

На правах рукописи

ЗОЛОТОВ ОЛЕГ ВЛАДИМИРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ
ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ПЛАСТИЧЕСКОГО
СВЕРЛЕНИЯ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2007

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова».

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Татаркин Евгений Юрьевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Ситников Александр Андреевич
	кандидат технических наук Земляков Сергей Анатольевич
Ведущая организация	ОАО «Алтайский научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (г. Барнаул)

Защита состоится « 21 » декабря 2007 г. в ____ час. ____ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.004.01 при Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова».

Автореферат разослан « ____ » ноября 2007 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Ю.О. Шевцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В машиностроении широко используются тонкостенные детали с узлами крепления: корпуса, поддоны, крышки, теплообменники, коллекторы, элементы трубопроводов и т.д. Узлы крепления в тонкостенных деталях традиционно изготавливают с использованием дополнительных крепежных элементов: гаек, резьбовых вставок, шпилек, которые закрепляются с помощью сварки, пайки или прессования. Это приводит к дополнительным затратам труда, материальных и энергетических ресурсов.

Поиск путей снижения трудоемкости и затрат при изготовлении узлов крепления в тонкостенных деталях привел к появлению новой технологии обработки - пластическому сверлению. В настоящее время для выбора режимов пластического сверления в различных источниках приводятся лишь ориентировочные значения частот вращения инструмента и подачи для малоуглеродистых сталей в зависимости от диаметра инструмента и толщины детали. Это свидетельствует о недостаточной изученности процесса формообразования при пластическом сверлении, отсутствии математических моделей, позволяющих назначать высокопроизводительные режимы обработки, проектировать новые способы, инструменты и технологии.

Цель работы. Повышение производительности и снижение трудоемкости изготовления элементов узлов крепления с использованием пластического сверления.

Методы исследования. Изложенные в работе теоретические и экспериментальные исследования базируются на научных основах технологии машиностроения, теории обработки металлов давлением, теории трения, теплопередачи, принципах системного анализа и математическом моделировании. Достоверность результатов оценивалась методами математической статистики.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель, позволяющая производить расчет узлов крепления в плоских и трубчатых деталях, изготовленных с использованием пластического сверления в сплошном металле или в заготовках с предварительно подготовленными отверстиями в зависимости от режимов обработки и конструктивно-геометрических параметров инструмента и заготовки.

2. Получена математическая модель, позволяющая определять режимы обработки с учетом конструктивно-геометрических параметров инструмента и физико-механических свойств заготовки.

3. Исследовано влияние технологических факторов на процесс формообразования поверхностей методом пластического сверления.

Практическая ценность

1. Разработана методика проектирования технологии изготовления элементов узлов крепления с использованием пластического сверления, по-

звolyющая назначать режимы обработки, обеспечивающие максимальную производительность.

2. Разработаны способы обработки и инструменты для пластического сверления.

Реализация результатов работы. Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в диссертации, нашли практическое применение. Технологический процесс формообразования крепежных элементов в тонкостенных деталях методом пластического сверления и разработанные для этого конструкции инструментов внедрены в ООО «Центр развития технологии «Алтай». Экономический эффект, обусловленный снижением трудоемкости и затрат на изготовление узлов крепления составил 98000 рублей в год.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались на совместных научных семинарах кафедр «Общая технология машиностроения» и «Технология автоматизированных производств» (АлтГТУ, Барнаул) в 2005-2007 годах, международной научно-технической конференции «СТСМ-2005» (Барнаул, 2005), международной научно-технической конференции «СТСМ-2006» (Барнаул, 2006), четвертой Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» (Новосибирск, 2006), третьей межрегиональной научно-практической конференции «Управление качеством образования, продукции и окружающей среды» (Бийск, 2005), 2-ой Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь" (Барнаул, 2005), 3-ей Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь" (Барнаул, 2006), Всероссийской научно-практической конференции "Ресурсосберегающие технологии в машиностроении" (Барнаул, 2006), научно-практической конференции «Молодежь – Барнаулу» (Барнаул, 2006).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 15 печатных работах, в том числе одна в рецензируемом научном журнале из списка рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков, 20 таблиц, список литературы из 118 наименований, 1 приложение. Общий объем работы - 162 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненной работы. Сформулирована цель, научная новизна и практическая ценность исследования.

В первой главе дан анализ современного состояния вопроса, сформу-

лированы цель и задачи исследований.

Вопросы совершенствования технологического процесса пластического сверления нашли отражение в работах отечественных ученых и зарубежных ученых: А.И. Прагера, Ю.Л. Иванова, В.В. Хоменко, К. Зигфреда, М. Эрнста, Ф. Тикала, а также в публикациях фирм Flowdrill Inc., Unimex N.V., ZECNA Hartmetall-Werkzeugfabrikation GmbH.

К достоинствам пластического сверления следует отнести высокую производительность и безотходность. Для выполнения пластического сверления не требуется специальное оборудование или инструмент, что позволяет изготавливать детали с труднодоступной внутренней поверхностью. Крепежные элементы, формообразованные при пластическом сверлении, могут служить опорными поверхностями при сварном или паяном соединении деталей с замкнутым контуром, осевыми направляющими или опорами для втулок подшипников скольжения. С помощью пластического сверления можно выполнить неразъемное диффузионное соединение тонкостенных деталей путем их совместной обработки.

Анализ показывает, что влияние данного технологического процесса на структуру металла и его физико-механические характеристики в целом незначительно, исходя из чего сделан предварительный вывод о том, что это не приведет к существенному снижению стойкости резбонарезающего или резбонакатывающего инструмента.

Вместе с тем технологии пластического сверления изучены недостаточно, о чем свидетельствует отсутствие четких рекомендаций по выбору технологических режимов в зависимости от диаметра выполняемого отверстия (под резьбу), толщины детали и марки обрабатываемого металла. Практически нет сведений о способах обработки, конструкциях и материале инструмента.

На основании вышеизложенного для достижения поставленной цели поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать комплекс математических моделей, устанавливающих взаимосвязь процесса формообразования элементов узла крепления с режимами обработки, конструктивно-геометрическими параметрами инструмента, физико-механическими и геометрическими параметрами заготовки;
2. Исследовать влияние технологических факторов на процесс формообразования поверхностей методом пластического сверления;
3. Разработать методику проектирования технологии изготовления элементов узлов крепления;
4. Разработать способы обработки и инструменты для пластического сверления;
5. Внедрить результаты исследований в условиях действующего производства.

Вторая глава посвящена разработке математической модели процесса

пластического сверления, позволяющей определить геометрические параметры крепежного элемента и основанной на законе постоянства объема, в соответствии с которым объем тела при его пластической деформации остается неизменным.

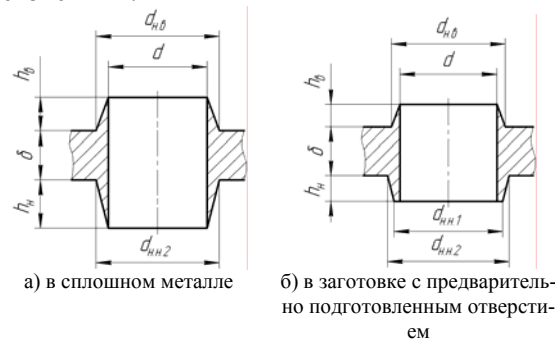


Рис. 1 - Схема расчета крепежного элемента в листовой детали
тали определяется по формуле:

$$h_n = \frac{3 \cdot \delta \cdot (d^2 - d_0^2)}{(K_h \cdot K_d^2 + 1) \cdot d_{н.н.2}^2 + (K_h \cdot K_d \cdot d + d_{н.н.1}) \cdot d_{н.н.2} - (2 \cdot K_h + 3) \cdot d^2 + d_{н.н.1}^2} \quad (1)$$

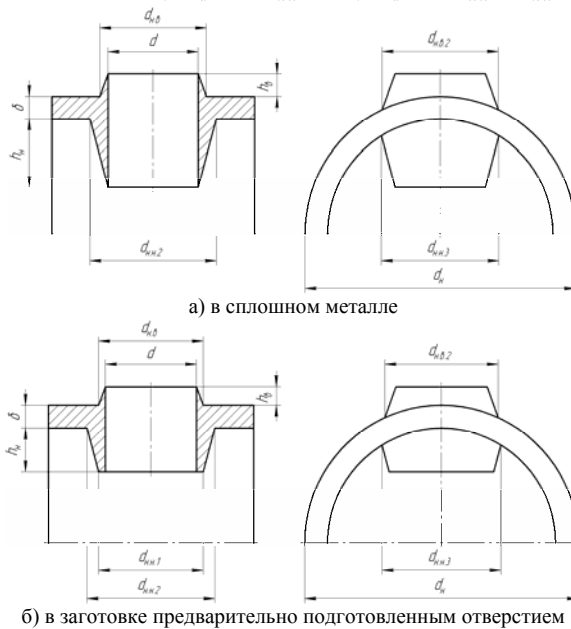


Рис. 2 - Схема расчета крепежного элемента в трубчатой детали

На рис. 1а представлена геометрическая модель крепежного элемента в листовой детали, полученного при пластическом сверлении в сплошном металле, а на рис. 1б - при обработке заготовки с предварительно подготовленным отверстием.

Высота наплыва на нижней поверхности детали

где δ – толщина детали; d – диаметр отверстия; d_0 – диаметр предварительно подготовленного отверстия; $K_h = h_0 / h_n$ – отношение высот наплывов на верхней и нижней поверхностях листовой детали; $K_d = d_{н.н.1} / d_{н.н.2}$ – отношение наружных диаметров наплывов на верхней и нижней поверхностях листовой детали; $d_{н.н.2}$ и $d_{н.н.1}$ – наружные диаметры наплывов на нижней поверхности листовой детали.

Высота наплыва на верхней поверхности детали определяется по формуле:

$$h_0 = K_h \cdot h_n \quad (2)$$

Наружный диаметр напыла на верхней поверхности детали определяется по формуле:

$$d_{н.в} = K_d \cdot d_{н.н.2} \quad (3)$$

На рис. 2а представлена геометрическая модель крепежного элемента в трубчатой детали, полученного при пластическом сверлении в сплошном металле, а на рис. 2б - при обработке трубчатой заготовки с предварительно подготовленным отверстием.

В первом приближении геометрические параметры крепежного элемента в трубчатой детали могут быть определены как для крепежного элемента в листовой детали по формулам (1) - (3). На основе этих параметров рассчитываются объемы напылов на верхней и нижней поверхностях детали. Объем выдавливаемого металла при обработке трубчатой заготовки определяется по формуле:

$$V = \frac{1}{6} \cdot \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\cos^2(\varphi)} \cdot \left(\sqrt{(d_n^2 - \cos^2(\varphi) \cdot d_0^2)^3} + \sqrt{(d_{вн}^2 - \cos^2(\varphi) \cdot d^2)^3} \right) d\varphi - \frac{1}{6} \cdot \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\cos^2(\varphi)} \cdot \left(\sqrt{(d_n^2 - \cos^2(\varphi) \cdot d^2)^3} + \sqrt{(d_{вн}^2 - \cos^2(\varphi) \cdot d_0^2)^3} \right) d\varphi \quad (4)$$

где d_n и $d_{вн}$ - наружный и внутренний диаметры заготовки.

Объем напыла на верхней поверхности рассчитывается по формуле:

$$V_v = 4 \cdot \int_0^{d_{н.в}/2} \left(y(x) \cdot \left(h_{в.дон} + \frac{d_n}{2} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{d_n^2}{4} - y(x)^2} \right) - \frac{d_n^2}{8} \cdot \arcsin\left(\frac{2 \cdot y(x)}{d_n}\right) - \frac{h_v \cdot y(x)^2}{(d_{н.в} - d)} \right) dx - \int_0^{\pi/2} \left(\frac{h_v \cdot d^2}{2} + \frac{d_n \cdot d^2}{4} + \frac{\sqrt{(d_n^2 - d^2 \cdot \cos^2(\varphi))^3}}{6 \cdot \cos^2(\varphi)} - \frac{d_n^3}{6 \cdot \cos^2(\varphi)} \right) \cdot d\varphi - \frac{1}{12} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot (h_{в.дон} - h_v) \quad (5)$$

$$y(x) = \frac{d_{н.в.2}}{d_{н.в}} \cdot \sqrt{\frac{d_{н.в}^2}{4} - x^2}; \quad h_{в.дон} = \frac{h_v \cdot d_{н.в}}{d_{н.в} - d}$$

где $d_{н.в.2}$ - наружный диаметр напыла на верхней поверхности в поперечном сечении детали.

Объем напыла на нижней поверхности вычисляется следующим образом:

$$V_n = \int_0^{d_{н.н.2}/2} \left(y(x) \cdot \left(h_{н.дон} - \frac{d_{вн}}{2} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{d_{вн}^2}{4} - y(x)^2} \right) + \frac{d_{вн}^2}{8} \cdot \arcsin\left(\frac{2 \cdot y(x)}{d_{вн}}\right) - \frac{h_n \cdot y(x)^2}{(d_{н.н.2} - d_{н.н.1})} \right) dx - \int_0^{\pi/2} \left(\frac{h_n \cdot d^2}{2} - \frac{d_{вн} \cdot d^2}{4} - \frac{\sqrt{(d_{вн}^2 - \cos^2(\varphi) \cdot d^2)^3}}{6 \cdot \cos^2(\varphi)} + \frac{d_{вн}^3}{6 \cdot \cos^2(\varphi)} \right) \cdot d\varphi - \frac{1}{12} \cdot \pi \cdot d_{н.н.1}^2 \cdot (h_{н.дон} - h_n) \quad (6)$$

$$y(x) = \frac{d_{н.н.3}}{d_{н.н.2}} \cdot \sqrt{\frac{d_{н.н.2}^2}{4} - x^2}; \quad h_{н.дон} = \frac{h_n \cdot d_{н.н.2}}{d_{н.н.2} - d_{н.н.1}}$$

где $d_{н.н.3}$ - наружный диаметр напыла на нижней поверхности в поперечном

сечении детали.

Размеры крепежного элемента в трубчатой детали определены с достаточной точностью (при допустимой погрешности $\pm 5\%$), если соблюдается закон постоянства объема:

$$0,95 \leq \frac{V}{V_6 + V_n} \leq 1,05 \quad (7)$$

в противном случае при $V/(V_6 + V_n) < 0,95$ выбирается меньшее значение высоты наплыва на нижней поверхности детали h_n , а при $V/(V_6 + V_n) > 1,05$ большее. Затем рассчитывается значение высоты наплыва на верхней поверхности детали h_6 по формуле (2), вычисляются объемы наплывов на верхней V_6 и нижней V_n поверхностях детали и проверяется условие (7). Если оно не соблюдается, то высота наплыва на нижней поверхности детали h_n уточняется до соблюдения условия (7).

Количество витков внутренней резьбы с полным профилем, которое можно нарезать в крепежном элементе, формообразованном при пластическом сверлении в листовой или трубчатой заготовке, можно рассчитать по формуле (при условии, что наплыв на верхней поверхности срезается, диаметр отверстия d равен внутреннему диаметру резьбы и наружный диаметр наплыва на нижней поверхности $d_{н.н.2} > D$):

$$n_6 = \frac{h_n \cdot \left(1 - \frac{D - d_{н.н.1}}{d_{н.н.2} - d_{н.н.1}}\right) + \delta - z}{n_3 \cdot P} \quad (8)$$

где D , n_3 и P - наружный диаметр, количество заходов и шаг внутренней резьбы; z - длина фаски; если $d_{н.н.2} \leq D$ то наплыв на нижней поверхности детали обладает недостаточной толщиной для нарезания резьбы.

Можно решать обратную задачу – определить минимальную толщину заготовки при заданном диаметре внутренней резьбы методом последовательных приближений.

Математическая модель позволяет проверить возможность формообразования узла крепления, и при необходимости скорректировать техническое задание. Результаты расчета геометрических параметров крепежного элемента используются при определении конструктивно-геометрических параметров инструмента, а также режимов обработки. Для получения сквозного отверстия длина цилиндрического участка рабочей части инструмента должна быть большей или равной суммарной высоте крепежного элемента, т.е. $L_u \geq (h_6 + \delta + h_n + \ell_{пб})$, диаметр инструмента выбирается равным диаметру отверстия $D_{ин} = d$, который при формообразовании крепежного элемента под резьбу выбирается равным ее внутреннему диаметру ($\ell_{пб}$ - длина перебега).

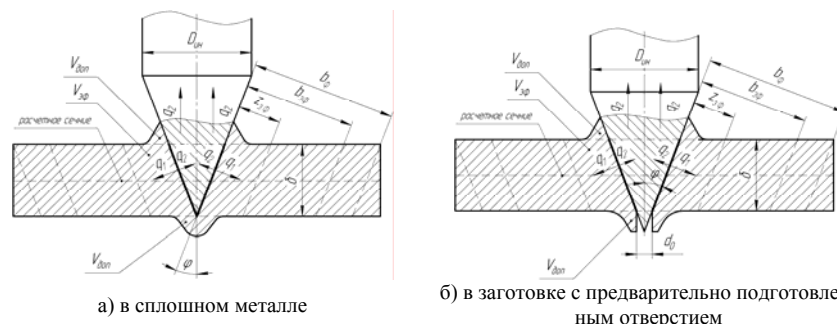
Третья глава посвящена разработке математической модели пластического сверления, позволяющей определить режимы обработки.

В процессе формообразования крепежного элемента в заготовке методом пластического сверления можно выделить три фазы. В течение первой фазы – фазы подвода инструмент перемещается до начального контакта с заготовкой, в течение второй фазы – фазы нагрева происходит внедрение инструмента в заготовку на длину равную ее толщине, сопровождающееся нагревом обрабатываемого металла за счет работы, совершаемой силами трения, до определенного распределения температуры в ее объеме, что является необходимым и достаточным условием для оптимального протекания третьей фазы - фазы формообразования. Распределение температуры в объеме заготовки в конце фазы нагрева характеризуется температурой на поверхности трения и температурой на границе зоны формообразования, которой соответствует максимальный поперечный размер крепежного элемента - наружный диаметр $d_{н.н.2}$. Для максимального повышения пластичности обрабатываемого металла температура на поверхности трения должна быть настолько это возможно высокой, но не вызывающей перегрева или пережога, а с другой стороны она не должна превышать температуру теплостойкости материала инструмента. Исходя из этого, при обработке малоуглеродистых и нержавеющей сталей, а также сплавов меди оптимальная температура на поверхности трения равна 680-780 °С, а при обработке алюминиевых сплавов - 400-470 °С. Температура на границе зона формообразования задается на 50 – 150 °С ниже температуры поверхности трения в зависимости от коэффициента теплопроводности обрабатываемого металла.

С учетом вышеизложенного необходимо определить полную работу сил трения в течение фазы нагрева, при которой достигается требуемое распределение температуры в объеме заготовки, ее продолжительность, и, соответственно режимы обработки – частоту вращения и подачу инструмента, обеспечивающие требуемое тепловыделение.

Для фазы нагрева характерен нестационарный режим теплообмена, обусловленный переменной по времени мощностью сил трения и малой продолжительностью. Поскольку толщина заготовки мала и всегда значительно меньше любого другого габаритного размера, то для определения поля температуры в ее объеме в течение фазы нагрева рассматривается стержневая модель одномерной задачи нестационарной теплопроводности двух контактирующих тел.

За основу взято решение данной задачи теплопроводности, полученное А.В. Чичинадзе, прошедшее экспериментальную проверку и являющееся достаточно простым с точки зрения выполнения инженерных расчетов, что обуславливает его широкое применение для определения поля температур при нестационарных режимах трения. На рис. 3 представлена схема расчета поля температур в объеме заготовки при пластическом сверлении в сплошном металле и в заготовке с предварительно подготовленным отверстием.



а) в сплошном металле

б) в заготовке с предварительно подготовленным отверстием

Рис. 3 - Схема расчета поля температур в заготовке

В результате получена формула для определения полной работы сил трения в течение фазы нагрева:

$$W_{mn} = \frac{\lambda_1 \cdot A_a \cdot t_n \cdot \mathcal{G}(0, \tau)}{\alpha_{mn} \cdot b \cdot \psi_V \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \tau_N + Fo \cdot \tau_W - \frac{2 \cdot \tau_N}{\pi^2} \cdot \Sigma^* \right)} \quad (9)$$

если соблюдается условие:

$$\mathcal{G}(\xi, \tau) \leq \frac{\alpha_{mn} \cdot W_{mn} \cdot b \cdot \psi_V}{\lambda_1 \cdot A_a \cdot t_n} \cdot \left(\left(\frac{1}{3} - \xi \cdot \left(1 - \frac{\xi}{2} \right) \right) \cdot \tau_N + Fo \cdot \tau_W - \frac{2 \cdot \tau_N}{\pi^2} \cdot \Sigma \right) \quad (10)$$

где $\mathcal{G}(0, \tau)$ и $\mathcal{G}(\xi, \tau)$ - среднеинтегральные избыточные температуры на поверхности трения и на границе зоны формообразования в конце фазы нагрева; $\xi = z_{з,ф} / b$ - безразмерная координата границы формообразования; $z_{з,ф}$ - расстояние по нормали от поверхности трения до границы формообразования; b - характерный размер заготовки; τ - безразмерное время; λ_1 - теплопроводность обрабатываемого металла; A_a - номинальная площадь контакта; t_n - продолжительность фазы нагрева; α_{mn} - коэффициент распределения тепловых потоков; ψ_V - коэффициент, учитывающий понижение температуры за счет передачи теплоты в дополнительный объем; τ_N - временной фактор мощности трения; Fo - число Фурье; τ_W - временной фактор работы трения; Σ и Σ^* - вспомогательные параметры.

Продолжительность фазы нагрева t_n определяется при помощи метода последовательных приближений, используя формулы (9) и (10). Продолжительность фазы нагрева может быть определена по формуле:

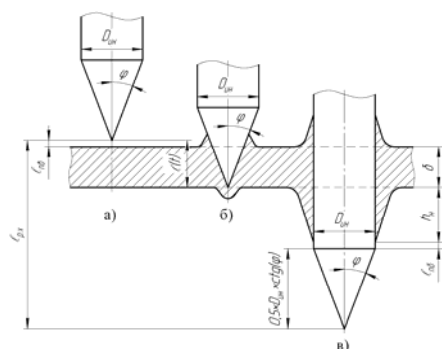
$$t_n = \delta / S_m \quad (11)$$

где S_m - подача (начальное значение выбирается по таблице 1).

Таблица 1 – Максимальные значения подачи по условиям нагрева заготовки

Обрабатываемый металл	Подача $S_{м, макс}$
Мало- и среднеуглеродистые стали	150 мм/мин
Нержавеющие стали	40-60 мм/мин
Медные сплавы	230 мм/мин
Алюминиевые сплавы	200 мм/мин

Данные в таблице 1 рассчитаны с использованием формул (9) и (10).



а) исходное; б) в конце фазы нагрева; в) в конце процесса.

Рис. 4 - Схема расчета подачи при пластическом сверлении

Рассматриваются два способа подачи, применяемые при пластическом сверлении: постоянная подача и равномерно ускоряющаяся подача, обеспечивающая с одной стороны плавный рост нагрузки в течение фазы нагрева, а с другой - снижение продолжительности фазы формообразования, и как следствие уменьшение основного времени. Равномерно ускоряющаяся подача характеризуется ускорением подачи $\Delta S_m / \Delta t$ и значением подачи в момент контакта инструмента с заготовкой $S_{м.к.}$. Расчетные формулы сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Расчет подачи при пластическом сверлении

Постоянная подача	Равномерно ускоряющаяся подача
Уравнение движения инструмента	
$\ell(t) = S_m \cdot t$ (12)	$\ell(t) = \frac{\Delta S_m}{\Delta t} \cdot t^2 + S_{м.0} \cdot t$ (13)
$S_m \in const$ (14)	$S_m(t) = \frac{\Delta S_m}{\Delta t} \cdot t + S_{м.0}$ (15)
Расчет подачи:	
Минутная подача: $S_m = \frac{\delta}{t_n}$ (16)	Ускорение подачи: $\frac{\Delta S_m}{\Delta t} = \frac{\delta - S_{м.к.} \cdot t_n}{t_n^2}$ (17)
	Подача в начальный момент времени: $S_{м.0} = \frac{\Delta S_m}{\Delta t} \cdot \frac{\ell_{нв} + \frac{d_0}{2} \cdot ctg(\varphi)}{S_{м.к.}}$ (18)
Определение основного времени:	
$t_{осн} = \frac{\ell_{нв} + \delta + h_n + \ell_{пб} + \frac{1}{2} \cdot D_{ин} \cdot ctg(\varphi)}{S_m}$ (19)	$t_{осн} = \frac{-S_{м.0} + \sqrt{S_{м.0}^2 + 4 \cdot \frac{\Delta S_m}{\Delta t} \cdot \left(\ell_{нв} + \delta + h_n + \ell_{пб} + \frac{1}{2} \cdot D_{ин} \cdot ctg(\varphi) \right)}}{2 \cdot \frac{\Delta S_m}{\Delta t}}$ (20)

где t - время; $\ell_{пв}$ - длина подвода; $\ell_{пб}$ - длина перебега; $S_{м.к.}$ - подача в момент контакта инструмента с заготовкой, выбирается на 40-80 мм/мин меньше значения постоянной подачи, рассчитанной по формуле (16).

Рассчитанные параметры подачи должны быть согласованы с параметрами оборудования, и при необходимости продолжительность фазы нагрева должна быть увеличена (при постоянной подаче это достигается путем выбора меньшего значения S_m по паспорту оборудования, соответственно продолжительность фазы нагрева рассчитывается по формуле (11)).

Следующим шагом является определение частоты вращения, с учетом, что известна подача и полная работа сил трения в течение фазы нагрева. Схема расчета полной работы трения в зависимости от частоты вращения и подачи представлена на рис. 5

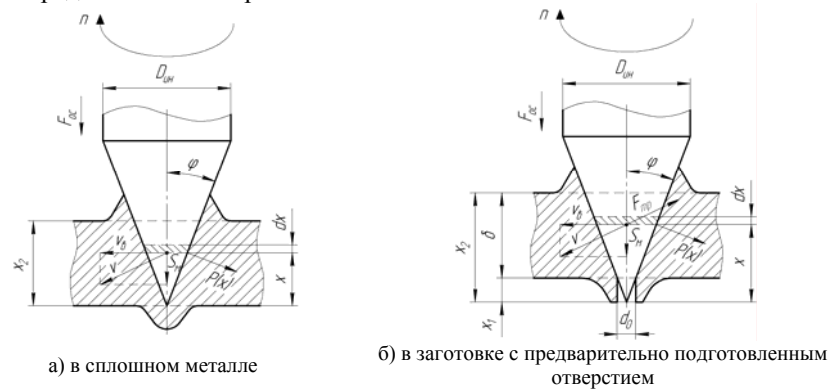


Рис. 5 - Схема расчета полной работы трения в зависимости от частоты вращения и подачи

Полная работа сил трения в течение фазы нагрева, в зависимости от частоты вращения и подачи определяется по формуле:

$$W_{mp} = \int_{t_{на}}^{t_{н}} \int_{x_1}^{x_2} 2 \cdot f_{mp} \cdot \frac{K_p \cdot F_{oc} \cdot \sin(\varphi)}{x_2^2 - x_1^2} \cdot x \cdot \sqrt{S_m^2 + (2 \cdot \pi \cdot n \cdot \operatorname{tg}(\varphi) \cdot x)^2} \cdot dx \cdot dt \quad (21)$$

где $x_2 = f(\ell)$ и $x_1 = f(\ell)$ - вспомогательные параметры, определяющие границы контакта; $t_{на}$ - продолжительность фазы подвода; f_{mp} - коэффициент трения; K_p - коэффициент, учитывающий неравномерное распределение давления по поверхности трения; F_{oc} - осевая нагрузка; n - частота вращения инструмента.

С помощью формулы (21) частоту вращения инструмента можно определить методом последовательных приближений.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований процесса формообразования узлов крепления в тонкостенных деталях. В качестве экспериментальных образцов для проведения исследований выбраны листовые заготовки из малоуглеродистой стали 08КП с толщинами 2 и 3,9 мм. Для проведения экспериментальных исследований разработан автоматизированный стенд сбора и обработки данных (АССОД), смонтированный на вертикально-фрезерном станке модели 6М12П. АССОД включает в себя: динамометр оригинальной конструкции, предназначенный для изме-

рения осевой нагрузки и крутящего момента в процессе пластического сверления, усилитель тензометрический УТ4-1 и компьютер с многофункциональной платой ввода/вывода ЛА-70М3 (АЦП) и периферийными устройствами. Обработка проводилась инструментами с диаметрами $D_{ин} = 4,1$ и $8,3$ мм, и углом конусности 40° , изготовленными из твердого сплава ВК8. В качестве измерительных инструментов использовались микрометр и нутромер. Влияние геометрических параметров заготовки и инструмента, а также технологических режимов на геометрию формообразуемого крепежного элемента и изменение осевой нагрузки и крутящего момента в процессе пластического сверления исследовали по методике дробно-факторного эксперимента. Были проведены две серии экспериментов: в первой исследовалось пластическое сверление в сплошном металле, а во второй пластическое сверление в заготовках с предварительно подготовленными отверстиями с диаметрами d_0 равными $1/3$ и $1/4$ диаметра инструмента $D_{ин}$. Частота дискретизации АЦП выбрана равной 20 Гц. В результате дешифровки осциллограмм получены графики зависимостей осевой нагрузки и крутящего момента от времени, причем за начало процесса пластического сверления принимается момент времени, при котором значение осевой нагрузки становится не нулевым. В соответствии с полученными графиками определяются максимальные значения осевой нагрузки и крутящего момента, а также значение крутящего момента в конце фазы нагрева (при времени $t_n = 60 \times \delta / S_m$).

В результате обработки данных получены степенные зависимости:

при пластическом сверлении в сплошном металле:

$$y = C \cdot \delta^{a1} \cdot D_{ин}^{a2} \cdot n^{a3} \cdot S_m^{a4} \quad (22)$$

при пластическом сверлении в заготовке с предварительно подготовленным отверстием:

$$y = C \cdot \delta^{a1} \cdot D_{ин}^{a2} \cdot \left(\frac{d_0}{D_{ин}} \right)^{a3} \cdot n^{a4} \cdot S_m^{a5} \quad (23)$$

Коэффициенты полученных эмпирических зависимостей сведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 - Коэффициенты эмпирических зависимостей для пластического сверления в сплошном металле

y	C	$a1$	$a2$	$a3$	$a4$
$d_{н.н.2}, \text{ мм}$	1,038169	0,106342	0,960060	0,023621	0,000278
K_h	0,574196	0,027640	0,119396	0,018207	-0,024263
K_d	1,509486	0,027915	-0,151907	-0,024720	-0,004590
$F_{oc}, \text{ Н}$	744,105585	1,022962	0,993322	-0,726454	0,726513
$M_{кр.н}, \text{ Н}\times\text{м}$	0,368732	1,248541	0,887553	-0,218751	0,225210
$M_{кр}, \text{ Н}\times\text{м}$	0,553098	1,218561	0,877853	-0,208651	0,205200

Таблица 4 - Коэффициенты эмпирических зависимостей для пластического сверления в заготовке с предварительно подготовленным отверстием

y	C	$a1$	$a2$	$a3$	$a4$	$a5$
$d_{н.н.1}, \text{мм}$	1,19707	0,112889	1,023450	0,119145	0,018392	-0,038250
$d_{н.н.2}, \text{мм}$	1,00131	0,107564	0,970709	-0,000596	0,023896	0,000288
K_h	0,924956	0,011627	0,067394	-0,574994	0,002026	-0,034465
K_d	3,934241	0,025201	-0,140760	0,001949	-0,023106	-0,004510
$F_{oc}, \text{Н}$	375,413	1,022962	0,993322	-0,365577	-0,726454	0,726513
$M_{кр.н}, \text{Н}\times\text{м}$	0,177692	1,228761	0,875873	-0,419389	-0,218671	0,245210
$M_{кр2}, \text{Н}\times\text{м}$	0,266537	1,218561	0,877853	-0,409689	-0,208651	0,205200

где F_{oc} и $M_{кр}$ – максимальные осевая нагрузка и крутящий момент, $M_{кр.н}$ – крутящий момент в конце фазы нагрева.

Полученные зависимости позволяют произвести расчет геометрических параметров крепежного элемента. Частота вращения инструмента может быть определена по формулам:

$$n = \left(\frac{\tau_N \cdot W_{mn}}{\pi \cdot C \cdot \delta^{a1+1} \cdot D_{ин}^{a2} \cdot S_m^{a4-1}} \right)^{\frac{1}{1+a3}} \quad (24) \quad \left| \quad n = \left(\frac{\tau_N \cdot W_{mn}}{\pi \cdot C \cdot \delta^{a1+1} \cdot D_{ин}^{a2} \cdot (d_0/D_{ин})^{a3} \cdot S_m^{a5-1}} \right)^{\frac{1}{1+a4}} \quad (25) \right.$$

где $a1 - a5$ – коэффициенты для крутящего момента в конце фазы нагрева $M_{кр.н}$ (таблица 3, 4); $\tau_N = 1,43-1,45$ - временной фактор мощности трения.

Пятая глава посвящена разработке методики проектирования технологии изготовления узлов крепления, а также новых конструкций инструментов и способов обработки. Приводятся результаты промышленного внедрения технологического процесса формообразования крепежных элементов в тонкостенных деталях в ООО «Центр развития технологии «Алтай».

Анализ существующих конструкций инструментов и синтез решений методом матриц открытий позволил получить ряд решений, обладающих признаками патентной чистоты. В частности предложены конструкции инструментов с рабочим частями, имеющими сферические центрирующие (для обработки цветных металлов), конические центрирующие (для обработки малоуглеродистых и нержавеющей сталей) и режущие элементы (для выполнения предварительного отверстия). Разработана конструкция инструмента с рабочей частью, имеющей два конических участка и режущие зубья, позволяющего осуществить формообразование крепежного элемента с выполнением фаски и срезанием наплыва на верхней поверхности детали за технологический проход. Это дает возможность уменьшить длительность изготовления узла крепления (подана заявка на изобретение 2006138387 от 30.10.06).

Проведен анализ существующих способов обработки и синтез решений методом матриц открытий, что позволило предложить ряд новых способов, обладающих признаками патентной чистоты, в частности, способы пластического с выполнение предварительного отверстия и предварительным нагре-

вом инструмента и/или заготовки сторонним источником тепла. Наиболее детально разработан способ с предварительным нагревом инструмента и заготовки, осуществляемый путем пропускания электрического тока. Указанный способ нагрева может быть также осуществлен непосредственно в процессе пластического сверления. Эффективность предложенных способов можно оценить, используя разработанные математические модели.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили предложить алгоритм проектирования операции пластического сверления, представленный на рис. 6.

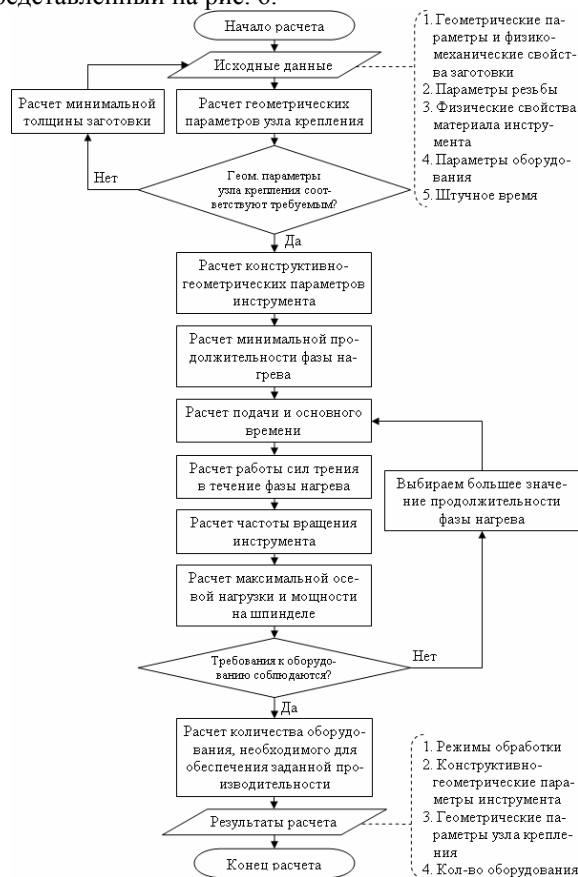


Рис. 6 – Алгоритм проектирования операции пластического сверления

При существующей технологии на ООО «Центр развития технологии «Алтай» узлы крепления в крышках 504.08.07 и 504.08.08 изготавливаются с использованием резьбовых втулок, устанавливаемых в предварительно просверленных отверстиях и закрепляемых с помощью сварки. Применение пла-

стического сверления позволило исключить операции по изготовлению резьбовых втулок и сверление отверстий под них, а также операцию сварки, за счет формообразования крепежных элементов непосредственно в деталях. Материал деталей - сталь 8КП, толщина 4 мм. Обработка пластическим сверлением выполняется на вертикальном консольно-фрезерном станке 6ДМ13Ф3 с частотой вращения шпинделя 1600 об/мин и равномерно ускоряющейся подачей от 80 до 125 мм/мин. В полученных крепежных элементах нарезается резьба М10. Экономический эффект, обусловленный снижением трудоемкости и затрат на изготовление узлов крепления составил 98000 рублей в год.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе решена актуальная задача повышения производительности и снижение трудоемкости изготовления элементов узлов крепления с использованием пластического сверления.

1. Разработана математическая модель, позволяющая произвести расчет узлов крепления в плоских или трубчатых деталях, изготовленных с использованием пластического сверления в сплошном металле или в заготовках с предварительно подготовленными отверстиями в зависимости от режимов обработки, конструктивно-геометрических параметров инструмента и заготовки.

2. Получена математическая модель, позволяющая определить режимы обработки в зависимости от конструктивно-геометрических и физических параметров инструмента и заготовки.

3. Экспериментально установлена зависимость силовых факторов (максимальной осевой нагрузки и крутящего момента) и геометрических параметров крепежного элемента от конструктивно-геометрических параметров инструмента и заготовки, и режимов обработки.

4. Разработаны способы пластического сверления, позволяющие повысить производительность - пластическое сверление в заготовке с предварительно подготовленным отверстием, при равномерно ускоряющейся подаче. Использование способов с предварительным нагревом инструмента и/или заготовки позволяет снизить режимы обработки и требования к оборудованию.

5. Предложены новые конструкции инструментов, повышающие производительность пластического сверления. Разработан инструмент для пластического сверления, позволяющий осуществить формообразование крепежного элемента с выполнением фаски и срезанием наплыва металла на верхней поверхности детали за один технологический проход, что обеспечивает уменьшение длительности изготовления узла крепления (заявка на изобретение 2006138387 от 30.10.06).

6. Разработана методика проектирования технологии изготовления узлов крепления с использованием пластического сверления, позволяющая назначать режимы обработки, обеспечивающие максимальную производительность.

7. Результаты теоретических и экспериментальных исследований работы подтверждены внедрением технологии пластического сверления на ООО «Центр развития технологии «Алтай» (г. Барнаул). Экономический эффект, обусловленный снижением трудоемкости и затрат на изготовление узлов крепления составил 98000 рублей в год.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. **Золотов, О. В. Определение тепловых потоков при обработке тонколистовой заготовки методом пластического сверления / О.В. Золотов, Е.Ю. Татаркин // Обработка металлов. – 2006. - № 3. - С. 10-11**
2. Золотов, О.В. Совершенствование технологии обработки методами пластического сверления / О.В. Золотов, Е.Ю. Татаркин // 2-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных "Наука и молодёжь". Секция "Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств", подсекция "Технология машиностроения" / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2005. – С. 67-68
3. Золотов, О.В. Повышение качества обработки тонкостенных деталей с помощью пластического сверления / О.В. Золотов, Е.Ю. Татаркин // Материалы третьей межрегиональной научно-практической конференции 29-30 июня 2005 года «Управление качеством образования, продукции и окружающей среды». / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2005. – С. 138 - 141.
4. Золотов, О.В. Расчет геометрических параметров узла крепления формообразованного при пластическом сверлении / О.В. Золотов, Е.Ю. Татаркин // Фундаментальные и прикладные исследования по приоритетным направлениям развития науки и техники. Ч. 2 / Современные технологические системы в машиностроении: сборник тезисов докладов международной школы-конференции по приоритетным направлениям развития науки и техники с участием молодых ученых, аспирантов и студентов / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2005. – С. 35-38
5. Золотов, О.В. Особенности компьютерного моделирования процесса пластического сверления в CAD/CAE системе MSC.MARC / О.В. Золотов // Фундаментальные и прикладные исследования по приоритетным направлениям развития науки и техники. Ч. 2 / Современные технологические системы в машиностроении: сборник тезисов докладов международной

- школы-конференции по приоритетным направлениям развития науки и техники с участием молодых ученых, аспирантов и студентов / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2005. – С. 125-127
6. Золотов, О.В. Определение геометрических параметров узла крепления в трубчатой заготовке формообразованного при пластическом сверлении / О.В. Золотов, А.Н. Литовченко // Фундаментальные и прикладные исследования по приоритетным направлениям развития науки и техники. Ч. 2 / Современные технологические системы в машиностроении: сборник тезисов докладов международной школы-конференции по приоритетным направлениям развития науки и техники с участием молодых ученых, аспирантов и студентов / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2005. – С. 154-155
 7. Золотов, О.В. Совершенствование технологии раскатки концов трубчатых деталей с помощью инструмента для пластического сверления / О.В. Золотов, А.Н. Литовченко, Е.Ю. Татаркин // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 4-й Всероссийской научно-практической конференции 23 марта 2006 г. / Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – С. 155-158
 8. Золотов, О.В. Определение тепловых потоков при обработке тонколистовой заготовки методом пластического сверления / О.В. Золотов, Е.Ю. Татаркин // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 4-й Всероссийской научно-практической конференции 23 марта 2006 г. / Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. - С. 162-166
 9. Золотов, О.В. Определение геометрических параметров узла крепления формообразованного при пластическом сверлении в тонкостенной заготовке с предварительно просверленным отверстием или при использовании специального инструмента / О.В. Золотов, Е.Ю. Татаркин, А.В. Пузанов // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 4-й Всероссийской научно-практической конференции 23 марта 2006 г. / Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. - С. 151-155
 10. Золотов, О.В. Расчет геометрических параметров узла крепления в трубчатой заготовке формообразованного при пластическом сверлении / О.В. Золотов, А.Н. Литовченко, Е.Ю. Татаркин // 3-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь". Секция «Технологии и оборудование автоматизированных производств». Подсекция «Технология машиностроения». / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2006. - С. 11-13

11. Золотов, О.В. Измерение активной мощности электродвигателя при обработке тонкостенных заготовок с помощью метода пластического сверления / О.В. Золотов, В.М. Коротких // 3-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь". Секция «Технологии и оборудование автоматизированных производств». Подсекция «Технология машиностроения». / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2006. - С. 9-10
12. Золотов, О.В. Измерение осевой нагрузки и крутящего момента в процессе пластического сверления / О.В. Золотов // Ресурсосберегающие технологии в машиностроении: материалы 5-ой Всероссийской научно-практической конференции 21-22 сентября 2006 г. / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – С. 93-96
13. Золотов, О.В. Технологические режимы обработки тонкостенных заготовок методом пластического сверления / О.В. Золотов, Е.Ю. Татаркин // Ресурсосберегающие технологии в машиностроении: материалы 5-ой Всероссийской научно-практической конференции 21-22 сентября 2006 г. / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. - Бийск: изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. - С. 96-100
14. Золотов, О.В. Особенности геометрии рабочей части инструмента для пластического сверления / О.В. Золотов, А.Н. Литовченко // Современные технологические системы в машиностроении (СТСМ – 2006): сборник тезисов докладов международной научно-технической конференции. / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. - Барнаул: изд-во Алт. гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 2006. – С. 116-119
15. Золотов, О.В. Инструмент для пластического сверления. / О.В. Золотов, А.Н. Литовченко, Е.Ю. Татаркин // Молодежь – Барнаулу: материалы науч. - практ. конф., 13-17 ноября 2006 г. – Барнаул: ПРИНТ-инфо, 2007. - С. 288-390.