

208 043
72-

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

НАДЕИН Владимир Анатольевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА И ПОВЫШЕНИЕ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ СОПЛОВЫХ ОТВЕРСТИЙ В
РАСПЫЛИТЕЛЯХ ФОРСУНОК ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Специальность 05.02.08 - "Технология
машиностроения"

Автореферат
диссертации на соискание
ученой степени кандидата
технических наук

Челябинск
1978

Работа выполнена на кафедре "Автоматизация мехвосборочного производства" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

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

Официальные оппоненты: лауреат Ленинской премии,
доктор технических наук, профессор
БАЗРОВ Б.М.,
кандидат технических наук, доцент
ЛАКИРЕВ С.Г.

Ведущее предприятие - Ярославский завод топливной аппаратуры.

Автореферат разослан " ____ " _____ 1978 года.

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 1978 г., в 15 часов, на заседании специализированного совета К-595/1 по присуждению ученой степени кандидата технических наук в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола (454044, г. Челябинск, 44, проспект им. В.И. Ленина, 76, ауд. 244 гл. учебного корпуса).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института. Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседаниях специализированного совета или прислать отзыв (в двух экземплярах, заверенных печатью).

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
специализированного совета -

кандидат технических наук, доцент



(В.М. МЕНЬШАКОВ)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. XXV съездом КПСС поставлена задача значительного увеличения выпуска тракторов и автомобилей с дизельными двигателями.

Для успешного решения этой задачи необходимо соответственно увеличить выпуск топливной аппаратуры для дизельных двигателей. Прирост выпуска должен обеспечиваться, в основном, за счет повышения эффективности производства. Это требует повышения эффективности каждой операции технологического процесса изготовления топливной аппаратуры. Особенно актуальна задача повышения эффективности операций, которые являются "узким местом" технологического процесса и сдерживают наращивание выпуска и повышение качества продукции.

Значительные трудности в производстве топливной аппаратуры связаны с обработкой сопловых отверстий распылителя - узла, предназначенного для подачи в цилиндры дизельного двигателя мелко-распыленной порции топлива в строго определенный момент рабочего цикла. Сопловые отверстия служат для распыливания топлива и характеризуются следующими геометрическими параметрами:

- диаметр $(0,1 \dots 0,5) \pm 0,01$ мм ;
- отношение длины отверстия к диаметру $3 \dots 7$;
- шероховатость не более $\frac{2,5}{\sqrt{R}}$;

На большинстве заводов топливной аппаратуры сопловые отверстия обрабатываются сверлением. Операции выполняются машинно-ручным способом, характеризуются большим количеством брака (например, на ЧТЗ брак из-за поломки сверл составляет 5 % от всего объема выпуска), низкой производительностью и требуют высокой квалификации операторов. Эти операции, как правило, являются "узким местом" производства распылителей. Работы, направленные на повышение эффективности обработки сопловых отверстий, систематически, начиная с 1972 года, включались в планы новой техники Министерства тракторного и сельскохозяйственного машиностроения СССР, тематические планы Центрального научно-исследовательского и конструкторского института топливной аппаратуры автотракторных и стационарных двигателей и планы новой техники заводов отрасли.

Попытки повышения эффективности сверления сопловых отверстий за счет автоматизации операции с помощью станков, работающих с постоянной подачей, оказались неудачными. Это объясняется тем,

что прочность и жесткость системы СПИД при сверлении отверстий диаметром менее одного миллиметра (мелкоразмерных) ограничены прочностью и жесткостью сверла. В то же время нагрузка на сверло при сверлении мелкоразмерных отверстий с постоянной подачей изменяется в широких пределах из-за рассеяния характеристик обрабатываемого материала, геометрических параметров сверл и степени их затупления. Поэтому, для уменьшения вероятности поломки инструмента, приходится вести обработку на заниженных режимах резания, рассчитанных на наилучшие условия работы сверла. Это резко снижает производительность обработки, не гарантируя отсутствия поломки инструмента.

Цель исследования. Разработка системы автоматического управления процессом сверления, обеспечивающей ликвидацию машинно-ручного труда, снижение расхода сверл, повышение производительности труда и уменьшение брака при обработке сопловых отверстий в корпусах распилителей.

Научная новизна. 1. Разработана методика экспериментально-аналитического исследования, позволяющая для каждого конкретного случая обработки определить алгоритм оптимального управления параметрами режима резания при сверлении мелкоразмерных отверстий.

2. Для определения алгоритма оптимального управления параметрами режима на конкретной операции необходимо иметь зависимость "мгновенной" стойкости инструмента от параметров режима и глубины сверления. Найдено аналитическое выражение, связывающее "мгновенную" стойкость и стойкостную зависимость, получаемую при обработке результатов экспериментов, проведенных с конечными глубинами сверления.

3. Поставлена и решена, как в общем виде, так и для случая сверления сопловых отверстий, задача определения наиболее выгодной скорости резания, когда её регулирование при изменении текущей глубины сверления представляется целесообразным, а влияние величины износа инструмента на параметры его нагрузки незначительно.

4. Поставлена в общем виде и решена для случая сверления сопловых отверстий задача определения наиболее выгодной скорости резания и оптимального времени работы инструмента до его смены с учетом влияния величины износа инструмента на параметры его нагрузки.

Практическая полезность. 1. Разработан и внедрен в производство промышленный вариант САУ со стабилизацией осевой нагрузки

на сверло, позволяющий ликвидировать машинно-ручной труд, в 2,7 раза увеличить производительность труда, в 2,6 раза сократить расход инструмента и уменьшить количество брака при сверлении сопловых отверстий. Разработанная САУ отличается простотой конструктивного исполнения, высокой надежностью и малой стоимостью.

2. Результаты теоретических исследований могут быть использованы при создании САУ для других операций, математическая модель которых подобна математической модели сверления мелкогабаритных отверстий.

Реализация работы в промышленности. Первые в стране станки-автоматы для сверления сопловых отверстий, оснащенные САУ со стабилизацией осевой нагрузки на сверло, внедрены на Челябинском тракторном заводе. Годовой экономический эффект от внедрения 4 станков составил 7,5 тыс.руб. в год.

В настоящее время ведутся работы по внедрению ещё пяти станков.

Апробация работы. Основные результаты исследований по теме диссертации автором докладывались:

1. На Отраслевой научно-технической конференции по техническому перевооружению производства прецизионных деталей (г. Ленинград, 1973 г.).

2. На научно-технических конференциях Челябинского политехнического института (г. Челябинск, 1974, 1977 г.г.).

3. На Отраслевом техническом Совете по топливной аппаратуре тракторных двигателей (г. Ленинград, 1977 г.).

Объем работы и её структура. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста; состоит из введения, пяти глав и заключения. Библиография содержит 136 наименований. В диссертации имеется 51 иллюстрация, 15 таблиц и 8 приложений.

Принятые обозначения

- Θ_1 - часть приведенных козрасчетных затрат, зависящая от режима резания и приходящаяся на одно обработанное отверстие, коп.;
- E - приведенные затраты, обусловленные одной минутой работы станка и рабочего, без затрат на режущий инструмент, коп./станко-мин;
- I - приведенные затраты, обусловленные эксплуатацией режу-

щего инструмента за период его стойкости, включая затраты на переточку, коп.;

T_p - время резания при сверлении одного отверстия, мин.;

$T_p = T_m - T_{xx}$, где T_{xx} - время холостых ходов;

T_{cm} - продолжительность простоя станка, связанного с одной заменой сверла, мин.;

N - число отверстий, обработанных за период стойкости сверла, шт.;

θ_2 - затраты, определяемые величиной θ_1 , но с учетом затрат на исправление брака, вызванного поломкой сверла, коп.;

C_b - величина затрат на исправление брака, вызванного поломкой сверла, коп.;

K_n - математическое ожидание числа переточек, допускаемых сверлом до его поломки;

d - диаметр сверла, мм;

T - стойкость, мин.;

V - скорость резания, м/мин.;

S - подача, мм/об.;

$Z = E T_{cm} + N + \frac{C_b}{K_n + 1}$ - затраты на режущий инструмент и исправление брака за период стойкости, коп.;

M_a - допускаемая из условия прочности сверла (с учетом коэффициента запаса прочности) величина крутящего момента, кгс·мг.;

P_a - допускаемая из условия устойчивости сверла (с учетом коэффициента запаса устойчивости) величина осевой силы, кгс.;

T_n^M, T_n^P - величины наиболее выгодных стойкостей, соответствующих ограничениям по крутящему моменту и осевой силе, мин.;

T_{mn} - "мгновенная" или ожидаемая стойкость, мин.;

l - текущая или "мгновенная" глубина сверления, мм.;

l_k - глубина готового отверстия, мм.;

t_k - время резания при сверлении отверстий глубиной l_k , мин.;

l_n - глубина сверления, при которой вступает в действие регулятор, мм.;

$S_{мин}$ - минутная подача, мм/мин.;

t - текущее время резания, мин.;

θ - затраты, определяемые величиной θ_2 , но отнесенные к единице площади боковой поверхности отверстия, коп./мм²;

- Δ - "мгновенная" интенсивность износа сверла, мм/мин;
 Δ_k, Δ_{k+1} - средняя интенсивность износа сверла при сверлении
 отверстий глубиной ℓ_k, ℓ_{k+1} , мм/мин;
 Δ_T - допустимая величина износа сверла за период стойкости, мм;
 T_H - величина времени приработки инструмента;
 θ_3 - затраты, определяемая величиной θ_2 , но отнесенные к
 единице длины обработанного отверстия, коп./мм;

I. ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ СОПЛОВЫХ ОТВЕРСТИЙ В КОРПУСАХ РАСПЫЛИТЕЛЕЙ

В настоящее время промышленностью выпускаются два основных типа распылителей: распылитель (короткий) двигателей семейства Д108 и В2 и распылитель (удлиненный) двигателей семейства СМД.

Анализ современных методов обработки малоразмерных отверстий показал, что все технологические требования, предъявляемые к сопловым отверстиям как короткого, так и удлиненного распылителя, могут быть обеспечены при обработке их методом сверления или методом электроэрозионной прошивки. Экономически целесообразно обрабатывать сопловые отверстия сверлением. Метод электроэрозионной прошивки может стать более экономичным при обработке сопловых отверстий в удлиненном распылителе, при условии разработки высокопроизводительных и дешевых отечественных электроэрозионных станков. Что касается короткого распылителя, то, даже при условии создания таких станков, сверление останется наиболее эффективным способом обработки его сопловых отверстий. Это объясняется тем, что длина сопловых отверстий в коротком распылителе в два раза больше, чем в удлиненном, что существенно снижает производительность электроэрозионной прошивки из-за затрудненной эвакуации продуктов эрозии. Поэтому в первую очередь необходимо повысить эффективность сверления сопловых отверстий в коротком распылителе. Решение задачи повышения эффективности следует искать прежде всего в автоматизации операции сверления, так как другие пути, например, применение сверл прогрессивных конструкций, трудно использовать из-за малого диаметра сопловых отверстий.

Анализ оборудования, применяемого при сверлении сопловых отверстий, показал, что как у нас в стране, так и за рубежом сопловые отверстия, в основном, сверлятся на станках с ручной подачей. В ФРГ были созданы специальные станки-полуавтоматы "Zetta 3/50" для сверления сопловых отверстий, работающие с постоянной подачей.

Попытка внедрения их на ЧТВ окончилась неудачей. Анализ причин этой неудачи и особенностей процесса сверления мелкогазмерных отверстий позволил сделать вывод о целесообразности разработки для автоматизации этого процесса системы оптимального автоматического управления параметрами режима, замкнутой обратной связью по ограничивающим силовым параметрам.

В настоящее время ни у нас в стране, ни за рубежом нет опыта разработки подобных систем управления процессом сверления мелкогазмерных отверстий. Нет и достаточно простых методов выбора оптимальных технологических законов регулирования параметров режима при таком сверлении. Эти обстоятельства вызывают необходимость проведения исследований, результаты которых позволили бы достигнуть цели, поставленной в работе. В процессе выполнения работы необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать процесс сверления сопловых отверстий и построить математическую модель его для конкретной модификации распилителя.

2. Разработать методику поиска алгоритма оптимального управления параметрами режима резания при сверлении мелкогазмерных отверстий.

3. Разработать конструкцию станка, оснащенного системой автоматической оптимизации параметров режима резания, провести исследование его работы и внедрить станок в производство.

2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМА ПРИ СВЕРЛЕНИИ МЕЛКОГАЗМЕРНЫХ ОТВЕРСТИЙ

Выбор критерия оптимальности. Основным показателем эффективности обработки на металлорежущих станках является величина приведенных коэффicientsных затрат (в дальнейшем именуемых просто затратами), учитывающих технологическую себестоимость изготовления детали требуемого качества и эффективность капитальных вложений в оборудование, на котором производится обработка. Для оценки эффективности собственно режима резания достаточно учитывать только ту часть затрат, которая зависит от его параметров — скорости резания и подачи. Переменная, зависящая от режима резания, часть затрат на сверление одного отверстия определяется следующим выражением:

$$O_1 = E \bar{t}_p + \frac{E \bar{t}_{em} + H}{N} \quad (1)$$

Особенностью процесса сверления мелкогазмерных отверстий является то, что большинство сверл выходит из строя в результате поломки раньше, чем их рабочая часть, вследствие износа и последующих заточек, укорачивается настолько, что сверление становится невозможным. Поэтому число переточек, допустимых сверлом, правильнее определять статистически. Извлечение осколков сломавшего сверла и последующая дообработка связаны с определенными затратами, которые необходимо ввести в выражение (1). Тогда затраты на обработку одного отверстия будут определяться выражением

$$\theta_2 = E\bar{t}_p + \frac{E\bar{t}_{cm} + H}{N} + \frac{C\delta}{N(\bar{k}_n + 1)} \quad (2)$$

Выразив \bar{t}_p и N через параметры режима и стойкость инструмента и отнеся затраты, определяемые величиной θ_2 , к единице площади боковой поверхности отверстия, получим

$$\theta = \frac{\theta_2}{\pi d} = 10^{-3} \left(\frac{E}{VS} + \frac{H}{VST(V, S, t)} \right) \quad (3)$$

Зависимость (3) является математическим выражением критерия оптимальности (целевой функцией). Так как нас интересует не абсолютная величина затрат, а сочетание параметров режима V_* и S_* , при которых затраты минимальны, то в дальнейшем множитель 10^{-3} в выражении (3) опущен.

Понятие "мгновенной" стойкости. Глубина сверления при обработке каждого отверстия непрерывно изменяется от нуля до l_k , и в каждый момент времени может быть определена как текущая или "мгновенная" глубина сверления. "Мгновенной" глубине сверления соответствует "мгновенная" стойкость, то есть стойкость, которая наблюдалась бы, если бы текущая глубина сверления не изменялась. Из выражения (3) следует, что для определения алгоритма оптимального управления режимом необходимо иметь зависимость "мгновенной" стойкости от параметров режима и глубины сверления. Традиционно применяемые при исследовании процесса сверления стойкостные зависимости отражают влияние на стойкость конечных, а не "мгновенных" глубин сверления. Найдем связь между стойкостным выражением, полученным при обработке результатов эксперимента, проведенного с конечными глубинами сверления, и "мгновенной" стойкостью.

Пусть за период стойкости просверлено всего N_k отверстий глубиной l_k , тогда

$$\Delta_T = \bar{\Delta}_k \cdot \bar{t}_k \cdot N_k . \quad (4)$$

Аналогичное соотношение имеет место для глубины сверления

$$l_{k+1} > l_k : \quad \Delta_T = \bar{\Delta}_{k+1} \cdot \bar{t}_{k+1} \cdot N_{k+1} . \quad (5)$$

При сверлении каждого отверстия глубиной l_{k+1} до тех пор, пока сверло не достигло глубины l_k , средняя интенсивность его износа равна $\bar{\Delta}_k$. Поэтому, обозначив через $\bar{\Delta}_{k,k+1}; \bar{t}_{k,k+1}$ среднюю интенсивность износа сверла и время его работы при сверлении отверстия на отрезке $l_{k,k+1} = l_{k+1} - l_k$, запишем

$$\bar{\Delta}_{k+1} (l_k + \bar{t}_{k,k+1}) = \bar{\Delta}_k \bar{t}_k + \bar{\Delta}_{k,k+1} \bar{t}_{k,k+1} . \quad (6)$$

"Мгновенная" интенсивность износа сверла на глубине сверления l_{k+1} определяется выражением:

$$\dot{\Delta}(l_{k+1}) = \lim_{l_k \rightarrow l_{k+1}} \bar{\Delta}_{k,k+1} . \quad (7)$$

Выражение для "мгновенной" стойкости, соответствующей "мгновенной" интенсивности износа сверла, запишем в виде

$$T_{\text{мгн}}(l_{k+1}) = \frac{\Delta_T}{\dot{\Delta}(l_{k+1})} . \quad (8)$$

В свою очередь стойкость сверла при глубине сверления l_{k+1} может быть определена выражением:

$$T(l_{k+1}) = \frac{\Delta_T}{\dot{\Delta}_{k+1}} . \quad (9)$$

Из уравнения (6) с учетом выражений (7), (8), (9) получено выражение для определения "мгновенной" стойкости по известной стойкостной зависимости:

$$T_{\text{мгн}}(l) = \frac{T^2(l_k)}{T(l_k) - l_k \frac{dT(l_k)}{dl_k}} . \quad (10)$$

В частности, если стойкостная зависимость аппроксимируется выражением

$$T = \frac{C_T'}{V^\mu \cdot S^\nu \cdot l_k^p} , \quad (11)$$

то "мгновенная" стойкость будет определяться выражением:

$$T_{\text{мгн}} = \frac{C_T}{V^\mu \cdot S^{\beta_1} \cdot \ell^{\rho_1}}, \quad (12)$$

где ℓ - текущая глубина сверления, а $C_T = \frac{C'_T}{\rho+1}$.

Определение оптимального режима резания при наличии силовых ограничений. Если стойкостная зависимость описывается выражением в виде (11), то целевая функция (3) не имеет стационарных точек, и её минимум находится на одной из границ допустимой области. Уравнения границ допустимой области целевой функции, определяемые силовыми ограничениями, могут быть записаны в виде:

$$M_{\partial} = C_M \cdot V^{\alpha_1} \cdot S^{\beta_1} \cdot \ell^{\gamma_1} \quad (13)$$

$$P_{\partial} = C_P \cdot V^{\alpha_2} \cdot S^{\beta_2} \cdot \ell^{\gamma_2} \quad (14)$$

Решая совместно уравнения (3), (12) и (13), а затем - (3), (12) и (14), получим два уравнения для определения затрат на обработку на границах допустимой области целевой функции:

$$\theta = \frac{E}{\left(\frac{M_{\partial}}{C_M}\right)^{\frac{1}{\beta_1}} \cdot \ell^{\frac{\gamma_1}{\beta_1}} \cdot V^{1-\frac{\alpha_1}{\beta_1}}} + \frac{\partial \ell^{\rho-\frac{\rho_1}{\beta_1}(\rho-1)} \cdot \left(\frac{M_{\partial}}{C_M}\right)^{\frac{1}{\beta_1}-1} \cdot V^{\mu-1-\frac{\alpha_1}{\beta_1}(\rho-1)}}{C_T}, \quad (15)$$

$$\theta = \frac{E}{\left(\frac{P_{\partial}}{C_P}\right)^{\frac{1}{\beta_2}} \cdot \ell^{\frac{\gamma_2}{\beta_2}} \cdot V^{1-\frac{\alpha_2}{\beta_2}}} + \frac{\partial \ell^{\rho-\frac{\rho_2}{\beta_2}(\rho-1)} \cdot \left(\frac{P_{\partial}}{C_P}\right)^{\frac{1}{\beta_2}-1} \cdot V^{\mu-1-\frac{\alpha_2}{\beta_2}(\rho-1)}}{C_T}. \quad (16)$$

Продифференцировав выражения (15) и (16) по скорости резания и приравняв производные нулю, после преобразований получим выражения для определения $V_{*}^m(\ell)$ и $V_{*}^p(\ell)$ - оптимальных скоростей резания вдоль границы, определяемой допускаемым крутящим моментом, и вдоль границы, определяемой допускаемой осевой нагрузкой на сверло. Выражения для оптимальных подач $S_{*}^m(\ell)$ и $S_{*}^p(\ell)$ найдем, решив уравнения (13) и (14) соответственно совместно с выражениями, полученными для V_{*}^m и V_{*}^p . Подставляя поочередно выражения для V_{*}^m , S_{*}^m и V_{*}^p , S_{*}^p в уравнение стойкостной зависимости (12), получим два выражения для определения наимыгоднейшей стойкости сверла:

$$T_{\text{н}}^m = \frac{C_T}{V^{\mu} S^{\beta_1} \ell^{\rho}} = \frac{\partial}{E} \left(\frac{\frac{\alpha_1}{\beta_1} \rho - \mu}{\frac{\alpha_1}{\beta_1} - 1} - 1 \right) = \text{const}, \quad (17)$$

$$T_H^P = \frac{Cr}{V^{\mu} S^{\beta} \ell^{\rho}} = \frac{\varepsilon}{E} \cdot \left(\frac{\frac{\alpha_2}{\beta_2}}{\frac{\alpha_2}{\beta_2} - 1} - \mu \right) = const \quad (18)$$

Таким образом, значение невыгоднейшей стойкости является величиной постоянной для данного ограничения и зависит только от отношения $\frac{\alpha}{\beta}$, то есть от степени относительного влияния скорости резания и подачи в уравнениях границ (13), (14) на величину параметра нагрузки.

Получены два режима: $\{V_*^M, S_*^M\}$ и $\{V_*^P, S_*^P\}$, минимизирующие целевую функцию на каждой из границ. Оба ли они находятся в разрешенной этими границами зоне, и как определить, какая из пар значений V_*^M, S_*^M и V_*^P, S_*^P обеспечит наименьшее значение целевой функции (для данной ℓ) в допустимой области?

Пусть $\alpha_1 > 0$ и $\alpha_2 > 0$, то есть увеличение скорости резания вызывает увеличение параметров нагрузки на сверло. Для определенности положим $\frac{\alpha_1}{\beta_1} > \frac{\alpha_2}{\beta_2}$.

В координатах $\lg V - \lg S - \lg \ell$ (рис. 1) уравнения (17), (18) определяют две параллельные плоскости невыгоднейших стойкостей T_H^M и T_H^P , которые являются геометрическим местом точек оптимального режима резания (при различных значениях ℓ) для границ допустимой области целевой функции с соответствующим отношением $\frac{\alpha}{\beta}$ (T_H^M для границы с $\frac{\alpha_1}{\beta_1}$; T_H^P - для границы с $\frac{\alpha_2}{\beta_2}$).

Уравнения границ (13), (14) в тех же координатах представляют собой пересекающиеся плоскости M_d и P_d , которые являются геометрическим местом точек таких предельных режимов резания, при которых значение соответствующего параметра нагрузки на инструмент равно допустимому. Линии пересечения CC_2 и EE_2 плоскостей границ с соответствующими им плоскостями невыгоднейших стойкостей являются геометрическим местом точек оптимального режима для этой границы. При глубине сверления $\ell = \ell_1$ графиками уравнений (13), (14), (17), (18) в координатах $\lg V - \lg S$ будут прямые линии, являющиеся следами плоскостей M_d, P_d, T_H^M, T_H^P на плоскости ℓ_1 , и оптимальному режиму для каждой границы будет соответствовать точка пересечения этой границы с соответствующей ей линией невыгоднейшей стойкости. Углы наклона этих линий к осям координат определяются величиной отношения $\frac{\alpha_1}{\beta_1}$, $\frac{\alpha_2}{\beta_2}$ и $\frac{\mu}{\nu}$ в уравнениях (13), (14), (12). Заметим, что обычно при сверлении скорость резания.

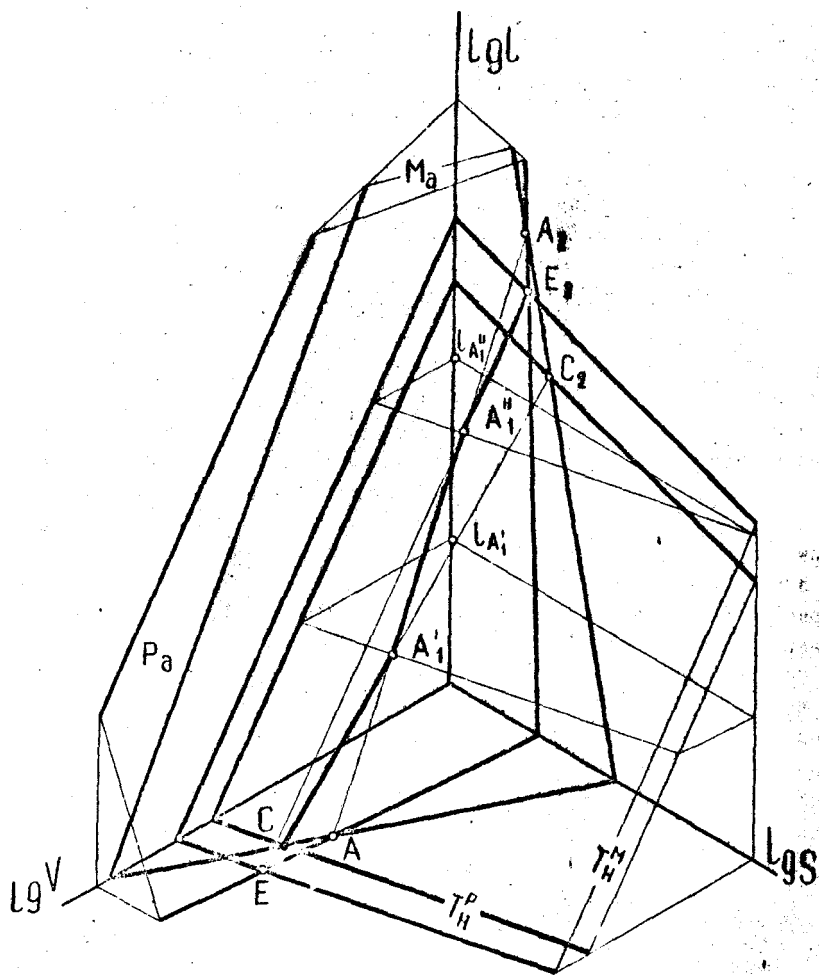


Рис.1. Плоскости ограничений, наилучших
стойкостей и алгоритм оптимального управления

сказывает большее влияние на стойкость и меньшее на величину параметра нагрузки, чем подача, то есть $\frac{A}{P} > 1$; $\frac{\alpha_1}{\beta_1} < 1$; $\frac{\alpha_2}{\beta_2} < 1$.

Анализ выражений (17) и (18) показывает, что большей величине отношения $\frac{\alpha}{\beta}$ (в интервале $-\infty < \frac{\alpha}{\beta} < 1$) соответствует большая величина наимыгоднейшей стойкости. Поэтому границе с большим отношением $\frac{\alpha}{\beta}$ соответствует линия наимыгоднейшей стойкости, расположенная ближе к началу координат.

На рис.2. в координатах $\epsilon_y V - \epsilon_g S$ нанесены границы допустимой области целевой функции, построенные для разных глубин сверления ℓ , ℓ_1 , ℓ_2 по уравнениям (13) (соответственно $A\Delta$, $A_1\Delta_1$, $A_2\Delta_2$) и (14) (соответственно AB , A_1B_1 , A_2B_2). Линии T_H^M , $T_{H_1}^M$, $T_{H_2}^M$ - это линии наимыгоднейших стойкости для границы $M\Delta$, а T_H^P , $T_{H_1}^P$, $T_{H_2}^P$ - линии наимыгоднейших стойкостей для границы $P\Delta$. При любой глубине сверления слева от точки А пересечения границ $P\Delta$ и $M\Delta$, допустимая область целевой функции, очерчена границей с меньшей величиной $\frac{\alpha}{\beta}$ (семейство прямых AB), а справа - с большей (семейство прямых $A\Delta$). Если точка А пересечения границ находится внутри зоны, ограниченной осями координат и линией T_H^M , находящейся ближе к началу координат, то пересечение линий границ линиями наимыгоднейшей стойкости возможно только правее точки А, а здесь границей области допустимых режимов резания является граница $M\Delta$ с большим отношением $\frac{\alpha}{\beta}$. Следовательно, оптимальному режиму будет соответствовать точка С пересечения этой границы с соответствующей ей линией наимыгоднейшей стойкости T_H^M . Точка Е пересечения границы $P\Delta$ и соответствующей ей линии наимыгоднейшей стойкости T_H^P находится в запрещенной зоне. Оптимальный режим может быть найден совместным решением уравнений (13) и (17). Если точка A_1 пересечения границ лежит внутри зоны, заключенной между линиями $T_{H_1}^M$ и $T_{H_1}^P$, то обе точки C_1 и E_1 пересечения границ с линиями $T_{H_1}^M$ и $T_{H_1}^P$ находятся в запрещенной зоне, и оптимальному режиму соответствует точке пересечения границ. То же самое можно сказать и для случая, когда точка пересечения границ лежит на одной (любой) из линий наимыгоднейшей стойкости. Оптимальный режим находится совместным решением уравнений (13) и (14). Если точка A_2 пересечения границ лежит вне зоны описываемой осями координат и линией $T_{H_2}^P$ наимыгоднейшей стойкости, соответствующей ограничению с меньшим отношением $\frac{\alpha}{\beta}$, то пересечение границ линиями

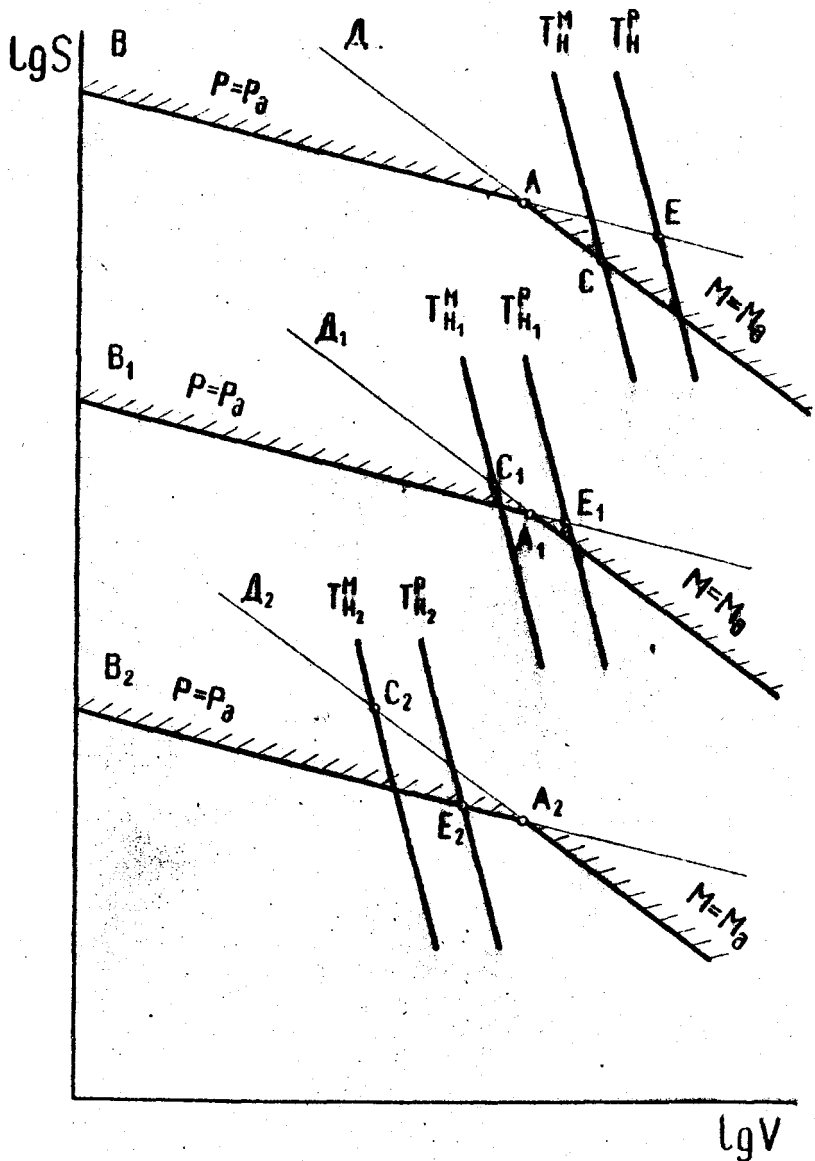


Рис.2. Оптимальные параметры режима при наличии силовых ограничений

наивыгоднейшей стойкости возможно только левее точки A_2 , а здесь границей области допустимых режимов резания является граница с меньшим отношением $\frac{v}{f}$. Оптимальный режим может быть найден совместным решением уравнений (14), (18). Таким образом, положение точки пересечения границ допустимой области целевой функции относительно линий наивыгоднейшей стойкости, соответствующих этим границам, однозначно определяет параметры оптимального режима. Смена границы (переключение управления), на которой находится точка, соответствующая оптимальному режиму, происходит в момент, когда точка пересечения границ попадает на одну из линий наивыгоднейшей стойкости.

Методика поиска алгоритма оптимального управления при сверлении мелкоразмерных отверстий. Для оптимизации операции необходимо знать закон изменения параметров режима, который бы обеспечил оптимальный режим на любой текущей глубине сверления.

На рис. I. точке A_I^I - это точка пересечения плоскостей M_d, P_d и T_H^I ; точка A_I^II - точка пересечения плоскостей M_d, P_d и T_H^II . Точки A_I^I и A_I^II являются точками переключения управления. При текущей глубине сверления $l < l_d^I$, линия пересечения AA_I^I плоскостей границ M_d и P_d находится внутри пространства, ограниченного плоскостями координат и плоскостью T_H^I . Согласно решению плоской задачи, оптимальный режим резания соответствует линии CA_I^I пересечения границы M_d с соответствующей плоскостью наивыгоднейшей стойкости T_H^I . При $l_d^I \leq l \leq l_d^{II}$ оптимальному режиму соответствует линия $A_I^I A_I^II$, а при $l > l_d^{II}$ - линия $A_I^II E_2$.

Таким образом, для оптимизации конкретной операции необходимо решением уравнений (13), (14) поочередно с уравнениями (17), (18) найти глубину сверления, соответствующую точкам переключения управления, а также скорость резания и подачу в них.

Далее нужно сравнить глубину отверстия, заданную технологическим процессом, с глубиной, соответствующей точкам переключения управления, и по результатам этого сравнения выбрать алгоритм оптимального управления параметрами режима.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТОЙКОСТНОЙ И СИЛОВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ОТВЕРСТИЙ ДИАМЕТРОМ 0,35 ММ

Определение коэффициентов и показателей степени $C_m, C_p, C_T, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \gamma_1, \gamma_2, \mu, \nu, \rho$, входящих в уравнения (13), (14), (11)

математической модели процесса сверления, произведено на основании экспериментальных исследований. Выражения (11), (13), (14) могут достаточно точно аппроксимировать стойкостную и силовые зависимости в относительно узком диапазоне скоростей резания, подачи и глубин сверления. Поэтому эксперимент по определению этих зависимостей проведен в два этапа. На первом этапе с помощью эксперимента, спланированного многофакторным методом ортогональных латинских и упорядоченных квадратов, определялся вид частных зависимостей стойкости и параметров нагрузки на сверло от параметров режима резания и глубины сверления. При графическом анализе результатов эксперимента были определены диапазоны параметров режима и глубины сверления, в которых стойкостная и силовые зависимости могут быть удовлетворительно аппроксимированы произведением степенных функций. Эти диапазоны оказались достаточными для решения задачи оптимизации параметров режима. На втором этапе в найденных диапазонах проводился трехфакторный эксперимент с варьированием каждого фактора на двух уровнях.

Эксперимент для определения стойкостной зависимости проводился на сверлильном станке Zetio 3/50 (ФРГ). Сверлились плоские образцы толщиной 2,5 мм из стали 18Х214МА. Твердость образцов НRC 22...27. При проведении эксперимента, как и в производственных условиях ЧТЗ, использовались цилиндрические сверла $\varnothing 0,35$ мм из стали Р18; вылет сверла устанавливался равным 5 мм; в качестве охлаждающей жидкости применялось растительное масло. После математической обработки результатов эксперимента установлено, что в диапазоне скоростей резания 6,6...16,5 м/мин, подачи 0,004...0,008 мм/об и глубин сверления 0,5...2,2 мм стойкостная зависимость с доверительной вероятностью равной 0,9 описывается выражением:

$$T = \frac{0,76 \pm 0,14}{\sqrt{2,2 \pm 0,14} S^{1,7 \pm 0,14} l^{2,6 \pm 0,14}} \quad (19)$$

Эксперимент для определения зависимостей параметров нагрузки на инструмент от параметров режима резания и глубины сверления проводился на установке, в комплект которой входили станок Zetio 3/50, тензоусилитель ТА-5, шлейфовый осциллограф НО08 и двухкомпонентный сверлильный динамометр, конструкция которого разработана автором этой работы. При математической обработке результатов эксперимента определено, что в диапазоне скоростей резания

6,6...16,5 м/мин, подач 0,004...0,008 мм/об и глубин сверления 0,4...2,2 мм зависимость параметров нагрузки на сверло от параметров режима и глубины сверления с доверительной вероятностью, равной 0,95, описывается выражениями:

$$M = 0,59 \pm 0,05 \cdot V^{0,23 \pm 0,03} \cdot g^{0,43 \pm 0,05} \cdot l^{0,17 \pm 0,03} \quad \text{кгсмм}, \quad (20)$$

$$P = 12,75 \pm 0,85 \cdot V^{0,17 \pm 0,03} \cdot g^{0,6 \pm 0,03} \cdot l^{0,08 \pm 0,03} \quad \text{кгс}. \quad (21)$$

4. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ С УЧЕТОМ ФАКТИЧЕСКИХ РЕАЛИЗАЦИЙ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ

Проведенные исследования показали, что при сверлении сопловых отверстий в корпусе короткого распылителя, глубина, соответствующая точке переключения управления A_I^H (см.рис.1.), меньше, чем глубине сверления, при достижении которой заканчивается переходный процесс при врезании сверла. Поэтому для оптимального управления параметрами режима резания при сверлении отверстий в корпусе короткого распылителя достаточно, за счет автоматического изменения скорости резания и подачи, поддерживать на постоянном уровне осевую нагрузку на сверло и соответствующую этому ограничению невыгоднейшую стойкость.

Не всегда регулирование скорости резания в процессе обработки технически возможно и экономически целесообразно. Для случая обработки с постоянной скоростью резания и стабилизированным параметром нагрузки на инструмент получено аналитическое выражение, позволяющее определить величину скорости резания, обеспечивающей минимальные затраты на обработку:

$$V_*^{A - \frac{\alpha_2}{\beta_2}} = \frac{C_r \cdot C_p^{\frac{1}{\beta_2}} \cdot l^{\frac{\alpha_2}{\beta_2} - p + 1} \cdot l_k}{(l_k - l_H)(p+1) \cdot P_0^{\frac{1}{\beta_2}} \left(\frac{\alpha_2}{\beta_2} - p + 1\right) \cdot T_H^p} \quad (22)$$

Выражение (22) справедливо и при стабилизации крутящего момента на сверле, если, вместо $P_0, C_p, \alpha_2, \beta_2, \delta_2$, подставить $M_0, C_m, \alpha_1, \beta_1, \delta_1$.

Уравнения (13) и (14) границ допустимой области целевой функции не учитывают протекания износа инструмента во времени. Поэтому алгоритм оптимального управления, найденный по предложенной в работе методике, обеспечивает строго оптимальное управление только при той величине износа, при которой получены уравнения (13) и (14).

Кроме этого, при сверлении со стабилизированным параметром нагрузки и постоянной скоростью резания, минутная подача по мере затупления инструмента уменьшается, при этом увеличивается машинное время обработки одного отверстия. Соответственно растут затраты, связанные с эксплуатацией станка и оплатой труда рабочего, приходящиеся на одно отверстие. Но одновременно с каждым новым просверленным отверстием уменьшаются затраты на инструмент, отнесенные к одному отверстию. Выражение для целевой функции представляет собой сумму этих затрат, поэтому существует величина времени работы инструмента до его смены, при которой затраты на обработку будут минимальными. Наивыгоднейшую стоимость и скорость резания при работе со стабилизированным параметром нагрузки и с учетом протекания износа инструмента найдем следующим образом. Выражение для суммарной длины отверстий, обработанных за период стоимости (без учета времени приработки инструмента), запишем в виде:

$$L = \int_{\bar{t}_H}^T S_{\min}(\bar{t}; v) \cdot d\bar{t} \quad (23)$$

Тогда выражение для приведенных затрат на сверление одного отверстия принимает вид:

$$\theta_3 = \frac{[E(T - \bar{t}_H) + \theta] \cdot l_k}{\int_{\bar{t}_H}^T S_{\min}(\bar{t}, v) \cdot d\bar{t}} \quad (24)$$

После экспериментального определения зависимости $S_{\min}(\bar{t}, v)$ наивыгоднейшие скорость резания и время работы инструмента до его смены определяются решением системы уравнений:

$$\frac{\partial \theta_3}{\partial T} = 0; \quad \frac{\partial \theta_3}{\partial v} = 0. \quad (25)$$

Зависимость $S_{\min}(\bar{t}, v)$ определена при сверлении сопловых отверстий в корпусе короткого распылителя со стабилизированной осевой нагрузкой на макетном образце станка для выполнения этой операции. Эта зависимость хорошо аппроксимируется выражением вида:

$$S_{\min} = AV^2 + BV + C - (DV^K + E) \cdot \bar{t}, \quad (26)$$

где A, B, C, D, K, E - эмпирические коэффициенты.

Подставив выражение (26) в (24), на основе выражений (25) после некоторых преобразований получим систему уравнений:

$$T_* = -\frac{\theta}{E} + \bar{t}_H \pm \sqrt{\left(\frac{\theta}{E} - \bar{t}_H\right)^2 + 2\left(\frac{AV^2 + BV + C}{DV^K + E}\right) \frac{\theta}{E} - \bar{t}_H^2}, \quad (27)$$

$$2(2AV + B)(T_* - \bar{T}_H) = kDV^{k-1}(T_*^2 - \bar{T}_H^2) \quad (28)$$

где T_* - наимыгоднейшее время работы инструмента до его смены. После подстановки в систему уравнений (27) и (28) численных значений входящих в неё величин и решения системы на ЭЦМ получены значения наимыгоднейших скорости резания $V_* = 15,5 \frac{M}{МИН}$ и стойкости $T_* = 11 \text{ мин}$ с учетом фактических реализаций процесса сверления сопловых отверстий. Проведенное аналитическое и экспериментальное исследование позволили получить исходные данные для определения основных конструктивных параметров станка-автомата.

5. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ СТАНКОВ-АВТОМАТОВ ДЛЯ СВЕРЛЕНИЯ СОПЛОВЫХ ОТВЕРСТИЙ

Результаты теоретических и экспериментальных исследований явились основой для разработки первого в стране станка-автомата для сверления сопловых отверстий в корпусе распылителя. Станок-автомат имеет следующий цикл работы: автоматическую подачу деталей из лотка в зону обработки, предварительное накернивание отверстия, поворот детали, подвод сверла и врезание на форсированной подаче, сверление с постоянной величиной осевого усилия на сверле при автоматическом изменении подачи, быстрый вывод сверла, поворот детали для сверления следующего отверстия. Станок оснащен системой, отключающей его для смены сверла в момент, когда продолжение работы этим сверлом ведет к увеличению затрат на обработку, вследствие значительного уменьшения минутной подачи при затуплении сверла.

Производственные испытания показали основные преимущества сверления сопловых отверстий с применением разработанной системы автоматического управления: ликвидирован машинно-ручной труд, сокращен брак и повышена производительность труда.

Четыре станка-автомата для сверления сопловых отверстий внедрены на Челябинском тракторном заводе. В результате внедрения в 2,7 раза повышена производительность труда, в 2,6 раза сокращен расход сверл, годовой экономический эффект составил 7,2 тыс.руб.

ВЫВОДЫ

I. Технико-экономический анализ современных методов обработки отверстий диаметром менее одного мм показал, что наиболее эффек-

тивным методом обработки сопловых отверстий в корпусах распылителей является сверление.

2. Разработана методика определения алгоритма оптимального управления параметрами режима резания при сверлении отверстий диаметром меньше одного мм. Методика может применяться для любых процессов резания, математическая модель которых подобна рассмотренной.

3. Предложена методика определения наиболее выгодной скорости резания для станков, работающих со стабилизированным параметром нагрузки на инструмент, в случаях, когда её регулирование представляется нецелесообразным по техническим или экономическим соображениям.

4. Поставлена и решена задача определения наиболее выгодного времени работы инструмента до его смены с учетом фактических реализаций процесса резания для станков, работающих со стабилизированным параметром нагрузки на инструмент.

5. Проведены экспериментальные исследования процесса сверления отверстий диаметром 0,35 мм. Определены стойкостная и силовые зависимости при сверлении.

6. На основе проведенных исследований разработана конструкция первого в стране станка-автомата для сверления сопловых отверстий в корпусах распылителей. Четыре станка-автомата внедрены на ЧТБ.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора:

1. К вопросу сверления сопловых отверстий в корпусе распылителя. Л., Труды ЦНИТА, вып. 59, 1973.

2. Исследование стойкостной и силовых зависимостей при сверлении сопловых отверстий. Л., Труды ЦНИТА, вып. 70, 1977.

3. Алгоритм оптимального управления операцией сверления сопловых отверстий (в соавторстве с М.М.Тверским). Л., Труды ЦНИТА, вып. 70, 1977.

4. Авторское свидетельство "Сверлильная головка с автоматическим регулированием подачи" (в соавторстве). Решение о выдаче от 30.XI.77г. по заявке № 2482679/25-08. М.ял² В23В39/10.