

X912

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

ХРЕБТОВ Юрий Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ
РАСТАЧИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ С ПЕРЕМЕННЫМ ПРИПУСКОМ

Специальность 05.02.08 - "Технология
машиностроения"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 1978

ЧПИ

Работа выполнена на кафедре "Автоматизация механосборочного производства" Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Тверской М.М.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Маргулис Д.К.,
кандидат технических наук, доцент Симахин Я.А.

Ведущее предприятие - производственное объединение "Челябинский стеклостроительный завод им. Серго Орджоникидзе".

Защита состоится _____ 1978г., в 15.00, в аудитории 244 на заседании специализированного совета К-597/1 по присуждению ученым степени кандидата технических наук в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола (454044, Челябинск-44, проспект им. В.И. Ленина, 76).

С диссертацией можно познакомиться в библиотеке института.
Автореферат разослан _____ 1978 г.

Ученый секретарь
специализированного
совета



Мемышаков В.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Повышение эффективности общественного производства и улучшение качества выпускаемой продукции - главное направление десятой пятилетки. Перед машиностроением ставится задача совершенствования наиболее трудоемких и малоеффективных операций на базе новой техники и технологии. К таким операциям следует отнести обработку отверстий в деталях типа "стакан", являющихся предметом массового производства ряда отраслей машиностроения. Диаметры этих отверстий лежат в пределах 40...150 мм, а отношение их длины к диаметру обычно составляет 3,5...7. Предварительно отверстия в заготовках, как правило, получают горячей штамповкой, что приводит к значительному колебанию припуска на последующую обработку и к его изменению по длине отверстия.

Традиционная технология механической обработки деталей данного класса предусматривает обработку локальных участков отверстий, уступов и цилиндрических участков, и им примыкающих, с помощью плавающих расточных пластин из быстрорежущей стали. Для этих операций характерно многократное увеличение глубины резания вдоль образующей, что при обработке с постоянным режимом резания приводит к потере производительности и частым отказам инструмента из-за поломок и выкрашиваний режущей кромки. По указанным причинам выполнение рассматриваемых операций с ручной подачей в ряде случаев оказывается более эффективным. Одним из путей снижения перегрузок инструмента и одновременного увеличения производительности обработки является автоматическое управление режимом резания на основе информации о действительной величине нагрузки на инструмент. Важнейшей задачей, решаемой при создании системы автоматического управления (САУ) режимом резания, является определение алгоритма оптимального управления, обеспечивающего экстремальное значение выбранного критерия оптимальности. При решении этой задачи в настоящее время, как правило, не учитывается рассеивание прочности режущего инструмента и ее изменение в процессе эксплуатации. Кроме того, оптимальное управление процессом обработки в условиях действия ограничений по прочности инструмента обычно связывают со стабилизацией одного из силовых параметров процесса резания (чаще всего тангенциальной составляющей силы резания P_2) на некотором предельном уровне. При этом не учитывается тот факт, что картина напряжений в режущей части ин-

струмента и их максимальное значение зависят не только от величины стабилизируемого параметра, но и от глубины резания, степени затупления инструмента и других факторов, изменяющихся в процессе обработки. Стабилизация силы резания в этих условиях приводит, в частности, к резкому снижению подачи при больших глубинах резания, а также к потере стойкости инструмента при работе с малой толщиной срезаемого слоя.

Другим путем повышения эффективности механической обработки отверстий в деталях типа "стакан" является совершенствование режущего инструмента. Снижение неконтролируемых перегрузок инструмента при использовании САУ процессом резания позволяет в ряде случаев применить многолезвийный расточечный инструмент, оснащенный твердым сплавом, взамен расточных пластин из быстрорежущей стали. Использование такого инструмента позволяет не только повысить производительность обработки, но и сократить количество операций механической обработки цилиндрических отверстий путем объединения операций, выполняемых по традиционной технологии расточными пластинами и резцами в консольных оправках.

Одной из основных проблем использования многолезвийного инструмента для растачивания отверстий с переменным припуском, имеющих значительную глубину, является обеспечение заданной точности обработки. Решение этой проблемы требует, в частности, определения предельных значений торцевого и радиального бieniaния режущих яромок инструмента. Применительно к процессу многолезвийного растачивания в условиях автоматического управления режимом резания данный вопрос в настоящее время практически не исследован.

Цель работы является повышение эффективности растачивания отверстий с переменным припуском путем создания системы автоматического управления процессом резания и разработки многолезвийного твердосплавного расточечного инструмента.

Основные задачи. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработка методики оптимизации режима резания с учетом рассеивания прочности твердосплавного инструмента и ее изменения в процессе эксплуатации.

2. На основании разработанной методики найден и исследован алгоритм оптимального управления процессом двухлезвийного растачивания.

3. Проведено исследование различных способов реализации найденного алгоритма оптимального управления и выбрана схема САУ.

4. Проведено исследование точности двухлезвийного растачивания отверстий с переменным припуском при автоматическом управлении процессом. В результате исследования получены предельные значения торцевого и радиального бieniaя противоположных режущих кромок двухлезвийного инструмента.

5. На основании проведенных исследований спроектированы, изготовлены и внедрены в производство САУ процессом растачивания и специальный двухлезвийный твердосплавный расточкой инструмент.

Научная новизна. Впервые при разработке алгоритма оптимального управления процессом обработка твердосплавным инструментом его неустранимый отказ рассматривается как случайное событие, вероятность наступления которого зависит от режима резания. С использованием соотношений алгебра вероятностей, получено выражение для критерия оптимальности, в котором учтена вероятность неустранимого отказа инструмента из-за поломки.

Проведено экспериментальное исследование зависимостей вероятности неустранимого отказа инструмента из-за поломки и его стоимости с учетом поломки, от параметров режима резания.

Исследована чувствительность приведенных затрат на обработку, в которых учтена вероятность поломки инструмента, к погрешности определения оптимальной подачи.

На основе экспериментальных силовых зависимостей исходного процесса и найденного алгоритма оптимального управления получены и исследованы зависимости составляющих силы резания от параметров режима резания при оптимальном управлении.

Построена математическая модель образования погрешности диаметра обработки и исследованы условия формообразования при двухлезвийном растачивании отверстий с переменным по длине обработки припуском в условиях автоматического управления подачей. На основании полученной модели разработана методика определения предельных значений торцевого и радиального бieniaя режущих кромок инструмента.

Практическая полезность. Спроектированы и изготовлены элементы САУ для операций растачивания отверстий с переменным припуском. Разработанной САУ оснащены серийно выпускаемые специальные расточные полуавтоматы, которые внедрены в производство.

Разработаны, изготовлены и внедрены в производство двухлезвийные расточные твердосплавные инструменты с быстросменной режущей частью.

Разработанная методика оптимизации режима резания может быть использована при оптимизации режимов и разработке САУ процессами чернового наружного точения, чернового фрезерования и другими видами обработки, допускающими при оптимальном режиме поломку некоторой доли инструмента.

Реализация работы в промышленности. На одном из заводов г. Златоуста Челябинской области на различных расточных операциях внедрены станки, оснащенные САУ. Внедрение этих станков позволило поднять производительность обработки в 1,4...1,7 раза, одновременно сократить потери от брака и затраты на режущий инструмент. На этом же заводе внедрен твердосплавный двухлезвийный расточный инструмент на операции чернового растачивания отверстия $\varnothing 80$ мм и длиной 390 мм. Внедрение инструмента совместно с САУ позволяло поднять производительность обработки в 1,9-2 раза, сократить затраты на инструмент в 2-2,5 раза и сократить число операций обработки отверстия. Суммарный годовой экономический эффект от внедрения перечисленных мероприятий составил 54000 руб.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации автором докладывались:

1. На научно-технических конференциях в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола в 1974...1978 гг.

2. На первой научно-технической конференции молодых ученых Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола в 1977 г.

3. На Всесоюзной конференции "Оптимизация технологических процессов механической обработки деталей и сборки приборов", Киев, 1978 г.

Объем работы и ее структура. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения; изложена на 150 страницах машинописного текста. Библиография состоит из 105 наименований. В диссертационной работе имеется 58 иллюстраций, 13 таблиц и 6 приложений.

I. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РАСТАЧИВАНИЯ ДВУХЛЕЗВИЙНЫМ ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

При черновой обработке сталей, в особенности закаленных, величина подачи, как правило, ограничивается возможностью поломки режущего инструмента. При классическом подходе к задаче оптимизации режима резания ограничение по прочности инструмента рассматривается как детерминированное. В то же время известно, что прочность твердосплавного инструмента, в особенности с напайными пластинками, обладает большим рассеиванием, что выражается, например, в рассеивании значений разрушающих подач, полученных при испытаниях инструмента методом ступенчато возрастающей подачи. Кроме того, прочность твердосплавного инструмента изменяется в процессе эксплуатации. Изменение прочности инструмента обусловлено протеканием в его режущей части таких сложных термомеханических процессов, как возникновение и развитие усталостных трещин, термическое растрескивание, пластическое течение материала режущего клина и др. На прочность инструмента влияет также уменьшение размеров твердосплавной пластиинки по мере ее переточки.

Таким образом, поломки твердосплавного инструмента, возникающие при обработке, являются результатом пикових случайных перегрузок, действующих на фоне рассеивания прочности инструмента и ее изменения в процессе эксплуатации. В этих условиях классический подход к задаче оптимизации режима резания, при котором ограничение по прочности рассматривается как детерминированное, не может дать сколько нибудь достоверных результатов, касающихся оптимальных значений скорости резания и, в особенности, подачи.

Методика оптимизации режима резания. С учетом вышеизложенного разработана методика оптимизации режима резания, основная на следующих положениях:

1. Отказ инструмента, наступивший в процессе обработки, является сложным случайным событием.

2. Все отказы инструмента можно разделить на устранимые и неустранимые. К устранимым относятся те отказы, при наступлении которых, работоспособность инструмента может быть восстановлена переточкой. Это предельный износ, незначительные сколы по задней поверхности, выкрашивания и т.д. После неустранимого отказа работоспособность инструмента восстановить переточкой либо вновь-

можно, либо экономически нецелесообразно. К неустранимым отказам, помимо поломок, срывов пластины и других видов разрушения инструмента следует также отнести отказы из-за предельного затупления, при наступлении которого работоспособность инструмента нельзя восстановить переточкой из-за достижения минимальных допустимых размеров рабочей части. Таким образом, вероятность отказа инструмента, равная единице, выражается следующей суммой:

$$\tilde{P}_n + \tilde{P}_c + \tilde{P}_y = 1, \quad (I)$$

где \tilde{P}_n - вероятность неустранимого отказа из-за разрушения инструмента; \tilde{P}_c - вероятность неустранимого отказа из-за предельного стачивания; \tilde{P}_y - вероятность устранимого отказа. Сумма первых двух слагаемых выражения (I) представляет собой вероятность неустранимого отказа \tilde{P}_n .

3. Фиксированным условиям обработки соответствует определенная вероятность неустранимого отказа. При изменении режима резания изменяется соотношение между вероятностями устранимого и неустранимого отказа. Например, увеличение подачи, при прочих равных условиях, вызывает увеличение вероятности неустранимого отказа инструмента за счет увеличения вероятности его поломки.

4. При увеличении \tilde{P}_n увеличиваются затраты на инструменты, отнесенные к одному периоду стойкости, и одновременно уменьшается средняя стойкость инструмента, поскольку его поломка наступает, как правило, значительно раньше предельного затупления.

5. Как показывает практика, черновая обработка твердосплавным инструментом с режимами резания, при которых вероятность его отказа из-за поломки близка к нулю, оказывается явно не экономичной. Иными словами, оптимальному режиму резания соответствует некоторое оптимальное значение вероятности неустранимого отказа инструмента из-за поломки.

Формирование критерия оптимальности с учетом поломок инструмента. В качестве критерия оптимальности при определении алгоритма оптимального управления используем функцию приведенных удельных затрат на обработку единицы площади боковой поверхности отверстий:

$$\Theta_t = \frac{E}{v s} + \frac{E \tilde{t}_m + N}{v s T(v, s, t)}, \quad (2)$$

где E - приведенные затраты, приходящиеся за одну минуту работы станка, исключая затраты на инструмент, коп/мин; \tilde{t}_m - время простоя станка при смене инструмента, мин; N - затраты на инстру-

мент, отнесенные к одному периоду стойкости, исп.; v - скорость резания, м/мин; s - подача на одну режущую кромку, мм/од; t - глубина резания, мм; $T(v, s, t)$ - ожидаемая средняя стойкость при условии сохранения постоянства режима резания в течение всего периода стойкости. Как уже указывалось, увеличение вероятности неустранимого отказа за счет поломки инструмента вызывает увеличение затрат на инструменты I и уменьшение средней стойкости $T(v, s, t)$. Зависимость затрат на инструмент от вероятности неустранимого отказа в общем виде может быть выражена соотношением:

$$I = \tilde{P}_n A_n + (1 - \tilde{P}_n) I_p, \quad (3)$$

где A_n - стоимость инструмента, исп; I_p - затраты на одну переточку, исп.

Затраты на инструмент могут быть также выражены через вероятность поломки \tilde{P}_n . Поступательно, $\tilde{P}_n = \tilde{P}_n \tilde{P}_c$. В свою очередь \tilde{P}_c также зависит от \tilde{P}_n . Эта зависимость, выведенная с использованием алгебры вероятностей, выражается следующим уравнением:

$$\tilde{P}_c = \frac{(1 - \tilde{P}_n)^k}{\sum_{j=1}^k (1 - \tilde{P}_n)^{j-1}}, \quad (4)$$

где k - максимальное число периодов стойкости инструмента до его списания.

После соответствующих подстановок получаем:

$$I = \frac{A_n + I_p \sum_{j=1}^k (1 - \tilde{P}_n)^{j-1}}{\sum_{j=1}^k (1 - \tilde{P}_n)^{j-1}}. \quad (5)$$

Нетрудно убедиться, что при $\tilde{P}_n = 0$ выражение (5) соответствует общепринятой формуле для определения затрат на инструмент без учета его поломок.

Таким образом, для нахождения оптимального режима резания в предлагаемой постановке задачи необходимо предварительное определение зависимостей средней стойкости инструмента с учетом его поломок и вероятности отказа из-за поломки от параметров управления и возмущающих воздействий. При растачивании отверстий с переменным по длине обработки припуском основным возмущающим воздействием является глубина резания. Наряду с глубиной резания на напряжение в режущей части инструмента влияет также и его затупление, что в общем случае требует изменения управляемых параметров и в функции затупления. В связи с этим проведено экспе-

риментальное исследование влияния затупления инструмента по задней грани на величину разрушающей подачи. Совокупность разрушающих подач, соответствующих различным степеням затупления, получены по методу ступенчато-возрастающей подачи. Сравнение полученных совокупностей с помощью критерия Вильямсона, показывает, что в исследуемом диапазоне изменения глубины резания (3...6 мм) влиянием затупления на разрушающую подачу можно пренебречь, при изменении последнего от нуля до значений близких к предельным. Полагая наличие пропорциональной связи между оптимальными и разрушающими подачами, данный вывод можно распространить и на зависимость оптимальной подачи от величины затупления инструмента. Таким образом, подача при оптимальном управлении в данном случае должна изменяться только в функции глубины резания. Скорость резания принята постоянной, поскольку известно, что основной эффект от автоматического управления режимами резания достигается за счет регулирования одного параметра — подачи. Величина принятой скорости резания равна 95 м/мин, что соответствует ее оптимальному значению при средних условиях обработки.

Вероятность поломки инструмента оценивалась по частоте поломок при проведении стойкостного эксперимента. Для сокращения расхода металла при проведения эксперимента стойкость и вероятность поломки двухлезвийного инструмента определялась по результатам испытаний однолезвийного инструмента. При этом двухлезвийный инструмент рассматривался как система последовательно соединенных, в смысле надежности, элементов. С учетом того, что распределение стойкости твердосплавного инструмента наиболее хорошо аппроксимируется законом Вейбулла-Гнеденко, получены формулы, устанавливающие связь средней стойкости и вероятности поломки одно- и двухлезвийного инструмента. Эти формулы имеют вид:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{\alpha}}; \quad (6)$$

$$\frac{\tilde{P}_{n_2}}{\tilde{P}_{n_1}} = \frac{2 \int_0^{\infty} e^{-2ct^{\alpha}} dt}{\int_0^{\infty} e^{-ct^{\alpha}} dt}. \quad (7)$$

Здесь α и c — параметры распределения Вейбулла-Гнеденко $P(t) = 1 - e^{-ct^{\alpha}}$, оцениваемые по результатам стойкостного эксперимента.

С учетом вышеизложенного в результате математической обработки двухфакторного эксперимента 2^2 получены следующие уравнения искомых моделей, адекватно описывающие реальную связь между параметрами при скорости резания 95 м/мин:

$$T = \frac{29,7}{S^{2,68} t^{1,12}} ; \quad (8)$$

$$\tilde{P}_n = 0,134 S^{1,47} t^{0,79} . \quad (9)$$

На основании полученных моделей и выражений (2) и (5) произведен расчет зависимости приведенных удельных затрат от подачи при целых значениях глубины резания в диапазоне от 2 до 8 мм. График этой зависимости изображен на рис.1. Сочетание значений глубин резания и подач, соответствующих точкам минимума приведенных затрат, образуют алгоритм оптимального управления процессом двухлезвийного растачивания. График алгоритма представлена на рис.2. Исследование полученного алгоритма оптимального управления показывает, что оптимальная вероятность неустранимого отказа из-за поломки должна увеличиваться при увеличении глубины резания, составляя в среднем 13%, см. рис.3.

Проведено исследование чувствительности удельных приведенных затрат с учетом поломок инструмента к погрешности определения оптимальной подачи S_{opt} . Исследование показало, что в диапазоне $\pm 10\% S_{opt}$ относительное увеличение затрат при любой глубине резания не превышает 1,3%.

Ш. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Для точной реализации найденного алгоритма оптимального управления в процессе обработки необходимо осуществлять непрерывный контроль глубины резания, что сопряжено со значительными трудностями. В качестве косвенного источника информации о текущем значении глубины резания может быть использована одна из составляющих силы резания. В связи с этим проведено экспериментальное исследование зависимостей осевой и тангенциальной составляющих силы резания при растачивании от подачи, глубины резания и степени затупления инструмента. После математической обработки результатов трехфакторного эксперимента 2^3 получены следующие уравнения регрессий искомых зависимостей:

$$P_x = 21,25S + 24,29t + 178,3\Delta + 123,3/S\Delta + 124,75t\Delta - 45,6st - 111,06st\Delta ; \quad (10)$$

$$P_z = -29,98 - 82,14S + 31,93t + 87,71\Delta + 188,78t + 16,67t\Delta , \quad (II)$$

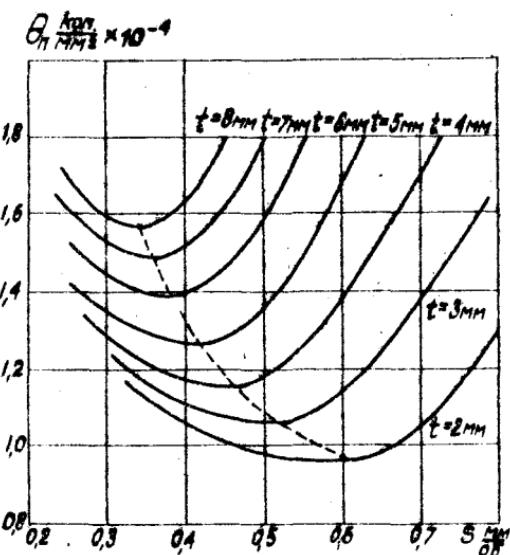


Рис.1. Зависимость удельных приведенных затрат с учетом поломок инструмента от подачи

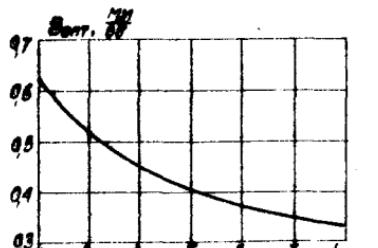


Рис.2. Алгоритм оптимального управления

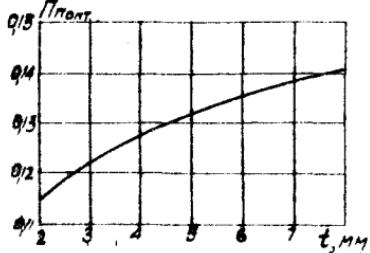


Рис.3. Зависимость оптимальной вероятности поломки инструмента от глубины резания

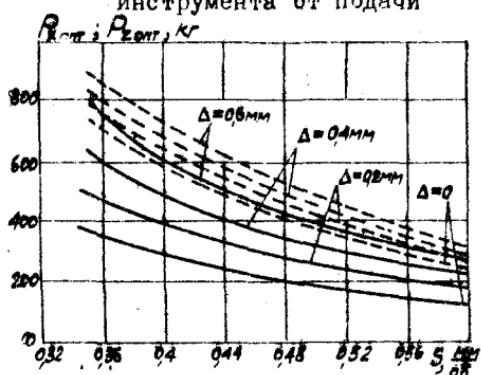


Рис.4. Зависимость осевой(—) и тангенциальной(---) составляющих силы резания от подачи в процессе реализации алгоритма оптимального управления

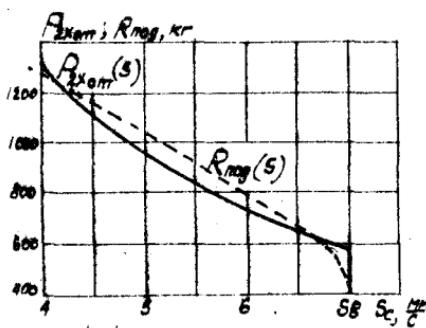


Рис.5. Реализация алгоритма оптимального управления

где Δ - величина фаски износа по задней грани, мм. На основании выражений (10) и (11) и найденного алгоритма оптимального управления получены зависимости $P_{x_{opt}}(s)$ и $P_{z_{opt}}(s)$. Эти зависимости показывают, как будут изменяться значения составляющих P_x и P_z при изменении подачи в процессе реализации найденного алгоритма оптимального управления в условиях различной степени затупления инструмента. Из графиков зависимостей $P_{x_{opt}}(s)$ и $P_{z_{opt}}(s)$ (рис.4) видно, что уменьшение оптимальной подачи вызывает значительное увеличение $P_{x_{opt}}$ и $P_{z_{opt}}$. Так, при уменьшении S_{opt} от 0,53 до 0,34 мм/об, что соответствует увеличению глубины резания от 3 до 8 мм, $P_{x_{opt}}$ при $\Delta=0$ возрастает от 180 кг до 400 кг.

Таким образом, САУ процессом двухлезвийного растачивания не может быть построена как система стабилизации одного из силовых параметров обработки. Одним из путей реализации алгоритма оптимального управления в этих условиях является создание статической системы автоматического регулирования (САР) осевой силы резания или крутящего момента M_{k0} . Статическая характеристика такой САР должна иметь максимальное совпадение с зависимостью выбранного силового параметра регулирования от подачи при реализации алгоритма оптимального управления в условиях средней степени затупления инструмента.

В результате сравнения эффективности вариантов управления с контролем осевой силы резания и крутящего момента с учетом простоты реализации САР в качестве регулируемой величины принята осевая сила резания. Как показывает расчет, потери удельных затрат, вызванные неоптимальной реакцией САР на затупление инструмента, выражающейся в перегрузке острого и ведогрузке затупившегося инструмента, составляют в этом случае не более 4,5%.

Итак, статическая характеристика разрабатываемой САР должна иметь максимальное приближение к зависимости оптимального значения осевой силы резания при двухлезвийном растачивании $P_{x_{opt}}(s)$ от подачи в условиях среднего затупления инструмента $\Delta = 0,4$ мм. График этой зависимости в координатах $P_{x_{opt}}$, S_c , где S_c - подача в мм/с, представлен на рис.5 сплошной линией. Максимальная подача (подача врезания S_g) ограничивается величиной 7 мм/с.

С целью создания САР с требуемой формой статической характеристики проведено исследование ряда гидравлических схем регулирования. В этих схемах используется гидравлический регулятор подачи, представляющий собой золотник с гидрофиренциальным плунжером, на торцы которого передается давление из штоковой и бесштоковой полостей силового цилиндра (см.рис.6, поз.4). САР с подобным регулятором имеет статическую ошибку регулирования по возмущающему воздействию, величина которой может варьироваться в широких пределах путем изменения структуры схемы и параметров ее настройки. В процессе исследования были составлены системы уравнений, описывающие поведение в установившемся режиме ряда различных структурных схем САР. Рассматриваемые схемы отличаются местом установки регулятора и дросселя, ограничивающего максимальную подачу, в гидросистему станка.

На основании составленных систем уравнений статики получены в параметрической форме статические характеристики исследуемых схем САР. С помощью ЭВМ проведено исследование влияния параметров настройки САР и параметров регулятора на вид статических характеристик. В результате исследования найдена оптимальная схема, обеспечивающая при соответствующем выборе параметров настройки максимальное приближение к требуемой форме статической характеристики (см.рис.5). В этой схеме регулятор устанавливается непосредственно на входе силового цилиндра, а дроссель на выходе (см.рис.6). Статическая характеристика этой схемы выражается следующими соотношениями:

$$S_c = \frac{1}{F_1} \sqrt{\frac{(P_{klt} - P'_f - R_o + C_1) q^2 \lambda^{2h} f_{dp}^2 \cdot 2g}{\delta f (\ell^2 q^2 \lambda^{2h} + f_{dp}^2)}} ; \quad (I2)$$

$$R_{reg} = \frac{(R_o - c \lambda) F_1}{f} - \left[R'_f + \left(\frac{S_c F_1}{M f_{dp}} \right)^2 \gamma \right] (F_2 - F_1) - \sum F_{tr} , \quad (I3)$$

где F_1, F_2 - эффективные площади поршня со стороны штоковой и бесштоковой полости силового цилиндра; f - площадь торца плунжера регулятора; P_{klt} и P'_f - давление настройки предохранительного и подпорного клапана; R_o - усилие задающей пружины регулятора при нулевом открытии его дроссельных канавок; λ - параметр-величина открытия дроссельных канавок; h, q - параметры геометрической характеристики регулятора; $\ell = \frac{f}{F_1}$; f_{dp} - площадь проходного сечения дросселя; R_{reg} - развиваемое усилие подачи; $\sum F_{tr}$ - суммарная сила трения в направляющих суппорта и уплотнениях гидроцилиндра.

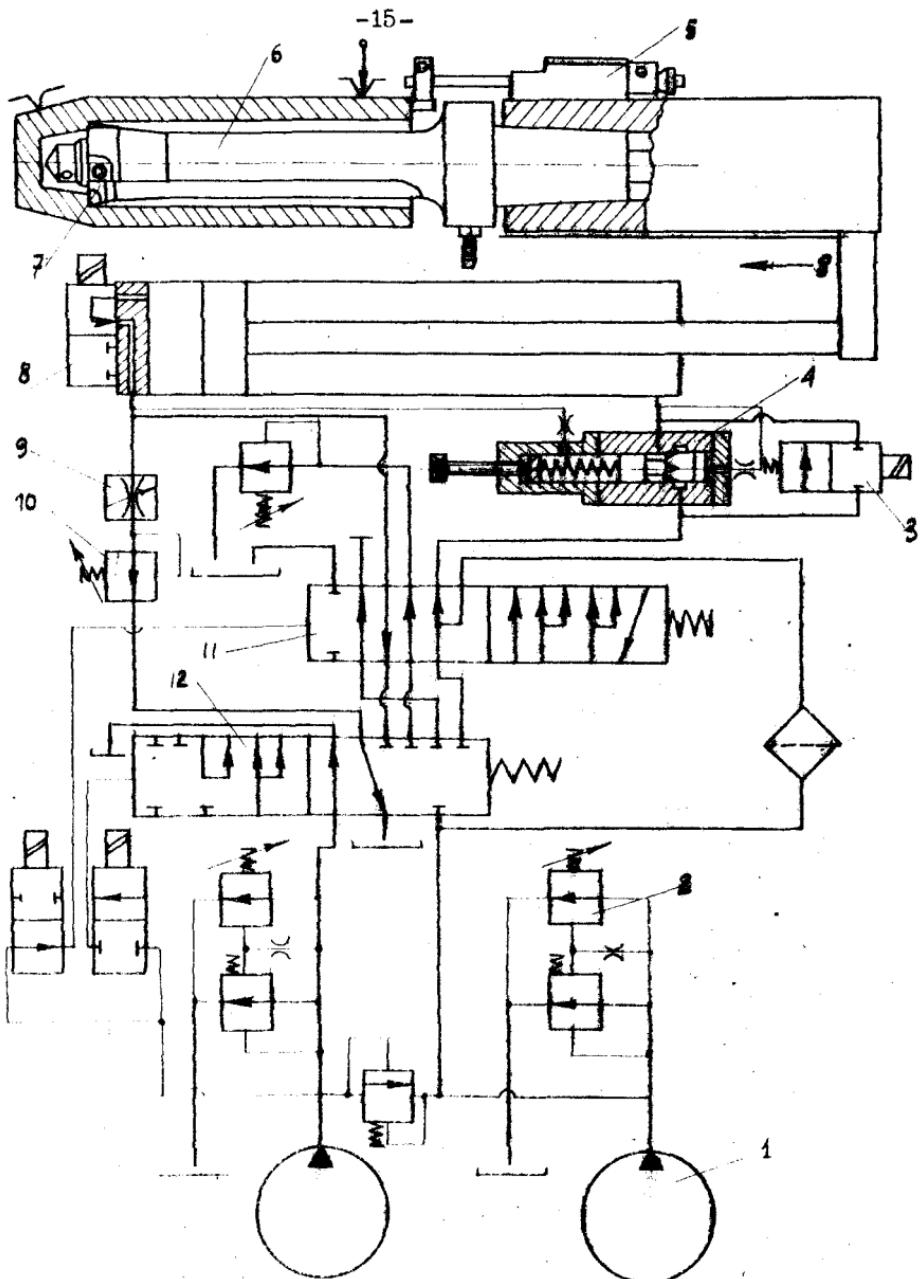


Рис.6. Принципиальная схема привода подачи станка "Таран-130",
оснащенного САУ

0399646

Параметрами настройки САР являются $P_{\text{кл}}$, $f_{\text{до}}$, R_0 и ρ' . При исследовании статики варьировалась также жесткость задающей пружины регулятора C .

Проведенное исследование динамической устойчивости линеаризованной модели САР по критерию Гурвица показало, что данная схема обеспечивает устойчивую работу привода подач как в процессе обработки, так и в режиме холостых ходов.

Разработка и внедрение промышленного варианта САУ процессом растачивания. На основании проведенных исследований была разработана САУ процессом растачивания для специальных расточных полуавтоматов модели "Таран-130". Принципиальная гидравлическая схема привода подач станка, оснащенного САУ, представлена на рис.6. При рабочей подаче масло поступает от насоса подач I в силовой цилиндр через дроссельные канавки регулятора 4, установленного на входе цилиндра. Проходное сечение дроссельных канавок регулятора изменяется в зависимости от перепада давлений в полостях силового цилиндра, что обеспечивает, при соответствующей настройке САУ, требуемый закон изменения подачи. При холостых ходах масло приходит через двухпозиционный золотник 3, установленный параллельно регулятору, что исключает возникновение в гидросистеме автоколебаний при быстрых ходах суппорта. Масло, вытесняемое из бесштоковой полости силового цилиндра, поступает на слив через двухпозиционный золотник 8, дроссель 9, с помощью которого устанавливается подача врезания S_g , и подпорный клапан 10. Требуемая глубина растачиваемого отверстия поддерживается с помощью разработанного специального выключателя 5, устанавливаемого на суппорт станка. Сигнал от выключателя подается на золотник 8, расположенный непосредственно на крыше силового цилиндра. При подаче сигнала золотник перекрывает свое проходное сечение, запирая бесштоковую полость цилиндра. Подача прекращается, при этом происходит зачистка дна обработанного отверстия. После выдержки по реле времени выключается быстрый отвод суппорта. Управление циклом обработки осуществляется с помощью двух двухходовых золотников II и I2.

Станки, оснащенные рассмотренной САУ внедрены на одном из заводов г. Златоуста. Эти станки используются на различных расточных операциях, выполняемых в условиях многократного изменения глубины резания по длине обработки. Обработка производится на расточными пластинаами из быстрорежущей стали, так и разра-

ботанным двухлезвийным расточным инструментом, оснащенным твердым сплавом. Внедрение станков, оснащенных САУ, позволило поднять производительность обработки в 1,4...1,7 раза, сократить затраты на инструмент в 1,5 раза и брак по точности на 80%. За счет внедрения многостаночного обслуживания и повышения производительности сократилось число рабочих-станочников, занятых на расточных операциях. На операциях, выполняемых после термообработки, удалось устранить тяжелый ручной труд при их выполнении с ручной подачей.

Ш. РАЗРАБОТКА ДВУХЛЕЗВИЙНОГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ РАСТАЧИВАНИЯ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ РЕЖИМОМ РЕЗАНИЯ

Автоматическое управление режимом резания на основе информации о действительной величине нагрузки на инструмент позволяет значительно снизить его неконтролируемые перегрузки при обработке. За счет этого появляется возможность применять на некоторых операциях обработки отверстий с переменным припуском инструмент, оснащенный твердым сплавом, взамен расточных пластины из быстрорежущей стали.

Разработанный инструмент представляет собой оправку 6 (рис. 6) с закрепляемой в ней двухлезвийной быстросменной режущей частью 7, настраиваемой на размер вне станка. В процессе производственных испытаний инструмента при растачивании отверстия в специальной хромистой стали с твердостью 32...36 HRC выбрана марка твердого сплава - Ti5K6, оптимальная геометрия режущей части и форма заточки передней поверхности.

Одной из главных проблем использования многолезвийного, в частности, двухлезвийного расточного инструмента для обработки отверстий значительной глубины при автоматическом управлении режимом резания является обеспечение заданной точности обработки. Основной причиной образования погрешности диаметра отверстия в этих условиях является несимметричность расположения режущих кромок инструмента относительно оси вращения детали, обусловленная неизбежными погрешностями заточки и застройки быстросменных режущих элементов. Вследствие несимметричности режущих кромок в процессе обработки возникает неуравновешенная радиальная сила резания, вызывающая изгиб оправки в направлении образуемого размера. При обработке с переменным по длине отвер-

стия режимом резания неуравновешенная радиальная сила изменяет свою величину, а при определенных условиях и направление, что приводит к искажению профиля обработанного отверстия в продольном сечении. Решение проблемы обеспечения заданной точности растачивания отверстий значительной глубины требует, в частности, определения допустимых значений торцевого и радиального биения противоположных режущих кромок инструмента.

В работе построена математическая модель образования погрешности диаметра отверстия обработанного с использованием САУ, реализующей найденный алгоритм оптимального управления. Для построения модели использована полученная экспериментальным путем степенная зависимость радиальной составляющей силы резания при растачивании от подачи и глубины резания:

$$P_y = C_p y^{\beta} t^{\gamma}, \quad (14)$$

где $C_p = 70,16$; $\beta = 0,48$; $\gamma = 1$.

Неуравновешенная радиальная сила R , вызывающая изгиб оправки обусловлена, главным образом, неравенством значений глубины резания и подачи на противоположных режущих кромках инструмента. При этом:

$$t_a = t + f \mp \epsilon + \varepsilon \sin \omega t; \quad (15)$$

$$t_b = t \mp f \mp \epsilon - \varepsilon \sin \omega t; \quad (16)$$

$$S_a = S + e \mp \frac{\epsilon}{\tan \varphi}; \quad (17)$$

$$S_b = S + e \mp \frac{\epsilon}{\tan \varphi}, \quad (18)$$

где t_a , t_b , S_a , S_b - глубина резания и подача на противоположных режущих кромках a и b ; t и s -名义альные значения глубины резания и подачи на одну кромку; e и f - половины радиального и торцевого биения противоположных режущих кромок относительно оси вращения детали; φ - радиальное перемещение конца оправки под действием неуравновешенной радиальной силы; ε - эксцентриситет отверстия в заготовке; ω - частота вращения детали.

Из условия статического равновесия оправки, рассматриваемой как консольная балка постоянного сечения, с учетом соотношений (14)...(18) получено выражение для определения перемещения φ :

$$\varphi = \frac{A - B \varepsilon \sin \omega t}{3EJ + BL^3}, \quad (19)$$

$$\text{где } A = C_p \left[t / (s \pm e)^{\beta} - (s \mp e)^{\beta} \right] \mp f / (s \pm e)^{\beta} + (s \mp e)^{\beta}; \quad (20)$$

$$B = C_p \left[(s \pm e)^{\beta} + \frac{\beta(t \pm f)(s \pm e)^{\beta-1}}{\tan \varphi} + (s \mp e)^{\beta} + \frac{\beta(t \mp f)(s \mp e)^{\beta-1}}{\tan \varphi} \right]; \quad (21)$$

$$B = C_2 / [(s \pm e)^\beta + (s \mp e)^\beta]; \quad (22)$$

L — длина оправки; J — момент инерции ее поперечного сечения;
 E — модуль упругости материала оправки.

Из соотношения (21) видно, что под действием неуравновешенной радиальной силы оправка совершаet вынужденные колебания $y_2(\omega t)$ с амплитудой

$$\psi = \frac{B \varepsilon L^3}{3EJ + BL^3} \quad (23)$$

относительно среднего положения, определяемого координатой

$$y_1 = \frac{AL^3}{3EJ + BL^3}. \quad (24)$$

Исследование условий формообразования обработанной поверхности показывает, что в рассматриваемых условиях вынужденные колебания $y_2(\omega t)$ не влияют на диаметр обработанного отверстия, вызывая только копирование погрешности расположения исходного отверстия в заготовке.

В работе также проведено исследование условий формообразования при линейной упругой характеристике системы СПИД. В этом случае вынужденные колебания $y_2(\omega t)$ не описываются гармонической функцией вида $\psi \sin \omega t$ и результатом их действия помимо погрешности расположения обработанного отверстия является также искажение его профиля в поперечном сечении.

Доля погрешности диаметра обработанного отверстия, обусловленная несимметричностью расположения режущих кромок инструмента, при линейной упругой характеристике системы СПИД в общем виде выражается соотношением:

$$\Delta D = 2/f \cdot y_1. \quad (25)$$

Если деформация y_1 , направлена в сторону режущей кромки, имеющей при $y_1 = 0$ больший радиальный вылет, то y_1 и f суммируются. Если же y_1 , направлена в противоположную сторону, то она частично или полностью компенсирует погрешность f . Очевидно в последнем случае оперекающая в осевом направлении режущая кромка имеет и больший радиальный вылет.

На основании соотношений (19) и (25) получена зависимость $\Delta D(s, t, e, f)$. Эта зависимость позволяет для любых фиксированных значений подачи и глубины резания в плоскости параметров e и f построить границы зоны допустимой настройки инструмента. Эти границы определяются соотношением: $\Delta D = \delta_{pr}$, где δ_{pr} — чисть

подъ допуска на диаметр, принятая для компенсации погрешности, вызванной несимметричностью расположения режущих кромок двухлезвийного инструмента. При обработке с использованием САУ границы зоны допустимой настройки представляют собой семейство частных ограничений, соответствующих различным точкам алгоритма оптимального управления $S_{opt}(t)$. Для любой точки e, f , лежащей внутри построенной таким образом зоны допустимой настройки, при всех возможных сочетаниях S_{opt} и t будет выполняться условие:

$$\Delta D \leq \delta_{\text{пр}}.$$

С целью определения условий настройки двухлезвийного инструмента для чистового растачивания исследованы условия его безрисочного вывода из обработанного отверстия. Эти условия выражаются двумя соотношениями:

$$y_1 \leq 0; y_2 \geq 2f. \quad (26)$$

Неравенства (26) с учетом (19) позволяют построить в плоскости параметров e, f зону, для любой точки которой обеспечиваются условия безрисочного вывода инструмента.

В работе также проанализирован процесс исправления погрешности расположения и формы исходного отверстия при двухлезвийном растачивании в условиях автоматического управления режимом резания. Показано, что двухлезвийный расточкой инструмент, по сравнению с однолезвийным, обладает при прочих равных условиях лучшей способностью исправления погрешности расположения и формы исходного отверстия.

Разработанный двухлезвийный расточкой инструмент, оснащенный твердым сплавом, внедрен на операции чернового растачивания отверстия диаметром 80 мм и длиной 390 мм. Глубина резания по длине обработки изменяется от 1,5 до 8 мм. Твердость обрабатываемого материала – 32...36НС. Внедрение инструмента в совокупности с САУ позволило повысить производительность труда в 1,9 раза, сократить затраты на инструмент в 2...2,5 раза, уменьшить брак по точности на 40% и сократить число операций обработки отверстия.

Суммарный годовой экономический эффект от внедрения результатов данной работы только на одном из заводов г. Златоуста составил 54000 руб.

По запросам ряда организаций стран передана техническая документация на САУ для специальных расточных полуавтоматов, разработанную автором на основе проведенных им исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ АВТОРА:

1. Разработка и внедрение САУ и специалструмента для расточкии корпусных деталей. Отчет по НИР. Челябинск, 1975. Регистрац. № 76000373, инвент. № Б449335.

2. Расточкой инструмент. Информационный листок Челябинского межотраслевого территориального центра научно-технической информации и пропаганды № 438-76. Челябинск, 1976.

3. Автоматическое регулирование подачи при растачивании глубоких отверстий. Информационный листок Челябинского межотраслевого территориального центра научно-технической информации и пропаганды № 434-76. Челябинск, 1976.

4. Определение алгоритма оптимального управления процессом растачивания глубоких отверстий с переменным припуском. В сб. науч.тр.ЧШИ № 180 - "Оптимизация параметров машин и производственных процессов", Челябинск, ЧШИ, 1976.

5. Обоснование выбора оптимальной схемы САР. Там же.

6. Определение алгоритма оптимального управления при заданной производительности операции. Там же (Тверской М.М.).

7. Анализ точности расточки глубоких отверстий двухлезвийным инструментом при адаптивном управлении процессом. В межвузовском сб. науч.тр. - "Автоматизация технологических процессов в машиностроении". Свердловск, 1978.

8. Динамика гидравлического привода подач. В сб. науч.тр.ЧШИ № 211, "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки", Челябинск, 1978 (Нагуло А.Н.).

9. Оптимизация режимов резания с учетом неустранимых отказов инструмента. Тезисы докладов всесоюзной конференции "Оптимизация технологических процессов механической обработки деталей и сборки приборов", Киев, 1976.