

05.03.01
П 889

На правах рукописи

Пургин Валерий Павлович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕРЛЕНИЯ
МАЛОРАЗМЕРНЫХ НЕПОЛНОПРОФИЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ
НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Специальность 05.03.01 — «Технологии и оборудование
механической и физико-технической обработки»**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Диссертация выполнена на кафедре «Технология машиностроения, станки и инструмент» филиала Южно-Уральского государственного университета в г.Златоусте.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Лакирев Сергей Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Шаламов Виктор Георгиевич;
кандидат технических наук,
Истомин Виктор Михайлович

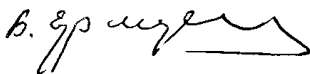
Ведущее предприятие – ФГУП «Производственное объединение
Златоустовский машиностроительный завод»

Защита состоится « 10 » апреля 2003 г. в 13-00 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.298.06 в Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан « 9 » марта 2003 г.

Ученый секретарь диссертационного
Совета, доктор технических наук,
профессор

 В.В.Ерофеев

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В условиях усиливающейся конкуренции продукции, выпускаемой предприятиями России, с импортной, необходимо расширять и постоянно обновлять номенклатуру изделий, повышать качество продукции и снижать затраты на ее изготовление. При этом особое внимание следует уделять операциям обработки, осуществление которых требует больших затрат времени, режущего инструмента, специальных приспособлений, а порой и необходимости применения ручного труда. В машиностроении одной из таких операций является операция сверления наклонных, вскрытых и пересекающихся отверстий, имеющих на всей длине или ее части неполный (незамкнутый) профиль боковой поверхности, то есть являющихся неполнопрофильными отверстиями (НПО).

Примерами изделий с НПО являются детали крепежной и трубопроводной арматуры с контрольными отверстиями, плашки со вскрытыми, форсунки с пересекающимися отверстиями. Замена таких отверстий на полнопрофильные не всегда возможна в связи с их функциональным назначением или экономически не целесообразна.

Обработка НПО осуществляется, как правило, сверлением, а электроэрозионные, электрохимические, ультразвуковые и лучевые методы, в связи с рядом их недостатков, применяются ограниченно. Сверление таких отверстий, особенно малоразмерных, затруднительно. Это связано с низкой жесткостью и прочностью спиральных сверл малого диаметра, а также с тем, что при сверлении малоразмерных НПО происходят явления, влияющие на стойкость инструмента, производительность и точность обработки.

Проведенные статистические исследования показали, что при сверлении НПО производительность процесса снижается в 1,5...2 раза, а поломки сверл возрастают в 2...2,5 раза, по сравнению с полнопрофильными отверстиями, процесс производится обычно на «ручной подаче».

Используемые в настоящее время при сверлении малоразмерных НПО приемы обработки, технологическая оснастка, оборудование малоэффективны.



При этом

- не раскрыты явления, приводящие к поломке сверл, на участках отверстий обрабатываемых только частью режущих кромок инструмента, происходящих даже при малых подачах;
- не установлены закономерности взаимодействий элементов технологической системы при сверлении НПО малого диаметра, влияние на них структуры и параметров технологической системы, условий обработки;
- отсутствуют методики расчета величины нагружения и деформаций инструмента при обработке НПО.

Вышеперечисленные проблемы затрудняют создание высокоэффективных процессов и технологических систем, а их решение является актуальным.

Цель работы. Совершенствование процессов сверления НПО малого диаметра на основе управления нагружением и деформацией спиральных сверл и создание эффективных технологических систем операций сверления.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать систему математических моделей, адекватно отображающих нагружение инструмента и его крутильно-продольные и изгибные деформации при сверлении малоразмерных НПО.
2. Экспериментально проверить основные закономерности процесса сверления НПО.
3. Разработать методику инженерного расчета конструктивно-технологических параметров процесса сверления НПО и рекомендации по его совершенствованию.
4. Создать комплекс технологического оснащения операций сверления НПО и внедрить результаты исследований в производство и учебный процесс.

Научная новизна работы. 1. Разработан комплекс статико-динамических математических моделей процесса сверления НПО, учитывающий влияние конструктивно-технологических параметров технологической системы на его силовые и точностные характеристики.

2. Установлено, что циклическое нагружение сверла вызывает его крутильно-продольные деформации, представляющие совокупность статических деформаций и деформаций от вынужденных, параметрических и автоколебаний.

3. Установлено, что направление осевой составляющей силы резания может изменяться на противоположное.

4. Выявлено, что изгибные деформации сверла, направляемого по кондукторной втулке, дополнительно нагружают инструмент крутящим моментом и осевой силой.

5. Определено, что применение кондукторных втулок, прилегающих к детали, дополнительно нагружает инструмент осевой силой и крутящим моментом от сил трения стружки, отводимой по канавкам сверла.

Практическая ценность работы. 1. Разработана методика проверочного расчета величины нагружения и деформаций спиральных сверл при обработке НПО малого диаметра.

2. С учетом особенностей процесса сверления НПО разработаны рекомендации по управлению величиной нагружения и деформаций инструмента путем рационального сочетания структуры, параметров технологической системы и условий обработки.

3. Разработано 10 способов и 19 устройств, защищенных авторскими свидетельствами, позволяющие повысить производительность и точность обработки НПС, снизить поломки инструмента.

4. Разработанная методика проверочного расчета, рекомендации по управлению величиной нагружения и деформаций инструмента 3 способа и 7 устройств внедрены на четырех предприятиях и в учебный процесс подготовки инженеров специальности 120100 и 210200.

На защиту выносятся: 1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса сверления НПО малого диаметра, определяющие закономерности изменения нагрузок и деформаций инструмента, погрешностей расположения отверстий, влияние на них условий обработки, структуры и параметров технологической системы.

2. Методика проверочного расчета величины нагружения и деформаций спиральных сверл при обработке НПО малого диаметра с рекомендациями по управлению этими параметрами.

3. Новые способы обработки НПО, отвода стружки из зоны резания, контроля инструмента, а также комплекс оригинальных устройств для оснащения операций сверления НПО.

Реализация результатов работы. По результатам теоретических и экспериментальных исследований предложены новые способы обработки, удаления стружки из зоны резания и технологическое оснащение операций сверления НПО, методика проверочного расчета нагружения и деформаций спиральных сверл при обработке НПО, рекомендации по управлению этими параметрами, испытанные в производственных условиях и внедренные на Златоустовском машиностроительном заводе им. В.И.Ленина, ФГУП «Производственное объединение Златоустовский машиностроительный завод», ФГУП «Усть-Катавский вагоностроительный завод», ОАО «Ашасвет».

Внедрение обеспечило:

- снижение поломок сверл в среднем в 1,7 раза;
- повышение производительности процессов в 1,6...1,9 раза;
- повышение точности расположения отверстий на 20...35%;
- снижение потерь от брака в 1,6...2,1 раза.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на республиканском совещании «Механизация и автоматизация ручных и трудоемких работ в машиностроении» (г.Ижевск, 1981 г.), на региональной научно-практической конференции «Автоматизированное проектирование и машинное моделирование технологических процессов в машиностроении» (г.Свердловск, 1987 г.), на региональной научно-технической конференции «Вопросы геометрического моделирования в САПР» (г. Свердловск, 1987 г.), на Всесоюзном научно-техническом семинаре «Комплексная автоматизация проектирования конструкторских работ машиностроении» (г.Ленинград, 1988 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции «Итоги, проблемы и перспективы комплексно-автоматизированных производств в машиностроении и приборостроении» (г.Горький, 1990 г.), на научно-технических конференциях ЗФ ЮУрГУ (в 1986-2001 г.; на объединенном заседании кафедр ЗФ ЮУрГУ технологического профиля в 2002 г.).

Публикации по теме диссертационной работы. Опубликовано 36 работ, в том числе 24 авторских свидетельства.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов основного текста, общих выводов, списка литературы и приложения.

Объем работы. 184 страницы основного текста, в том числе 68 рисунков, 15 таблиц. В списке использованной литературы содержится 155 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Состояние вопроса

Проблемы обработки сложновыполнимых отверстий, к которым относятся НПО, и вопросы точности их изготовления рассматривались в работах Горанского Г.К., Митрофанова С.П., Корчака С.Н., Подураева В.Н., Матвеева В.В., Мещерякова Р.К., Мирнова И.Я., Лакирева С.Г., Тверского М.М., Чиненова С.Г., Шаламова В.Г., Цветкова В.Д. и ряда других исследователей. Анализ выполненных исследований показал, что при сверлении НПО используются различные методы обработки и технологические средства, направленные на снижение неуравновешенного поперечного нагружения инструмента и его изгибных деформаций. Для этого:

- изменяют форму поверхности детали в зоне неполнопрофильного участка отверстия либо путем: предварительной обработки (фрезерование, засверливание...), либо путем установки технологических элементов (накладки, вставки...), предварительной сборки или группировки деталей;
- применяют силовое или кинематическое уравнивание инструмента, при этом воздействуют нагрузателем на ненагруженные режущие кромки сверла или изменяют параметры срезаемого слоя поперечным перемещением (разворотом) режущей части инструмента относительно детали;
- используют устройства для направления инструмента (кондукторные втулки, призмы...), спиральные сверла повышенной жесткости.

Данные технологические решения или усложняют процесс обработки, или неприемлемы для малоразмерных сверл.

Существующие математические модели процесса сверления отверстий отображают, в основном, закономерности обработки в деталях с входом-выходом, перпендикулярным оси вращения инструмента. Теоретические исследования процесса сверления деталей с другим расположением поверхностей проводились ограниченно, и до настоящего времени не создано комплекса статико-динамических моделей процесса сверления НПО малого диаметра.

Сложность выполнения процессов сверления НПО малого диаметра приводит к увеличению трудоемкости и себестоимости этих операций, частым поломкам сверл. Обработка таких отверстий производится на «ручной подаче» малой величины.

Проведенные статистические исследования показали, что трудоемкость обработки таких НПО как контрольные в 1,5...2,0, а поломки сверл в 2...2,5 раза больше, чем при обработке полнопрофильных отверстий, причем при уменьшении диаметра НПО и обрабатываемости материала трудоемкость обработки и поломки сверл возрастают в среднем в 1,25 раза интенсивнее, чем у полнопрофильных. При этом поломки сверл были вызваны крутильными деформациями, о чем свидетельствует характерная винтовая форма излома их спиральной части. Итак, частые поломки инструмента являются основной проблемой процесса сверления НПО малого диаметра, решение которой позволит повысить эффективность этой операции.

2. Математическое моделирование взаимодействия элементов технологической системы в процессе сверления неполнопрофильных отверстий

Разрушение инструмента от крутильных деформаций при сверлении НПО малого диаметра, когда формирование поверхности отверстия производится только частью режущих кромок сверла, даже при малых подачах, свидетельствует о том, что при обработке происходят явления, влияние которых до сих пор не учитывалось.

Проведенный анализ процесса позволил выявить ряд его особенностей.

Обработка неполнопрофильных участков отверстий производится только частью режущих кромок сверла, длина которых циклически изменяется. При этом изменяется и величина всех составляющих силы резания и крутящий момент, а соответственно и величина деформаций элементов технологической системы. Деформациям с максимальной амплитудой колебаний подвержено наиболее слабое звено технологической системы — спиральное сверло, имеющее при малых диаметрах не только низкие жесткость и прочность, но и частоты собственных колебаний, близкие к частоте возмущающих нагрузок.

Значительное влияние на взаимодействие элементов технологической системы также оказывает неуравновешенное нагружение инструмента радиальной и тангенциальной составляющими силы резания, изменяющие взаимодействие сверла не только с обрабатываемой деталью, но и с направляющей кондукторной втулкой. Изгибаясь, сверло прижимается к направляющей поверхности втулки и дополнительно нагружается крутящим моментом от сил трения.

Для снижения погрешности расположения НПО кондукторные втулки, длина которых составляет 5...8 диаметров сверла, располагают на минимальном расстоянии от обрабатываемой поверхности, а отвод стружки осуществляют через втулку. При этом сверло дополнительно нагружается крутящим моментом от сил трения стружки, пропорциональным глубине отверстия.

Как видно из вышесказанного, поломки сверл могут происходить при повышенном нагружении инструмента силами резания и трения или увеличением амплитуды его деформационных колебаний, свыше предельно допустимых, при динамическом нагружении технологической системы.

Так как поперечные перемещения инструмента относительно малы и ограничены кондукторной втулкой или обработанной частью отверстия, а крутильно-продольные деформации малоразмерных спиральных сверл значительно превышают деформации других элементов технологической системы, то для определения основных закономерностей процесса сверления НПО малого диаметра достаточно рассмотреть влияние возмущающих нагрузок только на кру-

тильные и продольные деформации спиральных сверл, приняв остальную часть технологической системы абсолютно жесткой (рис.1).

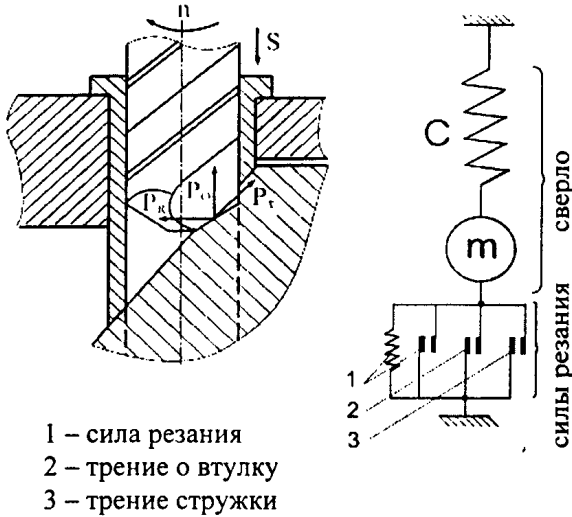


Рис.1. Схема процесса сверления и физическая модель упрощенной технологической системы

Установлено, что крутильно-продольные деформации спирального сверла в процессе обработки отображаются обобщенной математической моделью:

$$\begin{cases} K_{1K}\ddot{\theta} + K_{2K}\theta - K_{3K}X = K_{4K}b_{(\psi(t))}(a + \Delta a_{(t,\tau)})K_{5K} + C_M \\ K_{1П}\ddot{X} + K_{2П}X - K_{3П}\theta = K_{4П}b_{(\psi(t))}(a + \Delta a_{(t,\tau)})K_{5П} + C_P \end{cases} \quad (1)$$

где K_1, K_2, K_3 — коэффициенты, учитывающие инерционность, жесткость и перекрестную жесткость сверла, при крутильных и продольных колебаниях; $b, a, \Delta a$ — ширина, толщина и отклонение от толщины срезаемого слоя; K_4 — коэффициент, учитывающий влияние параметров срезаемого слоя на величину нагружения сверла от сил резания; K_5 — коэффициент, учитывающий изменение нагрузки при трении сверла и втулки; C — дополнительное нагружение инструмента от трения стружки.

Каждое из уравнений системы (1) в зависимости от значений коэффициентов K_1, \dots, K_5 и параметров $b, \Delta a$ может отображать различные виды деформаций сверла, приведенные в табл.1.

То есть уравнение (1) в зависимости от параметров технологической системы и условий обработки описывает статические деформации и свободные колебания сверла при его постоянном нагружении или вынужденные, параметрические и автоколебания — при динамическом нагружении инструмента.

Таблица 1

Виды деформаций технологической системы

Вид Деформаций	Коэффициенты и параметры				Уравнения деформаций
	K_1	K_2, K_3	b	Δa	
Статические деформации	0	const	const	0	$KX = P$
Свободные колебания	1		var		$\ddot{X} + KX = P$
Вынужденные колебания		const	$\ddot{X} + KX = P(t)$		
Параметрические Колебания		var	const	$\ddot{X} + K(t)X = P$	
Автоколебания		const		$\Delta a \neq 0$	$\ddot{X} + KX = P(x)$

Установлено, что при вынужденных колебаниях, происходящих при циклическом изменении ширины срезаемого слоя, амплитуда колебаний сверла зависит от соотношения частот возмущающих и собственных колебаний инструмента. В случае кратности частот происходит резонансное увеличение амплитуды колебаний, и деформации сверла могут превысить допустимые.

Из модели следует, что параметрические колебания, происходящие при периодических изменениях параметров системы, например жесткости сверла, могут при определенных сочетаниях частот возмущающих нагрузок и изменений параметра привести к потере устойчивости системы, при которой деформации сверла будут неограниченно возрастать.

Выявлено, что при автоколебаниях крутильно-продольные деформации сверла вызывают отклонения толщины срезаемого слоя, отображающиеся волнистостью поверхности резания. При четном числе полуволн на дуге, равной угловому шагу режущих кромок инструмента, система устойчива к автоколебаниям, при нечетном — автоколебания нарастают с максимальной скоростью.

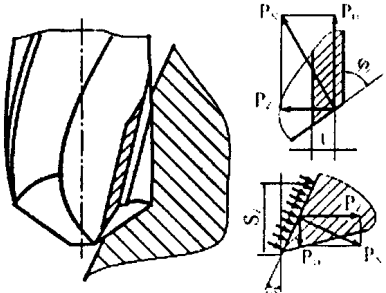
Обобщенная математическая модель отображает только общие закономерности поведения колебательной системы. Более полное представление о закономерностях процесса сверления НПО, влияние на него структуры и параметров технологической системы, условий обработки, дает комплексная математи-

ческая модель, в которой входящие в правую часть уравнений системы (1) возмущающие нагрузки представлены комплексом математических моделей, отображающих виды нагружения сверла.

– Нагружение сверла от сил резания определяется исходя из параметров срезаемого слоя. На участках отверстия, обработка которых при малой глубине резания производится только периферийной частью инструмента, расчет нагрузок производится по скорректированной подаче, так как на этих участках осевое нагружение сверла снижается вплоть до отрицательных значений, при которых подача кратковременно возрастает до S'_z (см.табл.2).

Таблица 2

Взаимодействие периферийной части сверла и детали

Схема процесса	Параметры среза
	$P_0 + P'_0 \leq 0, \text{ при}$ $t \leq \frac{2S \sin \varphi}{1,48 \sqrt{\sin \varphi_c \cos \omega_c / S - 1}}$ $S'_z = S + \Delta_{\Sigma C}, \text{ при } S_z + \Delta_{\Sigma C} \leq S_{\max}$ $S'_z = S_{\max}, \text{ при } S_z + \Delta_{\Sigma C} > S_{\max}$ $S_{\max} = \frac{\pi D t g \alpha \sin \varphi}{2 \cos \arcsin d_0 / D}$ $\Delta_{\Sigma C} - \text{осевые люфты станка}$

– Неуравновешенное поперечное нагружение инструмента приводит к его изгибным деформациям, смещению и уводу режущей части, а его боковая поверхность взаимодействует с втулкой в одной или нескольких зонах, количество и расположение которых зависит от вида крепления инструмента, его расположения относительно втулки и величины поперечного нагружения. В каждой из зон контакта сверло, взаимодействуя с втулкой ленточками или спинкой пера и одной из ленточек, нагружается силами трения, крутящим моментом и осевой силой. Вид контакта, а следовательно и нагружение сверла от сил трения, зависят от геометрических параметров сверла и диаметра направляющего отверстия втулки, критическое значение которого

$$D'_c = \left(\frac{4B^2 B_1^2 (B^2 + B_1^2 + (B_0^2 - B^2 - B_1^2))}{4B^2 B_1^2 - (B_0^2 - B^2 - B_1^2)^2} \right)^{0,5},$$

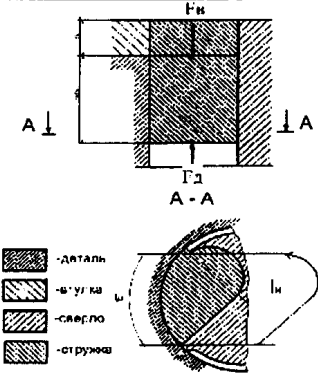
где B — ширина пера сверла; B_1 — ширина стружечной канавки; B_0 — расстояние между точками контакта ленточек сверла.

При диаметре отверстия втулки $D_a < D_a'$ сверло взаимодействует с втулкой по ленточкам, а при $D_a > D_a'$ — спинкой пера и одной из ленточек.

– Отвод стружки через обработанную часть отверстия и прилегающую к детали кондукторную втулку приводит к дополнительному нагружению инструмента силами трения. Схема процесса отвода стружки и зависимости, определяющие величины действующих нагрузок, а также наименьший угол наклона стружечных канавок сверла ω_c и допустимую глубину обработки отверстий без промежуточных выводов инструмента приведены в табл.3.

Таблица 3

Закономерности процесса отвода стружки

Схема отвода стружки	Параметры процесса
 <p> - деталь - втулка - слез.по - стружка </p>	$M_{сш} = D \left(\frac{2F_{дл}l_{д}f_{сш}}{\lambda_{\tau} + \mu_{\tau}} + \frac{2F_{нл}l_{н}f_{сн}}{\lambda_{\eta} + \eta_{\eta}} \right) / 2,$ $P_{сш} = \left(\frac{2F_{дл}l_{д}f_{сш}}{\lambda_{\tau} + \mu_{\tau}} + \frac{2F_{нл}l_{н}f_{сн}}{\lambda_{\eta} + \eta_{\eta}} \right) / \sin(2\omega_c),$ $\omega_c > \arcsin \frac{F_{д}}{2l_{д} \left(\frac{F_{д}f_{сш}}{\lambda_{\tau} + \mu_{\tau}} + \frac{F_{н}f_{сн}}{\lambda_{\eta} + \eta_{\eta}} \right)},$ $h_0 \leq \frac{\cos(\omega_c) S_{\kappa}}{\lambda_{\tau} + \mu_{\tau}} \left(\ln \left(\frac{M_{д\max} (\lambda_{\tau} + \mu_{\tau}) k_c}{DS_{дл} f_{сш}} + P_c \right) - \ln(P_c) \right) \left(1 - \frac{k_3 (\pi D^2 - 4F_c)}{\pi S_{\kappa} D^2} \right)$

3. Экспериментальные исследования процесса сверления НПО

Для проверки адекватности теоретических предсказанных закономерностей нагружения и деформаций спиральных сверл при обработке малоразмерных НПО и экспериментального определения деформационных характеристик стружки, был проведен ряд натурных экспериментов.

– Исследование взаимодействия режущих кромок сверла с обрабатываемым образцом производилось путем измерения однокомпонентным динамометром осевого нагружения инструмента при рассверливании отверстий диаметром 4 мм в образцах из стали 45 и 12X18Н10Т. Обработка осуществлялась на станке

16К20 при частоте вращения $0,21 \text{ с}^{-1}$, глубина резания и подача изменялись в диапазоне $t=0,05 \dots 0,2 \text{ мм}$, $S=0,2 \dots 1,6 \text{ мм/об}$. При «тянущем» нагружении сверла подача импульсно возрастала до $S_{\text{г}}$. Погрешность зависимостей, определяющих критическую глубину резания и увеличенной подачи, по сравнению с этими параметрами, определенными экспериментально, не превышает 12%.

– Исследование изгибных деформаций спиральных сверл, направляемых по кондукторной втулке осуществлялось на стенде, обеспечивающем возможность изменения способа крепления инструмента, его расположения относительно направляющего элемента, параметров последнего и величины поперечного нагружения сверла.

Проверка адекватности моделей осуществлялась путем сравнения расчетного расположения зон контакта сверла с направляющим устройством, а также величины смещения и увода режущей части сверла, с полученными экспериментально. Исследования производились для каждой из расчетных схем. При этом, изгибным деформациям подвергались сверла диаметром 2,5 и 4 мм, длиной соответственно 60 и 80 мм, длина направляющего устройства составляла 20 и 32 мм, вылет сверл 10 и 16 мм, смещение оси сверла относительно направляющего устройства $0 \dots 1 \text{ мм}$, величина поперечного нагружения составляла соответственно $5 \dots 15 \text{ Н}$ и $10 \dots 30 \text{ Н}$. Погрешность расположения зон контакта не превышала 11,2%, а смещения и увода режущей части сверла 11,6%.

– Исследование взаимодействия сверла и втулки в зоне контакта осуществлялось на стенде для моделирования трения инструмента и втулки. При этом на имитаторе инструмента элементы, контактирующие с втулкой, устанавливались в положения, соответствующие их расположению на поверхности сверла, изменялись направление и величина поперечного нагружения инструмента и определялся крутящий момент от сил трения, который сравнивался с расчетным. Проведенные экспериментальные исследования показали, что погрешность расчета нагружения сверла при трении о втулку составляет $7,6 \dots 11,1\%$.

– Исследование процесса отвода стружки из зоны резания проводилось в два этапа: на первом определялись деформационные характеристики стружки, на втором — закономерности нагружения инструмента при отводе стружки.

На первом этапе экспериментально-расчетным методом определялись: начальное давление стружки на поверхность отверстия P_c и значение коэффициента K_c , устанавливающего пропорциональность увеличения давления стружки на боковую поверхность отверстия, при ее продольном сжатии. Для этого нагружатель с полостью, заполненной стружкой, сжатой в осевом направлении с усилием F_i , устанавливался в полый шпинделе станда, а втулке, внутренняя поверхность которой контактирует со стружкой, придавалось вращение, и измерялся момент от сил трения M_i .

Параметры P_c и K_c рассчитываются по зависимостям:

$$F_{0i} = F_i - \frac{2M_i}{D} \left(1 + \frac{df_s + d_c n f_c}{Df} \right), \quad P_c = \frac{(F_i - F_{0i}) e^{\pi(D \cdot f + d \cdot f_s + d_c \cdot n f_c) K_c l / S_K}}{(e^{\pi(D \cdot f + d \cdot f_s + d_c \cdot n f_c) K_c l / S_K} - 1) S_K},$$

где D, d, d_c — диаметры втулки, вала и стержней; f, f_s, f_c — коэффициенты трения втулки, вала и стержней; S_K — площадь кольцевой полости.

Как показали исследования, деформационные характеристики различных видов стружки имеют близкие значения $P_c=0,115 \dots 0,13$ МПа, $K_c=0,786 \dots 0,816$.

На втором этапе проверялась адекватность зависимостей, отображающих закономерности нагружения инструмента от сил трения стружки.

Исследования проводились на станке 2Н125, на пиноли которого закреплялся однокомпонентный динамометр, обеспечивающий измерение крутящего момента на кондукторной втулке. При исследовании свёрла диаметром 3 и 5 мм устанавливались в кондукторной втулке динамометра на глубину 3...6 диаметров инструмента. С противоположной стороны во втулку вводились образцы обрабатываемого материала из стали 45, 12Х18Н10Т и латуни Л63, диаметром равным диаметру сверла и закреплялись на станке. Обработка заготовок производилась на нормативных режимах. Для каждого материала, диаметра сверла и глубины отверстия определялось среднее значение крутящего момента, величина которого сравнивалась с расчетным. Как показали исследования, максимальное расхождение величин крутящих моментов расчетного и определенного экспериментально составляет 9,3...12%.

Также были проведены исследования с принудительным отводом стружки из зоны резания сжатым воздухом давлением 0,05 МПа, подаваемым в канавки

сверла через отверстие в боковой поверхности втулки. При этом увеличение крутящего момента не наблюдалось.

– Исследование влияния силовых факторов процесса сверления НПО производилось с применением специального динамометра, обеспечивающего определение крутящего момента, осевой и радиальной составляющих силы резания, дополнительно оснащенного динамометрической кондукторной втулкой. На станке 2Н118Л с модернизированной коробкой подач в образцах из стали 45 обрабатывались отверстия диаметром 4 мм с углом наклона плоскости входа 60° . Обработка производилась при частоте вращения $0,75 \text{ с}^{-1}$ и подаче 0,05 мм/об. Направление сверла обеспечивалось втулкой диаметром 4,02 мм, установленной с зазором относительно детали 3 мм. Нагрузки, действующие на образец и кондукторную втулку, регистрировались осциллографом Н117/1 в пяти зонах, удаленных от начала отверстия на 2, 3, 4, 5 и 6 мм.

Проведенные исследования показали, что изменения составляющих силы резания, крутящих моментов от сил резания и трения происходит синхронно и синфазно. При комплексном нагружении сверла силами резания и трения, разработанные математические модели с достаточной достоверностью отображают реальные процессы обработки НПО, а их погрешность не превышает 14,2%.

– Исследование влияния динамических факторов на деформации инструмента осуществлялись путем определения влияния частоты гармонического нагружения инструмента на амплитуду его вынужденных крутильных колебаний. Эксперименты проводились на модернизированном станке 16К20П при обработке образцов из стали 45 с предварительно обработанным отверстием диаметром 2 мм, смещенным относительно оси вращения образца на 0,5 мм. Рассверливание образцов выполнялось сверлом диаметром 4 мм из стали Р6М5 с удаленной одной режущей кромкой при постоянной подаче $S=0,05 \text{ мм/об}$. Частота собственных крутильных колебаний изменялась за счет изменения длины вылета сверла и составляла 90 и 110 с^{-1} . Частота вращения образцов последовательно изменялась до частоты возмущающих нагрузок, в 1,5 раза превышающей частоту собственных колебаний инструмента. Измерение амплитуды крутильных колебаний осуществлялось анизотропным датчиком, а

изменения ЭДС регистрировались осциллографом 1С15.

Результаты исследований представлены на рис.2.

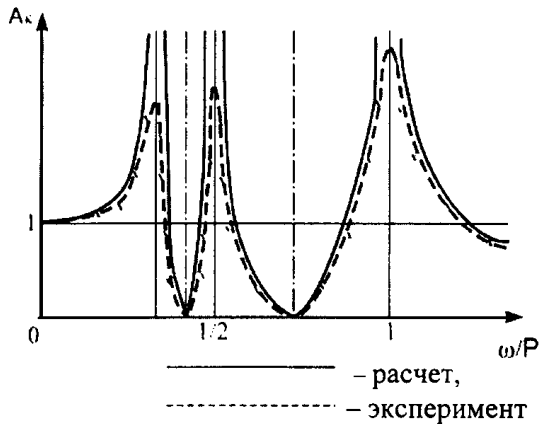


Рис. 3. Влияние частоты нагружения на амплитуду крутильных деформаций сверла

Как видно из графика, разработанные модели с достаточной достоверностью, отображают влияние динамических факторов нагружения. Максимальная погрешность расчетных деформаций, равная 19%, наблюдалась только в зоне резонанса, а на остальных участках не превышала 10...14%.

4. Практическое применение результатов исследований

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований была разработана методика проверочного расчета процесса сверления НПО малого диаметра, позволяющая определить влияние структуры и параметров технологической системы, условий обработки на величину нагружения и деформации спиральных сверл, в которой также даны рекомендации по совершенствованию процесса сверления НПО. Структурно методика расчета представляет собой комплекс подпрограмм, объединенных в три функциональных блока, обеспечивающих один из этапов расчета: подготовку исходных параметров, расчет статических нагрузок и расчет динамических нагрузок (рис.4).

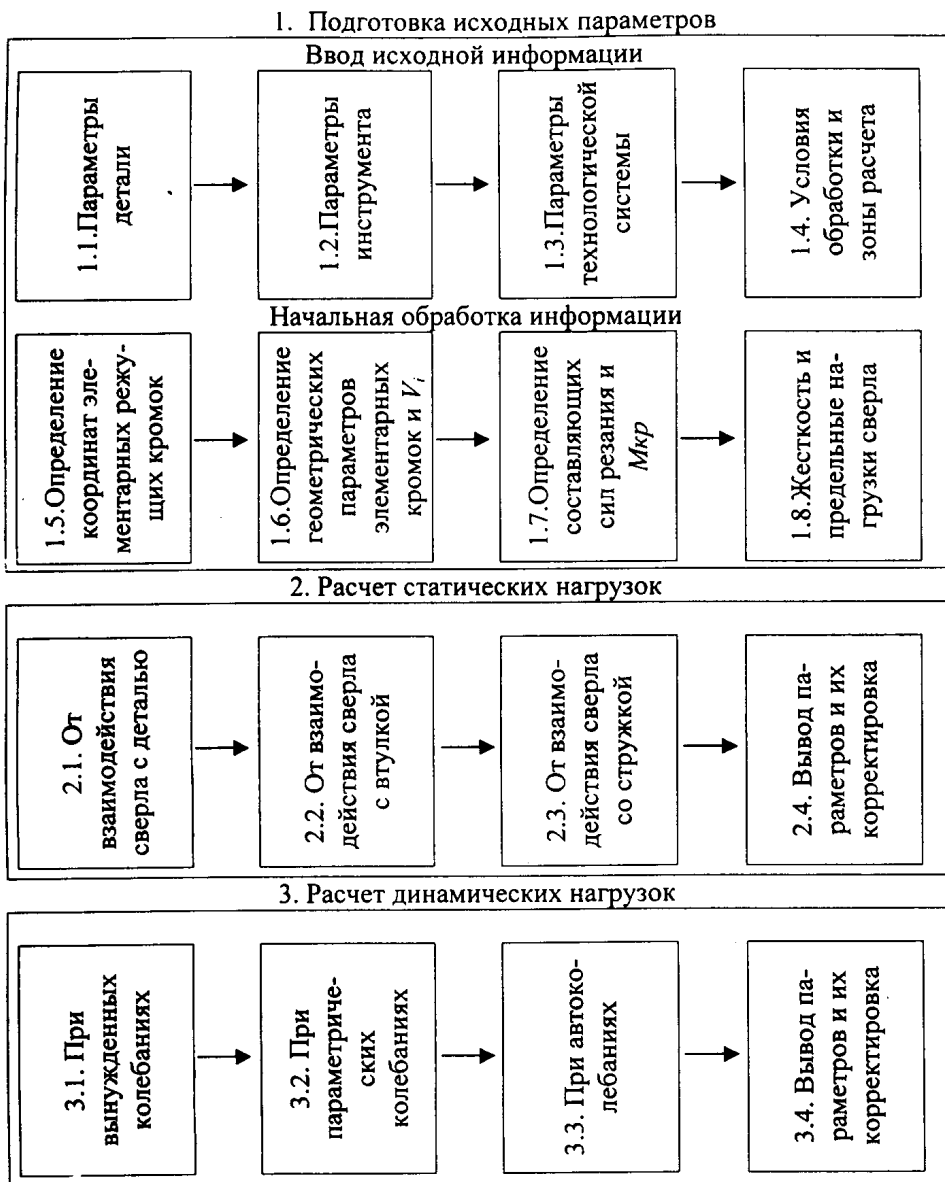


Рис.4. Методика расчета процесса сверления НПО

Установленные при исследованиях закономерности процесса сверления НПО малого диаметра, новые явления и действующие факторы, позволили создать комплекс новых способов и устройств технологического оснащения операций, позволяющих осуществлять управление параметрами процесса сверления НПО и повысить его технико-экономические показатели.

Комплекс включает в себя:

1. Устройства для закрепления деталей (а.с.1388198, 1553278, 1731459), обеспечивающие повышение надежности крепления деталей за счет компенсации погрешности их изготовления.
2. Способ и устройства направления инструмента с предварительным изгибом (а.с.1248727, 1248728), позволяющие повысить точность расположения отверстий за счет компенсации смещения и увода их оси.
3. Устройства для направления инструмента с вращающейся опорной поверхностью (а.с.1706781, 1706782), обеспечивающие снижение нагружения сверл крутящим моментом и гашение их крутильно-продольных колебаний.
4. Способы и устройства удаления стружки из зоны резания (а.с.1484588, 1579722, 1620269, 1685678), позволяющие снизить нагружение инструмента и исключить пакетирование стружки за счет ее принудительного отвода.
5. Способы и устройства управления динамическими параметрами процесса (а.с.1514507, 1560413, 1697980, 1720807), обеспечивающие снижение крутильно-продольных деформаций инструмента при вынужденных, параметрических и автоколебаниях за счет изменения частоты собственных колебаний сверл, относительного нагружения инструмента, изменений частоты вращения и подачи.
6. Способ и устройства привода, замены и контроля инструмента (а.с.812521, 975326, 1024231, 1366315, 1414522, 1549674), позволяющие увеличить стабильность подачи, ускоренную смену сверл без остановки вращения шпинделя, контролировать деформации, износ и целостность сверл.

Разработанная методика проверочного расчета, рекомендации по управлению величиной нагружения и деформаций инструмента 3 способа и 7 устройств внедрены на четырех предприятиях и в учебный процесс подготовки инженеров специальности 120100 и 210200.

Общие выводы по работе

1. Разработан комплекс статико-динамических математических моделей, адекватно отображающих нагрузки и деформации спиральных сверл малого диаметра при обработке НПО, с учетом влияния структуры и параметров технологической системы.
 - Установлено, что при обработке периферийной частью инструмента участков НПО с малой глубиной резания на сверло действует осевая нагрузка, совпадающая по направлению с подачей, приводящая к кратковременному увеличению последней и поломке сверл.
 - Нагружение инструмента неуравновешенными радиальной и тангенциальной составляющими силы резания вызывает его изгибные деформации, при которых происходит смещение и увод режущей части сверла, а его боковая поверхность может контактировать с кондукторной втулкой в нескольких зонах, в каждой из которых сверло дополнительно нагружается осевой силой и крутящим моментом от сил трения.
 - Теоретически определено дополнительное нагружение инструмента силами трения стружки о деталь и кондукторную втулку, величина дополнительного крутящего момента может превышать момент от сил резания.
 - Установлено, что крутильно-продольные деформации малоразмерных спиральных сверл при динамическом нагружении могут возрасти до критических значений (поломки сверл) при возникновении вынужденных, параметрических и автоколебаний.
2. Экспериментально подтверждена адекватность статико-динамических математических моделей, определяющих нагружение и деформации спирального сверла при его взаимодействии с обрабатываемой деталью, кондукторной втулкой, стружкой и влияние на них циклического нагружения.
3. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана методика инженерного проверочного расчета процесса сверления НПО малого диаметра, позволяющая определить нагрузки и деформации спираль-

ных сверл, совершенствовать структуру и параметры технологической системы и условия обработки.

4. Разработан комплекс оригинальных способов и устройств, обеспечивающих повышение эффективности закрепления деталей, направления инструмента, удаления стружки из зоны резания, управления динамическими параметрами процесса, привода и замены сверл и контроля их деформаций, целостности и износа, защищенный 24 авторскими свидетельствами.
5. Результаты работы внедрены в производство и учебный процесс подготовки инженеров по специальностям 120100 и 120200.

Основные положения диссертации опубликовали в следующих работах:

1. Лакирев С.Г., Пургин В.П. Расчёт сил резания при обработке нетехнологических отверстий // Механизация и автоматизация ручных и трудоёмких работ в машиностроении: Тез. докл. республ. совещания. — Ижевск, 1981.
2. Пургин В.П. Совершенствование процессов сверления отверстий с наклонным входом // Совершенствование машиностроительных материалов, конструкций и методов обработки деталей: Сборник научных трудов. — Челябинск: ЧПИ, 1982. — № 271.
3. Пургин В.П. Аналитическое исследование сил, действующих при сверлении неполных отверстий // Совершенствование машиностроительных материалов, конструкций машин и методов обработки деталей: Тематический сборник научных трудов. — Челябинск: ЧПИ, 1984.
4. Пургин В.П. Исследование сил резания при обработке неполных отверстий // Совершенствование машиностроительных материалов, конструкций машин и методов обработки деталей: Тематический сборник научных трудов. — Челябинск: ЧПИ, 1986.
5. Пургин В.П. Совершенствование технологических систем на операциях сверления неполнопрофильных отверстий // Совершенствование машиностроительных материалов, конструкций машин и методов обработки деталей: Тематический сборник научных трудов. — Челябинск: ЧПИ, 1988.

6. Лакирев С.Г., Пургин В.П. Нагружение спиральных свёрл при обработке неполнопрофильных отверстий // Проектирование и эксплуатация режущих инструментов в ГАП: Тезисы докладов региональной научно-технической конференции. — Свердловск, 1987.
7. Лакирев С.Г., Пургин В.П., Дерябин И.П. Моделирование образа деталей в процессах механической обработки // Вопросы геометрического моделирования в САПР: Тезисы докладов региональной научно-технической конференции. — Свердловск, 1987.
8. Лакирев С.Г., Пургин В.П., Дерябин И.П. Аппроксимация пространственного расположения режущих кромок сложнопрофильного инструмента в САПР ТП // Автоматизированное проектирование и машинное моделирование технологических процессов в машиностроении: Тезисы докладов региональной научно-технической конференции. — Свердловск, 1987.
9. Лакирев С.Г., Пургин В.П., Дерябин И.П. Методика автоматизированного проектирования технологических процессов обработки деталей с высокоточными поверхностями // Комплексная автоматизация проектирования конструкторских работ в машиностроении: Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического семинара. — Л., 1988.
10. Пургин В.П., Карсунцев А.И. Расчёт величины увода и прогнутости оси отверстия при сверлении // Тематический сборник научных трудов ЮУрГУ. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1998.
11. Пургин В.П., Карсунцев А.И. Исследование и совершенствование процесса отвода стружки при сверлении // Тематический сборник научных трудов. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1998.

А также в а.с. № 1248727, 1248728, 1706781, 1206782, 1685678, 1484588, 1560413, 1514507, 1697980, 1720807.

Новизна технических решений также подтверждена а.с. № 1388198, 1553278, 1731459, 1579722, 1620269, 812521, 975326, 1024231, 1366315, 1414522, 1549674, 1553277, 1539607, 717569, решение о выдаче патента по заявке 4899406/08(001748).