

35
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

ТЕРЕХИН Владимир Николаевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕРЛЕНИЯ
ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ С НАКЛОННЫМ ВХОДОМ**

Специальность 05.02.08 — технология машиностроения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Челябинск 1978

ЧПИ

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор **М. М. Тверской.**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Д. К. Маргулис,**
кандидат технических наук, доцент **Ю. П. Холмогорцев.**

Ведущая организация — производственное объединение «Челябинский станкостроительный завод им. С. Орджоникидзе».

Защита состоится *27 декабря* 1978 г., в *15⁰⁰*, в аудитории *244* на заседании специализированного совета К-597/І по присуждению ученой степени кандидата технических наук в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола (454044, Челябинск, 44, проспект им. В. И. Ленина, 76, Челябинский политехнический институт).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан *23 ноября* 1978 г.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании совета. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять в специализированный совет К-597/І по указанному выше адресу.

Ученый секретарь специализированного
совета кандидат технических наук, доцент
В. М. МЕНЬШАКОВ

Актуальность работы. Одной из основных задач десятой пяти - летки, пятилетки качества и высокой эффективности, является интенсификация производства на основе научно-технического прогресса и всемерного режима экономии. В машиностроении одним из путей комплексного решения этих вопросов является повышение технологичности деталей. Однако во многих случаях по требованиям эксплуатации изделий в конструкциях отдельных деталей не удается избежать "нетехнологичных элементов", обработка которых сложна и малоэффективна. К таким "нетехнологичным элементам" можно отнести глубокие отверстия с наклонным входом, ось которых составляет с нормалью к поверхности детали некоторый угол α (угол входа) отличный от нуля. Если угол входа больше угла $(90 - \varphi)$, где φ - половина угла режущей части сверла, то в первоначальный момент врезания сверло касается поверхности детали не вершиной, а периферийными точками режущих кромок. Это значительно затрудняет процесс врезания даже при наличии кондукторных втулок. Возникают сильные вибрации, нарушается геометрия и точность размеров отверстия, стойкость сверла резко падает. Образование на детали напуска определенной формы для устранения наклонного входа приводит к повышенному расходу металла на деталь, к необходимости дополнительных операций по удалению напуска.

Отверстия с наклонным входом часто являются еще и глубокими. Пониженная жесткость и прочность инструмента для глубокого сверления усугубляют трудности, отмеченные выше. Кроме того, требуется решить саму по себе сложную проблему повышения эффективности процесса глубокого сверления. Одним из наиболее эффективных путей решения этой проблемы является применение систем автоматического управления режимом обработки - систем стабилизации силовых параметров. Создание таких систем должно основываться на методах современной математической теории оптимального управления, в настоящее время еще недостаточно широко используемой в технологии машиностроения. Таким образом, повышение эффективности процесса сверления глубоких отверстий с наклонным входом является актуальной научно-производственной задачей.

Целью работы является повышение эффективности сверления глубоких отверстий с наклонным входом путем комплексного решения задач, возникающих на различных этапах сверления.

Основные задачи: I. Разработать и исследовать метод, улучшающий условия сверления на этапе врезания с учетом дальнейшего глубокого сверления и автоматизации процесса в целом.

2. Разработать математическую модель процесса глубокого сверления со стабилизированными силовыми параметрами.

3. Поставить и решить задачу оптимального управления процессом глубокого сверления со стабилизированными силовыми параметрами.

4. Произвести экспериментальное исследование процесса глубокого сверления.

5. Внедрить результаты разработок и исследований в производство.

Научная новизна. Предложен новый, запатентованный авторским свидетельством [8], способ сверления отверстий с наклонным входом, включающий предварительную обработку сверлом с углом режущей части 90° , которое располагается таким образом, чтобы одна из образующих его заходного конуса, образованного вращением режущих кромок, была перпендикулярна оси будущего отверстия, а другая совпадала с его образующей. Сделан подробный теоретический анализ предложенного способа с целью определения оптимального расположения вспомогательного сверла в пространстве по отношению к поверхности детали.

Разработана и обоснована упрощенная методика определения оптимального расположения вспомогательного сверла. Впервые предложена математическая модель процесса глубокого сверления со стабилизированными силовыми параметрами в виде двух конечно-разностных уравнений, связывающих время сверления на рабочем ходе и приращение износа сверла на рассматриваемом рабочем ходе с переменными параметрами режима резания.

Поставлена и решена задача разработки алгоритма оптимального управления процессом глубокого сверления со стабилизированными силовыми параметрами на основе интегрального критерия, учитывающего протекание процесса во времени и отражающего приведенные затраты на данную операцию.

Алгоритм управления процессом глубокого сверления со стабилизированными силовыми параметрами получен в результате решения много-уровневой (иерархической) задачи оптимизации. Оптимизация на одном из уровней проводилась на основе классического вариационного исчисления.

С целью практической реализации предложен квазиоптимальный алгоритм управления процессом.

Практическая полезность. Выработаны рекомендации по выбору исходных конструктивных параметров для проектирования специальных агрегатных станков, в которых реализуется предложенный способ сверления отверстий с наклонным входом. Разработана принципиаль -

ная схема автоматизации цикла сверления отверстий с наклонным входом.

По результатам теоретического и экспериментального исследований разработана система автоматической стабилизации силовых параметров процесса глубокого сверления, даны рекомендации по оптимизации этого процесса. Система автоматической стабилизации защищена авторским свидетельством [9]. Предложено устройство, устраняющее поломки инструмента при сверлении скважинных отверстий, защищенное авторским свидетельством [II]. Результаты теоретических исследований могут быть использованы для других операций с подобными математическими моделями.

Реализация работы в промышленности. При непосредственном участии автора в лаборатории кафедры АМСП ЧПИ спроектирован, изготовлен и внедрен в производство на механическом заводе г.Рек Свердловской области агрегатный станок-полуавтомат для сверления тангенциальных отверстий диаметром 3,4 мм в деталях из стали 40Х твердостью до 38 НРС. Станок позволил заменить операцию глубокого сверления до термообработки детали и операцию развертывания на станках с ручной подачей после термообработки одной сверлильной операцией и значительно сократить суммарный объем припуска на детали.

В лаборатории кафедры АМСП ЧПИ спроектирован, изготовлен и внедрен в Свердловском производственном объединении "Пневмострой-машина" специальный станок-автомат для сверления отверстий диаметром 4-5 мм глубиной 92 мм в деталях "шатун" из стали 38ХЗМЖ. Внедрение перечисленных станков позволило повысить производительность труда в 2,1 ... 2,4 раза. Суммарный годовой экономический эффект составляет 154 тыс.рублей.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации автором докладывались:

1. На научно-технических конференциях в Челябинском политехническом институте им.Ленинского комсомола в 1976 ... 1978гг.
2. На научно-технической конференции в Кузбасском политехническом институте, Кемерово, 1978 год.
3. На Республиканской конференции "Оптимизация технологических процессов механической обработки и сборки приборов" Киев, 1978 год.

Объем работы, ее структура. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения; изложена на 124 страницах машинописного текста. Библиография содержит 93 наименования. В диссертационной работе имеется 68 иллюстраций и 7 приложений (в том числе копии актов внедрения).

1. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ С НАКЛОННЫМ ВХОДОМ НА УЧАСТКЕ "ВХОДА"

Из существующих способов, улучшающих условия работы инструмента на участке "входа" наиболее приемлемым, особенно с позиций экономии металла и снижения расхода на инструмент, является способ, по которому на поверхности детали концевой фрезой с диаметром, равным диаметру отверстия, предварительно подготавливается вспомогательная поверхность ("площадка"), перпендикулярная оси отверстия. Ось фрезы при этом перпендикулярна направлению подачи и сила резания вызывает значительный изгибающий момент, который может вызвать не только отжим фрезы, но и ее поломку. Сохранность от поломок достигается занижением режима резания, в результате чего снижается производительность обработки в целом. Поскольку направление подачи фрезы перпендикулярно оси отверстия, то на участке "входа" происходит искажение формы отверстия, что в ряде случаев недопустимо.

Для повышения производительности обработки был предложен способ сверления отверстий с наклонным входом, по которому вспомогательная поверхность подготавливается заходным конусом (образованным вращением режущих кромок) вспомогательного сверла I с углом режущей части $2\varphi = 90^\circ$ (см. рис. 1). При этом ось вспомогательного сверла должна пересекаться с осью отверстия, а одна из образующих конуса должна совпадать с образующей будущего отверстия. Ось будущего отверстия (ось основного сверла 2) пересекается со вспомогательной поверхностью в точке O и совпадает с нормалью к вспомогательной поверхности в этой точке. Угол входа α вспомогательного сверла близок к нулю, и суммарная сила резания действует на него в направлении, близком к направлению его оси, что позволяет производить засверливание на больших подачах с высокой производительностью. Поскольку в подготовке площадки принимает участие только заходный конус вспомогательного сверла, то его максимальный диаметр не лимитируется, что дает возможность выбрать сверло требуемой (высокой) жесткости. Это условие также дает возможность применять один типоразмер вспомогательного сверла для отверстий разных диаметров. Конструктивно способ предварительного засверливания может быть реализован гораздо проще, чем способ предварительного фрезерования "площадки". Это даст возможность легко совместить две операции (засверливание и сверление отверстия) на одном станке-полуавтомате с простой компоновкой.

Радиус кривизны конического углубления в плоскости, перпенди-

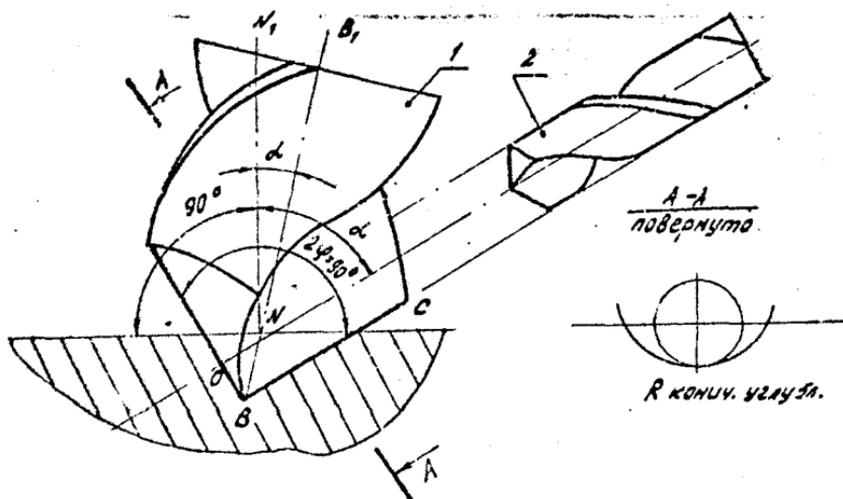


Рис. 1. Способ сверления отверстий с наклонным входом

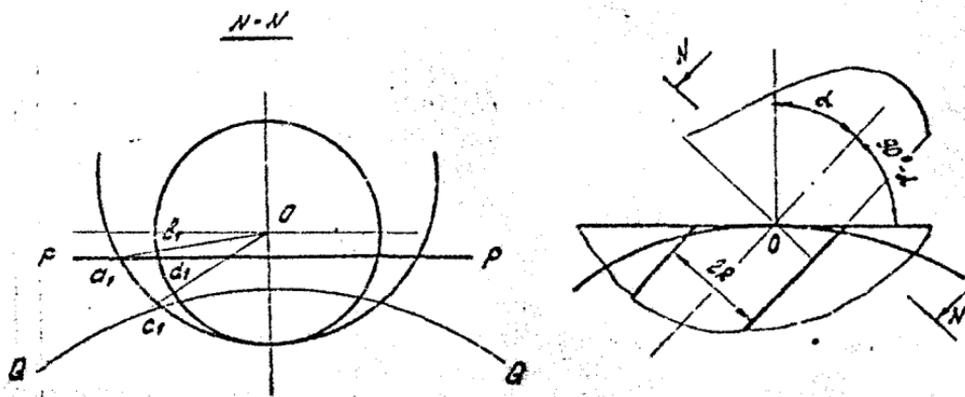


Рис. 2. Определение максимального размера стружки

кулярной оси отверстия, изменяется вдоль образующей конуса, и на расстоянии от вершины большем, чем радиус отверстия, начинает превышать радиус кривизны готового отверстия. Появляется погрешность в виде фасок на входе, которые искажают форму отверстия. Величина фаски при входе в поверхность произвольной формы будет зависеть от выбора положения общей образующей BC для конуса вспомогательного сверла и готового отверстия и от расположения вершины конуса этого сверла на общей образующей. Таким образом, применение данного способа требует определения оптимального положения вспомогательного сверла в пространстве по отношению к будущему отверстию и к поверхности детали. Для этого необходимо сравнить след входа "идеального" отверстия со следом входа, образованного конусом вспомогательного сверла.

Воспользуемся математическим аппаратом аналитической геометрии. Найдем уравнение поверхности детали $F_1(x, y, z)$ в некоторой системе декартовых прямоугольных координат. Найдем также, уравнения цилиндрической поверхности отверстия $F_2(x, y, z)$ и конической поверхности вспомогательного сверла $F_3(x, y, z)$. После этого, решая совместно уравнения $F_1(x, y, z)$ и $F_2(x, y, z)$ найдем уравнение линии пересечения отверстия с поверхностью детали $\{F_1, F_2\}$. Аналогично получим уравнение линии пересечения конуса вспомогательного сверла с поверхностью детали $\{F_1, F_3\}$. Эти линии пересечения являются пространственными кривыми. Имея уравнения линий пересечения можно построить графические изображения их проекций на координатные плоскости и количественно определить величину и характер фаски. Изменяя пространственное положение вспомогательного сверла путем изменения параметров в уравнении $F_3(x, y, z)$ можно добиться оптимального расположения вспомогательного сверла, минимизирующего величину фаски по выбранному критерию.

Недостатком рассмотренного метода отыскания оптимального расположения вспомогательного сверла путем перебора вариантов является большой объем вычислений и необходимости привлечения к расчетам ЭВМ. Примем в качестве критерия для количественной оценки величины фаски наибольшее расстояние между проекциями линий пересечения $\{F_1, F_2\}$ (окружность радиуса R , соответствующего половине номинального диаметра отверстия) и $\{F_1, F_3\}$ на плоскость, перпендикулярную оси отверстия на участках, где проекция $\{F_1, F_3\}$ удалена от центра окружности более, чем на R . Расстояние между проекциями измеряется по нормали к проекции цилиндра отверстия. Для некоторых, наиболее часто встречающихся частных

случаев (поверхность детали—плоскость, цилиндр, конус, сфера) в диссертации доказано, что если в точке входа отверстия поверхность детали имеет плоскость симметрии и ось отверстия лежит в этой плоскости, то при оптимальном положении вспомогательного сверла его ось также должна лежать в этой плоскости симметрии.

Вершина конуса должна лежать на образующей отверстия в такой точке, чтобы обеспечивался надежный вход вершины основного сверла в поверхность конического углубления. Если отверстие сверлится в плоскости, то: оптимальным расположением вспомогательного сверла будет такое, при котором его ось лежит в плоскости, содержащей ось отверстия и перпендикулярной плоскости детали.

Но многообразию поверхностей деталей и, тем более, многообразию ориентаций отверстий относительно поверхности детали требуется более общих методов нахождения оптимального расположения вспомогательного сверла простыми средствами. Известно, что небольшую часть криволинейной поверхности часто можно без заметной ошибки заменить небольшим участком касательной плоскости. С учетом этого, предложена упрощенная методика, согласно которой участок произвольной криволинейной поверхности детали, ограниченный контуром отверстия, заменяется плоскостью, касательной к поверхности детали в точке входа. Далее используя вывод для случая сверления отверстия в плоскости, легко находим оптимальное расположение сверла. Практическое использование предлагаемого метода в общем случае требует определения диапазона его применимости для различных диаметров отверстий и поверхностей различной формы. Анализ номенклатуры деталей показал, что подавляющее большинство отверстий с наклонным входом сверлится в "наружных" поверхностях. В этом случае, в любом из сечений, перпендикулярных оси отверстия (рис.2), след поверхности $Q-Q$ всегда располагается под следом касательной плоскости $P-P$, а значит и отрезок a, a_1 , характеризующий величину фаски в этом сечении при входе отверстия в поверхность, всегда меньше отрезка a, b_1 , характеризующего величину фаски в этом сечении при входе отверстия в касательную плоскость. Таким образом, размер фаски при входе отверстия в плоскость является границе "сверху" для размера фаски при входе отверстия в "наружную" поверхность и может быть использован для оценки диапазона применимости изложенного метода.

Максимальный размер фаски $a D_{max}$ при сверлении отверстия с наклонным входом в плоскость при оптимальном расположении вспомогательного сверла (в расчетной схеме ось отверстия входит в "площадку" в точке O) зависит от диаметра отверстия ($2R$) и от

угла входа отверстия α (рис.2):

$$s D_{max} = R \left(\frac{tg \alpha}{\sqrt{2} tg \alpha - 1} - 1 \right) \quad (1)$$

При $\alpha = 45^\circ$, $s D_{max} = 0$, т.е. фаска отсутствует.

Если найденная по (1) величина фаски $s D_{max}$ допустима, то находятся параметры плоскости, касательной к поверхности детали в точке входа отверстия. Затем, по отношению к этой плоскости, заменяющей условно поверхность детали, находят параметры (координаты вершины вспомогательного сверла в конечном положении после засверливания и направляющие косинусы оси этого сверла) определяющие оптимальное положение вспомогательного сверла в пространстве.

II. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ГЛУБОКОГО СВЕРЛЕНИЯ ПУТЕМ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ

Следующим этапом повышения эффективности операции сверления глубоких отверстий с наклонным входом является повышение эффективности собственно процесса глубокого сверления. М.М.Тверской в своих работах показал, что при оптимизации процесса сверления глубоких отверстий малого диаметра спиральными сверлами с промежуточными врезками необходимо стабилизировать силовые параметры (крутящий момент и (или) осевое усилие на сверле) за счет автоматического управления величиной подачи. При этом скорость резания должна непрерывно изменяться по определенному закону в зависимости от подачи. Более простыми являются системы стабилизации силовых параметров за счет автоматического управления величиной подачи при постоянной частоте вращения сверла n в пределах одного рабочего хода. Такие системы более надежны в эксплуатации, полностью используют прочностные возможности инструмента. Но из-за изменяющегося износа инструмента на следующем этапе развития средств оптимизации процесса необходимо дискретно (от одного рабочего хода к другому) управлять частотой вращения сверла.

Выберем в качестве критерия оптимальности среднюю, за период стойкости инструмента, переменную (зависящую от режима) часть приведенных затрат предприятия на сверление одного отверстия:

$$\theta_{ср} = \frac{E T + E T_{сч} + U}{N}, \quad (2)$$

где E - приведенные затраты, приходящиеся на одну минуту работы станка, исключая затраты на режущий инструмент, коп./станко-мин;

- T - время работы инструмента между переточками, мин;
 $T_{см}$ - время простоя станка при смене инструмента, мин;
 U - приведенные затраты на инструмент, приходящиеся на период стойкости, коп;
 N - число отверстий, просверленных за время T .

$$T = \sum_{i=1}^N \tau_i, \quad (3)$$

где τ_i - время сверления i -го отверстия.

При сверлении отверстия за несколько рабочих ходов время примет вид:

$$\tau_i = \sum_{j=1}^{K_i} (\tau_{ijp} + \tau_{ijx}), \quad (4)$$

где K_i - число рабочих ходов на i -ом отверстии;

τ_{ijp} - время j -го рабочего хода i -го отверстия;

τ_{ijx} - время j -го вспомогательного хода i -го отверстия.

Формирование математической модели процесса. Предварительным условием оптимизации любого управляемого процесса является необходимость создания модели процесса, т.е. его формализованного представления в виде системы математических соотношений. В рассматриваемом случае объектом управления является процесс глубокого сверления со стабилизированными, силовыми параметрами, то есть процесс сверления, в котором силовые параметры (крутящий момент и (или) осевое усилие на сверле) стабилизируются за счет автоматического управления величиной подачи при постоянной частоте вращения сверла n в пределах одного рабочего хода. Поскольку процесс сверления каждого отверстия производится с промежуточными выводами, то рассмотрим факторы, характеризующие процесс сверления на отдельном рабочем ходе с точки зрения их участия в управлении процессом.

Во-первых, процесс сверления на одном рабочем ходе характеризуется протяженностью и расположением как в пространстве (по глубине отверстия), так и во времени, т.е. τ_{ijp} зависит от длины рабочего хода l_{ij} и от средней глубины рабочего хода $L_{cp\ ij}$. Кроме того, τ_{ijp} в рассматриваемом процессе зависит от частоты вращения сверла n_{ij} и от начальной величины износа сверла Δs_{ij} на этом рабочем ходе.

Во-вторых, важной характеристикой процесса сверления на одном рабочем ходе является величина приращения износа сверла на этом рабочем ходе $\delta \Delta s_{ij}$, так как она определяет одну из началь-

ных условий $\Delta a_{i,j+1}$ для следующего рабочего хода, и, таким образом, определяет динамику процесса. Эта величина $\delta \Delta_{ij}$ также зависит от n_{ij} , Δa_{ij} , v_{ij} и $\Delta \varphi_{ij}$. Включение текущего износа инструмента в модель процесса позволяет учитывать изменение условий обработки во времени, поэтому динамической моделью процесса сверления со стабилизированными силовыми параметрами будут являться соотношения

$$T_{ijp} = T_{ijp}(n_{ij}, \Delta a_{ij}, v_{ij}, \Delta \varphi_{ij}), \quad (5)$$

$$\delta \Delta_{ij} = \delta \Delta_{ij}(n_{ij}, \Delta a_{ij}, v_{ij}, \Delta \varphi_{ij}), \quad (6)$$

Ограничениями, накладываемыми на переменные процесса являются ограничение на длину рабочего хода в виде равенства:

$$\sum_{j=1}^{k_i} v_{ij} = L_j \quad (7)$$

где L_j — длина отверстия, и ограничение на величину износа сверла в виде неравенства:

$$\Delta a_{i,k_i} \leq \Delta a_{\text{max}}, \quad (8)$$

нарушение которого приводит к появлению вибраций и резкому увеличению шероховатости поверхности.

Разработка алгоритма оптимального управления. Задача оптимального управления формулируется следующим образом: заданы математическая модель процесса (5), (6), ограничения (7), (8) и критерий оптимальности (2). Для заданного начального состояния (Δa_{0i}) требуется найти такое допустимое дискретное управление (последовательности n_{ij} , v_{ij} и $\Delta \varphi_{ij}$ для каждого i -го отверстия), которые доставляют критерию (2) наименьшее значение.

Заметим, что минимизация (2) представляет собой сложную, многоуровневую задачу большой размерности, которая может быть решена методом декомпозиции, основанном на разложении исходной задачи на подзадачи меньшей размерности. Предварительные эксперименты при сверлении отверстий диаметром 5 мм на глубину до 50 мм в стали 35Х3М2А показали, что износ на одном отверстии слабо зависит от способа распределения глубины отверстия между рабочими ходами в определенных границах. С целью упрощения решения задачи была принята структура управления, по которой частота вращения сверла постоянна в пределах одного отверстия и может изменяться

дискретно от отверстия к отверстию.

Тогда задача оптимального управления будет решаться на трех уровнях и иметь следующую структуру. Подзадачей первого, нижнего уровня, является минимизация выражения (4) путем оптимального распределения глубины отверстия между рабочими ходами, т.е. минимизация функции многих переменных $T_i(\nu_{ij}, \Delta_{oi})$ для различных сочетаний ν_i и Δ_{oi} . Подзадачей второго, среднего уровня, является минимизация выражения (3) для различного числа N путем определения оптимального множества частот вращения $\{\nu_i\}$ с учетом результатов решения подзадачи первого уровня. И, наконец, подзадачей третьего, верхнего уровня, является минимизация выражения (2) путем определения оптимального числа отверстий N с учетом результатов решения подзадачи второго уровня.

Для решения подзадачи первого уровня заменим совокупность векторов $\{\nu_{ij}, \Delta_{oij}\}$ совокупностью векторов $\{\Delta_{fij}\}$, где Δ_{fij} - конечная глубина сверления на ij -ом рабочем ходе, определяемая из соотношений: $\nu_{ij} = \Delta_{fij} / \Delta_{oij}$; $\Delta_{oij} = (\Delta_{oij} + \Delta_{fij})/2$; $\Delta_{oij} = \Delta_{fij} \cdot 1$. Полученная функция $T_i(\Delta_{fij})$ является аддитивной функцией векторов $\Delta_{fij1}, \Delta_{fij2}, \dots, \Delta_{fijk_i}$ и для ее минимизации используем итерационный метод покоординатного спуска, метод Гаусса-Зайделя. Результат решения будет зависеть от вида исходной конкретной модели (5) и от начальных условий (ν_i, Δ_{oi}). В этом случае (при оптимальном распределении глубины отверстия между рабочими ходами) время сверления T_i и приращение величины износа Δ_{oi} на i -ом отверстии будет зависеть только от частоты вращения сверла ν_i и от начальной величины износа Δ_{oi} на i -ом отверстии. Решение подзадачи первого уровня даст возможность укрупнить модель конкретного процесса. Укрупненная модель рассматриваемого процесса глубокого сверления со стабилизированными силовыми параметрами может быть записана в виде степенных зависимостей:

$$T_i = k_1 \nu_i^{\alpha_1} \Delta_{oi}^{\beta_1}, \quad (9)$$

$$\delta \Delta_{oi} = k_2 \nu_i^{\alpha_2} \Delta_{oi}^{\beta_2}, \quad (10)$$

где $k_1, k_2, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ - постоянные коэффициенты и показатели степеней. Ограничение (8) трансформируется в выражение:

$$\Delta_{oi} \leq \Delta_{oi}^{max} \quad (11)$$

Перейдем теперь к решению подзадачи второго уровня, которая формулируется как задача оптимального дискретного управления: заданы модель процесса (9), (10), функционал (3), характеризующий качество управления, ограничение (II) и длительность (число отверстий N) управления. Требуется для заданного начального состояния Δ_0 найти допустимое управление (последовательность ρ_i) доставляющее критерию (3) наименьшее значение. Одним из подходов к решению задач оптимизации дискретного управляемого объекта является предельный переход от дискретного к непрерывному управляемому объекту и его оптимизация методами теории оптимального управления непрерывными объектами.

В уравнениях (9), (10) в качестве аргумента фигурирует порядковый номер отверстия i . Вместо i введем новый аргумент α по формуле: $\alpha = ih, i = 1, 2, \dots, N$, где $h = \Delta l$ — длина одного отверстия.

Введем новые переменные x и y , непрерывные аналоги дискретных переменных ρ_i и $\Delta \rho_i$ соответственно, зависящие от аргумента α :

$$x(\alpha) = \frac{1}{h} \rho \left(\frac{\alpha}{h} \right) = \frac{1}{h} \rho(i); \quad y(\alpha) = \Delta \rho \left(\frac{\alpha}{h} \right) = \Delta \rho(i)$$

После подстановок соотношение (10) запишем в следующем виде:

$$\frac{y(\alpha+h) - y(\alpha)}{h} = k_2 x^2(\alpha) y^{\beta_2}(\alpha) \quad (12)$$

Здесь в левой части стоит выражение, имеющее своим пределом при $h \rightarrow 0$ (стремящемся к нулю) производную $dy/d\alpha$. Функционал (3) переписывается в виде:

$$T = \sum_{i=1}^N k_1 \rho_i^{\beta_1} \Delta \rho_i^{\beta_2} = \sum_{\alpha=h}^{Nh} k_1 h x^{\beta_1}(\alpha) y^{\beta_2}(\alpha)$$

причем суммирование в правой части производится по $\alpha = h, 2h, \dots, Nh$. Поскольку k_1 и h являются константами, то задача о минимуме функционала T равносильна (эквивалентна) задаче о минимуме функционала $J = \sum_{\alpha=h}^{Nh} x^{\beta_1}(\alpha) y^{\beta_2}(\alpha)$, правая часть которого в пределе стремится к определенному интегралу:

$$J = \int_0^{Nh} x^{\beta_1}(\alpha) y^{\beta_2}(\alpha) d\alpha \quad (13)$$

Таким образом, исходная дискретная задача свелась к приближению ей соответствующей непрерывной задаче, которая формулируется следующим образом. Необходимо найти такое управление $x^*(\alpha)$ и траекторию $y^*(\alpha)$, удовлетворяющую ограничению

$$y \leq y_{\max}, \quad (14)$$

чтобы решение $y(x)$ дифференциального уравнения

$$\dot{y} = \frac{dy(x)}{dx} = k_2 x^{a_2(x)} y^{b_2(x)} \quad (15)$$

с начальным условием $y(0) = y_0$ минимизировало функционал (13).

Для решения задачи воспользуемся классическим вариационным исчислением. Поскольку задача нелинейная, то при наличии ограничения (14) на управляемую переменную, оптимальная траектория в общем случае может состоять из граничных, (на которых траектория находится на границе допустимой области) и свободных (на которых траектория находится внутри допустимой области) участков. Так как физический смысл величины $y(x)$ - текущий износ инструмента, то длина граничного участка равна нулю. Тогда задача решается в два этапа. На первом этапе решается задача определения $x^*(x)$ и $y^*(x)$ с вырожденным изопериметрическим ограничением:

$$\int_0^{x_1} \dot{y}^*(x) dx = y_f \quad (16)$$

где y_f - постоянная величина, а на втором этапе определяется величина y_f ; при которой $J = \min$.

Задача отыскания минимума функционала (13) при наличии изопериметрического ограничения (16) является задачей на условный минимум и для ее решения применим метод неопределенных множителей Лагранжа. Для этого вводится вспомогательная функция

$$\Phi = x^{a_1(x)} y^{b_1(x)} + \lambda \dot{y}^*(x), \quad (17)$$

где λ - неопределенный множитель Лагранжа, после чего решается задача на глобальный минимум функционала $J_2 = \int_0^{x_1} \Phi dx$.

Выразим из (15) \dot{y} и подставим в (17):

$$\Phi = (y/k_2 y^{b_2})^{a_1/k_2} y^{b_1} + \lambda y \quad (18)$$

Поскольку подынтегральная функция Φ не содержит в явном виде аргумента x , то для нахождения оптимальной траектории $y^*(x)$, минимизирующей J_2 , необходимо решить уравнение

$$\Phi - y \frac{\partial \Phi}{\partial y} = c, \quad (19)$$

называемое первым интегралом Эйлера, где c - постоянная интегрирования. Решая (19) с учетом (18), получаем

$$y^* = \left(\frac{c}{k_3 y^* \beta_3} \right)^{1/d_3} \quad (20)$$

где $d_3 = d_1/d_2$; $\beta_3 = (\beta_1 d_2 - \alpha_1 \beta_2)/d_2$; $k_3 = \beta_3 k_1^{-d_1/d_2}$ (21)

Поставив выражения (18), (20) и (21) в выражение J получим:

$$J^* = \int_0^N \left(\frac{c}{1 - d_1/d_2} \right) dx = \left(\frac{c}{1 - d_1/d_2} \right) \frac{x}{0}^N \quad (22)$$

то есть на оптимальной траектории значение функционала должно нарастать линейно в зависимости от x . Это открывает следующий путь к решению исходной дискретной задачи. Условие (22) в дискретной интерпретации означает, что оптимальным алгоритмом изменения будет такой алгоритм, при котором время сверления одного отверстия должно быть одинаковым для любой начальной $\Delta \alpha_i$, т.е.

$$T_i = const \quad (23)$$

Если проанализировать критерий (2), то нетрудно заметить, что при линейном характере T в зависимости от N (согласно алгоритму (23) критерий по мере увеличения N монотонно уменьшается и число N ограничено только необходимостью замены инструмента, т.е. выполнением условия $\Delta \alpha_N > \Delta \alpha_{max}$. Учитывая это, а также взаимосвязь критериев третьего (2) и второго (3) уровней решение подзадач третьего и второго уровней можно объединить. В окончательно принятом виде методика решения задачи выглядит следующим образом.

Сределяется модель процесса (5). Определяется оптимальное распределение глубины отверстия между рабочими концами. Определяются укрупненная модель процесса (9), (10) и $\Delta \alpha_i$. Назначается произвольная частота вращения сверла n_i на первом отверстии. По (9) и (10) определяются последовательности $\{n_i\}$ и $\{\Delta \alpha_i\}$ до такого $i = N$, при котором выполняется условие $\Delta \alpha_{N+1} > \Delta \alpha_{max}$.

При этом затраты $B_{ср}(N)$ для заданного n_i минимальны. Затем изменяется начальная n_i и, аналогично, находятся соответствующие ей минимальные затраты и число N . Решая эту задачу для различных n_i (перебор) определяется наилучший вариант, при котором $B_{ср} = min$.

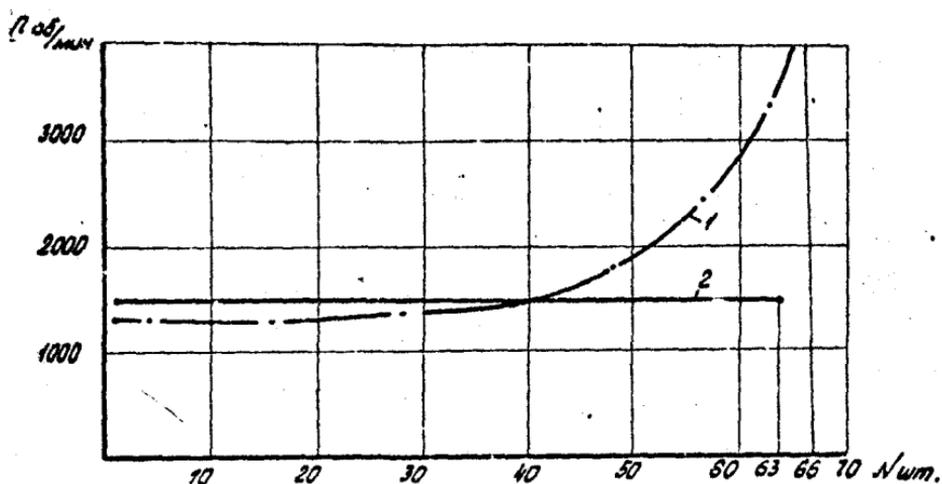


Рис.3 Изменение частоты вращения сверла при оптимальном(1) и квазиоптимальном(2) алгоритмах

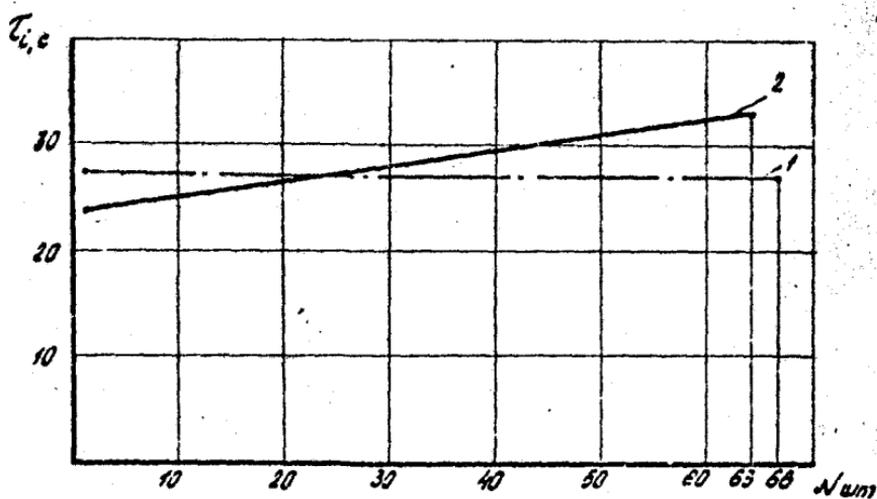


Рис.4 Изменение времени сверления при оптимальном(1) и квазиоптимальном(2) алгоритмах

Ш. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью определения численных значений параметров, входящих в математическую модель было проведено экспериментальное исследование процесса. Для исследования была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка, которая представляла собой агрегатную сверлильную головку с гидравлическим приводом подачи, оснащенную системой стабилизации силовых параметров (осевого усилия $P_{ос}$ и крутящего момента $M_{кр}$ на сверле). Исследовался процесс сверления отверстий диаметром 5 мм глубиной до 50 мм в заготовках из стали 3ХУ3ММА спиральными сверлами из быстрорежущей стали Р6М5 при $P_{ос} = 700$ н и $M_{кр} = 6$ нм. За показатель износа сверла была принята величина, обратная средней величине подачи, поддерживаемой системой стабилизации при сверлении за один рабочий ход отверстия глубиной 20 мм с частотой вращения сверла 800 об/мин. Большая частота вращения увеличивала вносимую погрешность, поскольку замеры производились перед началом эксперимента, меньшая частота вращения вызвала неустойчивую работу системы стабилизации. В результате математической обработки результатов эксперимента были получены следующие зависимости:

$$T_{ij} = 29,4 n_i^{-0,85} \Delta_{ci}^{1,07} \xi_j^{1,13} \Delta_{cj}^{-0,93}, \text{ с} \quad (22)$$

$$T_i = 1,9 \cdot 10^{-5} n_i^{-0,85} \Delta_{ci}^{2,4}, \text{ с}; \quad S_{\Delta_i} = 2,6 \cdot 10^{-19} n_i^{4,87-0,08} \Delta_{ci}^{-0,44}, \text{ 1/мм} \quad (23)$$

На основании этих зависимостей была поставлена и численно решена на ЭЕМ "Наирн-К" задача определения оптимального алгоритма управления процессом сверления отверстий глубиной 50 мм. Для $E=2,52$ коп/станко-мин; $I=11,2$ коп; $T_{ем} = 0,83$ мин минимум средних приведенных затрат на одно отверстие $S_{ср\ min} = 1,31$ коп/отв. достигается при сверлении 66 отверстий с постоянным временем сверления $T_i = 0,45$ мин = const. Промежуточные выводы должны производиться через равные промежутки времени 0,071 мин. Частота вращения сверла n_i должна изменяться при этом от $n_1 = 1290$ об/мин до $n_{66} = 6700$ об/мин (см. рис.3). Осуществление автоматического регулирования частоты вращения сверла в настоящее время представляет пока определенные затруднения либо в техническом, либо в экономическом отношении. В таких условиях иногда целесообразно бывает заменить оптимальный алгоритм управления процес -

сом квазиоптимальным алгоритмом, более удобным для реализации. Из рис.3 видно, что при постоянном времени сверления отверстий частота вращения сверла на большом участке изменяется незначительно, и лишь на последних деталях резко возрастает. Это дало возможность в качестве квазиоптимального выбрать алгоритм, при котором частота вращения сверла $n_i = const = n_c$. Был найден оптимальный уровень n_c , минимизирующий σ_{cp} с учетом (23). Расчеты на ЭВМ показали, что $\sigma_{cp \min} = 1,41$ коп/отв. достигаются при сверлении 63 отверстий с $n_c = 1475$ об/мин (см.рис.3). Время сверления отверстий при этом изменяется от $T_1 = 0,40$ мин. до $T_{63} = 0,56$ мин. (см. рис.4). С целью выявления области наиболее эффективного использования оптимального алгоритма был проведен анализ зависимостей (9) и (10). Анализ показал, что выигрыш при использовании оптимального алгоритма наиболее сильно увеличивается с уменьшением α_2 . Другими словами это означает, что тем более выгодно осуществлять регулирование частоты вращения по оптимальному закону, чем меньше влияние на приращение износа сверла на одном отверстии оказывает изменение частоты вращения сверла (скорости резания), что имеет место (как показал анализ литературных источников) в диапазоне малых диаметров сверления, а также, при использовании в инструменте прогрессивных, обладающих высокой температурной стойкостью, режущих материалов (корунги, сверхтвердые материалы).

По результатам теоретических и экспериментальных исследований был спроектирован и изготовлен специальный агрегатный станок-автомат для одновременного сверления центрального глубокого отверстия в шатуне ЗИЗ с двух сторон. Со стороны левого торца детали сверлится отверстие $\varnothing 4$ мм, со стороны правого - $\varnothing 5$ мм. Станок работает в автоматическом цикле, подача заготовок в зону обработки осуществляется магазинным загрузочным устройством. Длина детали (общая глубина сверления) - 92 мм. В случае необходимости станок может быть настроен на сверление более глубоких отверстий (до 200 мм).

Агрегатный станок имеет две сверлильные головки, которые начинают обработку одновременно, управление головками автономное, независимое. Система управления станком предусматривает блокировку, исключающую встречу сверл в конце цикла обработки. Автоматическое регулирование подачи инструмента при сверлении обеспечивает предохранение сверл от перегрузок по крутящему моменту и осевому усилию. Внедрение этого станка в Свердловском производственном объединении "Исчермостроймашин" позволило повысить производительность обработки в 1,5...2,7 раза, сократить расходы на инстру-

мент в 1,6... 2,2 раза и уменьшить брак в 1,8...3 раза.

По предложенному способу сверления отверстий с наклонным входом и на основании теоретических исследований и числовых расчетов был спроектирован и изготовлен специальный агрегатный станок-полуавтомат для сверления тангенциальных отверстий $\varnothing 3,4$ мм в деталях из стали 40Х твердостью до 42Н С цельными твердосплавными сверлами. Агрегатный станок содержит две агрегатные сверлильные головки и поворотное приспособление, установленные на общем Г-образном столе. Одной головкой станка производится за-сверливание вспомогательным сверлом с углом режущей части $2\varphi = 90^\circ$ с целью создания удобной поверхности для входа основного сверла. Второй головкой, после поворота детали относительно ее оси на угол 90° производится сверление отверстия. Оси обеих агрегатных головок расположены в параллельных горизонтальных плоскостях, ось приспособления наклонена по отношению к базовой плоскости станка. Подача агрегатных головок гидравлическая. Станок позволил уменьшить глубину сверления, устранить операцию развертывания на станках с ручной подачей и значительно сократить общий объем припуска на детали.

Внедрение этого станка на Режевском механическом заводе (Свердловская область) позволило повысить производительность обработки в 2,4 раза, коэффициент использования металла на 15%, сократить расходы на инструмент в 3,5 раза и брак по точности обработки на 40%.

Суммарный годовой экономический эффект от внедрения составляет 154 тыс.руб.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ АВТОРА :

1. Применение принципа максимума для нахождения оптимальной стратегии управления режимом резания. Сб. науч. тр. ЧПИ №178 "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки", Челябинск, 1976, (Тверской М.М.^х).

2. Выбор оптимального управления параметрами режима обработки на операциях сверления. Сб. науч. тр. ЧПИ № 180 "Оптимизация параметров машин и производственных процессов. Челябинск, 1976 (Каленик Д.В.).

х)

В скобках указаны фамилии соавторов.

3. Оптимизация процесса глубокого сверления. Тезисы доклада конференции "Прогрессивные технологические процессы обработки деталей и сборки приборов", Киев, 1976 (Тверской М.М.).

4. О выборе критерия оптимальности для операций сверления. Сб. науч. тр. КузПИ, № 87 "Повышение технологической надежности механической обработки металлов", Кемерово, 1977 (Тверской М.М.).

5. Постановка задачи оптимального управления процессом глубокого сверления. Там же (Тверской М.М.).

6. Оптимальное управление процессом глубокого сверления. Там же.

7. Исследование процессов сверления отверстий малого диаметра с наклонным входом в закаленных и труднообрабатываемых сплавах (отчет), тема 75/145, Инв. № Б 663844. Челябинский политехнический институт им. Ленинского комсомола, Тверской М.М., Челябинск, 1977, 71 стр.

8. Способ сверления отверстий с наклонным входом. Авторское свидетельство. Решение о выдаче от 30 декабря 1977 г. по заявке № 2433537/25-08. (Тверской М.М., Закамалдин В.И., Клепиков Ю.П.).

9. Устройство для управления подачей при глубоком сверлении. Авторское свидетельство. Решение о выдаче от 18 октября 1977 г. по заявке № 2433571/25-08 (Тверской М.М.).

10. Устройство для управления процессом глубокого сверления по величине крутящего момента. Авторское свидетельство. Решение о выдаче от 27 января 1978 г. по заявке № 2511389/25-08 (Тверской М.М., Каленик Д.В., Клепиков Ю.П.).

11. Устройство для сверления скважинных отверстий. Авторское свидетельство. Решение о выдаче от 16 июля 1978 г. по заявке № 2504272/25-08. (Тверской М.М.).

Заказ 1555. Тираж 120 экз. ОП 03357

Объем 0,9 п.л. Уч. изд. 1.2 п.л. Отпечатано в типографии КузПИ. Кемерово; Красноармейская, 115.