассматриваемых точек поверхности, то разность $\Delta \hat{z}$ между z - текущим отклонением точки, принадлежащей реальной поверхности, и $\hat{z}$ определяет величину отклонений от средней плоскости. Сумма абсолютных значений наибольших отклонений по обе стороны средней плоскости представляет отклонение формы:

$$\Delta \phi = |\Delta \hat{z}_{\max}| + |\Delta \hat{z}_{\min}|. \quad (5)$$

Отклонение расположения

$$\Delta \rho = \ell \sqrt{\beta_1^2 + \beta_2^2}, \quad (6)$$

где ℓ - длина нормируемого участка.

Отклонение размера для одной детали определяется в каждой точке рассматриваемой поверхности значением полученного вектора $\Delta \hat{z}_i$.

Таким образом, зависимости (2; 5; 6) представляют математическую модель расчета погрешностей обработки плоских поверхностей от упругих деформаций технологической системы. Реализация модели на ЭВМ позволяет рассчитать погрешности обработки плоских поверхностей, исходя из заданных параметров резания, жесткости элементов технологической системы, диаметра и материала фрезы, числа ее зубьев, расположения относительно обрабатываемой плоскости, твердости материала и допуска на размеры заготовки.

Глава 3. Экспериментальная проверка математической модели расчета отклонений формы, размера и расположения плоскости.

Для расчета упругих отклонений элементов технологической системы по зависимостям (I) необходимо располагать значениями податливостей узлов станка. Состав уравнений (I) показывает, что искомые упругие перемещения зависят от всех сил и моментов, действующих одновременно. Разработана методика, позволяющая определять податливости узлов станка с учетом их взаимного влияния. Применен метод преобразования прямых прямоугольных матриц в псевдообратные, т.е., если

$$|\Delta| = |W| \cdot |\rho| \quad (7)$$

$$\text{то,} \quad |W| = |\rho^+| \cdot |\Delta|, \quad (8)$$

где $|\Delta|$ – матрица перемещений, полученных экспериментально; $|W|$ – матрица неизвестных коэффициентов податливостей; $|\rho|$ – матрица сил и моментов; $|\rho^+|$ – псевдообратная матрица $|\rho|$.

При этом, найденные приближенные значения W_i имеют минимально возможную средне-квадратическую ошибку. В работе по предложенной методике для шпиндельного узла и узла поворотного стола определены коэффициенты, характеризующие статическую и квазистатическую податливости, отличающиеся между собой не более 20%.

В результате моделирования на ЭВМ однопереходного процесса обработки плоскости по двухстрочной схеме было рассчитано векторное поле отклонений точек от номинального положения. Анализ моделирования показал, что в результате обработки поверхность имеет систематическое отклонение от плоскостности в сторону вогнутости, величина которого изменяется по ширине и длине фрезерования. На стыке двух строк обработки имеется "ступенька". При моделировании упругие перемещения фрезы превалируют над упругими перемещениями заготовки. Поэтому суммарное отклонение имеет большее значение при меньших упругих перемещениях заготовки и, наоборот, чем больше упругие отклонения заготовки, тем меньше величина суммарного отклонения. Проверка модели расчета погрешностей в лабораторных и производственных условиях показала, что разработанные зависимости адекватно отображают действительный процесс образования отклонений формы, размера и расположения при обработке плоскостей торцовым фрезерованием.

Глава 4. Разработка математических моделей плана обработки плоскости и последовательности обработки плоскостей.

Разработанная в главе 2 математическая модель расчета отклонений формы, размера и расположения плоскости позволила построить математическую модель оптимального плана обработки плоскостей корпусных деталей, основанную на принципе динамического программирования. Динамическое программирование в этом случае выступает как некоторый оптимальный метод перебора вариантов. Основной принцип метода заключается в том, что каково бы ни было первоначальное состояние и первоначальное решение, последующее решение должно определять оптимальное поведение относительно состояния, полученного в результате первоначального решения, т.е. многошаговый процесс строится таким образом, чтобы при планировании каждого шага учитывался выигрыш не только на данном этапе, а и на всех этапах процесса. Выбрав критерием оптимального управления суммарную тех-

технологическую себестоимость C , получим критерий (целевую функцию) аддитивного типа.

Информация, необходимая для разработки математической модели, предусматривает основные данные о детали, заготовке, станке и инструменте. Скорость резания V назначается для конкретных условий обработки. Задаются массив подач $S \in \{S_{min}, \dots, S_k, \dots, S_{max}\}$ и ряд величин срезаемого слоя от t_{min} до t_{max} с шагом γ (t_{min} — наименьшая глубина резания). Принимаем, что заготовка в процессе ее обработки имеет ряд промежуточных значений допусков. Процесс удаления заданного общего минимального припуска Z_{amin} разбивается на ряд этапов N . Величина первого этапа равна $l_1 = t_{min}$, второго $l_2 = t_{min} + \gamma$, величина этапа с номером m : $l_m = t_{min} + (m-1)\gamma$. При назначении параметров k -го перехода учитываются параметры $(k-1)$ -го перехода. Расчет вариантов и формирование планов обработки ведется от завершающего перехода, который определяет заданную точность. Разработаны ограничения, учитывающие параметры качества детали и условия обработки.

По предложенной методике был разработан алгоритм и программа на языке Фортран IV для ЭВМ ЕС. Направление расч. от детали к заготовке, используя принцип динамического программирования, позволяет значительно (в 1,5 – 2 раза) сократить время, необходимое для определения оптимального варианта многопереходной обработки по сравнению с направленным перебором.

При разработке математической модели оптимальной последовательности обработки плоскостей и основных отверстий для оценки вариантов по затратам времени использован критерий максимальной производительности:

$$Q = \frac{K_0 X}{1 + K_0 X t_x + K_0 X \sum_{i=1}^N A_i (t'_{noz} + t_{cu}) + K_0 X \sum_{i=1}^N C_i}, \quad (9)$$

где $X = \frac{V}{V_0}$ (V_0 — скорость резания базового варианта; V — скорость резания проектируемого варианта); K_0 — технологическая производительность базового варианта; t_x — время, затрачиваемое на вспомогательные переходы; A_i — повторяемость использования i -го инструмента при обработке детали; $(t'_{noz} + t_{cu})$ — время позиционирования и смены инструмента; $\sum_{i=1}^N C_i$ — сумма потерь времени, связанного с эксплуатацией инструмента.

Задачу нахождения оптимальной последовательности обработки плоскостей корпусных деталей можно сформулировать следующим образом: необходимо назначить такую последовательность обработки

плоскостей и взаимосвязанных с ними основных отверстий, чтобы время взаимных вспомогательных перемещений заготовки и инструмента было минимальным. Для решения поставленной задачи нами был применен метод динамического программирования, основанный на принципе Беллмана, который заключается в том, что, если некоторая функция качества имеет вид аддитивного функционала, то конец оптимальной траектории оптимален. Задачи такого типа относят к задаче коммивояжера. В отличие от классической постановки эта задача включает некоторые ограничения: 1) если i -й и j -й переходы соответствуют черновой и чистовой обработке, то i -й должен предшествовать j -му; 2) если ℓ и k соответствуют чистовым переходам на плоскостях и отверстиях, взаимное расположение которых оговорено требованиями чертежа, то для уменьшения отклонений расположения осуществляется один из двух вариантов их выполнения - ℓ следует за k или k следует за ℓ ; 3) задана начальная поверхности обработки. В отдельных случаях наличие условий 2 и 3 не обязательно. Разработанные рекуррентные соотношения, включая ограничения 1, 2, 3, позволяют минимизировать вспомогательное время.

По предложенной модели разработаны алгоритм и программа на алгоритмических языках Фортран IV и Ассемблер для ЭВМ ЕС. Результаты расчета по программе и производственная проверка показали, что предложенная методика нахождения оптимальной последовательности обработки поверхностей корпусных деталей сокращает вспомогательное время до 20% по сравнению со временем по базовому варианту обработки.

Глава 5. Технико-экономическая эффективность результатов исследований.

Разработанные методика расчета отклонений формы, размера и расположения и математические модели плана и последовательности обработки плоскостей были реализованы в производственных условиях при проектировании операций обработки корпусных деталей на многооперационных станках мод. МС 12-250 и МС 30-500.

Разработанные модели и алгоритмы, реализованные на ЭВМ в производственных условиях, подтвердили правильность основных научных положений работы. Анализ экономической эффективности показал, что производительность оборудования повысилась на 16-20%. Полученный экономический эффект составил около 3 тыс. рублей на единицу оборудования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполненных исследований были получены следующие новые научные результаты.

1. Разработана методика расчета отклонений формы, размера и расположения обрабатываемых плоскостей корпусных деталей любой конфигурации, учитывающая взаимосвязь параметров точности, производительности и экономичности обработки.

2. Создана математическая модель образования отклонений формы, размера и расположения плоскостей.

3. Созданы математические модели оптимального плана и последовательности обработки плоскостей на принципах целочисленного программирования.

На основе выполненных исследований можно сделать следующие основные выводы.

1. Опережающее развитие станков с ЧПУ при сохранении большого удельного веса многооперационных станков в технологии механической обработки резанием сложных корпусных деталей обосновывает выбор направления исследования, касающегося оптимизации операции фрезерования плоских поверхностей корпусных деталей.

2. Технологическая система обладает неравномерными упругими свойствами, рассмотренными на основе положений теории упругости линейных систем со многими степенями свободы. Для приближенного описания простейших систем целесообразно использовать представление об эллипсе и эллипсоиде жесткости, согласно которому направления их главных осей могут не совпадать с направлениями осей координат станка.

3. Для определения отклонений формы, размера и расположения плоскости при различных схемах фрезерования следует применять математическое моделирование процесса торцового фрезерования. Экспериментальное исследование точности обработанных плоскостей показало, что погрешность расчетных и экспериментальных значений параметров точности не превышает 11%. Это позволило включить разработанные зависимости в математическую модель плана обработки плоскости.

4. Для сокращения продолжительности специальных испытаний жесткости станков для заданных условий обработки рекомендуется использовать разработанный метод определения податливостей узлов станка на основе приближенного решения системы линейных уравнений, определяющих упругие перемещения элементов технологической

системы псевдообращением матрицы сил и моментов.

5. При разработке математических моделей расчета погрешностей обработки плоскостей необходимо учитывать податливости взаимного влияния элементов технологической системы, что повышает достоверность моделей.

6. При нахождении плана обработки отдельной поверхности целесообразно использовать математическую модель и алгоритм, разработанные на основе принципа динамического программирования, которые позволяют обеспечить необходимую точность в пределах возможностей технологического метода и минимальную себестоимость обработки для конкретных производственных условий.

7. Разработана методика назначения оптимальной последовательности обработки плоскостей на основе принципа Беллмана. По этой методике рекомендуется находить минимальное вспомогательное время с учетом технологических особенностей многооперационных станков (скорости позиционирования, времени смены инструмента и поворота стола). Оптимизация последовательности обработки с помощью ЭВМ позволяет сократить вспомогательное время на 15-20%.

8. Разработанные методики, алгоритмы и программы расчета погрешностей обрабатываемых плоскостей, нахождения оптимального плана обработки плоскости и оптимальной последовательности обработки плоскостей легко адаптируются к другим условиям обработки.

9. Полученные научные результаты использованы в промышленности и подтверждаются актом внедрения. Оптимизация операции фрезерования плоскостей корпусных деталей на станках с ЧПУ позволила сократить трудоемкость обработки деталей на 16-22%; снизить технологическую себестоимость на 10-12%; повысить производительность обработки на 16-20%; получить экономический эффект около 3000 рублей в год на каждой единице оборудования.

Содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Диланян Р.З., Кравченко И.И. Построение оптимальных операций обработки плоскостей корпусных деталей на станках с ЧПУ типа "ОЦ". Материалы всесоюзной научно-технической конференции. Ташкент, ТашНИ, 1974, с. 54-55.

2. Диланян Р.З., Кравченко И.И., Гайгал И.В. Автоматизация проектирования оптимальных операций обработки корпусных деталей на станках с числовым программным управлением типа "ОЦ". Тезисы докладов IV Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции "Научные основы автоматизации производственных процессов

в машиностроении и приборостроении". -М., МВТУ им.Н.Э.Баумана, 1975, с.50-52.

3. Капустин Н.М., Загоруйко Е.А., Кравченко И.И. Оптимизация распределения припуска на обработку поверхности детали. Известия высших учебных заведений. М., Машиностроение, 1978, № 6, с.153-156.

4. Капустин Н.М., Диланян Р.З., Кравченко И.И. Оптимизация последовательности обработки поверхностей. Известия высших учебных заведений. М., Машиностроение, 1978, № 7, с.178-183.

5. Кравченко И.И. Автоматизация проектирования маршрута обработки поверхности детали. В методических указаниях к лабораторным работам по курсу "Автоматизация проектирования технологических процессов". Часть I. "Автоматизация проектирования технологических маршрутов обработки". Под ред.Капустина Н.М., МВТУ им.Баумана, 1979, с.16-19.

6. Кравченко И.И. Оптимизация последовательности обработки плоскостей и основных отверстий деталей типа корпус на многооперационных станках с ЧПУ. В методических указаниях к лабораторным работам по курсу "Автоматизация проектирования технологических процессов". Часть II. "Автоматизация проектирования станочных операций". Под ред.Капустина Н.М., МВТУ им.Баумана, 1979.

7. Кравченко И.И. Математическое моделирование обработки плоских поверхностей торцовым фрезерованием. Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции "Усовершенствование технологической подготовки производства машиностроительных и приборостроительных предприятий с применением средств вычислительной техники". Таллин, ТПИ, 1979.

