

05.02.08  
-464

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

ЧЕРЕМИСОВ Алексей Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ  
СВЕРЛЕНИЯ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ В ЛИСТОВЫХ  
ЗАГОТОВКАХ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ,  
ПОДВЕРГНУТОЙ ТМО

Специальность 05.02.08 - технология машиностроения

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск, 1979

Работа выполнена на кафедре "Металлорежущие станки и инструмент" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель-  
доктор технических наук,  
профессор

Д.К. Маргулис.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор

М.М. Тверской;

кандидат технических наук

В.Н. Коноплев.

Ведущее предприятие - Челябинский тракторный завод им. В.И. Ленина.

Защита диссертации состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1979 г. на заседании специализированного совета К 053.13.02 Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.  
Адрес: 454044, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЧПИ, ученый совет.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧПИ.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1979 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
кандидат технических наук,  
доцент

В.М. Меньшаков

Работа посвящена исследованию технологических операций сверления точных сквозных отверстий сверлами, оснащенными твердосплавными пластинками, в листовых деталях, изготавливаемых из высокопрочной стали, подвергнутой термомеханической обработке. Целью работы являлась разработка технологических рекомендаций, обеспечивающих получение точных отверстий при высокопроизводительной обработке деталей из указанной стали. Установлен характер действия сил резания на систему СПИД. Проведен анализ влияния силовых возмущений на точность диаметрального размера отверстий. Установлено положительное влияние значительного количества тепла, образующегося при высокопроизводительных режимах. Высокая температура обуславливает разупрочнение металла, срезаемого в последний момент сверления сквозного отверстия. Определены функции основных технологических ограничений, позволившие оптимизировать режимы резания с помощью ЭВМ, увеличить производительность, повысить качество отверстий и снизить себестоимость изделий.

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. "Основными направлениями развития народного хозяйства СССР", принятыми XXV съездом КПСС, предусматривается значительное повышение качества выпускаемых машин и приборов. Повышение качества машин неразрывно связано с применением для их изготовления новых высокопрочных и надежных в эксплуатации материалов. К таким материалам относится высокопрочная ( $\sigma_B \geq 200 \text{ кг/мм}^2$ ) и твердая ( $\text{HRC} > 50$ ) сталь, подвергнутая термомеханической обработке (ТМО). Первые попытки использовать эту сталь для изготовления деталей, которые раньше изготавливались из закаленной конструкционной стали, показали значительное снижение производительности и катастрофический расход инструмента на всех операциях механической обработки. Особая острота положения возникла на операции обработки точных отверстий. Низкая производительность на операции, недопустимо большой расход сверл, зенкеров и разверток поставили под сомнение возможность эффективной обработки отверстий в деталях из стали после ТМО.

Анализ технической литературы показал, что на таких операциях в принципе возможно повышение надежности инструмента. Для этого нужно применять сверла повышенной жесткости; но практика показала, что использовать рекомендации выполненных раньше исследований невозможно. Слишком велико различие в физико-механических свойствах сталей, для которых имеются рекомендации, и стали после ТМО.

Отсутствуют научно-обоснованные рекомендации получения точных отверстий. В условиях обработки высокопрочной стали, когда трудоемкость зенкерования и развертывания еще большая, чем при сверлении, повышение точности отверстий после сверления является важным и эффективным способом повышения производительности на технологической операции в целом.

В связи с этим исследование и разработка технологических рекомендаций по оптимизации операции сверления являются актуальной задачей.

Цель работы. Разработать рекомендации, обеспечивающие получение заданной точности и высокопроизводительное сверление отверстий в деталях из стали, подвергнутой ТМО.

Научная новизна. Впервые проведено комплексное исследование процесса сверления точных сквозных отверстий в деталях из стали, подвергнутой ТМО. При исследовании влияния радиальных колебаний сверла на точность отверстий впервые инструмент рассматривался как колебательная система с двумя степенями свободы. В результате анализа вынужденных колебаний такой системы обоснована возможность получения в производственных условиях отверстий по одиннадцатому качеству СТ СЭВ 114-75. Выполнено аналитическое исследование виброустойчивости прямоканавочных сверл, позволившее выбрать оптимальные конструктивные параметры инструмента при сверлении точных отверстий. Впервые исследовано влияние на производительность обработки нестационарного теплового поля при сверлении листовых деталей из высокопрочной стали, что позволило вести обработку сквозных отверстий без уменьшения параметров режима.

Практическая ценность. В результате исследований установлена практическая возможность высокопроизводительного сверления точных отверстий в деталях из стали, подвергнутой ТМО. Разработаны конструкция инструмента, определены оптимальные режимы, обеспечивающие получение требуемой точности и производительности на технологических операциях сверления сквозных отверстий. Внедрение результатов работы на Курганском машиностроительном заводе им. Ленина позволило исключить зенкерование при обработке точных отверстий в листовых деталях, повысить производительность обработки в 1,5 раза.

Публикация. По результатам исследований опубликовано четыре работы в открытой печати.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка использованной литературы из 93 наименований, 5 приложений и содержит 130 страниц машинописного текста, 14 таблиц, 56 иллюстраций.

Состояние вопроса. Задачи исследования. Исследований точности при сверлении сквозных отверстий в высокопрочной стали, насколько нам известно, нет. Воспользоваться результатами исследований, выполненных раньше, невозможно из-за значительного различия в свойствах обрабатываемого материала. Анализ технической литературы показывает, что из-за отсутствия сведений о взаимном влиянии технологических факторов на точность результаты исследований в различных условиях экспериментов противоречивы. Исключение, либо внесение хотя бы одного нового фактора часто приводит к противоположным результатам.

Основными факторами, сдерживающими производительность на технологических операциях сверления высокопрочных сталей, являются вибрации и теплонпряженность. Стандартные сверла с твердосплавными пластинками, по мнению А.А.Виноградова, А.А.Резникова, А.Ш.Шифрина и других исследователей, имеют недостаточную виброустойчивость. Не получили широкого применения при сверлении отверстий диаметром 15-35 мм и сверла с монолитной твердосплавной режущей частью из-за их высокой стоимости.

Учитывая высокие механические характеристики стали после ТМО, следует ожидать значительных по величине сил резания. Имеющиеся сведения о характере изменения сил резания при сверлении сквозных отверстий в конструктивных сталях и о влиянии их на точность отверстий весьма ограничены.

Высокая теплонпряженность резания - это одна из особенностей механической обработки высокопрочных сталей. Общим для исследований, выполненных раньше, является то, что расчеты и измерения температуры проводились для условий установившегося процесса. В листовых деталях температурный режим при сверлении изменяется в течение всего времени, прошедшего от начала обработки. Это должно оказывать влияние на выбор оптимальных режимов. Из изложенного вытекает необходимость в проведении комплексных исследований технологической операции сверления сквозных отверстий в листовых деталях их стали, подвергнутой ТМО. С учетом анализа литературных данных, в соответствии с целью работы в диссертации решались следующие задачи.

1. Установление связи погрешности диаметра отверстия с технологическими факторами на операции сверления.
2. Исследование зависимости виброустойчивости от конструктивных элементов сверла и режимов резания.
3. Определение оптимальных режимов сверления, обеспечивающих заданную точность отверстий и производительность.

4. Проведение анализа эффективности разработанных рекомендаций и внедрение результатов работы в производство.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ работ показал, что проблема повышения точности отверстий на экспериментальном уровне не решается. В основу методики исследования точности отверстий при сверлении принята известная расчетно-экспериментальная методика, сущность которой состоит в том, что влияние технологических факторов на регистрируемый параметр точности определяется расчетом, а зависимость технологических факторов от исходных устанавливается экспериментально.

Измерение сил и стойкостные исследования проводились на вертикально-сверлильном станке 2А135. Коробку подач станка модернизировали для получения более низких значений подач. Диапазон подач на станке составлял от 0,037 мм/об до 0,47 мм/об. Для экспериментов применяли листовую сталь, подвергнутую ТМО, с твердостью НРС 46...54, толщина листа (0,75...1,5д). Сверла диаметром 15...35 мм оснащались твердосплавными пластинками марки ВК8. Износ режущих кромок контролировали по двум параметрам. Фаску износа на главных режущих кромках измеряли лупой Бринеля. Радиальный износ сверла измеряли на микроскопе УИМ-23. Зависимость радиальных сил резания от режимов и конструктивных параметров сверла исследовали модернизированным динамометром Ю.П.Холмогорцева, а осевой силы и крутящего момента - динамометром УДМ-1200. Максимальную температуру при сверлении сквозных отверстий измеряли искусственными термopарами "хромель-алюмель". Регистрировали силы и температуру осциллографом К115. Математическую обработку экспериментов проводили методом наименьших квадратов. При построении математической модели стойкостной зависимости существенные факторы определяли методом "случайного баланса". В работе использовали многофакторное планирование эксперимента. Обработку результатов и расчеты точности выполняли на ЭВМ.

#### УСТАНОВЛЕНИЕ СВЯЗИ ПОГРЕШНОСТИ ДИАМЕТРА ОТВЕРСТИЯ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ ПРИ СВЕРЛЕНИИ

В работе выяснены причины возникновения разбивания диаметра отверстий. На основе логических связей расчетом определена величина разбивания диаметра отверстия и ее рассеяние. Установлены оптимальные конструктивные параметры и элементы геометрии режущей части инструмента, для которых в условиях конкретной системы

СПИД величина разбивания диаметра отверстия может определяться заранее.

Производящий размер сверла зависит от фактического диаметра после изготовления сверла и убывания диаметра в результате переточек (размерного износа):

$$D = D_{\phi} - \Delta D \quad (1)$$

Фактический диаметр сверла при изготовлении зависит от величины допуска и схемы расположения поля допуска. Установлено, что изменение производящего размера сверла, исполнительный диаметр которого выполнен по ГОСТ 885-64 (точное исполнение), меньше допуска на диаметр отверстия по А<sub>4</sub> и Н11. Повышать точность исполнительных диаметров сверл нет необходимости. Однако схема расположения поля допуска на исполнительный диаметр сверла по ГОСТ 885-64 неблагоприятна для гарантированного получения заданной точности отверстий, в связи с незначительным разбиванием диаметра при сверлении отверстий в рассматриваемой стали.

Установлено, что при обработке отверстий по А<sub>4</sub> допуск и схему расположения поля допуска на исполнительные диаметры сверл нужно принимать такими, как для зенкеров № 2, выпускаемых заводами СССР. При изготовлении деталей с отверстиями по одиннадцатому качеству в соответствии с СТЭСВ 114-75 (допуск по одиннадцатому качеству для отверстий диаметром св. 10 до 50 мм на 0,01 мм меньше допуска по А<sub>4</sub>) допуск на исполнительные диаметры сверл рекомендуется назначить по ГОСТ 885-64, а схему расположения поля допуска принять такой, как для зенкеров № 2, выпускаемых заводами СССР. Только в этом случае гарантируется получение требуемой точности за весь срок службы инструмента.

Логрешность траектории движения зависит только от радиальных перемещений сверла, которые, в свою очередь, достаточно полно характеризуются двумя исходными технологическими факторами - избыточной и внешними радиальными силами.

Опыты показали, что скорость резания в диапазоне от 0,25 до 0,67 м/с на величину избыточной радиальной силы не влияет. Зависимость этой силы от подачи, осевого биения и диаметра сверла описывается выражением (12).

Внешняя радиальная сила (поперечная составляющая сила по А.Г. Косиловой):

$$P_n = P_{oc} \frac{tg \theta}{tg(90^\circ - \varphi)} \quad (2)$$

зависит от величины осевой составляющей силы резания  $P_{oc}$  и угла  $\theta$  наклона оси сверла к плоскости заготовки.

Экспериментальная зависимость осевой силы от режимов сверления имеет вид:

$$P_{oc} = 3935^{0,65} D^{0,97} V^{-0,12} \quad (3)$$

Угол наклона вершины сверла к плоскости заготовки определяли решением дифференциальных уравнений упругой линии сжато-изогнутой балки постоянного сечения \*).

Получено, что:

$$\theta = -\frac{R}{P_{oc}} \left\{ 1 + \frac{\sqrt{J_2}}{\cos(\ell_1 \sqrt{\frac{P_{oc}}{J_1 E}}) \cos(\ell_2 \sqrt{\frac{P_{oc}}{E J_2}}) [\sqrt{J_2} \operatorname{tg}(\ell_1 \sqrt{\frac{P_{oc}}{J_1 E}}) \operatorname{tg} \ell_2]} \right\},$$

где  $J_1, J_2$  - моменты инерции поперечного сечения ступенчатого прямоканавочного сверла.

Радиальные перемещения сверла от избыточной и внешней радиальных сил определяли последовательным решением дифференциальных уравнений движения колебательной системы с двумя степенями свободы (см. рис. 1). Это позволило учитывать не только статический, но и динамический характер нагружения системы силами резания.

При действии силы  $R$  можно записать:

$$\begin{cases} M\ddot{x}_1 + C_1 \dot{x}_1 + [k_1 + z \cos \alpha \cos(\beta - \alpha)] x_1 - z \sin \alpha \cos(\beta - \alpha) x_2 = R_0 \cos(\beta - \alpha); \\ M\ddot{x}_2 + C_2 \dot{x}_2 + [k_2 - z \sin \alpha \sin(\beta - \alpha)] x_2 + z \cos \alpha \sin(\beta - \alpha) x_1 = R_0 \sin(\beta - \alpha). \end{cases} \quad (5)$$

Частное решение системы дифференциальных уравнений находили в форме:

$$\begin{cases} x_1 = a = \text{const}, \\ x_2 = b = \text{const}. \end{cases} \quad (6)$$

Считали, что избыточная радиальная сила постоянна по величине и направлению в системе координат сверла. Установлено, что:

\* С. Д. Пономарев и другие. Расчеты на прочность в машиностроении. Т. 1-Ш. М., Машгиз, 1969.

$$a = \frac{\kappa_1 \kappa_2 \cos(\beta - \alpha)}{\kappa_1 \kappa_2 + z[\kappa_2 \cos(\beta - \alpha) \cos \alpha - \kappa_1 \sin \alpha \sin(\beta - \alpha)]} \quad (7)$$

$$b = \frac{\kappa_1 \kappa_2 \sin(\beta - \alpha)}{\kappa_1 \kappa_2 + z[\kappa_2 \cos(\beta - \alpha) \cos \alpha - \kappa_1 \sin \alpha \sin(\beta - \alpha)]}$$

Если принять во внимание, что разбивание диаметра сверла происходит только при смещении в направлении оси  $Y$  (см. рис. 1), т.е.

$$y = x_1 \cos \alpha - x_2 \sin \alpha \quad (8)$$

то:

$$y = \frac{R[d \cos \alpha \cos(\beta - \alpha) - \sin \alpha \sin(\beta - \alpha)]}{\kappa_2 + z[d \cos \alpha \cos(\beta - \alpha) - \sin \alpha \sin(\beta - \alpha)]} \quad (9)$$

где  $z$  - коэффициент, характеризующий степень воздействия процесса резания на колебательную систему (коэффициент режимов резания).

Коэффициент режимов резания  $z$  определяется отношением приращения силы, действующей в плоскости, перпендикулярной оси вращения сверла, к величине деформации в направлении действия этой силы:

$$z = \frac{dR}{y} \quad (10)$$

При смещении сверла в направлении  $Y$  (см. рис. 1) из параметров режима изменяется доля подачи, приходящаяся на режущую кромку  $S$  и глубину  $t$  резания:

$$dS = y \operatorname{ctg} \varphi; \quad dt = y,$$

где  $\varphi$  - угол при вершине сверла.

С точностью до малых второго порядка приращение силы вычисляется по формуле:

$$dR = \left( \frac{\partial R}{\partial S} \operatorname{ctg} \varphi + \frac{dR}{dt} \right) y \quad (11)$$

Зависимость радиальной силы  $R$  от режимов сверления определена экспериментально:

$$R = 2,73 \left( \frac{f}{s} \right)^{0,64} D^{0,48} \quad (12)$$

где  $f$  - осевое биение режущих кромок сверла.  
Тогда:

$$z = 2,73 \left(\frac{f}{S}\right)^{0,64} D^{0,48} \left(-\frac{0,64}{S} ctg \varphi + 0,96 D^{-1}\right). \quad (13)$$

Видно, что воздействие процесса резания на колебательную систему сверла является фактором, уменьшающим радиальные перемещения.

Действие внешней радиальной силы на колебательную систему прямоканавочного сверла таково, что уравнение траектории конца режущей кромки имеет вид:

$$\left[\frac{d}{2} \cos \alpha (x-D) - \frac{d}{2} \sin (\gamma-B)\right]^2 + \left[\frac{d}{2} \sin \alpha (x-A) + \frac{d}{2} \cos \alpha \times (y-C)\right]^2 = [(x-a)(x-D) + (y-C)(y+B)]^2. \quad (14)$$

Можно утверждать, что внешняя радиальная сила изменяет диаметр отверстия. Но расчеты показывают, что для инструмента высокой жесткости величина разбивания диаметра отверстия мала. Внешняя радиальная сила уводит ось отверстия относительно оси вращения шпинделя станка. Максимальная величина увода определяется из формулы:

$$m = \sqrt{(A \cos \alpha - C \sin \alpha)^2 + (B \cos \alpha - D \sin \alpha)^2}, \quad (15)$$

где  $A; B; C; D$  - амплитуды колебаний сверла вдоль осей  $X_1$  и  $X_2$  (см. рис. 1).

Описанный выше подход к определению радиальных перемещений сверла позволил установить качественную и количественную характеристику действия сил в плоскости заготовки. Установленные зависимости погрешности траектории движения от режимов резания и геометрических параметров сверл позволяют разработать практические рекомендации при сверлении точных отверстий.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЯМОКАНАВОЧНЫХ СВЕРЛ ПРИ СВЕРЛЕНИИ СТАЛИ, ПОДВЕРГНУТОЙ ТМО

Спиральные сверла, с успехом применявшиеся при обработке отверстий в деталях из закаленной стали, при сверлении этих же деталей из стали, подвергнутой ТМО, выкрашивались и ломались на первом, либо втором отверстии из-за вибраций.

Производственный опыт и анализ технической литературы позволяют предположить, что для сверления неглубоких отверстий можно применить прямоканавочные сверла, но сведений о их виброустойчивости при сверлении высокопрочной стали, насколько нам известно, нет.

В работе установлено, что у прямоканавочных сверл связь между осевыми и крутильными деформациями практически отсутствует. Они устойчивы к синфазным крутильно-осевым колебаниям. При исследовании устойчивости к радиальным колебаниям сверло представили колебательной системой с двумя степенями свободы (рис.1). Виброустойчивость системы с двумя степенями свободы зависит от ориентации  $\alpha$  и настройки  $d$  \*).

Сверло, имеющее прямые стружкоотводящие канавки, в отличие от спирального, настройку и ориентацию в процессе эксплуатации не изменяет, причем:

$$d = \frac{K_2}{K_1}, \quad (16)$$

где  $K_1, K_2$  - жесткости сверла вдоль главных осей инерции.

Для повышения жесткости инструмента его направляющую часть изготавливали большего диаметра.

Длину рабочей части считали достаточной, если при сверлении незатупленным и полностью изношенным до последней переточки сверлом не наблюдалось увеличения крутящего момента от пакетирования стружки в канавках.

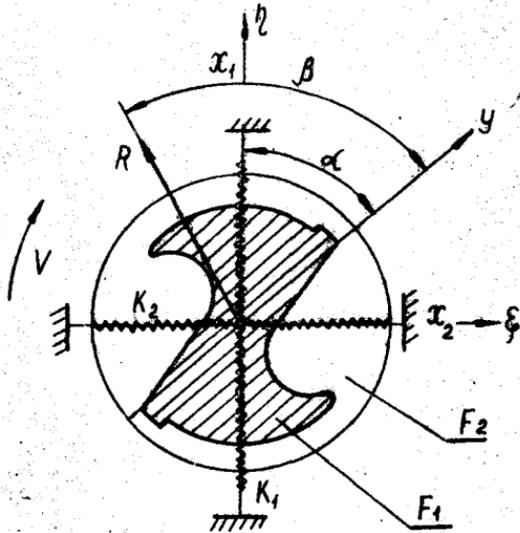


Рис.1. Колебательная система прямоканавочного сверла

\* ) И. Глушый. Автоколебания в металлорежущих станках. М., Машгиз, 1956.

Для расчета длины рабочей части сверла при обработке сквозных отверстий в листовых деталях получена формула:

$$l_1 = 2,2(b + H), \quad (17)$$

где  $b$  - высота твердосплавной пластинки ;  
 $H$  - толщина листовой детали.

Выражение (1) для настройки  $d$  системы, которой представлено ступенчатое прямоканавочное сверло, имеет вид:

$$d = \frac{n + f(e)}{\rho n + f(e)}, \quad (18)$$

где:

$$e = \frac{l_2}{l_1}; \quad f(e) = e(3 + 3e + e^2); \quad n = \frac{B_y^{(2)}}{B_y^{(1)}};$$

$$\rho = \frac{B_x^{(1)}}{B_x^{(2)}};$$

$l_2$  - длина направляющей части ;  
 $B_x^{(1)}; B_y^{(1)}$  - изгибные жесткости сверла на рабочем участке;  
 $B_x^{(2)}; B_y^{(2)}$  - изгибные жесткости на направляющем участке сверла.

Так как величина  $d < 1$ , то условие устойчивости системы будет следующим:

$$\frac{\kappa_1}{2} \geq \frac{1}{d-1} \left( 1 - \sin \beta \frac{1 + \sqrt{d}}{\sqrt{d}} \right). \quad (19)$$

Из неравенства видно, что на устойчивость прямоканавочных сверл к радиальным колебаниям влияет не абсолютное значение длины и диаметра сверла, а соотношение этих параметров на направляющей и рабочей части инструмента.

Таким образом, установлена зависимость устойчивости прямоканавочных сверл к радиальным колебаниям от соотношения величин основных конструктивных элементов. При оптимизации режимов сверления условие виброустойчивости используется для определения предельной допустимой подачи.

#### ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СВЕРЛЕНИЯ

На операции обработки сквозных отверстий при сверлении на обычных режимах заметно проявляются общеизвестные отказы. Они состоят в том, что при выходе сверла из детали образуется участок

металла, не полностью отделившегося от основной массы детали, который срезается за последние несколько оборотов сверла. Чтобы избежать поломок инструмента, обычно прибегают к уменьшению подачи (а иногда скорости резания). Рассмотрение технологических особенностей сверления листовой заготовки привело к рабочей гипотезе о возможности ликвидации поломок инструмента путем разупрочнения образующегося перед сверлом участка материала детали тепловым потоком требуемого уровня. Возможность создания такого теплового потока усматривалась в усилении термодинамического нагружения процесса путем увеличения режимов. Выполненный анализ показал следующее.

Интенсивность тепловыделения на режущих кромках инструмента в единицу времени можно определить по формуле А.Н.Резникова:

$$q_{(z)} = 0,039 V \rho_z', \quad (20)$$

где  $V$  - скорость резания;  
 $\rho_z'$  - удельная тангенциальная сила резания.

Значение удельных сил резания на участках главной и поперечной кромок определяли экспериментально.

Для расчета интенсивности тепловыделения на режущих кромках введена безразмерная функция

$$f(\psi) = \frac{R}{M} \psi \rho_z', \quad (21)$$

где  $R$  - радиус сверла;  $M$  - крутящий момент;

$\psi = \frac{z}{R}$ ;  $z$  - расстояние от оси сверла до точки на режущей кромке, в которой определяется интенсивность тепловыделения.

Тогда интенсивность тепловыделения в точке на режущей кромке сверла можно рассчитать по формуле:

$$q_{(z)} = q_0 f(\psi), \quad (22)$$

где  $q_0 = 0,0147 \frac{Дж}{мм^2 \cdot с}$  - средняя интенсивность тепловыделения.

Результаты исследований показывают, что при сверлении стали, подвергнутой ТМО, тепловыделение на поперечной кромке меньше средней интенсивности тепловыделения. Оно увеличивается при уменьшении скорости резания, так как с уменьшением скорости резания удельные силы на поперечной кромке возрастают. Опты по-

казывают, что при скорости резания меньше 0,159 м/с сверление высокопрочной стали невозможно. Поперечная режущая кромка сверла выламывается. На главных режущих кромках интенсивность тепловыделения также зависит от скорости резания. Для скорости резания, меньшей 0,28 м/с, функция  $f(\psi)$  убывающая. Интенсивность тепловыделения в точках главных режущих кромок увеличивается при приближении к поперечной кромке. Максимального значения она достигает на участках сопряжения поперечной и главных режущих кромок сверла. Здесь наблюдаются наибольшие удельные тангенциальные силы резания.

Увеличение скорости резания изменяет характер распределения интенсивности тепловыделения на режущих кромках сверла. На участках кромок, расположенных ближе к вершине, условия резания облегчаются, и интенсивность тепловыделения падает. При скорости резания свыше 0,28 м/с наибольшее тепловыделение наблюдается на периферийных участках главных кромок сверла.

Исследованиями установлено, что при сверлении высокопрочной стали зависимость интенсивности тепловыделения имеет вид: для поперечной кромки

$$q_n(\psi) = q_0 0,08 e^{-0,013V} \cdot (e^{12,25\psi} - 1), \quad (23)$$

для главной режущей кромки

$$q_2(\psi) = q_0 0,85 e^{0,175(\psi - 0,587)(V - 16,7)}$$

При изменении подачи и диаметра сверла характер интенсивности тепловыделения на режущих кромках не изменяется.

Для расчета температурных полей в изделии при сверлении сквозных отверстий использовали метод источников тепла. По Г.С. Карслоу, температура в любой точке обрабатываемого материала при действии единичного точечного источника теплоты определяется выражением:

$$T = \frac{q}{\rho c (4\pi x)^{3/2} (t-\tau)^{3/2}} \exp\left[-\frac{L^2}{4x(t-\tau)}\right] x$$

$$R \sum_{z=-\infty}^{+\infty} \left\{ \exp\left[-\frac{(2ml+z'-z)^2}{4x(t-\tau)}\right] + \exp\left[-\frac{(2ml-z'-z)^2}{4x(t-\tau)}\right] \right\},$$

- где  $\rho$  - плотность;  
 $c$  - теплоемкость;  
 $\alpha$  - температуропроводность обрабатываемого материала;  
 $q$  - интенсивность источника тепла;  
 $t$  - момент времени действия источника;  
 $t$  - момент времени, в который определяется температура;  
 $e$  - толщина пластины (детали).

При известной интенсивности тепловыделения температура в любой точке обрабатываемого материала от действия линейного источника тепла может определяться выражением:

$$T = \frac{q_0}{8\pi\lambda} \int_0^t \frac{dx}{x^{3/2}} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^4 \frac{\alpha(k_j) e^{-C_{ijklm}(x)}}{\sqrt{1+ctg^2(\varphi(j))}} \times \left\{ \left[ erf(a_j(x)D_2(j)) - \theta_{ijklm}(x) \right] - erf[a_j(x)D_1(j) - \theta_{ijklm}(x)] \right\}, \quad (25)$$

- где  $\lambda$  - теплопроводность материала;  
 $\varphi$  - угол при вершине сверла;  
 $a, c$  - величины, характеризующие интенсивность тепловыделения;  
 $a, \theta, D_1, D_2$  - величины, характеризующие положение режущих кромок сверла в материале детали.

Распределение температуры вдоль режущих кромок сверла рассчитывали в середине срезаемого слоя металла, т.е. на расстоянии  $0,25 S$  от режущей кромки. На рис.2 кривыми 1 представлено распределение температуры в период окончания врезания режущих кромок в материал заготовки.

Наибольшие температуры имеют место под точками режущих кромок с наибольшей интенсивностью тепловыделения, у концов поперечной кромки. По мере углубления сверла температура изделия вдоль режущих кромок выравнивается.

Кривыми 2 представлены температуры в момент нахождения режущей части сверла в середине листовой детали. Тепловые потоки, направленные от наиболее нагретых участков режущих кромок, несколько выравнивают температурное поле. Максимальная температура в этот период наблюдается под поперечной кромкой, поскольку этот участок подвергается одновременному воздействию двух тепловых потоков с обеих полукромки режущей части сверла.

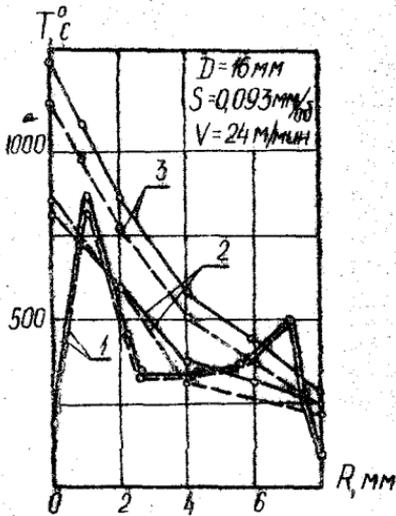


Рис.2. Распределение температуры вдоль режущих кромок сверла.

--- толщина пластины 21 мм;  
— толщина пластины 9 мм.  
Сверло находится: 1 - в начале сверления; 2 - в середине заготовки; 3 - в конце сверления.

деталей в производственных условиях подтвердила возможность сверления сквозного отверстия на высокопроизводительных режимах.

### ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ СВЕРЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ, ПОДВЕРГНУТОЙ ТМО

Оптимизация режимов проводилась по удельной стоимости съема металла при заданной производительности. Для расчета режимов на ЭВМ разработана программа, по которой методом сканирования определяются такие сочетания подачи и частоты вращения шпинделя из имеющихся на станке, при которых удельная стоимость будет наименьшей из всей области допустимых режимов. В работе определены функции основных ограничений на область режимов сверления.

В работе установлено, что техническое ограничение по точности

На рис.2 кривыми 3 показано распределение температуры в обрабатываемом материале в период сверления сквозного отверстия, когда режущие кромки сверла находятся у выходного торца детали.

Высказанная выше гипотеза подтвердилась тем, что температуры рассматриваемого участка металла при высокопроизводительных режимах, как показали измерения, составляют 700–1000°C. Исследования показали, что именно в этом интервале температур имеет место значительное уменьшение твердости обрабатываемого материала.

Установлено, что это приводит к изменению характера нагружения сверла в последний момент сверления.

Отсутствие колебаний сил резания позволяет режимы не уменьшать, а увеличивать до тех пор, пока температура не достигнет температуры плавления припоя. Обработка

имеет вид:

$$S_{min} \leq S \leq S_{max} \quad (26)$$

Предельные допустимые значения подачи  $S_{min}$  и  $S_{max}$  определяются из формулы (9) при известных величинах радиальной силы, коэффициента режимов резания и верхнего и нижнего пределов допустимой погрешности траектории движения инструмента.

Для прямоканавочных сверл положение границы допустимых значений подачи по виброустойчивости зависит от диаметра рабочей части, осевого биения режущих кромок, длины и диаметра направления. Предельное значение подачи при действии ограничения по виброустойчивости определяется решением уравнения границы виброустойчивости. Уравнение границы получено из неравенства (19), в котором значение коэффициента режимов резания содержит параметры оптимизации. Область допустимых значений подачи находится выше линии границы виброустойчивости.

Тепловые расчеты, подтвержденные экспериментом, позволили назначить функцию технического ограничения по теплонапряженности:

$$S^{0,65} V^{0,26} \leq T_{пл} 7215D^{0,49}, \quad (27)$$

где  $T_{пл}$  - температура плавления материала припоя.

Таким образом, можно считать установленной практическую возможность эффективной обработки точных отверстий в деталях из стали, подвергнутой ТМО. Разработанная конструкция инструмента, рекомендации по выбору оптимальных режимов обеспечивают получение требуемой точности и производительности на технологической операции обработки сквозных отверстий. Внедрение результатов исследований позволило исключить зенкерование, повысить производительность при сверлении в 1,5 раза и уменьшить расход инструмента. Расчеты показали, что экономический эффект от внедрения результатов работы составил 214 рублей на каждые 100 деталей.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

1. Установлено, что при сверлении деталей из высокопрочной стали, подвергнутой ТМО, поломки инструмента, с успехом применявшегося для обработки отверстий в деталях из закаленных сталей, вызваны вибрациями. Выполненные исследования зависимости виброустойчивости прямоканавочных сверл от конструктивных элементов

показали, что их устойчивость к радиальным колебаниям изменяется не только от длины и диаметра, но и от соотношения этих параметров на рабочей и направляющей части инструмента.

2. В работе установлена практическая возможность стабильного получения заданной точности на технологических операциях сверления деталей из стали, подвергнутой ТМО.

3. При исследовании влияния радиальных колебаний на точность отверстий показано, что инструмент должен рассматриваться как колебательная система с двумя степенями свободы, что позволяет с большей достоверностью определить конструктивные элементы и режимы, обеспечивающие заданную точность.

4. Исследованиями установлено, что характер погрешности траектории движения от действия радиальных сил неодинаков. Избыточная радиальная сила резания разбивает диаметр отверстия. Внешняя радиальная сила и разбивает диаметр отверстия, и приводит к уводу его оси.

5. В работе показано, что исполнительные размеры диаметров сверл св. 18 до 50 мм должны выполняться по ГОСТ 825-64, а схема расположения поля допуска на исполнительный размер диаметра приниматься такой, как для зенкеров № 2, выпускаемых заводами СССР, только при этом точность отверстий по одиннадцатому качеству достигается за весь период стойкости инструмента.

6. Установлено, что наибольшая температура при сверлении сквозных отверстий наблюдается под поперечной кромкой. При одинаковом характере распределения температуры в обрабатываемом материале вдоль режущих кромок, сверление листовых деталей происходит при более высоком уровне температур из-за особых условий теплоотвода.

7. В результате исследований установлено, что наибольшая температура, наблюдаемая в обрабатываемом материале в момент выхода режущих кромок при сверлении листовых заготовок, разупрочняет материал детали у ее выходного торца, чем обеспечивается сверление сквозных отверстий без уменьшения режимов.

8. Производственные испытания и внедрение рекомендаций, полученных при исследовании, позволяют сделать вывод о возможности эффективной обработки отверстий в деталях из стали после ТМО.

Внедрение результатов исследования позволило получить экономический эффект в размере 214 рублей на каждые 100 деталей.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Черемисов А.В. Сверление отверстий в высокопрочной стали. В сб. "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки", № 178, ЧПИ, 1976.

2. Маргулис Д.К., Черемисов А.В. Оптимальная геометрия режущей части сверл для обработки высокопрочных сталей. В сб. "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки", № 211, ЧПИ, 1978.

3. Черемисов А.В. Влияние несимметричного расположения твердосплавной пластинки на стойкость сверл. В сб. "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки", № 211, ЧПИ, 1978.

4. Черемисов А.В. Эффективность применения прямоканавочных сверл при обработке высокопрочных сталей. В сб. "Повышение эффективности работы и качества продукции в инструментальном производстве", Пермь, обл.НТО Машпром, 1976.