

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



На правах рукописи

БЫШКИН АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**СВЕРЛЕНИЕ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ ДИАМЕТРОМ ДО 2 ММ
В ЗАГОТОВКАХ ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ В ПРЕДВАРИТЕЛЬНО
СОЗДАННОМ УПРУГОДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ**

Специальность 2.5.5. – Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук

доцент Куц Вадим Васильевич

КУРСК – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ сверления ОТВЕРСТИЙ в ЦВЕТНЫХ СПЛАВАХ.....	10
1.1 Анализ применения цветных сплавов в машиностроении.....	10
1.2 Обработка глубоких отверстий диаметром до 2 мм.....	13
1.3 Способ сверления глубоких отверстий диаметром до 2 мм в заготовках из цветных сплавов в ПУДС.....	16
1.4 Выводы по первой главе, цели и задачи исследования.....	21
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА И УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И УСТАНОВКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПУДС.....	23
2.1 Определение величин деформации заготовок из цветных сплавов для создания ПУДС.....	23
2.2 Разработка метода и устройства определения предела пропорциональности материалов заготовок из цветных сплавов.....	26
2.3 Разработка приспособления для создания ПУДС в заготовках из цветных сплавов в рамках экспериментального исследования.....	32
2.4. Устройство для создания ПУДС в заготовках при сверлении в заводских условиях.....	35
2.5 Выводы по главе 2.....	37
ГЛАВА 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ЗАГОТОВКАХ ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ В ПУДС.....	38
3.1. Исследование распределения напряжений в материале заготовок из цветных сплавов в процессе сверления заготовок в нормальном и ПУДС.....	38

3.2. Исследование силовых характеристик процесса сверления заготовок в нормальном и ПУДС.....	48
3.3. Исследование изменения внутренних напряжений в процессе сверлении заготовок из цветных сплавов в ПУДС.....	49
3.4 Выводы по главе 3.....	53
ГЛАВА 4. ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПУДС ЗАГОТОВОК ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ НА ПРОЦЕСС СВЕРЛЕНИЯ.....	54
4.1. Исследование влияния ПУДС заготовок из цветных сплавов на осевую силу резания.....	54
4.2. Исследование влияния ПУДС заготовок из цветных сплавов на крутящий момент	56
4.3. Исследование влияния ПУДС заготовок на период стойкости сверла ..	58
4.4. Исследование влияния ПУДС заготовок из цветных сплавов на шероховатость поверхности отверстия.....	60
4.5. Исследование влияния ПУДС заготовок из цветных сплавов на изменение профиля обработанного отверстия.....	62
4.6 Выводы по главе 4.....	69
ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ПУДС ЗАГОТОВОК ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ.....	70
5.1.1 Исследование осевой силы при сверлении заготовок из латуни ЛС59-1	70
5.1.2. Исследование осевой силы при сверлении заготовок из алюминиевого сплава Д16.....	73
5.2.1 Исследование глубины устойчивого сверления заготовок из сплава ЛС59-1	78

5.2.2 Исследование глубины устойчивого сверления заготовок из сплава Д16	81
5.3 Исследование периода стойкости сверл с учетом глубины устойчивого сверления заготовок из цветных сплавов в ПУДС	83
5.3.1 Исследование периода стойкости сверл при сверлении заготовок из сплава Д16	84
5.3.2 Исследование периода стойкости сверл при сверлении заготовок из сплава ЛС59-1	88
5.4 Разработка метода проектирования процесса сверления глубоких отверстий в заготовках из цветных сплавов в ПУДС	93
5.5 Построение оптимизационной модели сверления глубоких отверстий в заготовках из цветных сплавов в ПУДС	101
5.6 Выводы по главе 5	106
Общие выводы и результаты работы	107
Список литературы	110
Приложение 1	145
Приложение 2	146
Приложение 3	147
Приложение 4	148

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в отечественных отраслях промышленности нашли широкое применение детали из цветных сплавов (латуни и дюралюминия), что обусловлено их полезными технологическими свойствами, где обработка глубоких отверстий до 2 мм традиционно осуществляется путем их сверления с применением цельных сверл из быстрорежущих сталей и твердого сплава. Однако сверление отверстий до 2 мм накладывает определенные технологические ограничения, связанные с малой жесткостью инструмента, низкой прочностью осевого инструмента до 2 мм, тяжелыми условиями при выводе стружки из зоны резания, что не позволяет добиваться высоких показателей по стойкости сверла и производительности обработки.

Анализ современного состояния вопроса показал, что среди возможных способов повышения износостойкости режущего инструмента и обрабатываемости цветных сплавов резанием наиболее эффективным является обработка с предварительным или опережающим пластическим деформированием обрабатываемого материала, которые в основном связаны с токарной обработкой, а также при обработке протягиванием. При этом наблюдается наличие множества пробелов по обработке осевым инструментом, который требует отдельного детального исследования в связи с трудностями реализации предварительного или опережающего пластического деформирования, в связи с закрытой системой инструмент-заготовка. Таким образом, поиск решений лезвийной обработки осевым инструментом заготовок из цветных сплавов в предварительном напряженном состоянии является актуальной научно-производственной задачей.

Актуальность работы подтверждается выполнением ее в рамках гранта РФФИ (№19-38-90108).

Цель работы заключается в повышении периода стойкости и работоспособности спиральных сверл из быстрорежущей стали при сверлении глубоких отверстий диаметром до 2 мм в заготовках из цветных сплавов (широко используемых марок

латуни и дюралюминия) путем создания в зоне обработки предварительного упругодеформированного состояния (ПУДС).

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие задачи:

1) Разработать способ сверления глубоких отверстий малого диаметра в заготовках из цветных сплавов (широко используемых марок латуни и дюралюминия), предварительно сжатых до предела пропорциональности обрабатываемого материала.

2) Разработать способ и устройство для определения величины предела пропорциональности материалов из цветных сплавов.

3) Выполнить компьютерное исследование процесса сверления отверстий в заготовках из цветных сплавов в ПУДС.

4) Провести дисперсионный анализ влияния ПУДС заготовок из цветных сплавов на процесс сверления.

5) Выполнить экспериментальное исследование процесса сверления отверстий в ПУДС заготовок из цветных сплавов.

6) Разработать метод проектирования процесса сверления глубоких отверстий в заготовках из цветных сплавов в ПУДС, а также модель оптимизации режимов сверления по наибольшей производительности обработки при обеспечении заданного периода стойкости сверла.

Объектом исследования является процесс сверления глубоких отверстий до 2 мм сверлами из быстрорежущих сталей в заготовках из цветных сплавов (широко используемых марок латуни и дюралюминия) в ПУДС.

Методы исследования. Исследование процесса сверления глубоких отверстий до 2 мм в заготовках из цветных сплавов производилось на основе положений теории резания, математической статистики, планирования и организации эксперимента, компьютерного моделирования процессов резания методом конечных элементов.

Статистическая обработка полученных экспериментальных результатов производилась с использованием математического аппарата программных комплексов

Maple, STATISTICA и Excel. Компьютерное моделирование процессов сверления глубоких отверстий в заготовках из цветных сплавов в предварительном упругодеформированном состоянии выполнялось в среде конечно-элементного анализа DEFORM-3D.

Экспериментальное исследование проводилось с использованием современных стандартных и специальных измерительных приборов: датчик крутящего момента ZNNT-5Nm; S-образный тензодатчик производства УРАЛБЕС К-16А 500 кг с подвесами М12; тензометрическая станция ZET 017 с программной средой ZETLAB; инструментальный микроскоп ММИ-2; профилометр АБРИС-ПМ7 и пр.

Предметом исследования является метод проектирования процесса сверления глубоких отверстий в заготовках из цветных сплавов в ПУДС.

Достоверность результатов обеспечена корректностью постановки задач, обоснованным использованием аналитических зависимостей, строгостью использованного математического аппарата, корректной постановкой экспериментов, обработкой экспериментальных данных и подтверждается качественным и количественным соответствием теоретических исследований с экспериментальными данными.

Научная новизна работы заключается в установленных закономерностях процесса сверления глубоких отверстий диаметром до 2 мм сверлом из быстрорежущей стали в заготовках из цветных сплавов ЛС59-1 и Д16 в ПУДС от режимов обработки.

Практическая значимость работы заключается в разработке способа сверления глубоких отверстий малого диаметра в заготовках из цветных сплавов в предварительном упругодеформированном состоянии (патент №2760768), а также способа и устройства для определения величины предела пропорциональности материалов из цветных сплавов (патент №2686572).

Положения научной новизны, выносимые на защиту:

1. Результаты компьютерного моделирования распределения напряжений в материале заготовок, осевой силы, крутящего момента в процессе сверления загото-

вок из сплава Д16 в нормальном и предварительном упругодеформированном состоянии.

2. Полученные на основе натуральных экспериментов результаты дисперсионного анализа влияния ПУДС при сверлении сплава ЛС59-1 на осевую силу резания и крутящий момент, период стойкости сверл, шероховатость поверхности обработанного отверстия и изменение его профиля поперечного сечения.

3. Полученные на основе натуральных экспериментов при сверлении сплавов ЛС59-1 и Д16 в ПУДС результаты измерения и установленные зависимости для осевой силы, глубины устойчивого сверления, периода стойкости сверл от режимов обработки.

4. Разработанный метод и алгоритм проектирования процесса сверления глубоких отверстий в заготовках из цветных сплавов в ПУДС.

5. Разработанная модель оптимизации режимов сверления по наибольшей производительности обработки при обеспечении заданной стойкости сверла.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности п.6 «Исследование влияния режимов обработки на силы резания, температуру, стойкость инструмента и динамическую жесткость оборудования» специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены на предприятиях машиностроительного комплекса Курской области, в частности ООО «ГЕОТЕХНИК» г. Железногорск, АО «ГЕОМАШ» г. Щигры, что подтверждено соответствующими техническими актами.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 8-й Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология: сборник научных статей» (Курск, 2018), 7-ой Международной научно-практической конференции «Инновации, качество и сервис в технике и технологиях» (Курск, 2017), Международной научно-технической конференции «Машиностроительные технологические

системы» (Азов 2022 г.), III Всероссийской научно-технической конференции «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2022 г.), 8-й Всероссийской научно-технической конференции «Прогрессивные технологии и процессы» (Курск, 2021 г.), 2-й Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика А.А. Байкова «Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов» (Курск, 2021), 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Прогрессивные технологии и процессы» (Курск, 2021). В полном объеме диссертация была заслушана и одобрена на расширенном заседании кафедры «Машиностроительных технологий и оборудования» Юго-Западного государственного университета.

Публикации. Общий объем публикаций по теме работы составляет свыше 5 печ. л., из них соискателю принадлежит свыше 3 печ. л. По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе 5 публикаций в изданиях из перечня ВАК. 3 публикации Scopus, и 2 патента.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, библиографии (источников) и приложений. Работа выполнена на 148 страницах и содержит 88 рисунков, список использованной литературы из 316 наименований, 18 таблиц, 4 приложения.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ЦВЕТНЫХ СПЛАВАХ

1.1 Анализ применения цветных сплавов в машиностроении

Цветные металлы по общепринятой классификации делятся на редкие, благородные, легкие и тяжелые. Рассмотрим редкие металлы. К ним относятся титан, молибден, цирконий, вольфрам. Исходя из названия можно догадаться о их высокой стоимости. Применение таких металлов, как вольфрам и молибден, оправдано в инструментальной промышленности, где они выступают как легирующие добавки, резко повышающие физико-механические свойства инструмента. Соответственно цена сырья здесь имеет второстепенное значение, так как в цену инструмента закладывается еще много факторов, и аналогов этих материалов немного. Титан также является легирующим элементом в производстве жаростойких и нержавеющей сталей, также титан добавляют в алюминий, медь и никель для увеличения прочности. Титановые сплавы нашли широкое применение в таких отраслях промышленности, как военная, авиация, медицина, где уникальные свойства титана, а именно высокая прочность при малом весе, побеждают такие характеристики, как цена и трудная обрабатываемость. В связи с этими факторами в общем машиностроении применение титановых сплавов пока ограничено. К благородным металлам относят золото, платину, палладий, серебро. Данные металлы используют в ювелирной промышленности и приборостроении для военной промышленности, так как стоимость данных металлов в разы превышает стоимость других цветных металлов и сплавов. Переходя к легким металлам, можно отметить алюминий и магний. Магний благодаря своей легкости при относительной прочности применяется в авиации и машиностроении. Существуют как литейные магниевые сплавы, так и сплавы, обрабатываемые давлением. Однако магний имеет низкую коррозионную стойкость по сравнению с алюминием. Благодаря своим свойствам, а именно легкости, коррозионной стойкости, прочности и технологичности, алюминий – один из самых востребованных

цветных металлов. На данный момент тяжело найти отрасль, где бы не применялись алюминиевые сплавы. Данные сплавы нашли широкое применение в строительстве в качестве алюминиевых конструкций окон, фасадов, кровли и др. В авиации, космической, судостроительной и вагоностроительной промышленности алюминий является основным материалом для фюзеляжей, корпусов и деталей. Даже упаковка продуктов, таблеток и другой разнообразной продукции требует применения алюминия. Таким образом, можно сделать вывод о том, что алюминиевые сплавы лидируют по применению в отечественной промышленности [1,2].

Рассмотрим тяжелые цветные сплавы. К ним относятся олово, цинк, медь, свинец, ртуть. Олово применяется для лужения, пайки и в качестве функциональной поверхности или легирующего элемента. Цинк нашел широкое применение в промышленности в качестве функциональной поверхности или легирующего элемента. Свинец широко используется в строительстве, электротехнике и производстве военной техники, однако из-за безопасности доля его применения постоянно сокращается. Ртуть – уникальный металл, однако также имеет ограниченную область применения. Медь, как в чистом виде, так и в качестве сплава, нашла широчайшее применение в отечественной промышленности. В чистом виде – это практически незаменимый металл в электротехнике. В машиностроении нашли свое применение сплавы меди – это латуни и бронзы. Бронзы – это сплав меди с различными металлами и сплавами, поэтому они могут иметь самый разнообразный набор свойств, что в свою очередь расширяет их применение. Латуни – это сплав меди с цинком и легирующими добавками. Латуни являются самыми распространенными медными сплавами. Эксплуатационные характеристики латуни позволяют использовать ее широко во всех отраслях промышленности [1,2].

В отечественном машиностроении из всех цветных сплавов можно выделить два сплава – это Д16 и ЛС59-1. Они обладают хорошими физико-механическими свойствами и технологичны, это повлияло на их широкое применение в производстве.

Таким образом, анализ применения различных цветных сплавов показал, что Д16 и ЛС59-1 являются одними из самых распространенных цветных сплавов в машиностроении. Стоит отметить, что из данных сплавов изготавливается большая номенклатура деталей (рис. 1.1), например, жиклеры, вентили, штуцеры форсунки.



а)

б)



в)

г)

Рис 1.1 Детали, изготовленные из цветных сплавов:

а) жиклеры газовых плит, б) жиклеры карбюраторов,

в) форсунки, г) электромагнитные клапана форсунок

Эти детали объединяет наличие в них отверстий диаметром до 2 мм. Рассмотрим методы формообразования таких отверстий.

1.2 Обработка глубоких отверстий диаметром до 2 мм

В последнее время широкое развитие получили такие направления формирования отверстий, как электроэрозионное прошивание, лазерная и лучевая обработка [181-184]. Электроискровая обработка характеризуется использованием искровых разрядов малой длительности (10^{-5} – 10^{-7} с) при прямом подключении электрического тока (заготовка-анод, инструмент-катод). В зависимости от мощности искровых разрядов режимы делятся на жесткие и средние (для предварительной обработки), мягкие и особо мягкие (для окончательной). Использование мягких режимов обеспечивает отклонение размеров детали до 2 мкм при $Ra=0,01$ мкм.

Использование керосина или минерального масла в качестве диэлектрической жидкости предотвращает нагрев электролита.

Электроискровые режимы используют при обработке твердых сплавов, труднообрабатываемых материалов и сплавов, тантала, молибдена, вольфрама и т.д.. Обрабатывают сквозные и глубокие отверстия любого поперечного сечения, отверстия с криволинейными осями, вырезают детали из листовых заготовок, используя проволочные и ленточные электроды [181].

Электроимпульсная обработка характеризуется применением импульсов большой длительности (0,5-10 с), соответствующих дуговому разряду между электродами и более интенсивному разрушению катода. В этом случае на заготовку подается минус от электромашиного или электронного генератора. Это обеспечивает высокую производительность (в 8-10 раз больше, чем при электроискровых режимах) и небольшой износ инструмента. Электроимпульсная обработка применяется при предварительной обработке заготовок сложнопрофильных деталей (штампы, лопатки турбин и т.д.), изготовленных из труднообрабатываемых сталей и сплавов (лопатки – 08X17H34B5T3Ю2Л, 20X13, 15X18H22B6M2Л; штампы ХВГ, Х12Ф1, Х12М) [181].

Электронно-лучевая обработка основана на тепловом воздействии потока движущихся электронов на обрабатываемый материал, который в месте обработки

плавится и испаряется. Такой интенсивный нагрев вызывается тем, что кинетическая энергия движущихся электронов при ударе о поверхность обрабатываемой заготовки почти полностью переходит в тепловую, которая концентрируется на площадке диаметром 10 мкм и вызывает ее нагрев до 6000 °С. Обработка ведется в импульсном режиме: длительность импульса: 0,0001 – 0,000001 с; частота 50...5000 Гц. Высокая концентрация энергии и ее импульсное воздействие обеспечивают условия обработки, при которых поверхности заготовки, находящиеся на расстоянии 1 мкм от кромки электронного луча, разогреваются до 300 °С [181].

Однако стоимость применяемого оборудования и инструмента позволяет применять данный вид обработки на материалах, которые имеют плохие технологические свойства, например, нержавеющие стали, жаропрочные и другие. Материалы ЛС59-1 и Д16 имеют хорошие технологические свойства и хорошо обрабатываются лезвийной обработкой [185-226,271-298], что делает целесообразным сверление отверстий спиральными сверлами.

Большой научный вклад в исследование сверления внесли многие отечественные и зарубежные ученые. Процессы изнашивания инструмента при резании явились объектом исследования таких отечественных ученых технологической школы обработки материалов резанием, как А.А. Аваков [77], Т.Н. Лоладзе [66], А.Д. Макаров [114], Н.В. Талантов [74], П.И. Ящерицын [230,231], Ю.Л. Чигиринский [270], А.А. Рыжкин [174], С.В. Грубый [223], Я.Л. Гуревич [45,70], В.С. Мухин [209]. Основателями теории резания являются В.Ф. Бобров [26], А.М. Гильман [27], Г.И. Грановский [47,65], А.М. Даниелян [75], А.Д. Локтев [79]. Вопросам механики резания материалов посвящен труд Н.М. Зорева [68]. Основными учеными в сфере разработки инструмента и его геометрии являются В.А. Гречишников [192], В.И. Кокарев [192], С.В. Кирсанов [53,56,57,190-192], М.А. Краплин [62].

Стоит отметить, что сверление отверстий диаметром до 2 мм накладывает определенные технологические ограничения на режимы обработки, связанные с малой жесткостью инструмента, низкой прочностью осевого инструмента диаметром до 2 мм и тяжелыми условиями при выводе стружки из зоны резания [227-255].

Вследствие чего пока не будут решены данные проблемы, попытки интенсификации данного процесса будут актуальны для отечественного машиностроения с целью создания высокоэффективных конкурентоспособных производств как на внутреннем рынке, так и на внешнем.

Для достижения данной цели предлагаются различные технологические приемы, позволяющие решить описанные выше проблемы при сверлении отверстий диаметром до 2 мм. Например, для обеспечения благоприятных условий сверления цветных сплавов могут быть применены методы вибрационного сверления с введением дополнительных колебаний инструмента [3-26,28-38]. Стоит отметить, методы сверления с наложением осевых колебаний предложены такими учеными как А.И. Барботько, Д. Кумабэ, С.Г. Емельянов, В.Н. Подураев [17,24]. Также к методам, обеспечивающим благоприятные условия сверления цветных сплавов, относятся предварительный нагрев заготовки в зоне обработки с целью изменения физико-механических свойств обрабатываемого материала [39-52] и обеспечение подачи СОЖ в зону обработки [53-60]. Тепловыми процессами занимался А.Н. Резников [48], М.И. Клушин занимался вопросами охлаждения и смазки распыленными жидкостями при резании металлов [51]. Данные способы в различной мере положительно повлияли на процесс сверления, что обеспечило повышение производительности процесса или стойкости инструмента.

Применение различных покрытий инструмента [61-77], аспекты качества инструмента и производительности изучал Б.И. Гордиенко [62], В.Ф. Безъязычный исследовал влияние наноструктурированных покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей [178].

Автоматизация процесса [164-180,228], основателями которой являются Б.С. Балакшин [228], А.М. Корытин [232], Ю.М. Соломенцев [238], О.И. Драчев [238], А.К. Тугенгольд [180], также позволила повысить производительность процесса сверления.

Однако применение данных подходов при сверлении отверстий диаметром до 2 мм требует разработки и создания специальных приспособлений, имеющих достаточно сложное конструктивное исполнение.

1.3 Способ сверления глубоких отверстий диаметром до 2 мм в заготовках из цветных сплавов в ПУДС

В литературе достаточно часто упоминается применение опережающего пластического деформирования при лезвийной обработке [79-159]. Опережающее пластическое деформирование хорошо зарекомендовало себя при токарной обработке цилиндрических поверхностей как внешних, так и внутренних, о чем упоминается в работах А.Е. Древаль [59,141,153,158,226,227,233-237,252]. Однако в исследуемой литературе не освещен вопрос применения деформаций при обработке отверстий осевым инструментом. Стоит отметить направление комбинированной обработки протягиванием [89,111-114]. При этом протягиванием затруднительно получить отверстия малого диаметра, например, до 2 мм. В связи с чем можно утверждать, что работ, посвященных обработке отверстий малого диаметра с опережающим пластическим деформированием, найдено не было. Ввиду этого для интенсификации процесса сверления глубоких отверстий диаметром до 2 мм был предложен способ [261, 262, 270], суть которого заключается в том, что в заготовке перед началом обработки в области сверления создается ПУДС путем ее сжатия (целиком или локально) в направлении оси отверстия (рис.1.2).

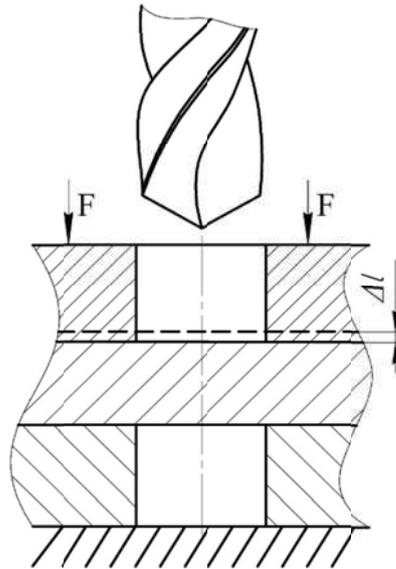


Рис 1.2 Схема нагружения образца

Сжатие (деформация) заготовки осуществляется на величину Δl , соответствующую пределу пропорциональности обрабатываемого материала, для чего необходимо использовать кондуктор специальной конструкции. ПУДС заготовки сохраняется на все время сверления, после окончания сверления и вывода сверла из отверстия снимается, кондуктор разжимается, и заготовка приобретает исходные размеры, которые были до сжатия.

В основу данного способа положена, предложенная автором гипотеза, что созданное в зоне сверления ПУДС будет способствовать снижению осевой силы и крутящего момента, а также повышению периода стойкости применяемого спирального сверла.

На основе теории пластичности деформационного типа, процесс резания с применением предварительного упругодеформированного состояния, созданного с помощью сжатия заготовки из цветного сплава кондукторной плитой, может быть описан с помощью известной зависимости [314, 315], как

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} - 2\mu\omega(\varepsilon_{kl}) D_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (1.1)$$

где C_{ijkl} – компоненты тензора 4-го ранга, тензоры модуля упругости обрабатываемого материала

$$C_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + 2\mu \Delta_{ijkl}, \quad (1.2)$$

где λ – первый коэффициент Ламе;

μ – второй коэффициент Ламе или модуль сдвига;

δ_{ij} и δ_{kl} – символы Кронекера;

$\omega(\varepsilon_{kl})$ – функция пластичности Ильюшина;

Δ_{ijkl} – компоненты тензора, равные

$$\Delta_{ijkl} = \delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}; \quad (1.3)$$

D_{ijkl} – компоненты тензора, равные

$$D_{ijkl} = \Delta_{ijkl} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\delta_{kl}; \quad (1.4)$$

ε_{kl} – компонент тензора деформаций обрабатываемого материала.

Второе слагаемое в формуле (1.1) описывает составляющую напряжения соответствующее пластической деформации.

С учетом особенностей рассматриваемого способа сверления компоненты тензора ε_{kl} будут определяться как,

$$\varepsilon_{kl} = \varepsilon_{kl}^{\text{конд.}} + \varepsilon_{kl}^{\text{св-ла}}, \quad (1.5)$$

где $\varepsilon_{kl}^{\text{конд.}}$ – составляющая компонента тензора деформаций обрабатываемого материала создаваемых кондуктором на этапе предварительного сжатие заготовки;

$\varepsilon_{kl}^{\text{св-ла}}$ – составляющая компонента тензора деформаций обрабатываемого материала создаваемых в процессе сверления с учетом его контакта со сверлом.

Смысл формулы (1.1) состоит в том, что на этапе предварительного сжатия материала заготовки до точки предела пропорциональности учитывается только первое слагаемое (1), т.к. функция пластичности Ильюшина $\omega(\varepsilon_{kl})=0$, т.е. материал заготовки имеет только упругие деформации $\varepsilon_{kl}^{\text{конд.}}$. На этапе непосредственно сверления, материал заготовки, под воздействием сверла уже будет испытывать упруго-пластические деформации $\varepsilon_{kl}^{\text{конд.}} + \varepsilon_{kl}^{\text{св-ла}}$, в формуле (1.1) будет учитываться допол-

нительно вторая составляющая, для точек материала, где $\omega(\varepsilon_{kl}) > 0$. Это позволяет предположить, что для осуществления процесса резания сверлу необходимо уже сдеформировать материал на меньшую, по сравнению с традиционным сверлением, величину, исходя из того, что

$$\varepsilon_{kl}^{св-ла} < \varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^{конд}. \quad (1.6)$$

Из всего вышесказанного следует, что сверление заготовок из цветных сплавов в предварительно упругодеформированном состоянии, должно характеризоваться меньшей величиной осевой силы и крутящим моментом.

Оценить долю уменьшения осевой силы, можно приблизительно, на основе следующих рассуждений. Так, например, исходя из кривой растяжения Д16 (рис. 1.3, [317]), следует, что напряжение пропорциональности $\sigma_{np} = 240$ МПа, а напряжение текучести $\sigma_T = 380$ МПа.

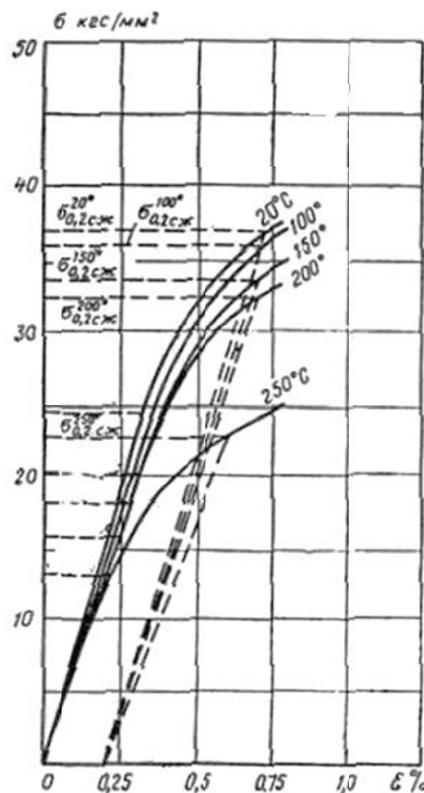


Рис. 1.3. Диаграмма сжатия до предела текучести сплава Д16 при разной температуре [317]

Принимая допущение, что площадь поперечного сечения образца остаётся неизменным, получим выражение для оценки силы, действующей сверлом на участок поверхности в зоне резания в нормальном состоянии материала

$$P_1 = \sigma_T S, \quad (1.7)$$

и при предварительном уругодеформированном состоянии

$$P_2 = (\sigma_T - \sigma_{np}) S. \quad (1.8)$$

Находя отношение этих сил

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\sigma_T}{(\sigma_T - \sigma_{np})}, \quad (1.9)$$

получим выражение для оценки величины уменьшения силы резания при сверлении

$$\left(1 - \frac{\sigma_T - \sigma_{np}}{\sigma_T} \right) \times 100\%. \quad (1.10)$$

Исходя из того, что предварительное напряжение создаваемое кондуктором в зоне обработки не одинаково и не превышает величины $\sigma_{np} = 240$ МПа, был построен график изменения величины доли уменьшения осевой силы при сверлении от напряжения, создаваемого кондуктором (рис. 1.4).

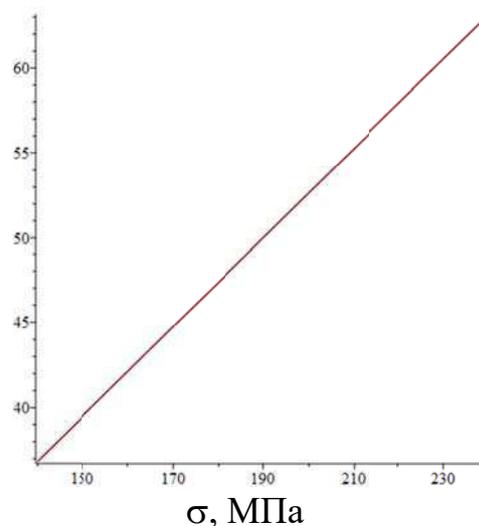


Рис. 1.4 Изменение величины доли уменьшения осевой силы при сверлении Д16 в ПУДС от напряжения

Из рисунка следует, что осевая сила будет уменьшаться от 37 до 63 % по сравнению с традиционным сверлением.

1.4 Выводы по первой главе, цели и задачи исследования

1. На основании выполненного анализа установлено, что наибольшее распространение в отечественном машиностроении получили цветные сплавы марок ЛС59-1 и Д16 ввиду их относительно невысокой стоимости, антикоррозийной стойкости и физико-механических свойств.

2. Существующие методы обработки глубоких отверстий диаметром до 2 мм не позволяют достигнуть высоких показателей по производительности обработки, в частности при сверлении спиральными сверлами большого периода стойкости, что связано с их малой жесткостью, прочностью, затрудненным отводом стружки и подачей СОЖ в зону обработки.

3. Для повышения стойкости спиральных сверл и снижения осевой силы и крутящего момента при сверлении отверстий диаметром до 2 мм и обеспечения высокой производительности обработки предложен способ сверления глубоких отверстий в заготовках из цветных сплавов в ПУДС.

4. На основе теоретических исследований установлено, что при сверлении цветных сплавов предложенным способом осевая сила будет уменьшаться, в частности для сплава Д16 от 37 до 63 % по сравнению с традиционным сверлением.

Цель работы заключается в повышении периода стойкости и работоспособности спиральных сверл из быстрорежущей стали при сверлении глубоких отверстий диаметром до 2 мм в заготовках из цветных сплавов (широко используемых марок латуни и дюралюминия) путем создания в зоне обработки предварительного упругодеформированного состояния (ПУДС).

Для достижения поставленной цели сформированы следующие задачи исследования:

- 1) Разработать способ сверления глубоких отверстий малого диаметра в заготовках из цветных сплавов (широко используемых марок латуни и дюралюминия).
- 2) Разработать способ и устройство для определения величины предела пропорциональности материалов из цветных сплавов.
- 3) Выполнить компьютерное исследование процесса сверления отверстий в заготовках из цветных сплавов в ПУДС.
- 4) Провести дисперсионный анализ влияния ПУДС заготовок из цветных сплавов на процесс сверления.
- 5) Выполнить экспериментальное исследование процесса сверления отверстий в ПУДС заготовок из цветных сплавов.
- 6) Разработать метод проектирования процесса сверления глубоких отверстий в заготовках из цветных сплавов в ПУДС, а также модель оптимизации режимов сверления по наибольшей производительности обработки при обеспечении заданной стойкости сверла.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА И УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И УСТАНОВКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПУДС

2.1 Определение величин деформации заготовок из цветных сплавов для создания ПУДС

Для реализации предложенного способа сверления глубоких отверстий в заготовках из цветных сплавов (см. п.п. 1.3) необходимо определить величины предельных деформаций заготовок, имеющих различные размеры, а также наибольшее усилие сжатия, которое будет соответствовать напряжению пропорциональности обрабатываемого материала [257,263,269,300].

Величины наибольших предварительных деформаций заготовок из цветных сплавов, которые будут соответствовать напряжению пропорциональности обрабатываемого материала, и при которых будем выполнять исследования процесса сверления, могут быть определены на основе закона Гука [160-13]

$$\sigma_{\text{пр}} = E \cdot \varepsilon,$$

где $\sigma_{\text{пр}}$ – напряжение пропорциональности рассматриваемого материала; E – модуль упругости рассматриваемого материала; ε – относительная продольная деформация сжимаемого материала, которая определяется как

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l},$$

где Δl – величина абсолютного продольного сжатия заготовки (деформации); l – первоначальная длина заготовки.

С учетом этих зависимостей получим выражение для расчета величины деформации заготовки

$$\Delta l = l \cdot \frac{\sigma_{\text{пр}}}{E}.$$

Для рассматриваемых материалов с учетом их физико-механических свойств (табл. 2.1) были построены графики изменения предельных величин деформаций за-

готовок от их длины (рис. 2.1), где пунктирная линия соответствует сплаву ЛС59-1, сплошная – Д16.

Таблица 2.1 – Физико-механические свойства рассматриваемых материалов

№	Материал	E , ГПа	$\sigma_{пр}$, МПа
1	Д16	72	250
2	ЛС59-1	115	420

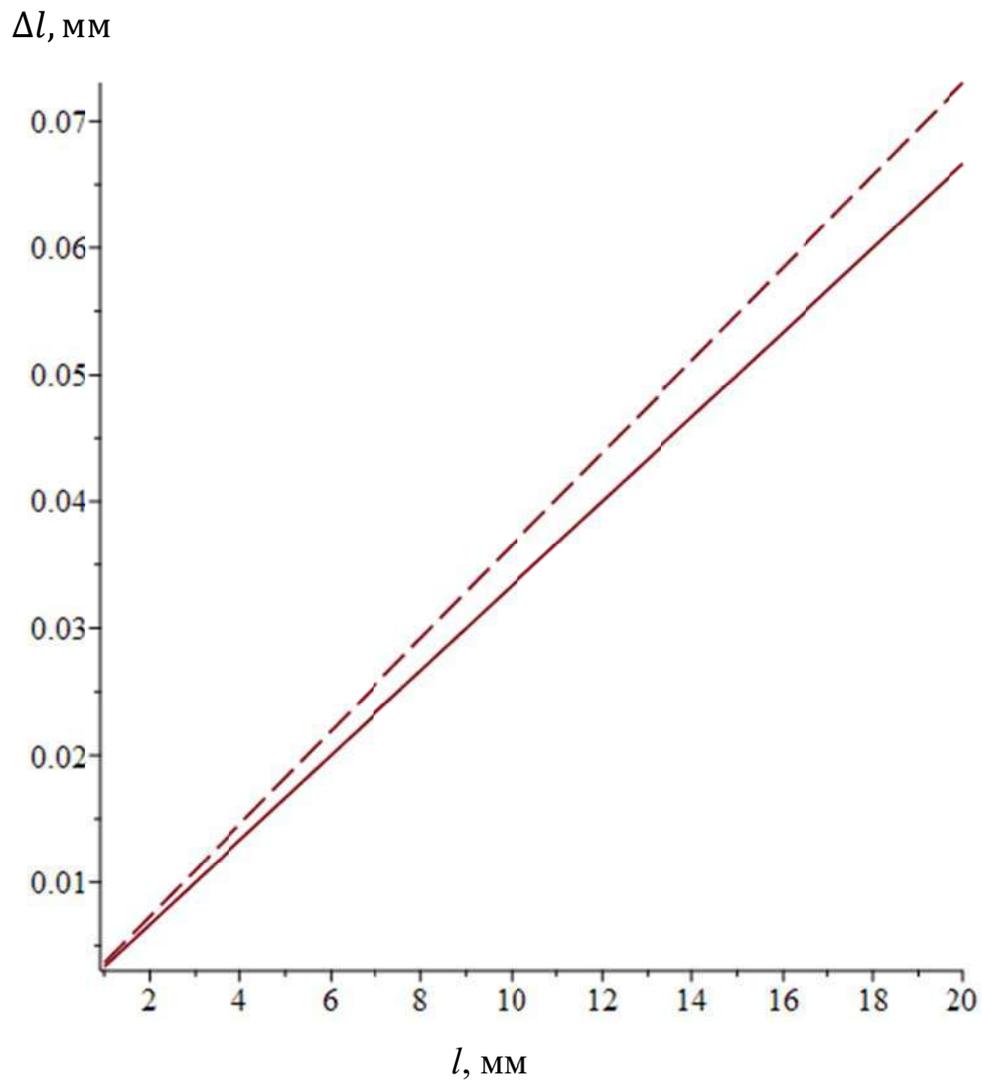


Рис. 2.1 Величины предельных деформаций (Δl , мм) для заготовок из рассматриваемых материалов заданной длины (l , мм), где пунктирная линия соответствует сплаву ЛС59-1, сплошная – Д16

Также при проектировании приспособлений для создания ПУДС заготовок требуется знание величины наибольшего усилия сжатия, которое может быть найдено из известного выражения для определения величины напряжения

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{F}{S},$$

где F – усилие сжатия заготовок; S – площадь поперечного сечения заготовок.

Отсюда получим

$$F = \sigma_{\text{пр}} S.$$

Исходя из того, что в исследовании будут использоваться заготовки, нарезанные из прутка диаметром ($D_{\text{пр}}$), а напряжение будет создаваться кондуктором с отверстием равным радиусу нарезаемого отверстия ($D_{\text{отв}}$), окончательно получим следующее выражения для определения наибольшего усилия сжатия

$$F = \frac{1}{4} \pi \sigma_{\text{пр}} (D_{\text{пр}}^2 - D_{\text{отв}}^2).$$

На рис. 2.2 показаны графики изменения наибольшего усилия сжатия для прутка диаметром 10 мм при диаметрах обрабатываемых отверстий от 1 до 3 мм.

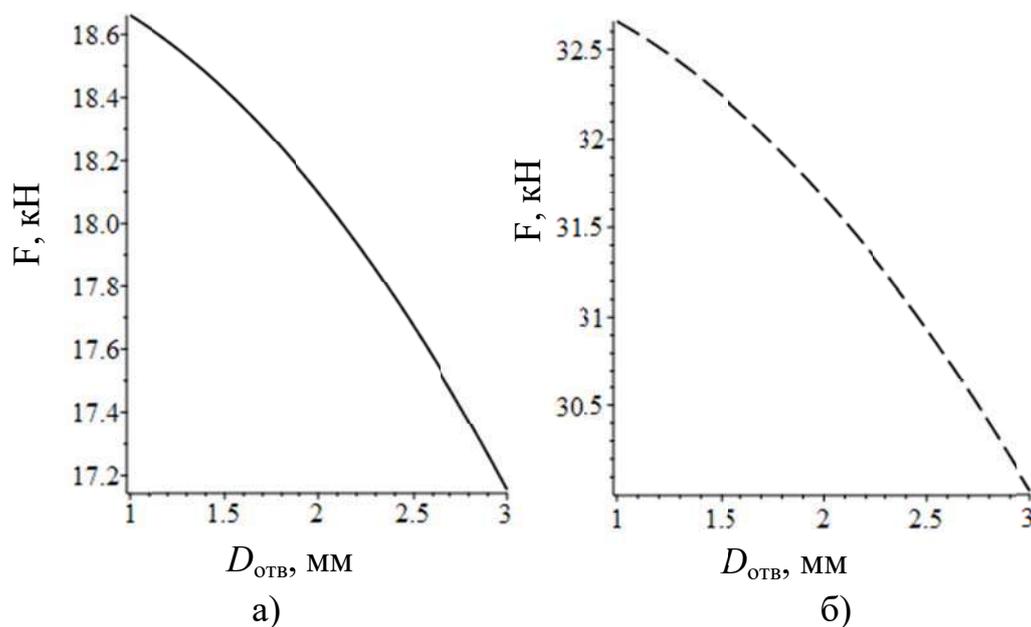


Рис. 2.2 Наибольшее усилие сжатия (кН) прутка диаметром 10 мм при различных диаметрах отверстий (мм) для рассматриваемых материалов:

а) Д16; б) ЛС59-1

Полученные зависимости будут использованы при дальнейшем планировании и выполнении экспериментов по исследованию процесса сверления заготовок из цветных сплавов в ПУДС.

2.2 Разработка метода и устройства определения предела пропорциональности материалов заготовок из цветных сплавов

Непостоянство значений физико-механических свойств, применяемых в промышленности марок цветных сплавов, требует для реализации предложенного способа сверления глубоких отверстий (см. п. 1.3) установления значений предела упругости и пропорциональности материалов, соответствующих конкретной партии заготовок или отдельной заготовки [257,263,269,300].

Для определения предела упругости и пропорциональности в промышленности применяют ГОСТ 1497-84 «МЕТАЛЛЫ. Методы испытаний на растяжение» и ГОСТ 25.503-97 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие», которые подразумевают подготовку (изготовления) испытуемых цилиндрических образцов строго заданного типа и размера, что характеризуется, прежде всего, высокими временными и материальными затратами на подготовку и проведение испытаний. Это обстоятельство затрудняет использование предложенного способа сверления глубоких отверстий на производстве, особенно в условиях невысоких материальных запасов на предприятии и необходимости частых поставок обрабатываемых материалов зачастую от разных производителей.

В связи с этим был разработан способ и устройство для определения предела упругости и пропорциональности, не требующий трудоемкой подготовки испытуемого образца сложной формы, а в некоторых случаях позволяющий проводить измерения непосредственно с использованием обрабатываемых заготовок с учетом их конкретной геометрии, и имеющий высокую степень автоматизации.

При определении пределов упругости и пропорциональности испытуемый образец (3) устанавливают между неподвижной опорной площадкой (1) и подвижной опорной площадкой (2), нагружают образец предварительной малой нагрузкой F_0 регистрируемой посредством датчика нагрузки (4) и фиксируют положение подвижной опоры, определяют размер l_0 . После чего образец дискретно нагружают перемещением подвижной опоры в направлении неподвижной опоры на величину Δl , фиксируя величину нагрузки F_j (рис. 2.3). Величину перемещения Δl выбирают исходя из необходимой точности измерения.

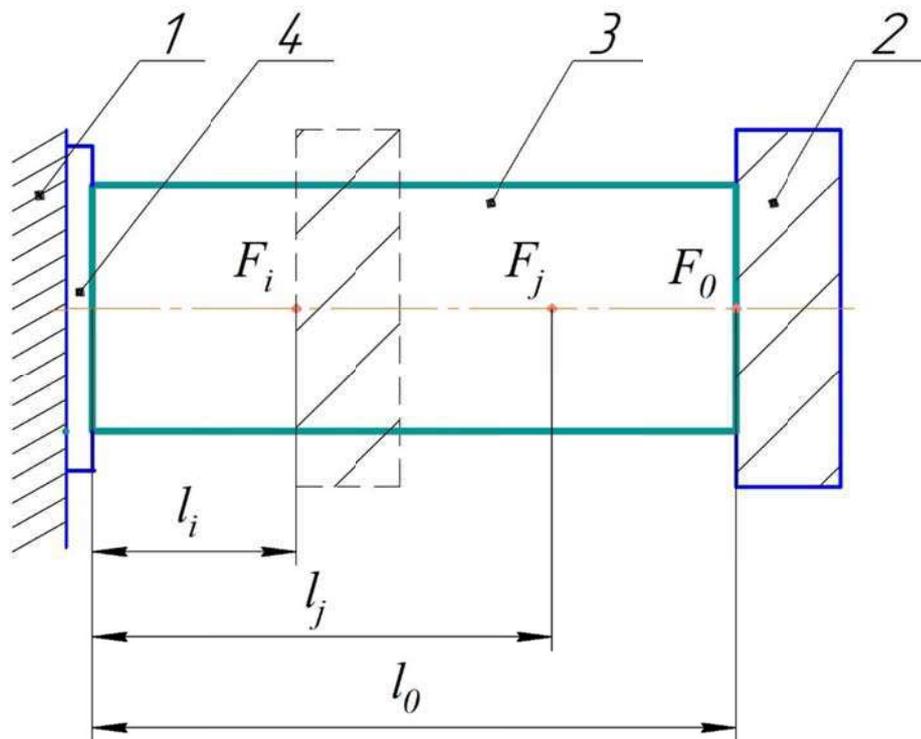


Рис. 2.3 Схема нагружения образца

При измерении предела упругости материала после первого нагружения нагрузку уменьшают до величины равной F_0 , и регистрируют положение подвижной опоры, определяют размер l_j . Если условие

$$\frac{|\bar{\varepsilon}l_0 - l_j|}{l_0} \geq 0,0005 \quad (2.1)$$

не выполняется, то повторяют несколько циклов нагружения, перемещая подвижную опору в каждом цикле на величину $n \cdot \Delta l$, где n – номер цикла нагружения, и фиксируя новое значение нагрузки F_j . Циклы нагружения и разгрузки делают до тех

пор, пока не выполнится условие (1). После этого определяют величину предела упругости, как

$$\sigma_u = \frac{F_u}{S}, \quad (2.2)$$

где S – площадь поперечного сечения образца; F_u – величина нагрузки, соответствующая пределу упругости материала образца

$$F_u = \frac{F_i + F_{i-1}}{2}, \quad (2.3)$$

где F_i и F_{i-1} – величина нагрузки при i -м и $i-1$ -м цикле нагружения, после которого выполнилось условие (2.1);

Погрешность измерения величины предела пропорциональности материала (рис. 2.4), как величины, измеряемой косвенным методом, укрупненно оценим по формуле [18-19]

$$\Delta\sigma_u = \left| \frac{\partial\sigma_u}{\partial F_u} \right| \Delta F + \left| \frac{\partial\sigma_u}{\partial S} \right| \Delta S = \frac{\Delta F}{S} + \frac{F_u \Delta S}{S^2}, \quad (2.4)$$

где ΔF – погрешность определения нагрузки, соответствующей условию (2.1)

$$\Delta F = \Delta F_1 + \Delta F_2 \quad (2.5)$$

где ΔF_1 – погрешность определения нагрузки на i -м и $i+1$ -м цикле нагружения; ΔF_2 – погрешность, вызванная ошибкой определения условия (2.1).

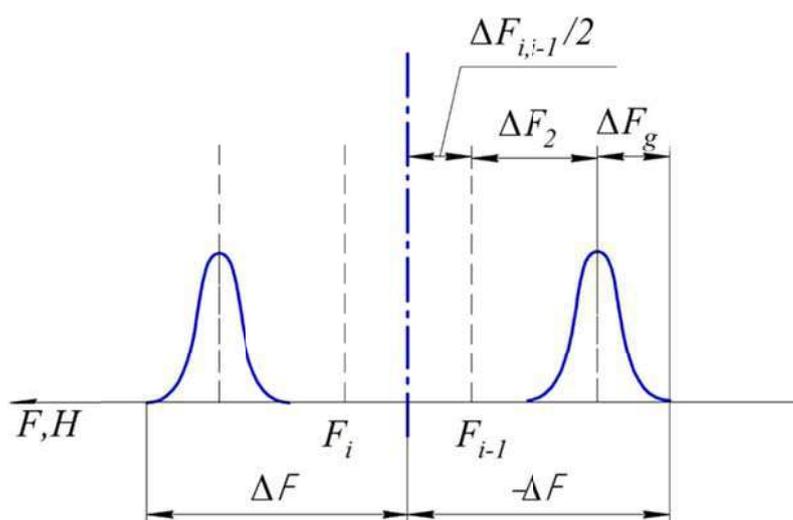


Рис. 2.4 Определение погрешности измерения предела упругости и пропорциональности

Величину погрешности определения нагрузки на i -м и $i+1$ -м цикле нагружения определим, как

$$\Delta F_1 = \Delta F_{i,i-1} + \Delta F_g, \quad (2.6)$$

где $\Delta F_{i,i-1}$ – погрешность, определяемая величиной дискретности перемещения подвижной опоры, ΔF_g , – погрешность датчика, используемого для измерения нагрузки,

$$\Delta F_{i,i-1} = (F_i - F_{i-1})/2. \quad (2.7)$$

Погрешность, вызванная ошибкой определения условия (1), определим как

$$\Delta F_2 = \left[\frac{2\Delta F_g}{\Delta F_{1,0}} \right] \cdot \Delta F_{1,0}, \quad (2.8)$$

где $\Delta F_{1,0}$ – величина изменения нагрузки при нулевом и 1-м шаге нагружения образца

$$\Delta F_{1,0} = F_1 - F_0. \quad (2.9)$$

Параллельно может быть определена величина предела пропорциональности материала по формуле (рис 2.5)

$$\sigma_p = \frac{F_i + F_{i-1}}{2S}, \quad (2.10)$$

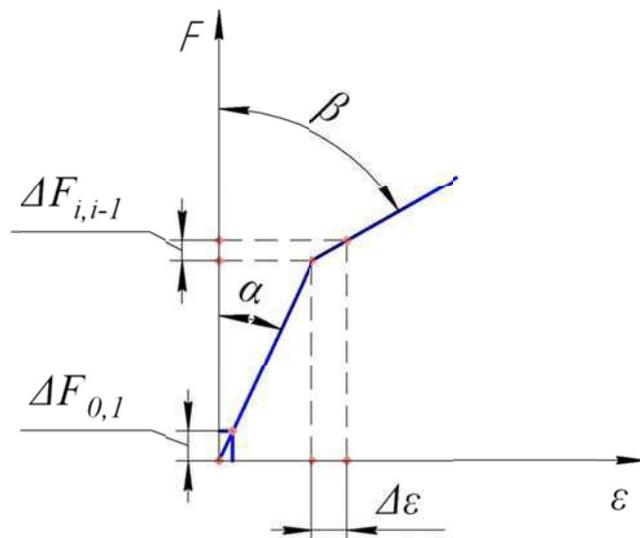


Рис. 2.5 Определение предела пропорциональности материала

где F_i и F_{i-1} – величина нагрузки при i -м и $i-1$ -м цикле нагружения, соответствующая моменту выполнения условия

$$\operatorname{tg} \beta_i \geq 1,5 \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (2.11)$$

или

$$\frac{\operatorname{tg} \beta_i}{\operatorname{tg} \alpha} \geq 1,5, \quad (2.12)$$

где β_i – угол наклона кривой сжатия на i -м цикле нагружения; α – угол наклона кривой сжатия на первом цикле нагружения.

С учетом того, что

$$\operatorname{tg} \beta_i = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta F_{i,i-1}} \text{ и } \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta F_{1,0}}, \quad (2.13)$$

где $\Delta \varepsilon$ – величина изменения деформации, приходящаяся на один шаг нагружения, то условие (12) можно представить, как

$$\frac{\Delta F_{1,0}}{\Delta F_{i,i-1}} \geq 1,5. \quad (2.14)$$

Погрешность измерения предела пропорциональности $\Delta \sigma_p$ можно оценить по формуле (4) с учетом того, что

$$\Delta F = \left[2\Delta F_g \cdot \left(\frac{\Delta F_{1,0} + \Delta F_{i,i-1}}{\Delta F_{i,i-1}^2 \cdot \Delta F_{1,0}} \right) \right] \cdot \Delta F_{1,0}. \quad (2.15)$$

Рассмотрим пример расчета погрешности измерения предела упругости. При условии, что значение изменения нагрузки на 0-ой и 1-ой итерации нагрузки было 30 Н, а погрешность датчика, используемого для измерения нагрузки 0,01 Н, тогда ошибка измерения при $\Delta F_{i,i-1} = 18\text{Н}$ будет равна

$$\Delta F_1 = \Delta F_{i,i-1} + \Delta F_g = 18 + 0,01 = 18,01 \text{ Н},$$

$$\Delta F_2 = \left[\frac{2 \cdot 0,01}{30} \right] \cdot 30 = 30 \text{ Н},$$

$$\Delta F = \Delta F_1 + \Delta F_2 = 18,01 + 30 = 48,01 \text{ Н}.$$

Учитывая, что площадь образца квадратного сечения со сторонами равными 1 см равна $S = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, а погрешность измерения $\Delta S = 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ и $F_i = 12000 \text{ Н}$ (нагрузка на i -й итерации), получим следующее значение:

$$\Delta \sigma_u = \frac{\Delta F}{S} + \frac{F \Delta S}{S^2} = \frac{48,01}{0,0001} + \frac{12000 \cdot 0,00000002}{0,00000001} = 483400 \text{ Па} = 0,48 \text{ МПа}$$

Рассмотрим пример расчета погрешности измерения предела пропорциональности при $\Delta F_{i,i-1} = 19\text{Н}$. Тогда погрешность определения нагрузки определим по формуле (15)

$$\Delta F = \left[2 \cdot 0,01 \cdot \left(\frac{19 + 30}{30 \cdot 19} \right) \right] \cdot 30 = 30\text{Н},$$

и далее

$$\Delta\sigma_p = \frac{\Delta F}{S} + \frac{F\Delta S}{S^2} = \frac{30}{0,0001} + \frac{12000 \cdot 0,00000001}{0,00000001} = 302400 \text{ Па} = 0,3 \text{ МПа}.$$

В рамках представленного способа было разработано и спроектировано экспериментальное устройство для определения пределов упругости и пропорциональности материалов для последующего сверления заготовок в напряженно деформированном состоянии (рис. 2.6) [257,263,269,300].

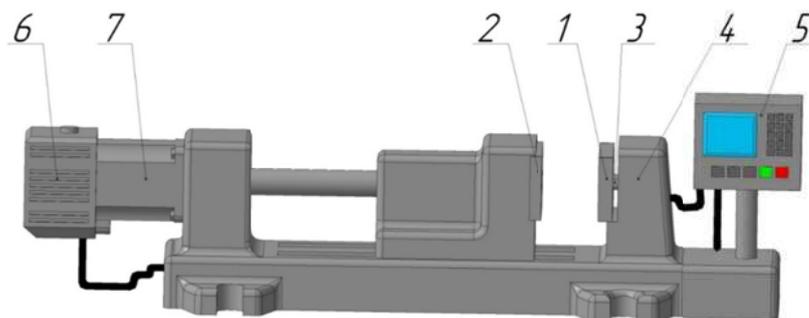


Рис. 2.6 Устройство для автоматизированного определения пределов упругости и пропорциональности материалов

При определении величины предела пропорциональности материала испытуемый образец устанавливают между неподвижной опорной площадкой 1 и подвижной опорной площадкой 2. Нагружают образец предварительной малой нагрузкой, регистрируемой посредством датчика нагрузки 3, регистрирующего напряжение между неподвижной опорной площадки 1 и корпусом 4. После чего посредством блока управления 5 подают сигнал на шаговый двигатель 6 и нагружают образец путем перемещения подвижной опорной площадки 2 в сторону неподвижной опорной площадки 3 при помощи винта 7. Величину перемещения выбирают исходя из необходимой точности измерения. После первого нагружения снимают нагрузку путем

перемещения подвижной опоры в сторону обратной от неподвижной опоры при помощи винта 7 и снимают показание с датчика нагрузки 3, если величина нагрузки соответствует величине предварительной малой нагрузки, то повторяют нагружение путем перемещения подвижной опорной площадки 2 в сторону неподвижной опорной площадки 1 при помощи винта 7.

2.3 Разработка приспособления для создания ПУДС в заготовках из цветных сплавов в рамках экспериментального исследования

Для создания ПУДС в заготовках при проведении экспериментальных исследований с целью выявления влияния технологических параметров на процесс сверления отверстий была разработана экспериментальная установка.

Основная ее часть выполнена из двух закаленных пластин рис.2.7.

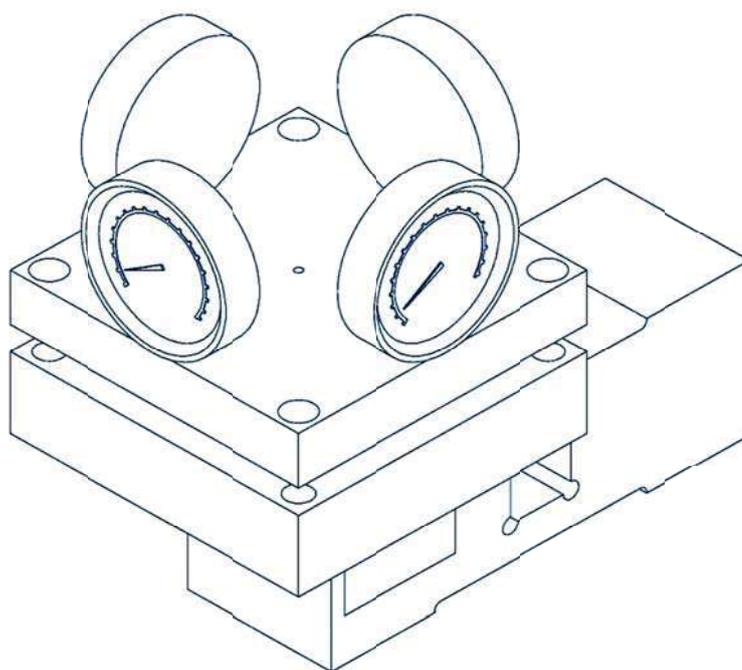


Рис.2.7 Элемент конструкции нагружения при экспериментальных исследованиях процесса сверления отверстий в заготовках в ПУДС

В верхней пластине, которая выполняет роль кондуктора и служит для доступа сверла к испытуемой заготовке, имеется центральное отверстие, диаметр которого равен диаметру обрабатываемого отверстия. Также в данной плите находятся от-

верстия для крепления стрелочных индикаторов и болтов, позволяющих создать требуемую нагрузку на обрабатываемую заготовку. Требуемая нагрузка создается за счет того, что болты, проходящие через верхнюю пластину, вкручиваются в нижнюю пластину, в которой имеются отверстия с резьбой, а заготовка находится в центральной части между пластинами. Величина необходимой нагрузки формируется следующим образом. На нижнюю пластину в центре устанавливается заготовка, на нее помещают верхнюю пластину, которая предварительно фиксируется болтами. После чего устанавливаются индикаторы в нулевое положение. Затем происходит последовательная затяжка болтов по четверти оборота и повторяется до тех пор, пока на всех четырех индикаторах не будет достигнуто определенное значение перемещения. Значение перемещения на индикаторах должно быть равно величине деформации, соответствующей пределу пропорциональности материала обрабатываемой заготовки [256].

Также в нижней части пластины выполнены отверстия с резьбой для крепления датчиков, регистрирующих осевую нагрузку и крутящий момент. Для измерения крутящего момента применялся датчик ZNNT-5Nm (рис.2.8).



Рис. 2.8 Фрагмент исследования крутящего момента при сверлении отверстий в ПУДС

Датчик ZNNT-5Nm обладает следующими характеристиками: диапазон измерения 0-5Нм, чувствительность: $1,5 \pm 0,1$ мВ/В; нелинейность: $\pm 0,05\%F.S$; погреш-

ность гистерезиса: $\pm 0,05\%F.S$; погрешность повторяемости: $\pm 0,05\%F.S$; нулевой температурный коэффициент: $\pm 0.03\%F.S / 10^{\circ}C$; напряжение питания: рекомендуется 8 В (может быть выбрано пользователем); входное сопротивление: $385 \pm 35\Omega$; выходное сопротивление: коэффициент выходной температуры: $\pm 0.03\%F.S / 10^{\circ}C$; диапазон рабочих температур: $-30 \sim +70^{\circ}C$; материал – нержавеющая сталь.

Датчики устанавливались на станок Wabeco CC-1410 LM посредством тисков и специально выполненных метизов.

Для измерения осевой силы применялся датчик производства УРАЛВЕС К-16А 500 кг рис.2.9.



Рис. 2.9 Фрагмент исследования осевой силы при сверлении отверстий в ПУДС

Датчик силы обладает следующими характеристиками: максимальная нагрузка (E_{max}) 500 кг; выходной сигнал $2,0 \pm 0,002$ мВ/В; класс точности по ГОСТ 8.631–2013 (OIML R 60:2000) С3; вид преобразуемой силы растяжение/сжатие; максимальное число поверочных интервалов (N_{max}) 3000; входное сопротивление 400 ± 20 Ом; выходное сопротивление 352 ± 5 Ом; сопротивление изоляции ≥ 5000 Мом; предельные значения температуры от -30 до $+50$ °С; значение температуры при монтаже от -10 до $+50$ °С; предел допустимой нагрузки (E_{lim}) 125 % от НПИ; разруша-

ющая перегрузка 200 % от НПИ; напряжение питания от 5 до 12 В; максимальное напряжение питания 15 В; степень защиты (по ГОСТ 14254) IP 67; материал корпуса датчика – легированная сталь; длина кабеля 2,6 м; вес тензодатчика 1,62 кг.

Данные снимались посредством тензометрической станции ZET 017 в программной среде ZETLAB (рис. 2.10).

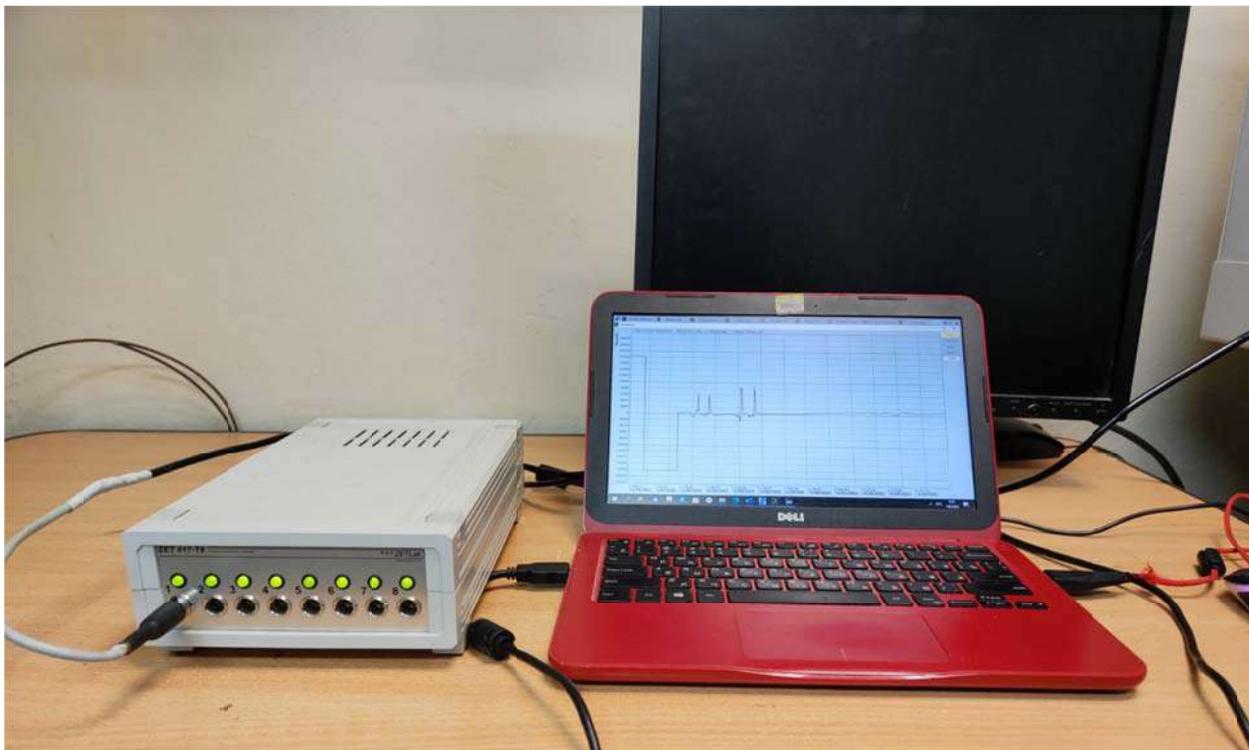


Рис. 2.10 Фрагмент обработки результатов исследования осевой силы и крутящего момента при сверлении цветных сплавов в ПУДС

Использование генератора сигналов позволило в программной среде ZETLAB получить электрические сигналы различной формы с частотой сигнала 10^{-1} с и исследовать реакцию систем на различные виды возбуждений с используемых датчиков.

2.4. Устройство для создания ПУДС в заготовках при сверлении в заводских условиях

Устройство, представленное в п. 2.3, характеризуется высокими временными затратами, приходящимися на закрепление и на ПУДС заготовок, что не позволяет

его использовать в производственных условиях. Для сокращения этих временных затрат было разработано новое устройство, принцип действия которого поясняется рис. 2.11.

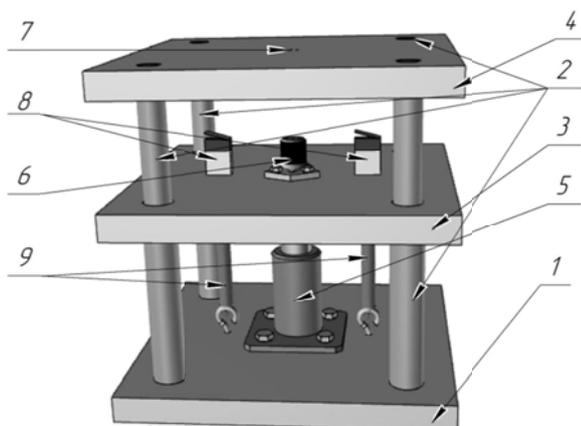


Рис. 2.11 Устройство для сверления в ПУДС

Устройство состоит из основания 1, которое крепится на столе станка, на котором закреплены четыре колонны 2, на которых расположены неподвижная плита 3 и подвижная плита 4, приводимая в действие гидроцилиндром 5. При этом между подвижной плитой 4 и неподвижной плитой 3 устанавливается заготовка 6 под сменным кондуктором 7. При сверлении подвижная плита 4 под действием гидроцилиндра 5 сближается по четырем колоннам 2, как по направляющим, к неподвижной плите 3 до срабатывания датчиков 8, которые настроены на размер позволяющий создать упруго напряженное состояние заготовки. После процесса сверления усилие на гидроцилиндре 5 снимают, и подвижная плита 4 возвращается в исходное положение под действием пружин 9.

Устройство работает следующим образом. Заготовка 6 устанавливается на подвижную плиту 4 и посредством гидроцилиндра 5 по направляющим четырем колоннам 2 прижимается к неподвижной плите 3 до срабатывания датчиков 8. При этом срабатывание датчиков 8 настроено таким образом, что образец подвергают ПУДС равному пределу пропорциональности материала заготовки, то есть при снятии нагрузки размеры заготовки остаются прежними, а во время обработки заготовка находится в напряженном состоянии, что способствует уменьшению сил резания,

затрачиваемых на разрушение материала в зоне резания, что в свою очередь повышает стойкость инструмента. После снятия нагрузки заготовку удаляют и процесс повторяется заново.

2.5 Выводы по главе 2

1. Установлены зависимости по определению величин ПУДС заготовок, имеющих различные размеры, а также наибольших усилий сжатия, которые будут соответствовать напряжению пропорциональности обрабатываемого материала, необходимые для реализации предложенного в работе способа сверления глубоких отверстий в заготовках из цветных сплавов в ПУДС.

2. Разработан новый способ и устройство, позволяющие определить ПУДС и предел пропорциональности материалов, соответствующих конкретной партии заготовок или отдельной заготовки с учетом их геометрии. В работе приводится вывод формул для расчета измеряемых величин и погрешности их определения.

3. Для выполнения экспериментальных исследований процесса сверления отверстий в ПУДС заготовках из цветных сплавов была разработана установка, состоящая из приспособления для создания ПУДС в заготовках, и системы датчиков с тензостанцией, позволяющей фиксировать и обрабатывать данные осевой силы и крутящего момента при сверлении.

4. Разработано устройство для создания в заготовках ПУДС при сверлении отверстий в заводских условиях и позволяющее снизить временные затраты на закрепление и сжатие заготовок.

ГЛАВА 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ЗАГОТОВКАХ ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ В ПУДС

Данное исследование было выполнено на основе моделирования процесса сверления сквозного отверстия в среде конечно-элементного анализа DEFORM-3D. В качестве материала заготовки использовался алюминиевый сплав AL-2024 (аналог Д16 по ГОСТ 4784-97). При исследовании выполнялось параллельное моделирование и сравнение процессов сверления заготовок в нормальном состоянии и ПУДС.

3.1. Исследование распределения напряжений в материале заготовок из цветных сплавов в процессе сверления заготовок в нормальном и ПУДС

Деформирование заготовки осуществлялось путем перемещения вниз верхней кондукторной плиты с диаметром отверстия 1 мм на величину 0,033 мм. На рисунке 3.1 показано распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в заготовке после предварительного сжатия.

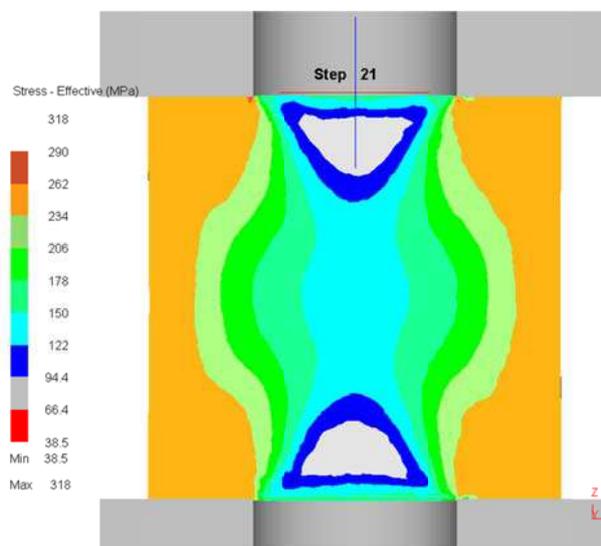
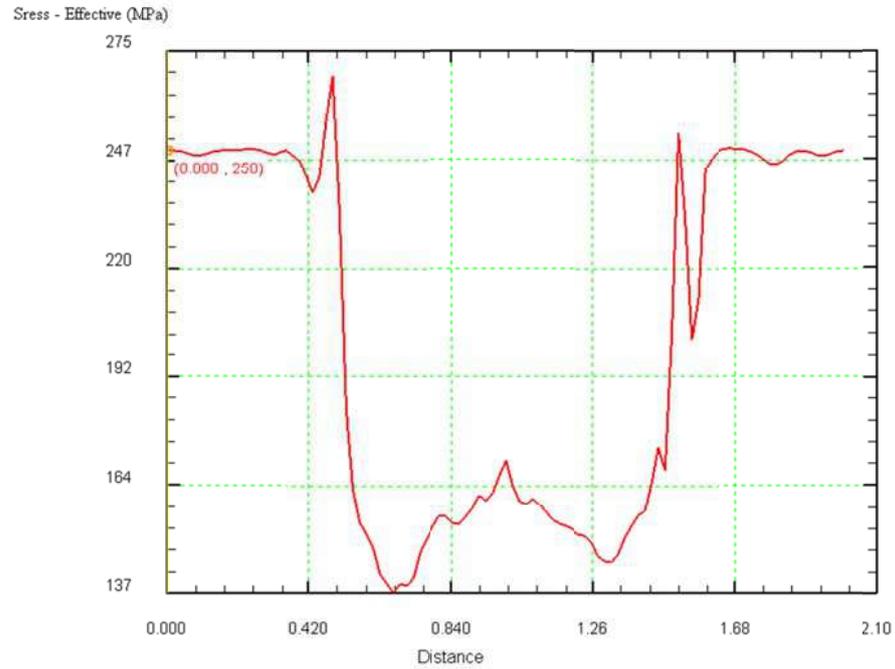


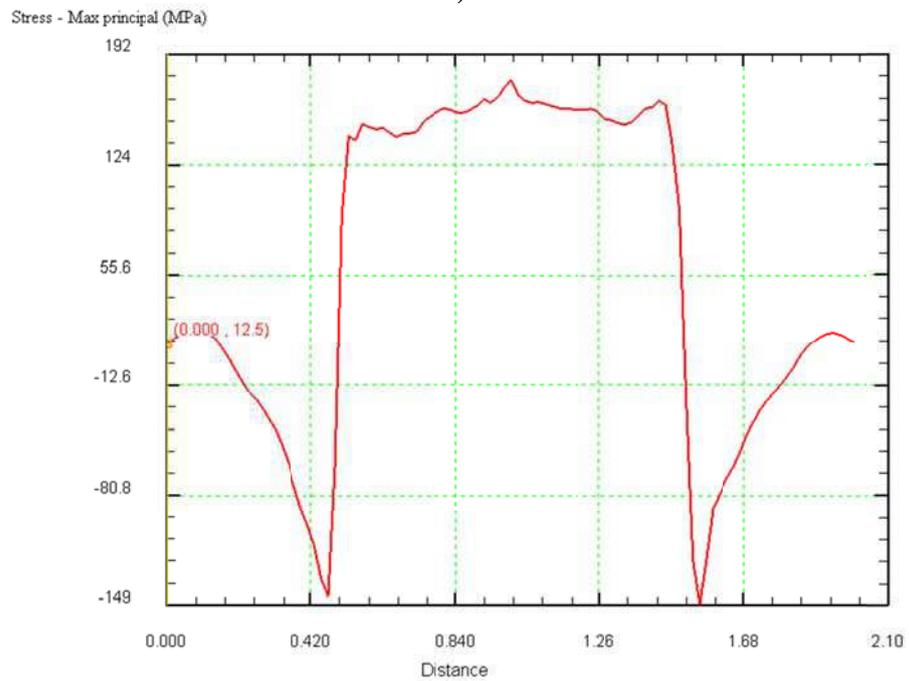
Рис. 3.1. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в заготовке после предварительного сжатия

На рисунке 3.2 показаны графики изменения величин эквивалентных напряжений по Мизесу (Stress – Effective) по наружной поверхности (плоскости) заготовок

ки после предварительного сжатия (рис. 3.2, а) и наибольшего главного (Stress – Max principal) напряжения (рис. 3.2, б).



а)



б)

Рис. 3.2 Изменение эквивалентных напряжений по Мизесу по наружной поверхности заготовки после предварительного сжатия:

а) эквивалентные по Мизесу; б) наибольшее главное

Можно сделать вывод, что при создании ПУДС в начальный момент времени поверхность заготовки в зоне сверла (Distans от 0,5 до 1,5 мм) испытывает растягивающее напряжения до 190 МПа, а под кондуктором расположена область сжатия.

На рисунке 3.3 показано распределение эквивалентного напряжения по Мизесу на момент входа сверла (глубина 0,001 мм) в материал заготовки без предварительного нагружения (рис. 3.3., а) и с предварительным нагружением (рис. 3.3., б).

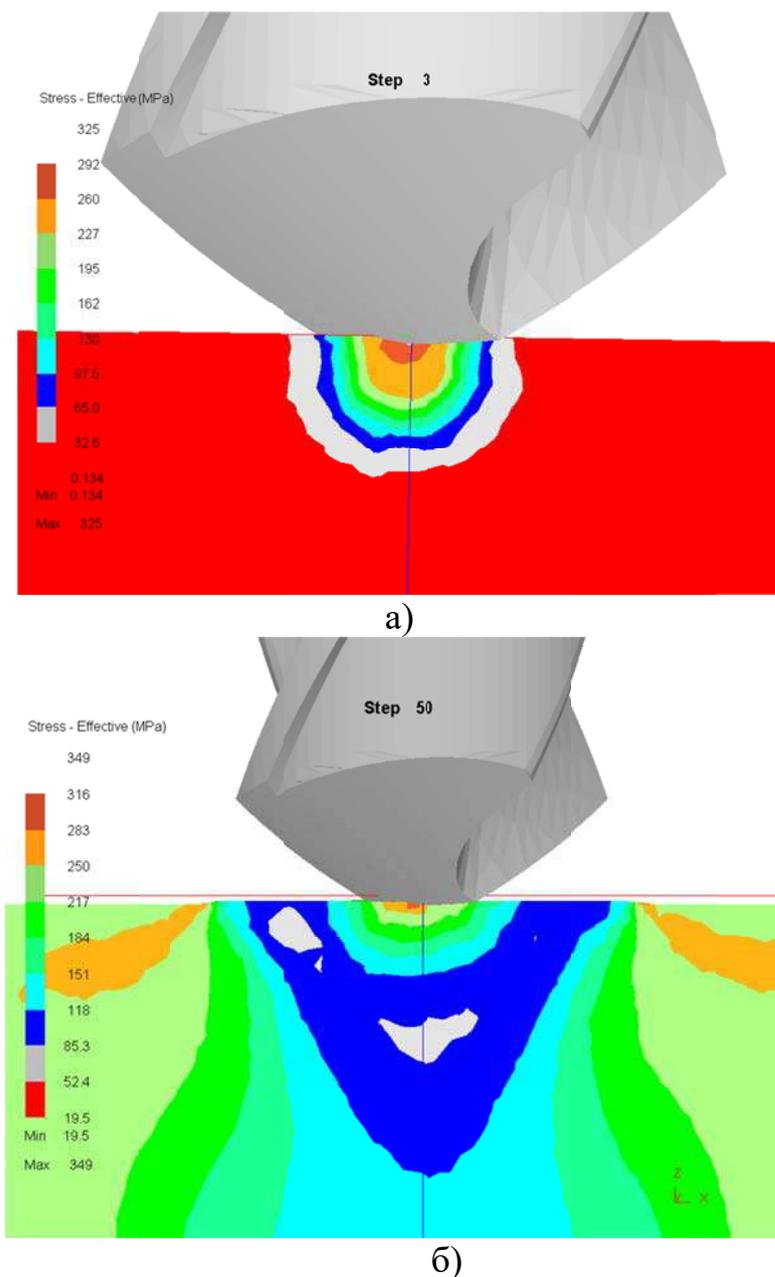
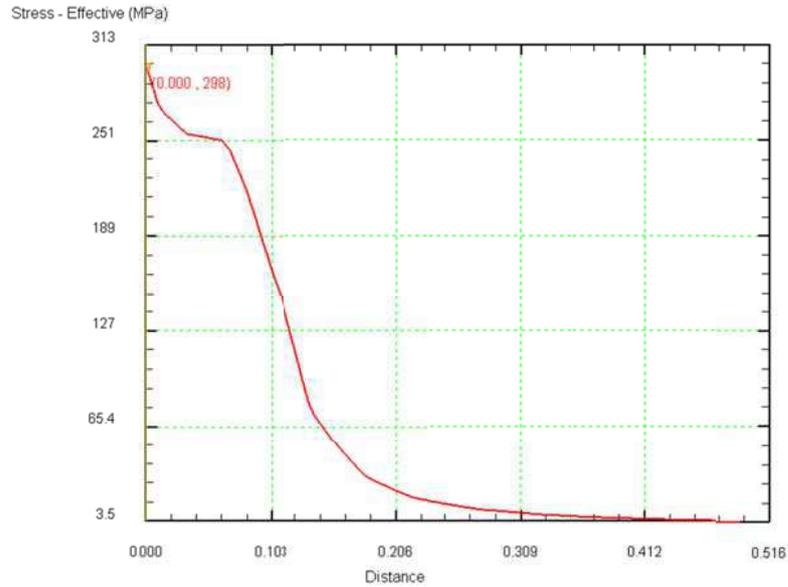
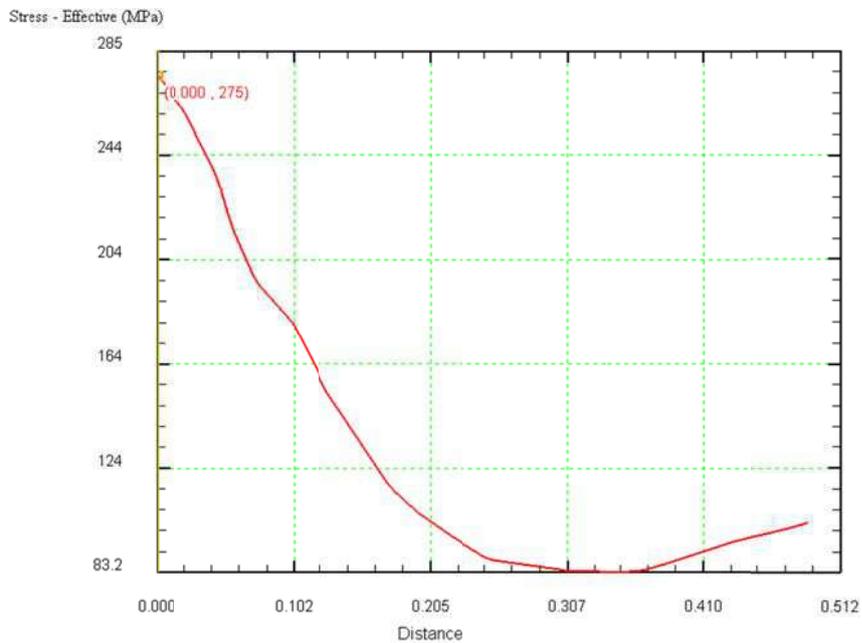


Рис. 3.3. Распределение эквивалентного напряжения по Мизесу на момент входа сверла: а) без предварительного нагружения;
б) с предварительным нагружением

Изменение эквивалентных напряжений по Мизесу (Stress – Effective) в глубину заготовки до 0,5 мм по оси сверла для двух рассматриваемых способов сверления показано на рисунке 3.4., а на рисунке 3.5. показано изменение наибольшего главного напряжения (Stress – Max principal).



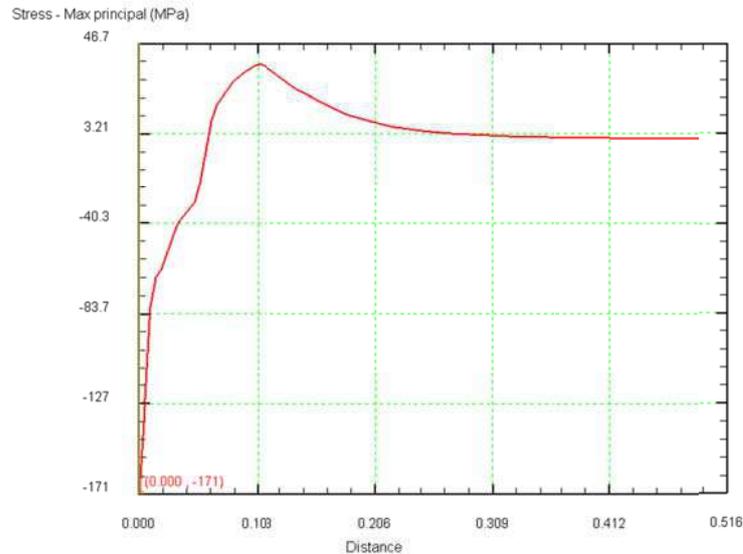
а)



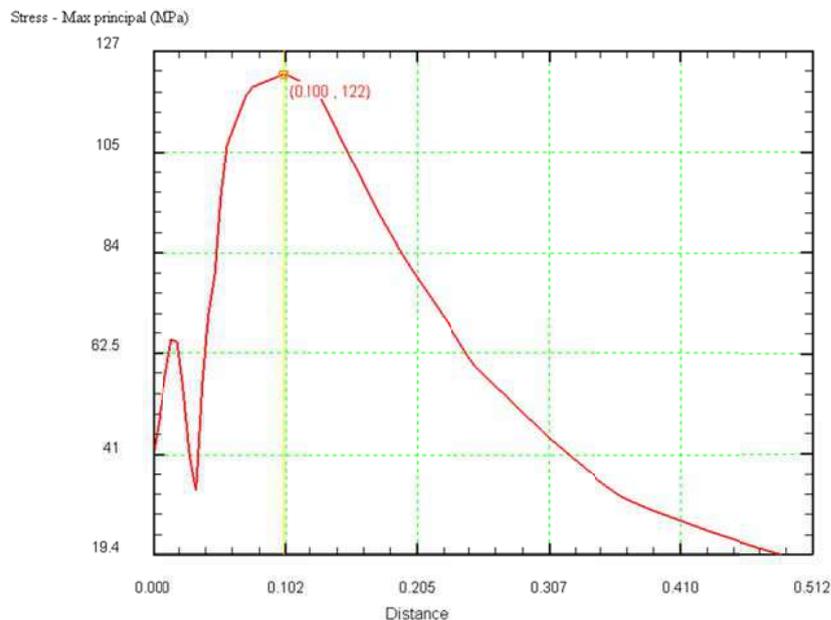
б)

Рис. 3.4 Изменение эквивалентных напряжений по Мизесу в глубину заготовки вдоль оси сверла: а) без ПУДС; б) с ПУДС

Из рисунка 3.4 можно сделать вывод, что создание ПУДС уменьшает глубину зоны высоких значений эквивалентных напряжений по Мизесу (≈ 251 МПа) на момент контакта сверла с заготовкой. На рисунке 3.5 видно, что при сверлении в момент контакт на глубине 0,1 мм расположена зона наибольшего сжимающего главного напряжения, при этом в случае с ПУДС величина напряжения выше более чем в 2 раза.



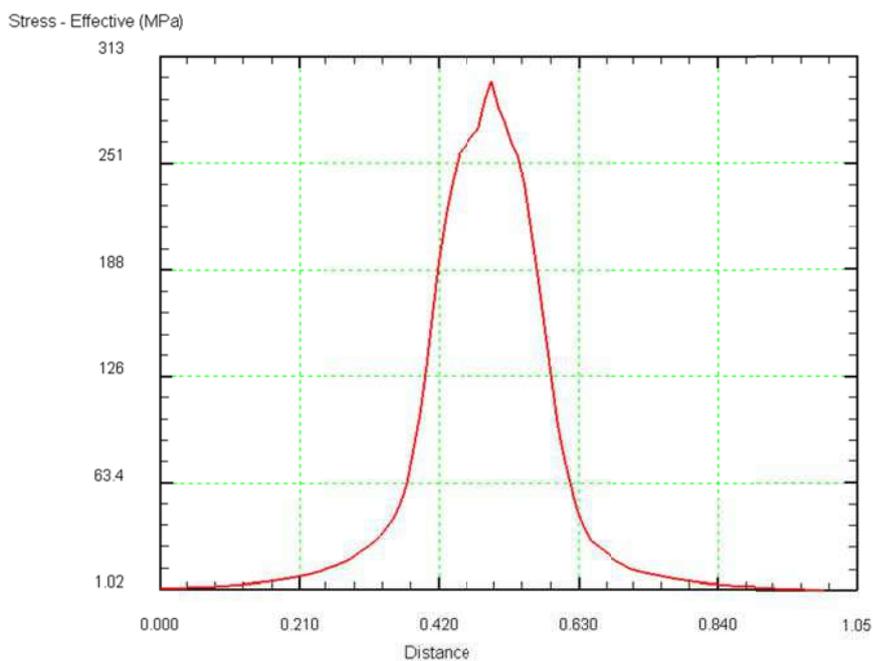
а)



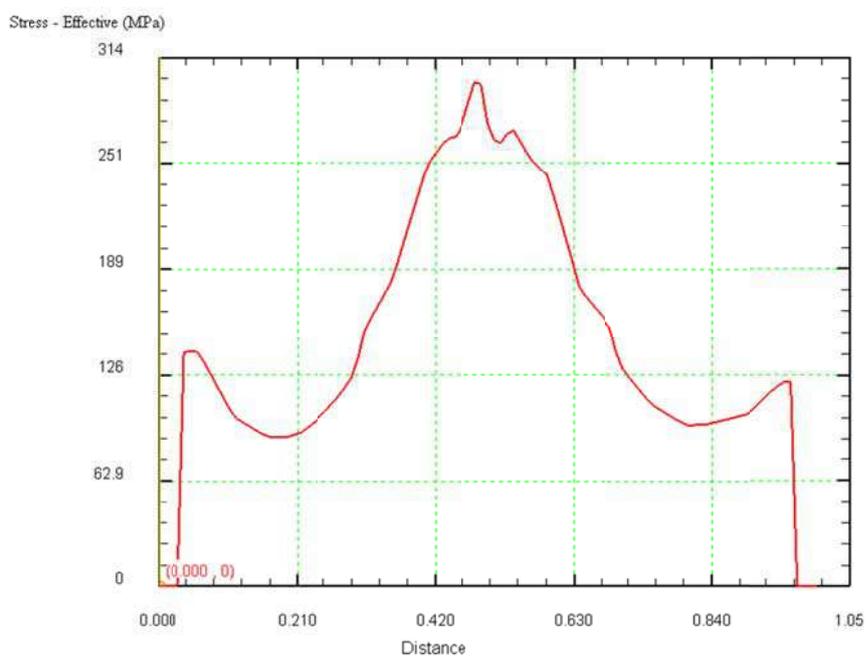
б)

Рис. 3.5 Изменение наибольшего главного напряжения в глубину заготовки вдоль оси сверла: а) без ПУДС; б) с ПУДС

На рисунках 3.6 и 3.7 показаны графики изменения эквивалентных напряжений по Мизесу (Stress – Effective) и наибольшего главного (Stress – Max principal) напряжения по наружной поверхности заготовки на плоскости в зоне формируемого отверстия.

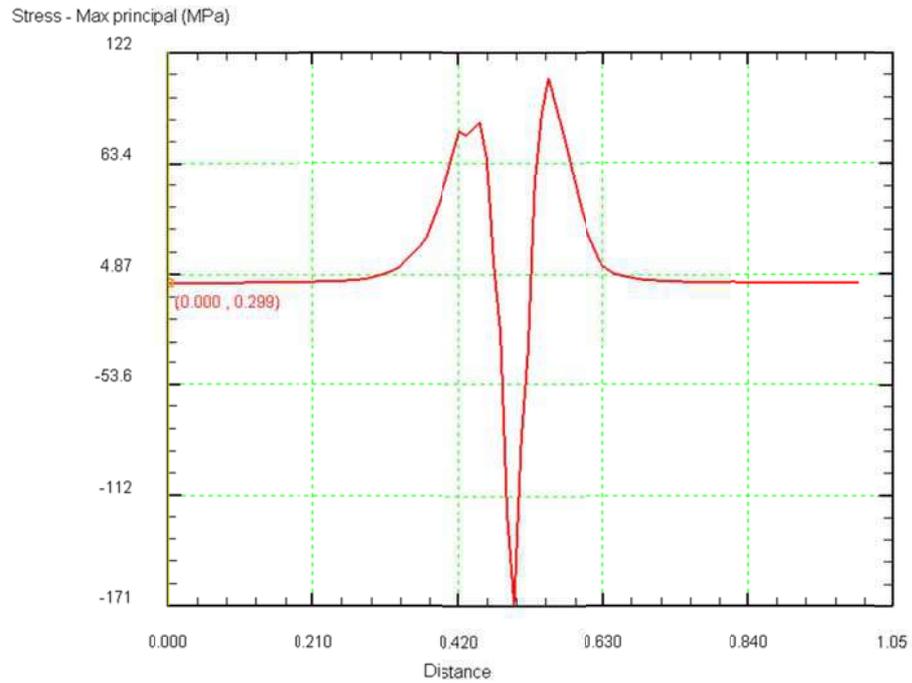


а)

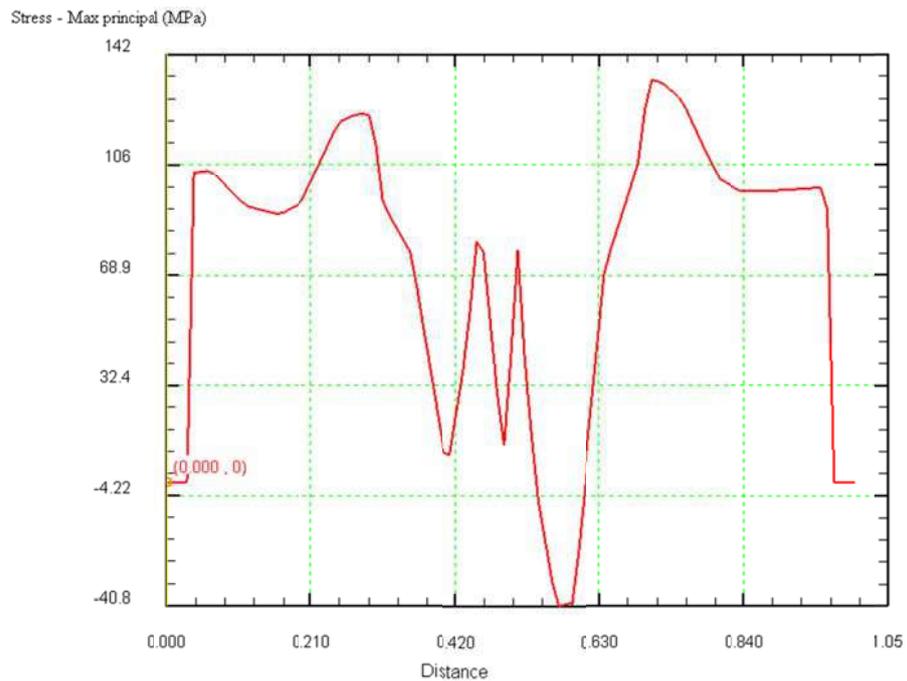


б)

Рис. 3.6 Изменение эквивалентных напряжений в заготовке по Мизесу вдоль наружной поверхности заготовки: а) без ПУДС; б) с ПУДС



а)



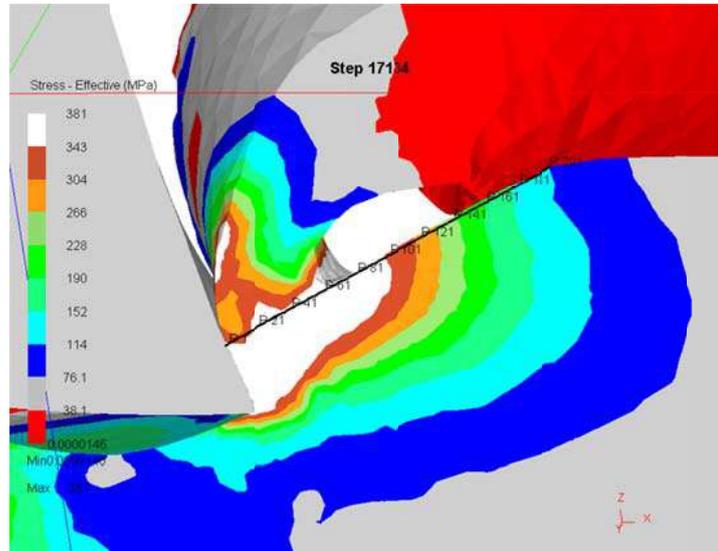
б)

Рис. 3.7 Изменение наибольшего главного напряжения в заготовке по наружной поверхности заготовки: а) без ПУДС; б) с ПУДС

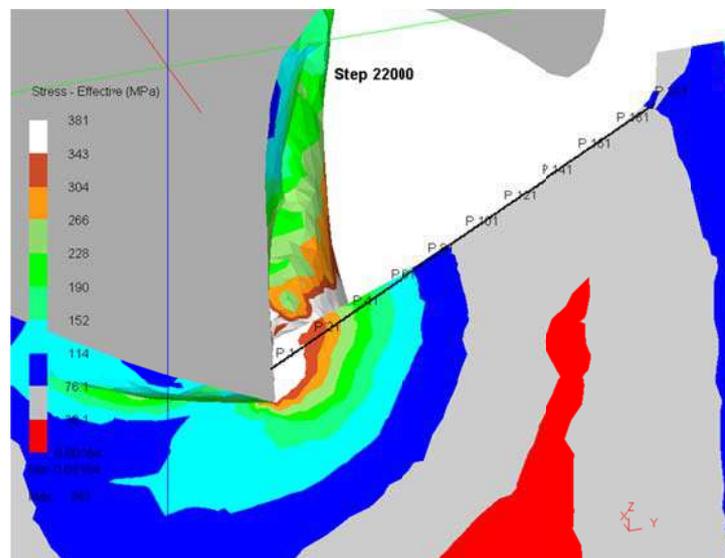
Из показанных на рисунке 3.6 графиков следует, что создание ПУДС существенно расширяет зону высоких значений эквивалентного напряжения по Мизесу на момент контакта сверла с заготовкой, а из рисунка 3.7 следует, что, в случае с

ПУДС, величина наибольшего сжимающего главного напряжения становится меньше и ширины ее зоны становится немного шире.

Далее рассмотрим распределение полей напряжений при установившемся процессе сверления в направлении снимаемого материала участком главной режущей кромки сверла, примыкающей к перемычке (рис. 3.8)



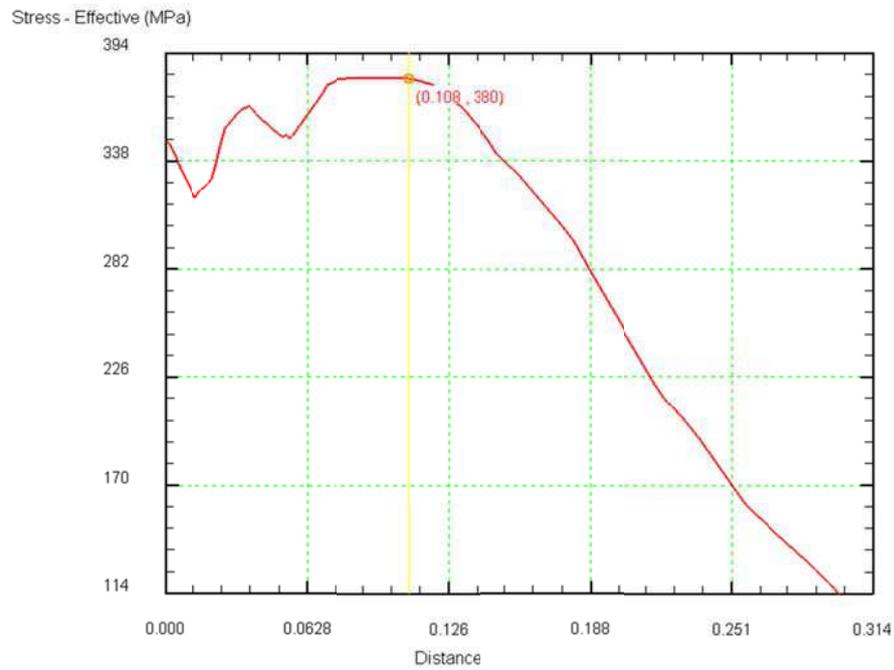
а)



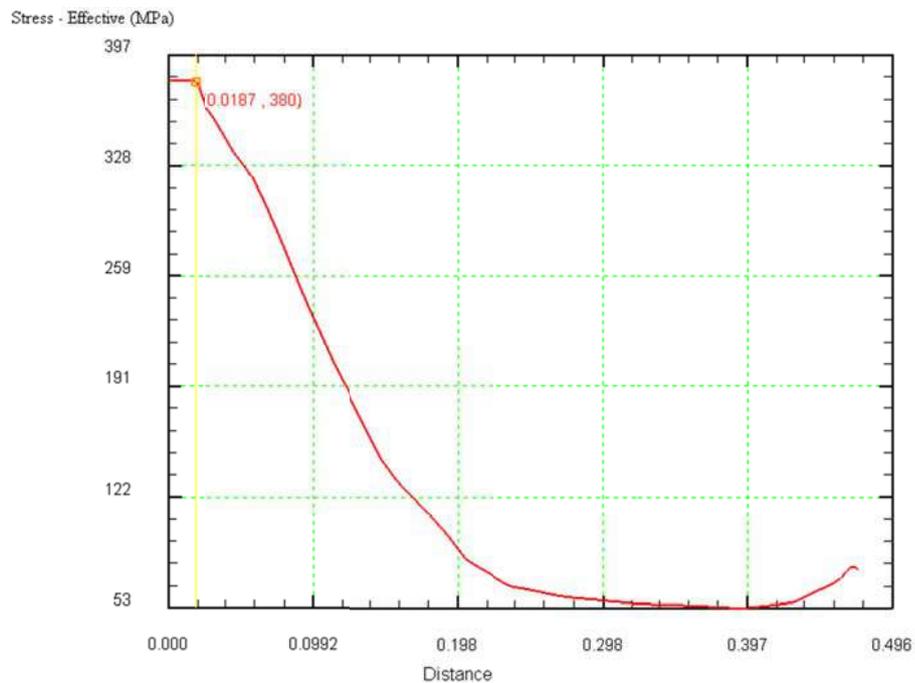
б)

Рис. 3.8 Распределение эквивалентного напряжения по Мизесу при устойчивом процессе сверления: а) без ПУДС; б) с ПУДС

На рисунках 3.9 и 3.10 показаны графики изменения эквивалентных напряжений по Мизесу (Stress – Effective) и наибольшего главного (Stress – Max principal) напряжения при устойчивом процессе сверления.



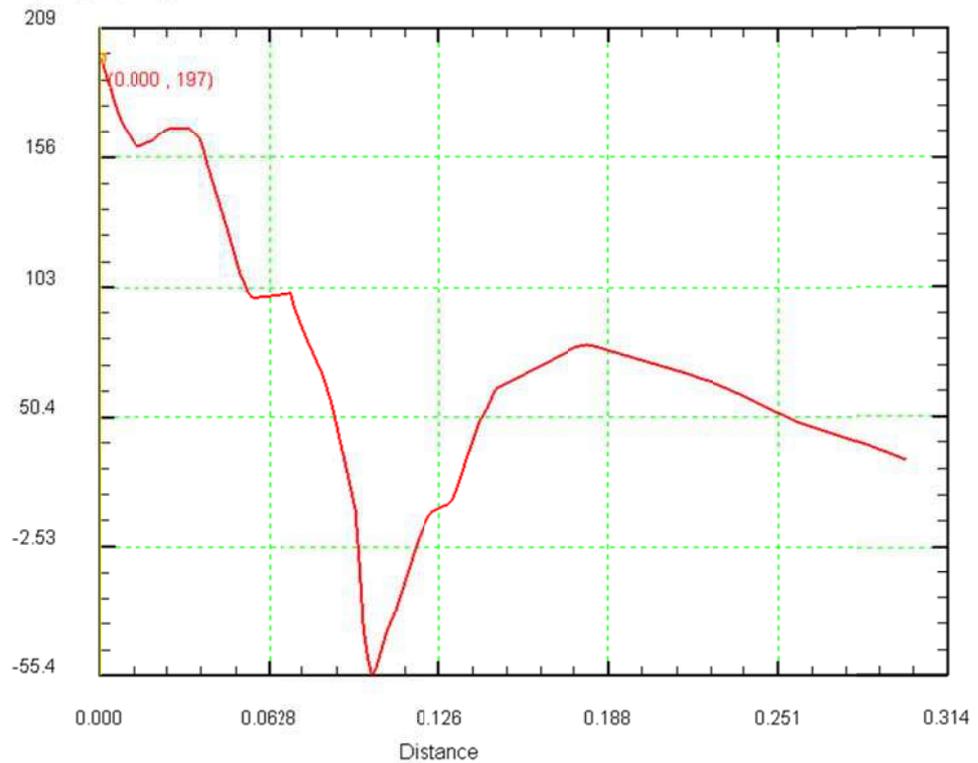
а)



б)

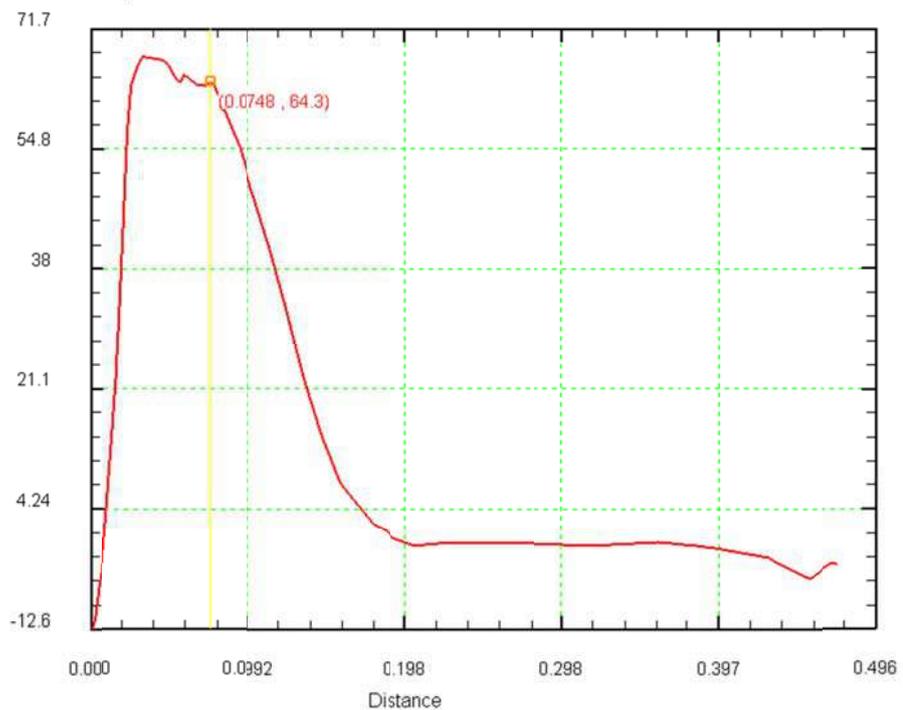
Рис. 3.9 Изменение эквивалентных напряжений в заготовке по Мизесу при устойчивом процессе сверления: а) без ПУДС; б) с ПУДС

Stress - Max principal (MPa)



а)

Stress - Max principal (MPa)



б)

Рис. 3.10 Изменение наибольшего главного напряжения в заготовке при устойчивом процессе сверления: а) без ПУДС; б) с ПУДС

Из построенных графиков изменения эквивалентного напряжения в заготовке по Мизесу при устойчивом процессе сверления (см. рис. 3.9) следует, что создание ПУДС существенно сужает зону наибольших напряжений, а также существенно изменяет характер распределения наибольшего главного напряжения (см. рис. 3.10), исключая зоны сжимающих напряжений.

3.2. Исследование силовых характеристик процесса сверления заготовок в нормальном и ПУДС

Моделирование в среде Deform 3D позволило выполнить сравнение осевой силы и крутящего момента при сверлении заготовок из цветных сплавов (рис. 3.11 и 3.12) без предварительного нагружения (линия 1) и с предварительным нагружением (линия 2).

Осевая сила, (Н)

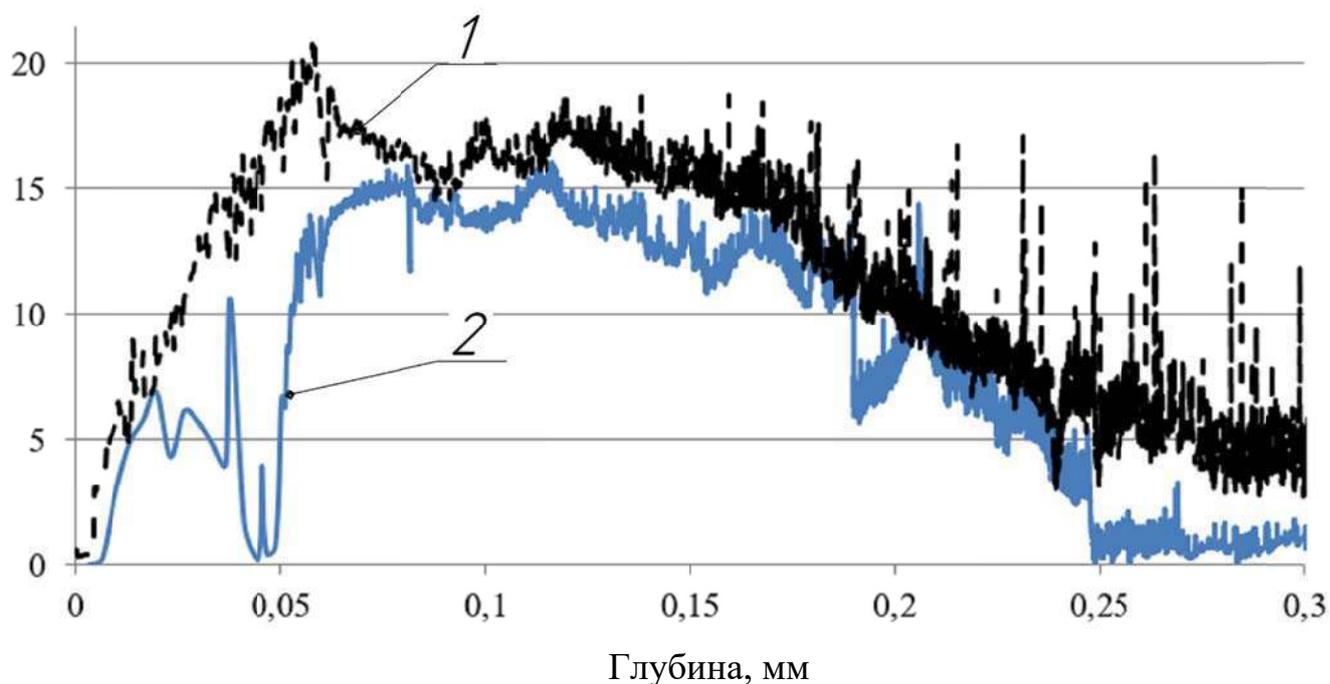


Рис. 3.11 Изменение осевой силы при сверлении заготовок из цветных сплавов без предварительного нагружения и с предварительным нагружением, Н

Осевая сила, (Н)

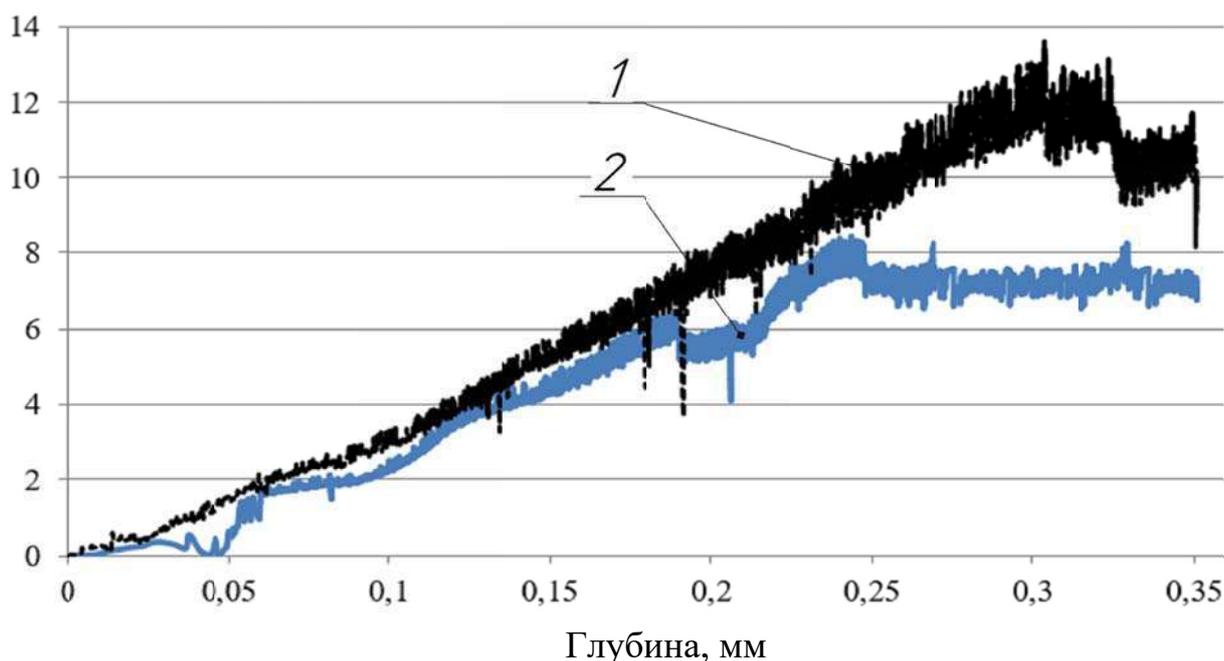


Рис. 3.12 Изменение крутящего момента при сверлении

заготовок из цветных

сплавов без предварительного нагружения и с предварительным нагружением, кН·м

Из результатов моделирования следует, создание ПУДС в заготовках из цветных сплавов позволяет снизить величины осевой силы и крутящего момента при заданных режимах обработки.

3.3. Исследование изменения внутренних напряжений в процессе сверлении заготовок из цветных сплавов в ПУДС

Особый интерес при раскрытии механизма этого явления представляет исследование и описание изменения зоны ПУДС обрабатываемого материала на различной глубине сверления без учета напряжений, создаваемых сверлом в процессе работы. Данное исследование было выполнено на основе моделирования процесса сверления сквозного отверстия диаметром 2 мм в среде конечно-элементного анализа DEFORM-3D. В качестве материала заготовки использовался алюминиевый сплав AL-2024 (Д16 по ГОСТ 4784-97). Наружный диаметр заготовки и ее высоту прини-

мали равным 10 мм. Деформирование заготовки осуществлялось путем перемещения вниз верхней кондукторной плиты на величину 0,033 мм.

На рисунке 3.13 показано распределение напряжений по Мизесу (МПа) после создания в материале заготовки ПУДС.

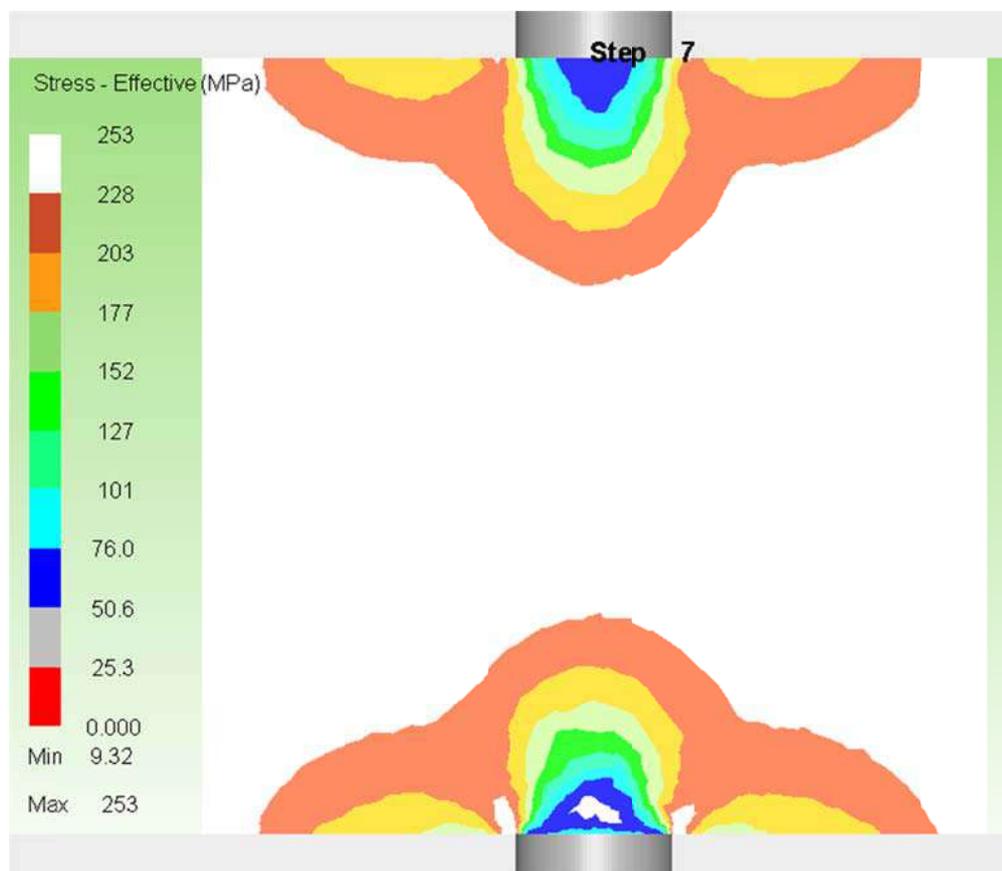


Рис. 3.13 Распределение в заготовке напряжений по Мизесу (МПа) в начальный момент времени

Из данного рисунка видно, что на поверхности заготовки по оси отверстия в области контакта перемычки сверла и заготовки напряжение Мизеса достигает значений до 76 МПа, а также с противоположной стороны заготовки в месте будущего выхода сверла. Таким образом, можно утверждать, что деформирование заготовки кондуктором с отверстием позволяет создать на начальном этапе в зоне обработки ПУДС обрабатываемого материала [258].

На рисунке 3.14 показано распределение в заготовке напряжений по Мизесу (МПа) на глубине сверления: 1,5, 5, 8 и 9,5 мм.

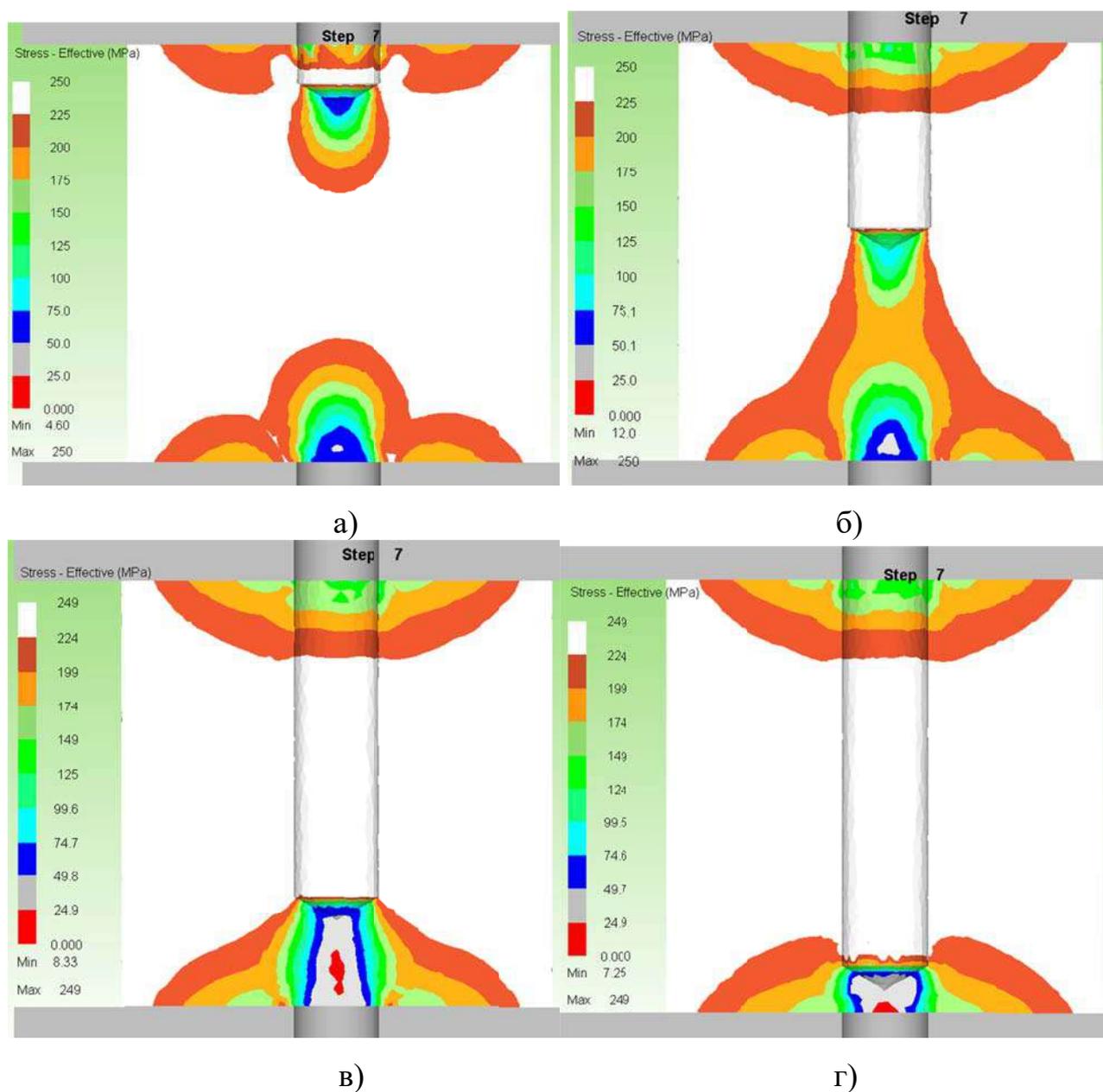


Рис. 3.14 Распределение в заготовке напряжений по Мизесу (МПа)

в процессе сверления на глубине:

а) 1,5 мм; б) 5 мм; в) 8 мм; г) 9,5 мм

Из рисунков видно, что в процессе продвижения сверла в глубь заготовки зона напряжения будет также перемещаться в глубь материала и располагаться за поверхностью дна формируемого отверстия. Это связано прежде всего с тем, что дно отверстия, имеющее коническую форму, выступает в качестве концентратора напряжений.

На рисунке 3.15 показано изменение напряжений по Мизесу в процессе сверления на точках поверхности дна отверстия, расположенных на разных расстояниях от оси.

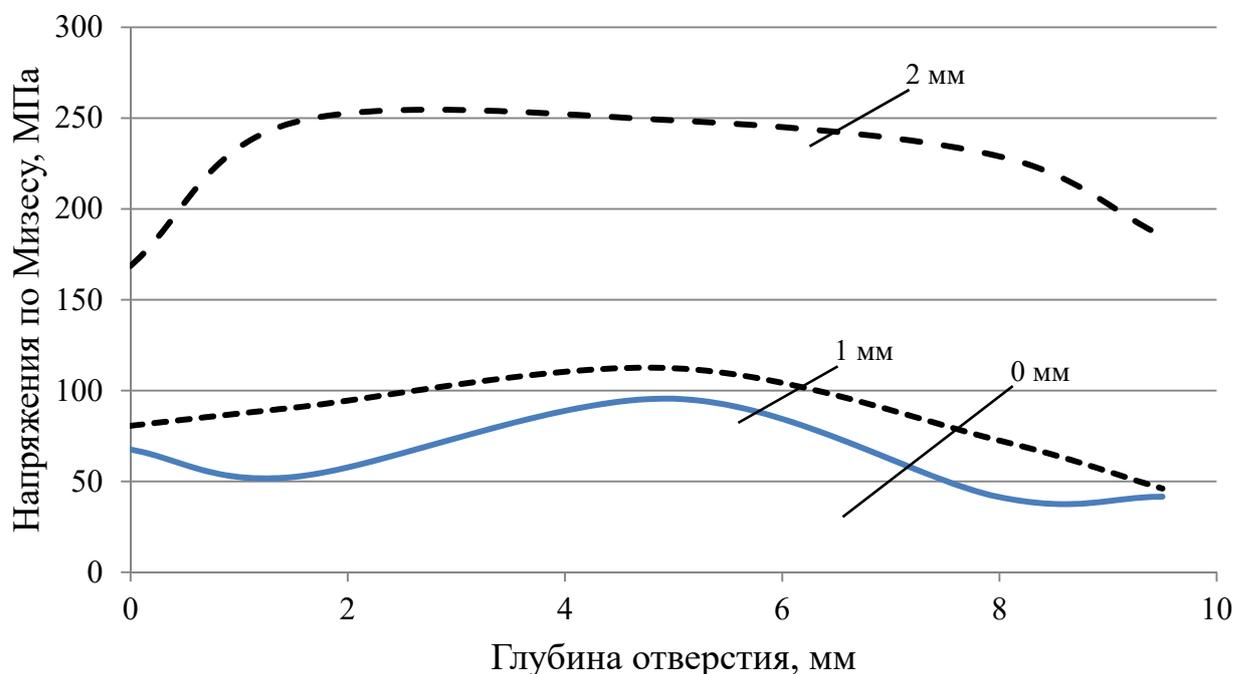


Рис. 3.15 Изменение напряжений по Мизесу (МПа) в процессе сверления на точках поверхности дна отверстия, расположенных на разных расстояниях от оси

Из рисунка 3.15 видно, что на периферии обрабатываемого отверстия, вдоль оси обрабатываемого отверстия, формируется зона наибольших напряжений по Мизесу в диапазоне от 168 до 249 МПа на всем протяжении процесса сверления. В точках, расположенных вблизи от оси формируемого отверстия, напряжения по Мизесу имеют наименьшие значения.

Исходя из полученных результатов, можно утверждать, что при сверлении отверстий диаметром до 2 мм ПУДС обрабатываемого материала будет сохраняться в зоне резания на протяжении всего времени обработки, обеспечивая уменьшение осевой составляющей силы резания при сверлении [258].

3.4 Выводы по главе 3

На основе выполненного компьютерного исследования процессов сверления отверстий в заготовках из сплава Д16 как в нормальном (ненагруженном) состоянии, так и в ПУДС, можно сделать следующие выводы:

1. Создание ПУДС существенно сужает зону наибольших напряжений по Мизесу, а также существенно изменяет характер распределения наибольшего главного напряжения, исключает зоны сжимающих напряжений.
2. Создание ПУДС в заготовках из цветных сплавов позволяет снизить величины осевой силы и крутящего момента.
3. Можно утверждать, что при сверлении отверстий диаметром до 2 мм ПУДС обрабатываемого материала будет сохраняться в зоне резания на протяжении всего времени обработки, обеспечивая уменьшение осевой составляющей силы резания при сверлении.

ГЛАВА 4. ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПУДС ЗАГОТОВОК ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ НА ПРОЦЕСС СВЕРЛЕНИЯ

4.1. Исследование влияния ПУДС заготовок из цветных сплавов на осевую силу резания

С целью исследования влияния ПУДС заготовок из цветных металлов и сплавов на различные показатели процесса сверления были проведены серии экспериментов, в рамках которых одной группой сверл выполнялось сверление заготовок из латуни марки ЛС59-1 в обычном состоянии, а другой группой сверл сверление в заготовках после создания в материале ПУДС. Обработка выполнялась на фрезерном стенке Wabeco CC-F1200 (рис. 4.1).

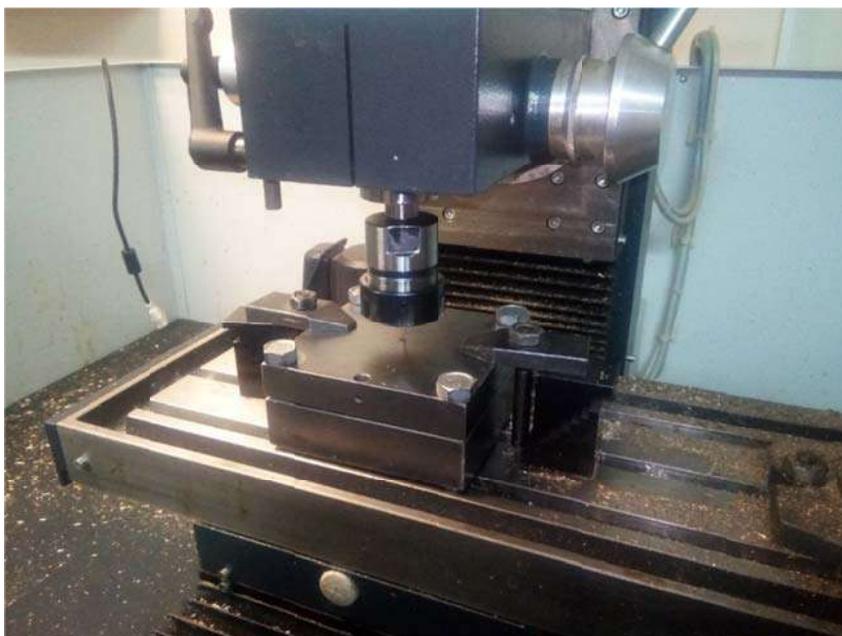


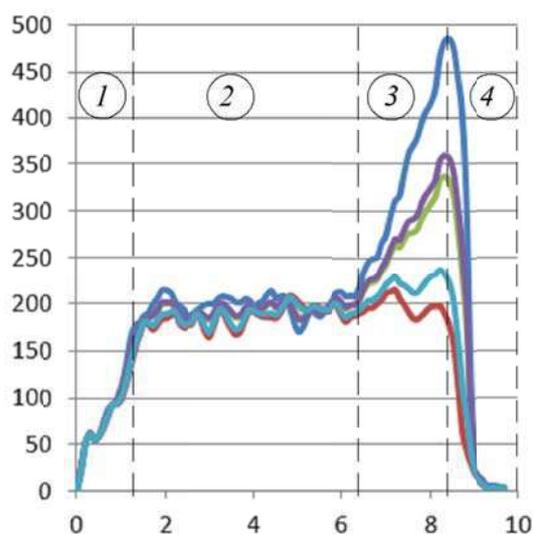
Рис. 4.1. Обработка заготовок из цветных металлов и сплавов в ПУДС

Обработка результатов эксперимента выполнялась с применением методов дисперсионного анализа в программе Statistica.

Для проведения исследования использовались сверла диаметром 2 мм, толщина заготовок из сплава ЛС59-1 составляла 10 мм. Обработка выполнялась на следу-

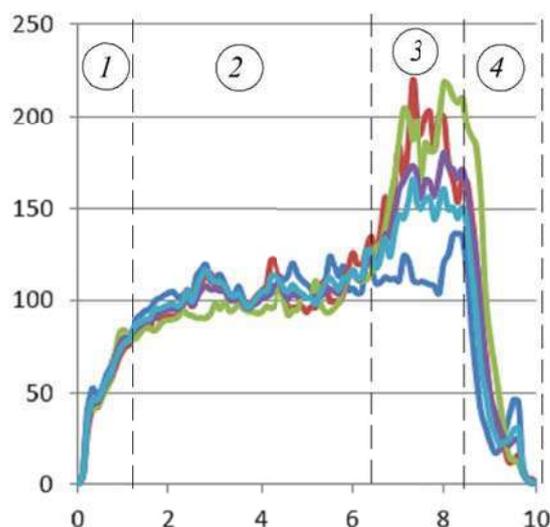
ющих режимах: число оборотов 3000 об/мин; подача 15 мм/мин (0,005 мм/об). На рис. 4.2. показаны результаты измерения осевой силы (Н) при сверлении пяти отверстий без создания в заготовках ПУДС (рис. 4.2 а) и при создании предварительного упругодеформированного состояния (рис.4.2 б).

Осевая сила, (Н)



Время, с
а)

Осевая сила, (Н)



Время, с
б)

Рис. 4.2. График изменения осевой силы (Н) при сверлении заготовок из сплава ЛС59-1: а) без ПУДС; б) с ПУДС

На графике измерения осевой силы при сверлении можно выделить четыре характерные зоны: 1 – зона врезания инструмента, где инструмент врезается, и сила возрастает за короткий промежуток времени; 2 – зона установившегося сверления, эта зона характеризуется постоянной силой на длинном промежутке времени; 3 – зона увеличения осевой силы резания при сверлении, обусловленное плохим выводом стружки и скоплением ее в зоне резания; 4 – зона выхода инструмента, сила резко падает на коротком промежутке времени [260].

Для каждого эксперимента определялась наибольшая величина осевой силы, соответствующая зоне устойчивого сверления в интервале времени от 1,5 до 6 с. Результаты эксперимента представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты исследования влияния ПУДС заготовок на осевую силу

№	Осевая сила, Н	
	Без ПУДС	С ПУДС
1	214,5	123,7
2	208,6	126,1
3	204,8	115,9
4	203,7	116,0
5	207,7	116,1

На рис. 4.3. показан результат выполнения однофакторного дисперсионного анализа в программе Statistica.

Одномерные результаты для каждой ЗП (Таблица данных1) Сигма-ограниченная параметризация Декомпозиция гипотезы						
Эффект	Степени свободы	Р SS	Р MS	Р F	Р p	
Св. член	1	268009,6	268009,6	12665,56	0,000000	
ПУДС	1	19492,2	19492,2	921,16	0,000000	
Ошибка	8	169,3	21,2			
Всего	9	19661,5				

Рис. 4.3. Результат выполнения однофакторного дисперсионного анализа в программе Statistica о влиянии ПУДС заготовок (ПУДС) на осевую силу

Анализ показал (см. рис. 4.3.) малую вероятность (близкую к нулю) того, что ПУДС заготовок (ПУДС) не оказывает влияния на осевую силу при сверлении. Таким образом, можно утверждать, что влияние исследуемого состояния на осевую силу является статистически значимым и позволяет снизить осевую силу, в частном случае для сверл диаметром 2 мм и при заданных режимах на 42,3%.

4.2. Исследование влияния ПУДС заготовок из цветных сплавов на крутящий момент

Для исследования использовались сверла диаметром 2 мм, толщина заготовок составляла 10 мм. Обработка выполнялась на следующих режимах: число оборотов 3000 об/мин; подача 200 мм/мин (0,067 мм/об). На рис. 4.4. показаны результаты измерения крутящего момента (Н·м) при сверлении пяти отверстий без создания в заготовках ПУДС (рис. 4.4., а) и при создании ПУДС (рис.4.4., б).

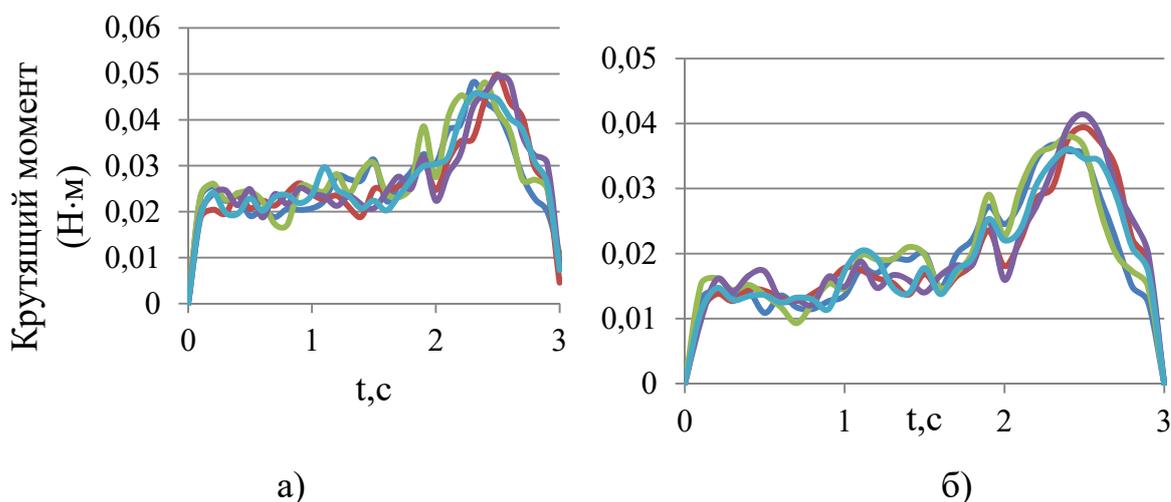


Рис. 4.4. График изменения крутящего момента (Н·м) при сверлении заготовок из сплава ЛС59-1: а) без ПУДС; б) с ПУДС

Для каждого эксперимента определялась средняя величина крутящего момента, соответствующая устойчивому сверлению в интервале времени от 0,2 до 1,6 с. Результаты эксперимента представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты исследования влияния ПУДС заготовок на крутящий момент

№	Крутящий момент, мН·м	
	Без ПУДС	С ПУДС
1	23,3	14,9
2	22,5	14,8
3	24,3	15,8
4	22,8	15,3
5	22,7	14,8

На рис. 4.5. показан результат выполнения однофакторного дисперсионного анализа в программе Statistica.

Одномерный критерий значимости для Момент, мН*м (Таблица данных1) Сигма-ограниченная параметризация Декомпозиция гипотезы						
Эффект	SS	Степени свободы	MS	F	p	
Св. член	3657,107	1	3657,107	10738,64	0,000000	
PUDS	159,997	1	159,997	469,81	0,000000	
Ошибка	2,724	8	0,341			

Рис. 4.5. Результат выполнения однофакторного дисперсионного анализа в программе Statistica о влиянии ПУДС заготовок (PUDS) на крутящий момент

Анализ показал (см. рис. 4.5.) малую вероятность (близкую к нулю) того, что ПУДС заготовок (PUDS) не оказывает влияния на крутящий момент при сверлении. Таким образом, можно утверждать, что влияние исследуемого состояния на осевую силу является статистически значимым и позволяет снизить крутящий момент, в частном случае для сверл диаметром 2 мм и при заданных режимах на 34,6% [264,265].

4.3. Исследование влияния ПУДС заготовок на период стойкости сверла

В рамках исследования использовались сверла диаметром 1,3 мм. Обработка выполнялась на следующих режимах: число оборотов 2100 об/мин; подача 100 мм/мин (0,048 мм/об). Период стойкости сверл оценивали количеством отверстий, которое сверло обрабатывает до его поломки.

Результаты экспериментального исследования влияния ПУДС заготовок из цветных металлов и сплавов на период стойкости сверл показаны в табл. 4.3

Таблица 4.3 – Результаты исследования влияния ПУДС заготовок на период стойкости сверла

№	Количество обработанных отверстий	
	Без ПУДС	С ПУДС
1	9	14
2	10	15
3	10	15
4	11	13
5	9	14

На рис. 4.6. показан результат выполнения однофакторного дисперсионного анализа в программе Statistica.

Одномерный критерий значимости для T (Таблица данных1) Сигма-ограниченная параметризация Декомпозиция гипотезы					
Эффект	SS	Степени свободы	MS	F	p
Св. член	1440,000	1	1440,000	2057,143	0,000000
PUDS	48,400	1	48,400	69,143	0,000033
Ошибка	5,600	8	0,700		

Рис. 4.6. Результат выполнения однофакторного дисперсионного анализа в программе Statistica о влиянии ПУДС заготовок (PUDS) на стойкость сверл

Анализ показал (см. рис. 4.6.) малую вероятность того, что ПУДС (PUDS) не оказывает влияния на стойкость сверл. Таким образом, можно утверждать, что создание ПУДС при сверлении отверстий в заготовках из цветных металлов и сплавов позволяет при заданных режимах повысить стойкость сверл в среднем на 50 %.

4.4. Исследование влияния ПУДС заготовок из цветных сплавов на шероховатость поверхности отверстия

С целью проведения исследования было просверлено пять образцов сверлом 1,1 мм без создания в заготовке ПУДС, а также нагруженные образцы. При этом использовались следующие режимы: значение подачи 20 мм/об; частота вращения шпинделя 3000 об/мин. Для измерения шероховатости образец был разрезан параллельно оси отверстия для обеспечения доступа иглы профилометра. Далее при помощи профилометра Абрис-ПМ7 была измерена шероховатость (рис.4.7).



Рис. 4.7. Измерение шероховатости отверстий после сверления цветных металлов и сплавов в ПУДС

Измерение шероховатости для каждого отверстия выполнялось трижды. Данные по результатам измерения шероховатости полученных отверстий представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты исследования влияния ПУДС заготовок на шероховатость отверстий

№	Rz, мкм					
	Без ПУДС			С ПУДС		
1	7,6	7,59	7,6	4,96	4,37	4,18
2	4,12	4,16	4,17	6,7	6,72	6,73
3	5,41	6,0	5,41	5,7	5,73	5,75
4	4,61	4,35	4,44	6,54	6,47	6,39
5	6,11	6,37	6,56	5,36	5,49	5,63

На рис. 4.8. показан результат выполнения однофакторного дисперсионного анализа в программе Statistica.

Одномерный критерий значимости для Rz (Таблица данных1) Сигма-ограниченная параметризация Декомпозиция гипотезы						
Эффект	SS	Степени свободы	MS	F	p	
Св. член	977,2096	1	977,2096	811,4596	0,000000	
ПУДС	0,1643	1	0,1643	0,1364	0,714648	
Ошибка	33,7189	28	1,2042			

Рис. 4.8. Результат выполнения однофакторного дисперсионного анализа в программе Statistica о влиянии ПУДС заготовок (ПУДС) на шероховатость обработанных отверстий

Из результатов следует, что вероятность того, что ПУДС не влияет на шероховатость обработанных отверстий составляет 71,5 %. Тем самым изменение шероховатости можно признать статистически незначимым.

Таким образом, анализ полученных данных показывает, что при сверлении отверстий цветных металлов и сплавов в ПУДС не оказывает влияния на шероховатость отверстия в сравнении с классическим сверлением [259].

4.5. Исследование влияния ПУДС заготовок из цветных сплавов на изменение профиля обработанного отверстия

С целью проведения исследования было просверлено пять образцов сверлом 1,1 мм без создания в заготовке ПУДС, а также нагруженные образцы. При этом использовались следующие режимы: значение подачи 20 мм/об; частота вращения шпинделя 3000 об/мин. Далее при помощи инструментального микроскопа были измерены диаметры отверстий на входе сверла, выходе сверла из заготовки и в середине отверстия рис.4.9.

Данные по результатам измерения диаметров полученных отверстий представлены в таблице 4.5. Измерение диаметра отверстий производилось в трех деталях с помощью микроскопа ММИ-2. Сначала измерение проводилось на входе сверла, затем на выходе сверла. В дальнейшем заготовка фрезеровалась, что позволило провести исследование в середине отверстия.

Таким образом, можно выявить влияние ПУДС на отклонение размеров полученной заготовки. Таких как изменение линейных размеров, бочкообразной формы или сужения формы отверстия.

Таблица 4.5 – Результаты измерения диаметров отверстий, мм

Без нагрузки				С нагрузкой			
На входе сверла	В середине отверстия	На выходе сверла	Погрешность профиля в продольном сечении	На входе сверла	В середине отверстия	На выходе сверла	Погрешность профиля в продольном сечении
1,25	1,15	1,15	0,1	1,22	1,15	1,15	0,07
1,25	1,16	1,15	0,1	1,24	1,16	1,14	0,1
1,26	1,16	1,17	0,1	1,25	1,17	1,15	0,1
1,25	1,16	1,15	0,1	1,24	1,16	1,14	0,1
1,26	1,16	1,17	0,1	1,25	1,17	1,15	0,1

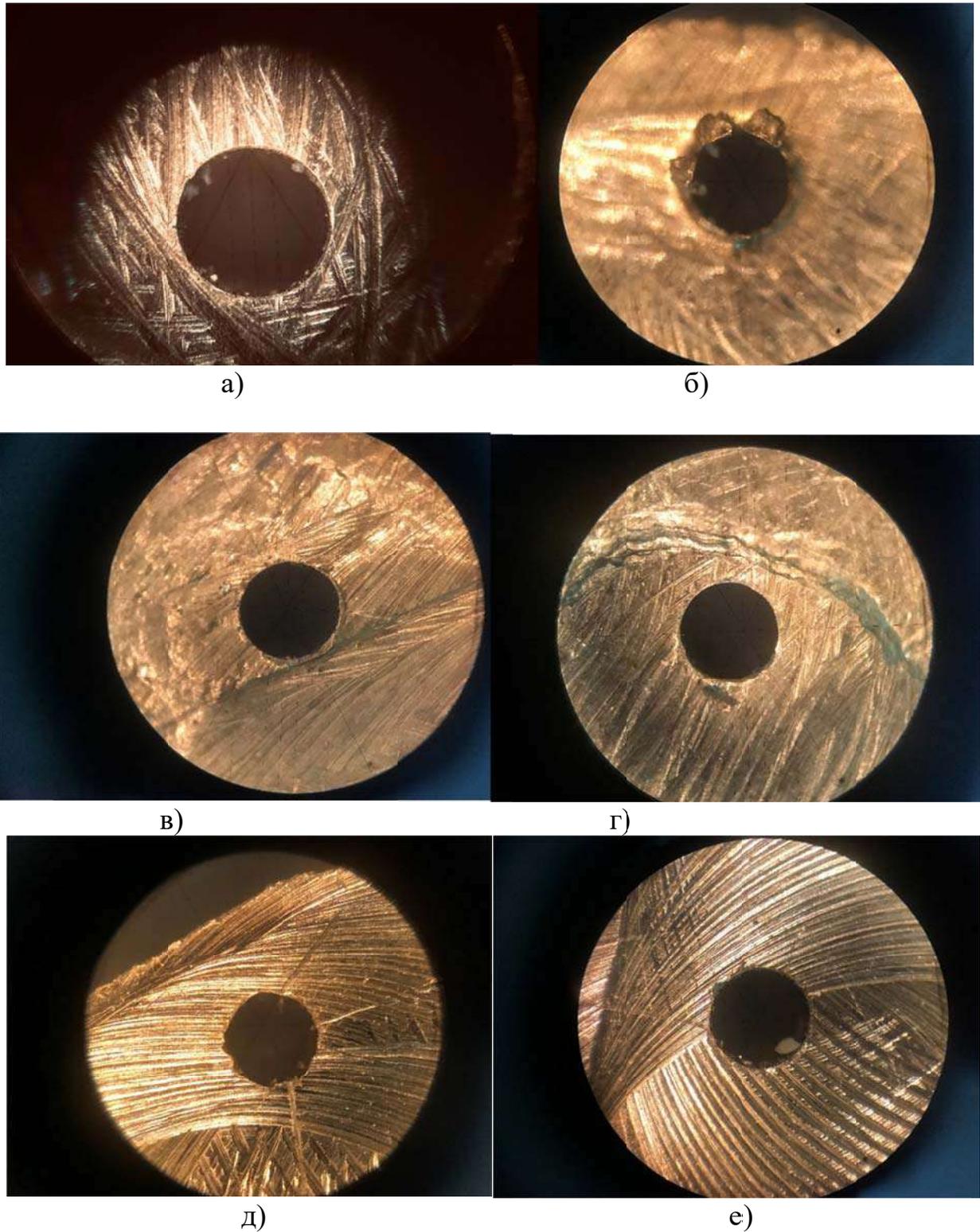


Рис. 4.9. Вид отверстий после сверления цветных металлов и сплавов:

- а) на входе сверла без ПУДС; б) на выходе сверла без ПУДС;
- в) в середине отверстия без ПУДС; г) на входе сверла с ПУДС;
- д) на выходе сверла с ПУДС; е) в середине отверстия с ПУДС

На рис. 4.10 показаны результаты двухфакторного дисперсионного анализа влияния ПУДС на диаметр обработанных отверстий в различных сечениях, выполненного в программе Statistica [267].

Одномерные результаты для каждой ЗП (Таблица данных1) Сигма-ограниченная параметризация Декомпозиция гипотезы					
Эффект	Степени свободы	Диаметр SS	Диаметр MS	Диаметр F	Диаметр p
Св. член	1	25,27605	25,27605	267628,8	0,000000
ПУДС	1	0,00027	0,00027	2,9	0,115313
Сечение	2	0,03253	0,01627	172,2	0,000000
ПУДС*Сечение	2	0,00031	0,00016	1,6	0,233314
Ошибка	12	0,00113	0,00009		
Всего	17	0,03425			

Рис. 4.10 Итоговые результаты выполнения двухфакторного дисперсионного анализа влияния ПУДС на диаметр обработанных отверстий в различных сечениях

На рисунках 4.11-4.13 показана декомпозиция результатов проверки гипотез о равенстве диаметров обработанных отверстий, где переменной «ПУДС», отражающей наличие у заготовки ПУДС, соответствуют следующие значения: 0 – без ПУДС; 1 – с ПУДС, а переменной «Сечение», отражающей сечение отверстия, в котором производили измерения, соответствуют следующие значения: 1 – на выходе сверла; 2 – в середине отверстия; 3 – на выходе сверла.

Исходя из полученных результатов (см. рис. 4.11 – 4.13), можно признать:

- влияние ПУДС на диаметр обрабатываемого отверстия незначительным (вероятность того, что это состояние не влияет на диаметр отверстия, равна 11,5 %);
- изменение диаметра обрабатываемого отверстия в различных сечениях значительным (вероятность того, что диаметры в различных сечениях не различаются, близка к нулю);

– влияние ПУДС на диаметр обработанных отверстий в различных сечениях незначительным (вероятность того, что это состояние не влияет на диаметр отверстия в различных сечениях, равна 23,3 %).

ПУДС; Взвеш. средние (Таблица данных1)						
Текущ. эффект: $F(1, 12)=2,8824$, $p=,11531$						
Декомпозиция гипотезы						
N ячейки	ПУДС	Диаметр Среднее	Диаметр Стд.ош.	Диаметр -95,00%	Диаметр +95,00%	N
1	0	1,188889	0,016283	1,151341	1,226437	9
2	1	1,181111	0,014380	1,147950	1,214272	9

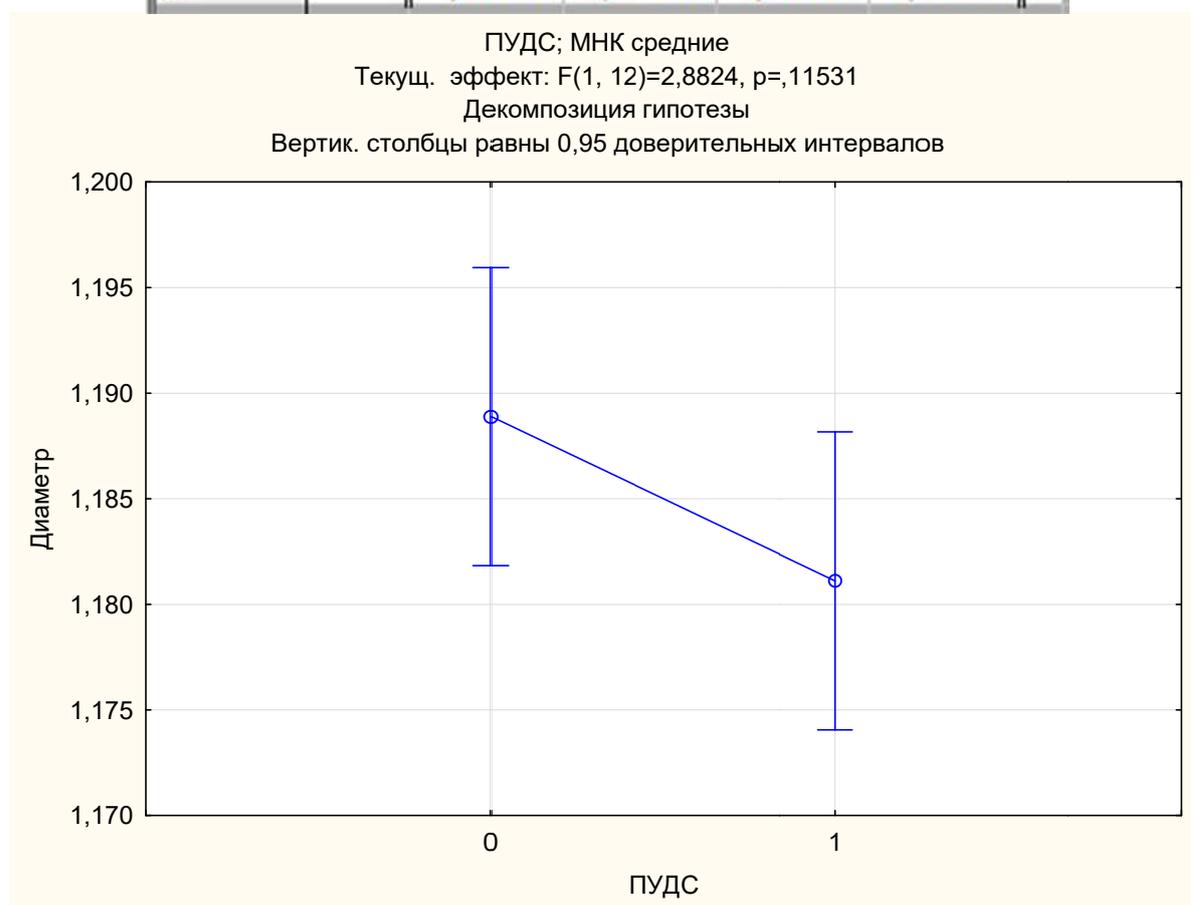


Рис. 4.11 Детализация проверки гипотезы о влиянии ПУДС на диаметр обработанных отверстий

Сечение; Взвеш. средние (Таблица данных1)						
Текущ. эффект: F(2, 12)=172,24, p=,00000						
Декомпозиция гипотезы						
N ячейки	Сечение	Диаметр Среднее	Диаметр Стд. ош.	Диаметр -95,00%	Диаметр +95,00%	N
1	1	1,245000	0,005627	1,230535	1,259465	6
2	2	1,158333	0,003073	1,150433	1,166233	6
3	3	1,151667	0,004014	1,141349	1,161985	6

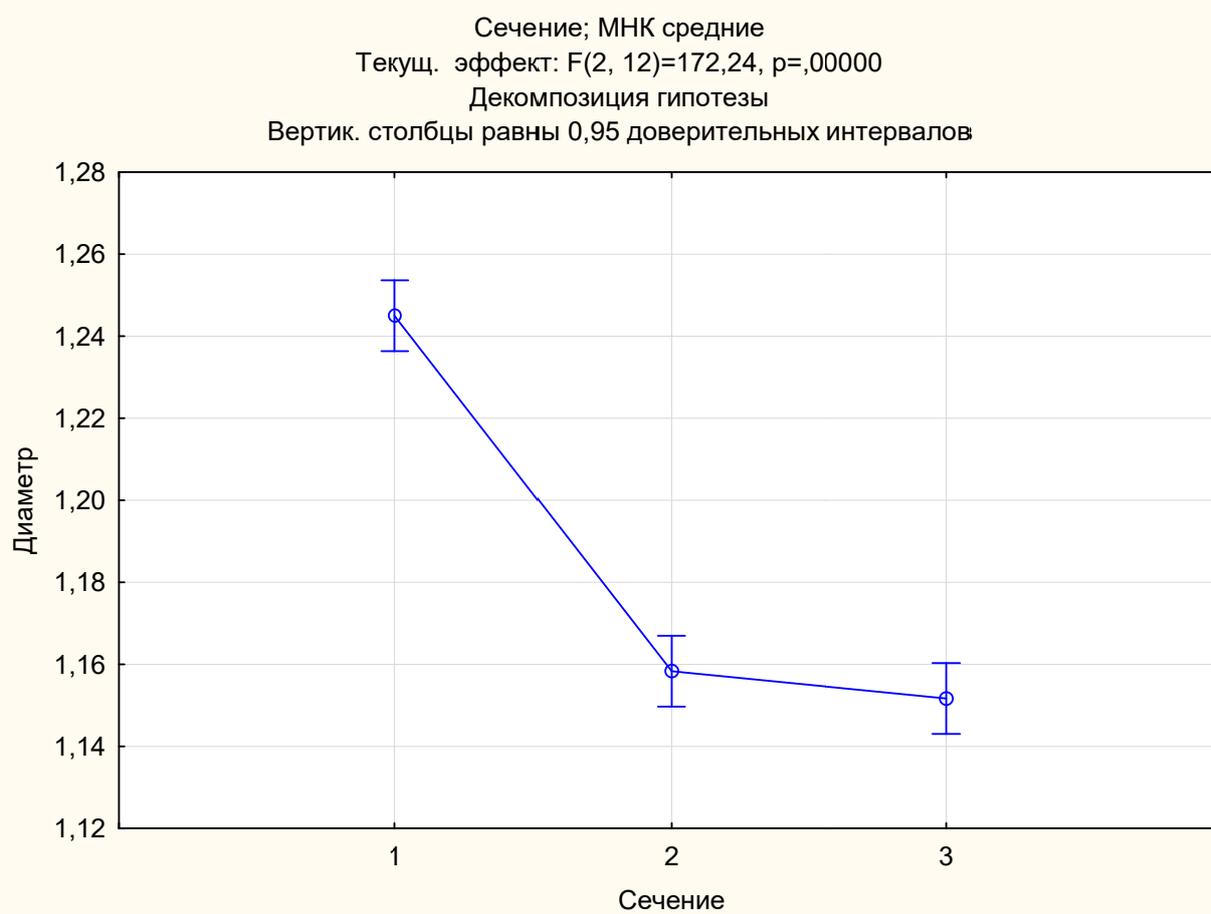


Рис.

4.12 Детализация проверки гипотезы о равенстве диаметров обработанных отверстий в различных сечения

ПУДС*Сечение; Взвеш. средние (Таблица данных1)							
Текущ. эффект: F(2, 12)=1,6471, p=,23331							
Декомпозиция гипотезы							
N ячейки	ПУДС	Сечение	Диаметр Среднее	Диаметр Стд.ош.	Диаметр -95,00%	Диаметр +95,00%	N
1	0	1	1,253333	0,003333	1,238991	1,267676	3
2	0	2	1,156667	0,003333	1,142324	1,171009	3
3	0	3	1,156667	0,006667	1,127982	1,185351	3
4	1	1	1,236667	0,008819	1,198721	1,274612	3
5	1	2	1,160000	0,005774	1,135159	1,184841	3
6	1	3	1,146667	0,003333	1,132324	1,161009	3

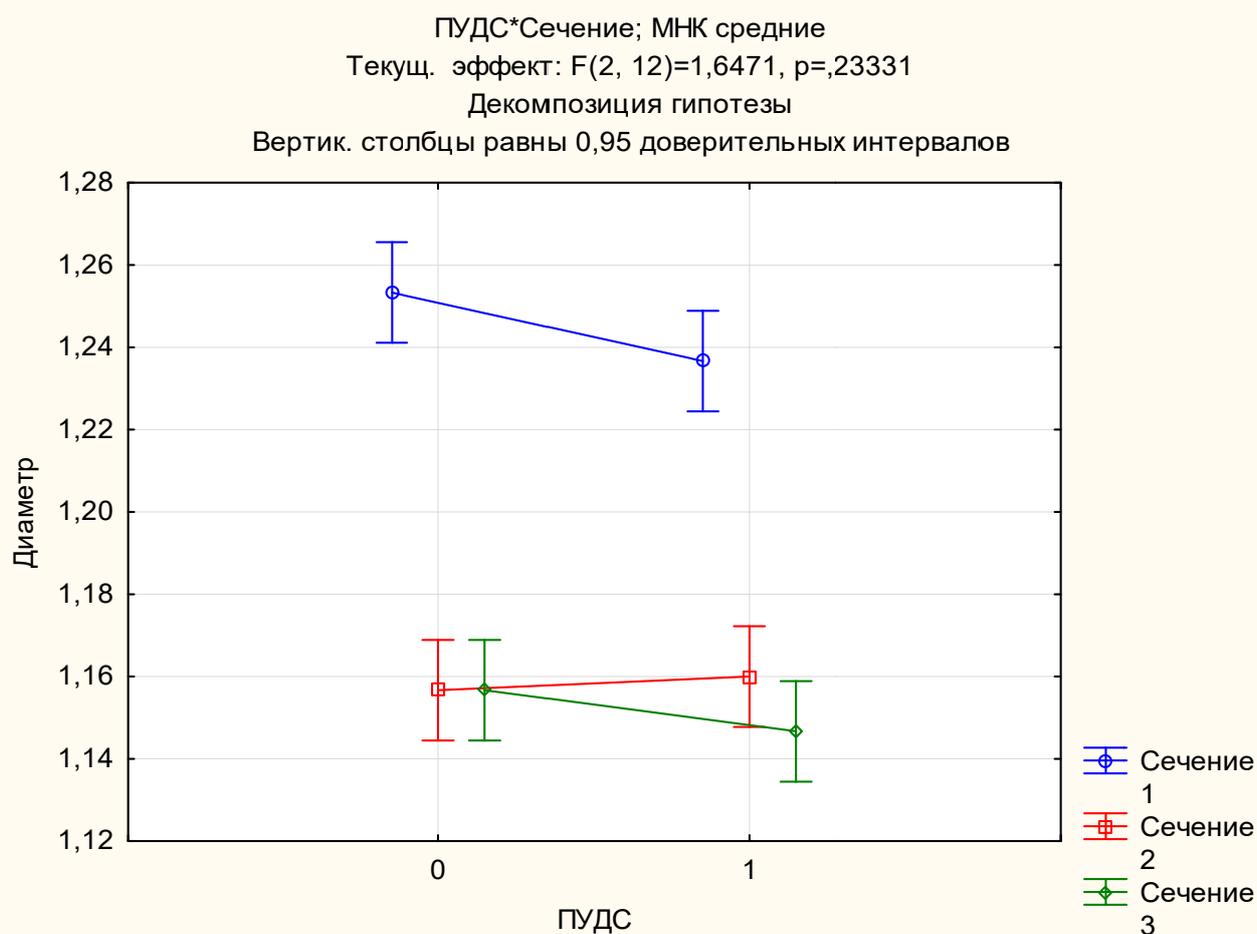


Рис.

4.13 Детализация проверки гипотезы о влиянии ПУДС на диаметр обработанных отверстий в различных сечениях

Далее также был выполнен однофакторный дисперсионный анализ влияния ПУДС на погрешность профиля обработанных отверстий в продольном сечении (рис. 4.14).

Одномерный критерий значимости для Погр. проф. (Таблица данных 14)					
Сигма-ограниченная параметризация					
Декомпозиция гипотезы					
Эффект	SS	Степени свободы	MS	F	p
Св. член	0,038400	1	0,038400	36,57143	0,003772
ПУДС	0,002400	1	0,002400	2,28571	0,205106
Ошибка	0,004200	4	0,001050		

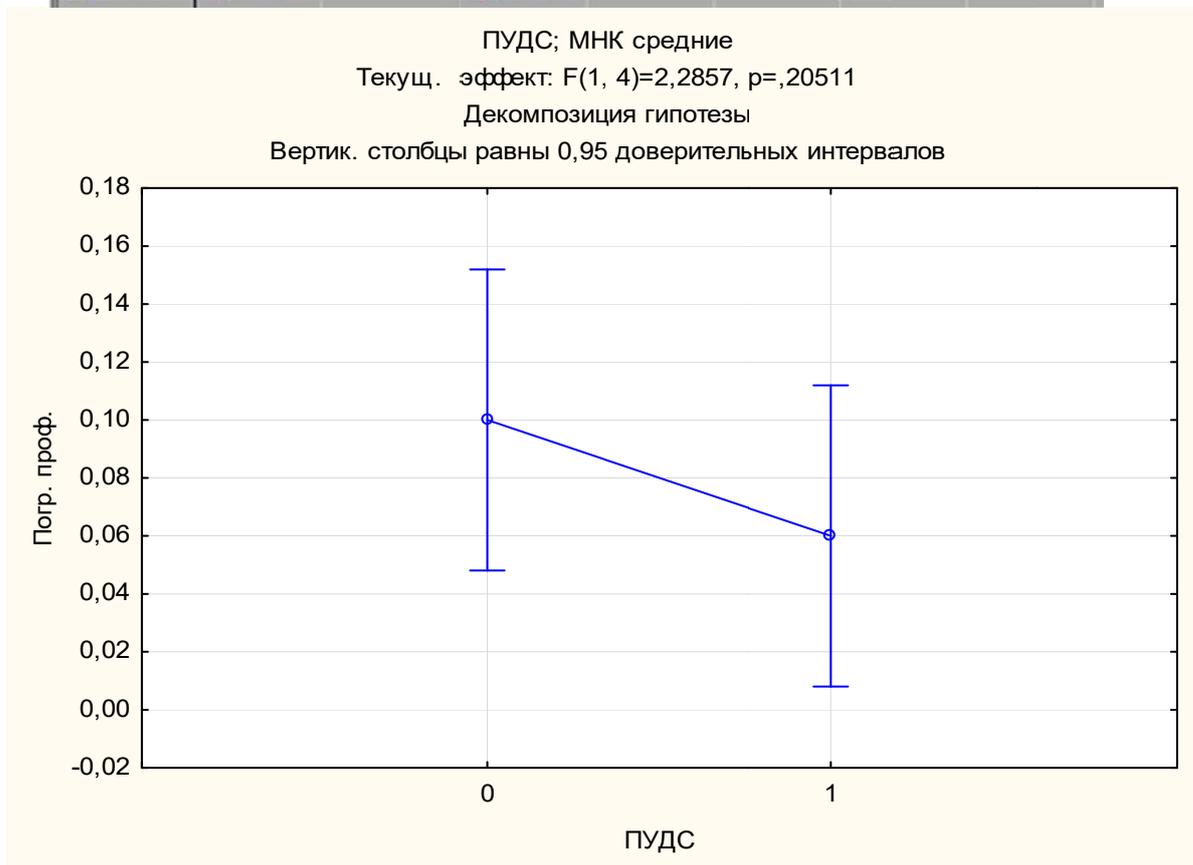


Рис. 4.14. Результаты однофакторного дисперсионного анализа влияния ПУДС на погрешность профиля обработанных отверстий в продольном сечении

Из результатов следует, что вероятность того, что ПУДС не влияет на погрешность профиля обработанных отверстий в продольном сечении, составляет 20,5%. Тем самым изменение этой погрешности можно признать статистически незначимым.

Таким образом, анализ полученных данных показывает, что при сверлении отверстий цветных металлов и сплавов в ПУДС не оказывает влияния на погрешность формы отверстия в сравнении с традиционным сверлением [267].

4.6 Выводы по главе 4

Выполненный дисперсионный анализ влияния ПУДС заготовок из сплава ЛС59-1 на процесс сверления показал:

1. его влияние на снижение осевой силы, в частности при использовании сверл диаметром 2 мм и режимах: число оборотов 3000 об/мин; подача 15 мм/мин (0,005 мм/об) на 42,3%;

2. его влияние на снижение крутящего момента, в частности при использовании сверл диаметром 2 мм и режимах: число оборотов 3000 об/мин; подача 200 мм/мин (0,067 мм/об) на 34,6%;

3. его влияние на повышение стойкости сверл, в частности при использовании сверл диаметром 1,3 мм и режимах: число оборотов 2100 об/мин; подача 100 мм/мин (0,048 мм/об) на 50 %;

4. отсутствие его влияния на шероховатость обработанных отверстий в сравнении с классическим сверлением, в частности при использовании сверла 1,1 мм и режимах: частота оборотов 3000 об/мин; подачи 20 мм/об;

5. отсутствие его влияния на диаметр обрабатываемого отверстия, в частности при использовании сверла 1,1 мм и режимах: частота оборотов 3000 об/мин; подачи 20 мм/об;

6. отсутствие его влияния на диаметр обработанных отверстий в различных сечениях, в частности при использовании сверла 1,1 мм и режимах: частота оборотов 3000 об/мин; подачи 20 мм/об;

7. отсутствие его влияния на погрешность профиля обработанных отверстий в продольном сечении, в частности при использовании сверла 1,1 мм и режимах: частота оборотов 3000 об/мин; подачи 20 мм/об.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ПУДС ЗАГОТОВОК ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ

При выполнении исследования использовались образцы рассматриваемых сплавов диаметром 10 мм и высотой 10 мм. Сверление заготовок из сплава Д16 при проведении экспериментов выполнялось с использованием СОЖ марки Bohre.

5.1. Исследование осевой силы при сверлении заготовок из цветных сплавов в ПУДС

5.1.1 Исследование осевой силы при сверлении заготовок из латуни ЛС59-1

Для исследования осевой силы при обработке заготовок из латуни ЛС59-1 в ПУДС был составлен план эксперимента с учетом технологических возможностей используемого оборудования (табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Матрица планирования эксперимента при сверлении заготовок из латуни ЛС59-1

№	d, мм	n, об/мин	s, мм/мин	s _o , мм/об
1.	1	1500	20	0,013
2.	1	1500	160	0,107
3.	1	3000	20	0,007
4.	1	3000	160	0,053
5.	2	1500	20	0,013
6.	2	1500	200	0,133
7.	2	3000	20	0,007
8.	2	3000	200	0,067

В дальнейшем при обработке результатов эксперимента вместо двух параметров плана, число оборотов и минутной подачи, использовался обобщенный параметр, подача на один оборот сверла $s_o = \frac{s}{n}$, мм/об. В процессе реализации данного

плана выполнялось сверление двух сквозных отверстий, осевая сила определялась по графику в зоне установившегося резания (рис. 5.1).

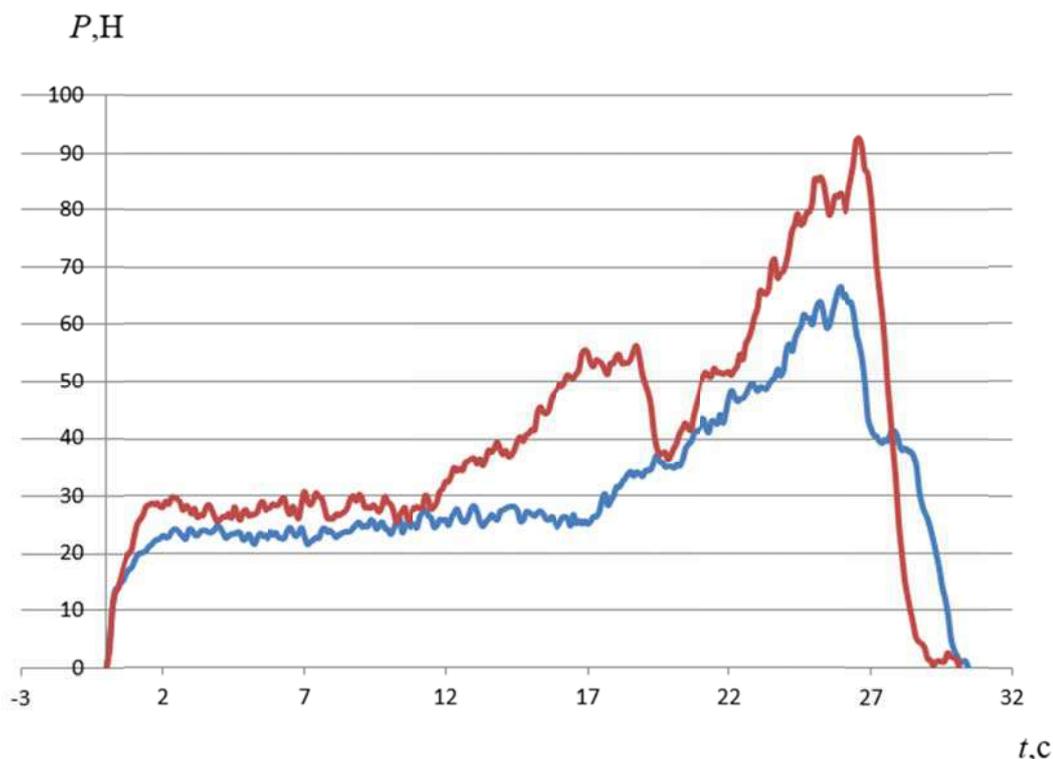


Рис. 5.1 График измерения осевой силы при сверлении ЛС59-1:
 $d=1$ мм; $s_o=0,013$ мм/об ($s=20$ мм/мин и $n=1500$ об/мин)

В таблице 5.2 представлены результаты измерения осевой силы в соответствии с планом эксперимента (см. табл. 5.1).

Таблица 5.2 – Результаты измерения осевой силы при сверлении латуни ЛС59-1

№	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Осевая сила, Н	27,4	117,9	21,6	64,2	62,2	192,3	75,3	94,1
	30,6	97,1	18,3	98,3	56,9	131,9	67,2	75,1
	44,3	107,5	19,95	81,2	60,9	162,1	71,25	84,6
	38,55	116,1	17,65	84,95	63,75	174,8	78,55	87,3
	30,45	98,9	22,25	77,55	55,35	149,54	63,95	81,9

Для построения регрессионного уравнения осевой силы было выполнено логарифмирование параметров и результатов экспериментов. Построение уравнения выполнялось в программе Statistica с использованием факторной регрессии, на рисунке 5.2 показаны результаты данного регрессионного анализа.

Зависим. Перемен.	SS модели и SS остатков (Таблица данных1)										
	Множест. R	Множест. R2	Скоррект R2	SS Модель	сс Модель	MS Модель	SS Остаток	сс Остаток	MS Остаток	F	p
ln(Po)	0,936354	0,876759	0,857799	5,863001	2	2,931500	0,824127	13	0,063394	46,24229	0,000001

а)

Эффект	Оценки параметров (Таблица данных1) Сигма-ограниченная параметризация										
	Коммент. (B/Z/P)	ln(Po) Парам.	ln(Po) Ст. Ош	ln(Po) t	ln(Po) p	-95,00% Дов. инт	+95,00% Дов. инт	ln(Po) Бета (?)	ln(Po) Ст. Ош. ?	-95,00% Дов. инт	+95,00% Дов. инт
Св. член		5,708540	0,204955	27,85236	0,000000	5,265762	6,151319				
ln(d)	Объедин										
ln(So)		0,522373	0,056896	9,18113	0,000000	0,399456	0,645290	0,930615	0,101362	0,711636	1,149593
ln(d)*ln(So)		-0,256859	0,048448	-5,30173	0,000143	-0,361525	-0,152193	-0,537392	0,101362	-0,756370	-0,318413

б)

Рис. 5.2 Результаты регрессионного анализа процесса сверления ЛС59-1: а) оценка значимости модели регрессии; б) оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии

На рисунке 5.3 показан результат сопоставления наблюдаемых и предсказанных значений вместе с 95% доверительных интервалов, все точки наблюдаемых значений расположены внутри доверительного интервала.

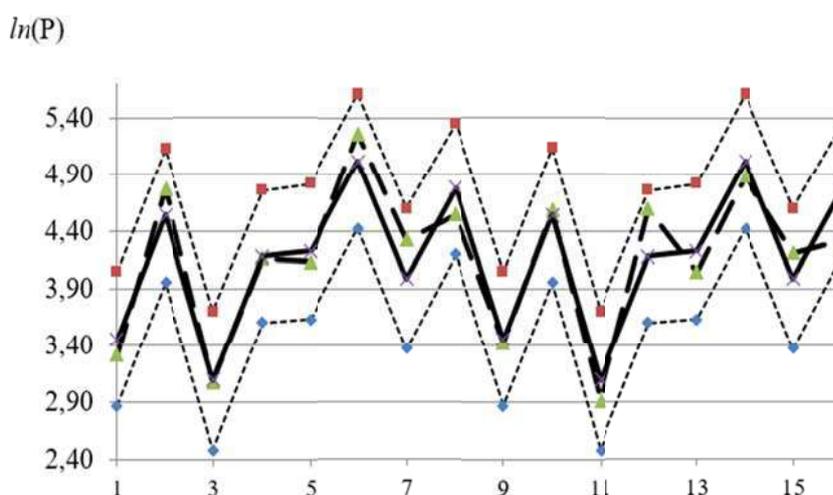


Рис. 5.3 Наблюдаемые и предсказанные значения величины $\ln(P_o)$ вместе с 95% доверительных интервалов

Полученные результаты свидетельствуют об адекватности полученного уравнения регрессии

$$\ln(P) = 5,71 + 0,522 \ln(s_o) - 0,257 \ln(d) \ln(s_o). \quad (5.1)$$

Выполнив математические преобразования (5.1), была получена следующая зависимость для осевой силы

$$P = 301,431s_0^{0,522}d^{0,257 \ln(s_0)}, \text{ Н.} \quad (5.2)$$

На рисунке 5.4 показаны графики изменения осевой силы при сверлении заготовок из латуни ЛС59-1 в ПУДС сверлами с диаметром 1, 1.5 и 2 мм, построенные по уравнению (5.2).

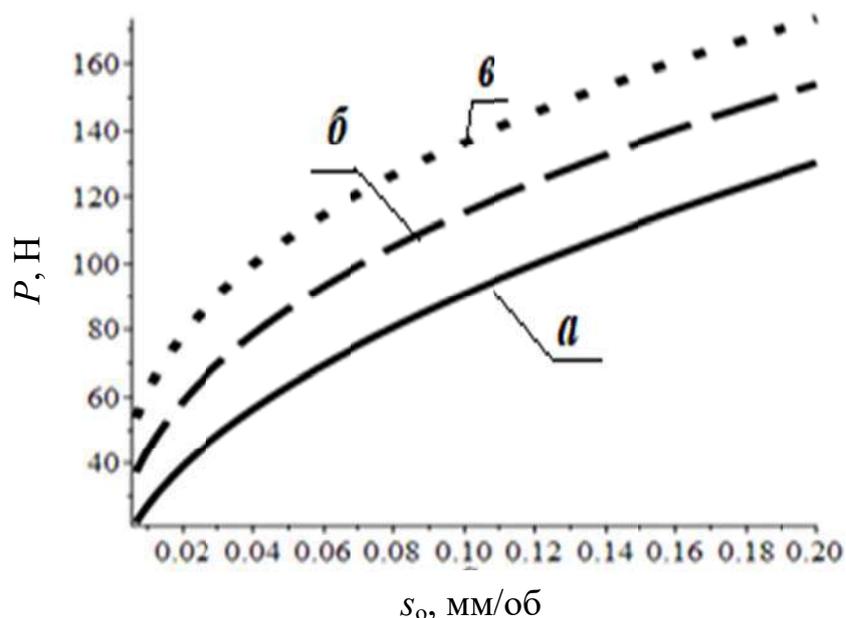


Рис. 5.4 Зависимость осевой силы при сверлении латуни ЛС59-1 в ПУДС от подачи s_0 при диаметре сверла:
а) $d=1$ мм; б) $d=1,5$ мм; в) $d=2$ мм

Полученная зависимость (5.2) позволит обоснованно назначить режимы обработки глубоких отверстий диаметром до 2 мм (1-2 мм) при сверлении латуни ЛС59-1 в ПУДС, исходя из заданной прочности сверла и обеспечивающих наибольшую производительность обработки при заданных требованиях к стойкости инструмента [259].

5.1.2. Исследование осевой силы при сверлении заготовок из алюминиевого сплава Д16

Для исследования осевой силы при сверлении заготовок из алюминиевого сплава Д16 в ПУДС была составлена следующая матрица эксперимента (табл. 5.3).

Таблица 5.3 – Матрица планирования эксперимента для исследования осевой силы при сверлении заготовок из алюминиевого сплава Д16 в ПУДС

№	d, мм	n, об/мин	s, мм/мин	s ₀ , мм/об
1.	1	1500	20	0,013
2.	1	3000	20	0,007
3.	1	1500	160	0,107
4.	1	3000	160	0,053
5.	2	1500	20	0,013
6.	2	3000	20	0,007
7.	2	1500	160	0,107
8.	2	3000	160	0,053

В каждой точке плана также выполнялось сверление двух сквозных отверстий, и осевая сила определялась по графику в зоне установившегося резания (рис. 5.5).

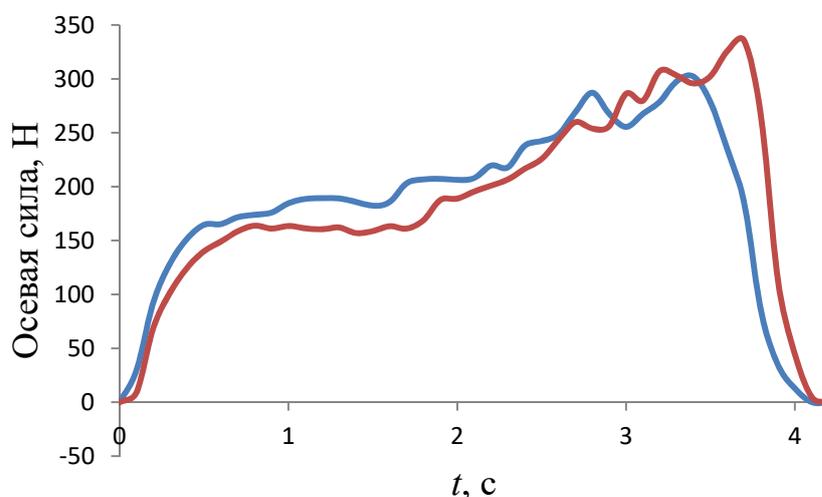


Рис. 5.5 График измерения осевой силы при сверлении Д16:

$d=2$ мм; $s_0=0,053$ мм/об ($s=40$ мм/мин и $n=3000$ об/мин)

В таблице 5.4 представлены результаты измерения осевой силы в соответствии с планом эксперимента (см. табл. 5.3).

Таблица 5.4 – Результаты измерения осевой силы при сверлении Д16

№	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Осевая сила, Н	46,9	17,3	79,5	89,9	29	25,4	376,3	189,3
	25,5	18,5	86,9	63,9	43,5	21,5	322,2	163,8
	32	21,6	87,9	76,9	36,25	23,45	349,25	1176,55
	40,4	17,9	83,2	82,3	40,15	21,15	370,05	188,75
	36,2	13,4	78,5	71,5	32,3	25,75	328,45	164,35

После обработки данных в программе Statistica было получено следующее регрессионное уравнение для логарифмического значения осевой силы

$$\ln(P) = 5.811 + 3.3 \ln(d) + 0.556 \ln(s_o) + 0,655 \ln(d) \ln(s_o), \quad (5.3)$$

имеющее характеристики, представленные на рисунках 5.6 и 5.7.

SS модели и SS остатков (Таблица данных1)											
Зависим. Перемен.	Множест. R	Множест. R2	Скоррект R2	SS Модель	сс Модель	MS Модель	SS Остаток	сс Остаток	MS Остаток	F	p
ln(Po)	0,979322	0,959072	0,948840	14,43201		3,4,810669	0,615884	12	0,051324	93,73200	0,000000

а)

Оценки параметров (Таблица данных1)										
Сигма-ограниченная параметризация										
Эффект	ln(Po) Парам.	ln(Po) Ст. Ош.	ln(Po) t	ln(Po) p	-95,00% Дов.инт	+95,00% Дов.инт	ln(Po) Бета (?)	ln(Po) Ст.Ош.?	-95,00% Дов.инт	+95,00% Дов.инт
Св.член	5,810459	0,276724	20,99729	0,000000	5,207529	6,413389				
ln(d)	3,299999	0,564595	5,84490	0,000079	2,069853	4,530145	1,179319	0,201769	0,739702	1,618936
ln(So)	0,556368	0,073083	7,61279	0,000006	0,397133	0,715603	0,628753	0,082592	0,448801	0,808704
ln(d)*ln(So)	0,654805	0,149110	4,39141	0,000879	0,329921	0,979688	0,922419	0,210051	0,464758	1,380081

б)

Рис. 5.6 Результаты регрессионного анализа процесса сверления сплава Д16: а) оценка значимости модели регрессии; б) оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии

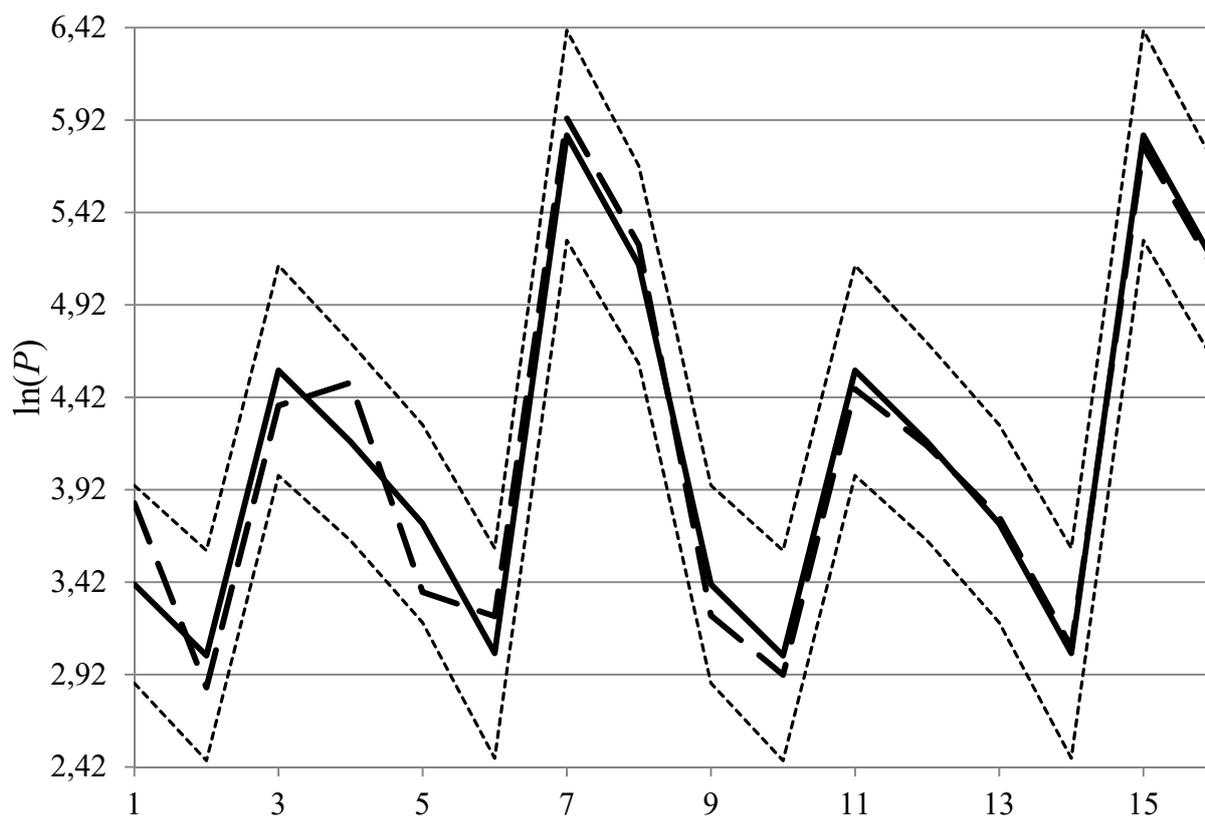


Рис. 5.7 Наблюдаемые и предсказанные значения величины $\ln(P)$ вместе с 95% доверительных интервалов

Полученные результаты регрессионного анализа свидетельствуют об адекватности полученного уравнения регрессии (5.3). После математических преобразований уравнения (5.3) было получено окончательное уравнение для осевой силы при сверлении заготовок из сплава Д16 в ПУДС

$$P = 333,77s_o^{0,556}d^{3,3+0,0,65 \ln(s_o)}, \text{ Н.} \quad (5.4)$$

На рисунке 5.8 показаны графики изменения осевой силы при сверлении заготовок из сплава Д16 в ПУДС.

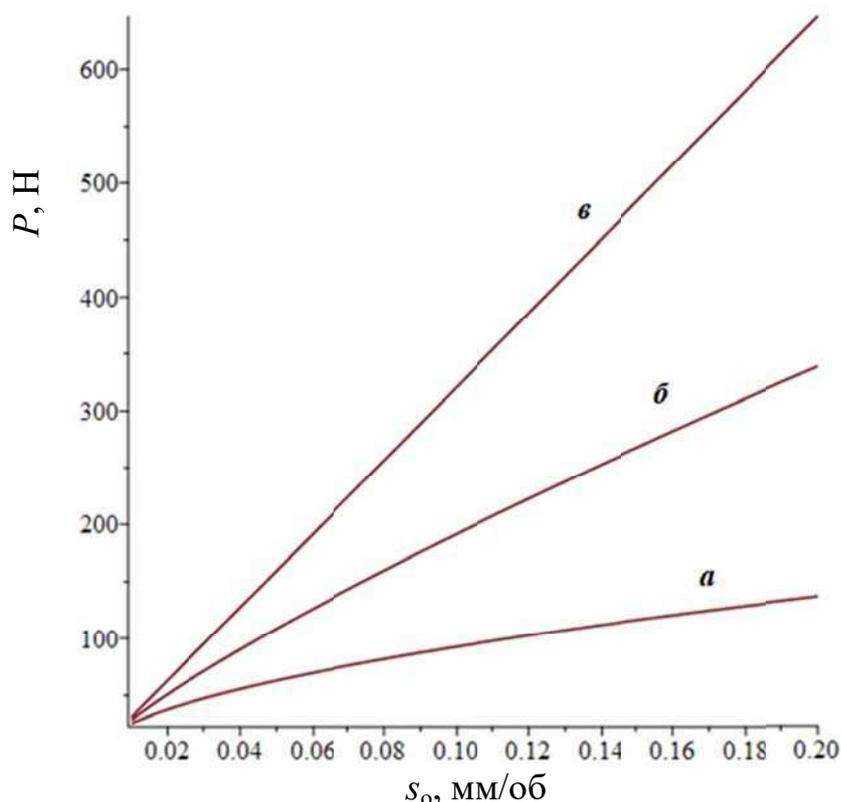


Рис. 5.8 Зависимость осевой силы при сверлении сплава Д16 в ПУДС от подачи s_o при диаметре сверла:
а) $d=1$ мм; б) $d=1,5$ мм; в) $d=2$ мм

Кривые на рис. 5.8 соответствуют диаметрами 1, 1,5 и 2 мм и построены по уравнению (5.4) [260].

5.2. Исследование глубины устойчивого сверления заготовок из цветных сплавов в ПУДС

Выполненные исследования осевой силы и крутящего момента резания позволили установить зону устойчивого процесса сверления (см. рис. 5.1. и 5.5), которая характеризуется временем устойчивой работы сверла (t_u) при заданных режимах сверления. Исходя из времени устойчивой работы сверла, будем выполнять расчет глубины просверленного отверстия, соответствующего этому времени

$$L = s \cdot t_u. \quad (5.5)$$

Далее выполним построение регрессионных моделей глубины просверленных отверстий для материалов ЛС59-1 и Д16.

5.2.1 Исследование глубины устойчивого сверления заготовок из сплава ЛС59-1

В таблице 5.5 показаны результаты измерения глубины устойчивого сверления заготовок из сплава ЛС59-1 в ПУДС.

Таблица 5.5 – Результаты измерения глубины устойчивого сверления заготовок из сплава ЛС59-1

№	d, мм	n, об/мин	s, мм/мин	s ₀ , мм/об	Время устойчивого сверления, с		Глубина устойчивого сверления (L), мм	
1.	1	1500	20	0,013	17,1	11,8	5,70	3,93
2.	1	1500	160	0,107	3,1	3,4	8,27	9,07
3.	1	3000	20	0,007	12,5	12,2	4,17	4,07
4.	1	3000	160	0,053	2,1	2	5,60	5,33
5.	2	1500	20	0,013	17,2	17,5	5,73	5,83
6.	2	1500	200	0,133	1,2	1,5	4,00	5,00
7.	2	3000	20	0,007	11,7	11,1	3,90	3,70
8.	2	3000	200	0,067	2	2,4	6,67	8,00

Для построения уравнения регрессии было выполнено логарифмирование данных результатов (табл. 5.6).

Таблица 5.6 – Логарифмированные значения результатов измерения глубины устойчивого сверления заготовок из сплава ЛС59-1

№	ln(d)	ln(s)	ln(n)	ln(s ₀)	ln(L)	
1.	0	7,31322	2,995732	-4,34281	1,740466	1,369487
2.	0	7,31322	5,075174	-2,23493	2,112231	2,204605
3.	0	8,006368	2,995732	-4,96185	1,427116	1,402824
4.	0	8,006368	5,075174	-2,93746	1,722767	1,673976
5.	0,693147	7,31322	2,995732	-4,34281	1,746297	1,763589
6.	0,693147	7,31322	5,298317	-2,01741	1,386294	1,609438
7.	0,693147	8,006368	2,995732	-4,96185	1,360977	1,308333
8.	0,693147	8,006368	5,298317	-2,70306	1,89712	2,079442

На основании полученных данных (см. табл. 5.6) в программе Statistica был выполнен подбор уравнения регрессии, обладающего лучшими показателями по адекватности (рис. 5.9 – 5.10)

$$\ln(L) = 0,955 + 26,07 \ln(d) + 1,15 \ln(s) - 3,34 \ln(d) \ln(n) - 7,85 \ln(d) \ln(s) - 0,126 \ln(n) \ln(s) + 1,004 \ln(d) \ln(n) \ln(s). \quad (5.6)$$

SS модели и SS остатков (Таблица данных1)											
Зависим. Перемен.	Множест. R	Множест. R2	Скоррект R2	SS Модель	сс Модель	MS Модель	SS Остаток	сс Остаток	MS Остаток	F	p
ln(L)	0,970289	0,941451	0,902436	1,105690	6	0,184282	0,068730	9	0,007639	24,12416	0,000046

а)

Оценки параметров (Таблица данных1)											
Сигма-ограниченная параметризация											
Эффект	Коммент. (V/Z/P)	ln(L) Парам.	ln(L) Ст. Ош.	ln(L) t	ln(L) p	-95,00% Дов.инт	+95,00% Дов.инт	ln(L) Бета (?)	ln(L) Ст.Ош.?	-95,00% Дов.инт	+95,00% Дов.инт
Св.член		0,95482	0,123852	7,70935	0,000030	0,67464	1,23499				
ln(d)	Объедин	26,06952	3,691416	7,06220	0,000059	17,71896	34,42008	33,3483	4,722076	22,6662	44,0303
ln(n)											
ln(s)		1,15303	0,166559	6,92261	0,000069	0,77624	1,52981	4,6744	0,675231	3,1469	6,2018
ln(d)*ln(n)		-3,34089	0,480864	-6,94768	0,000067	-4,42868	-2,25310	-32,8025	4,721357	-43,4829	-22,1220
ln(d)*ln(s)		-7,84484	0,889754	-8,81687	0,000010	-9,85761	-5,83208	-44,7086	5,070802	-56,1796	-33,2377
ln(n)*ln(s)	-0,12549	0,021396	-5,86500	0,000239	-0,17389	-0,07709	-3,9556	0,674434	-5,4812	-2,4299	
ln(d)*ln(n)*ln(s)	1,00425	0,115914	8,66373	0,000012	0,74203	1,26646	43,9230	5,069759	32,4544	55,3916	

б)

Рис. 5.9 Результаты регрессионного анализа глубины устойчивого сверления заготовок из сплава ЛС59-1: а) оценка значимости модели регрессии; б) оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии

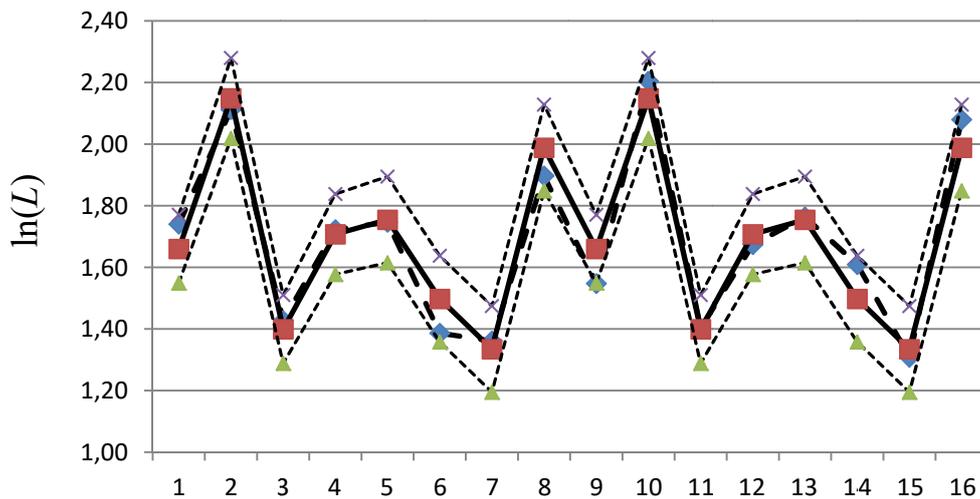


Рис. 5.10 Наблюдаемые и предсказанные значения величины $\ln(L)$ вместе с 95% доверительных интервалов

На основании полученных данных можно говорить об адекватности построенного уравнения. Проведя математические преобразования (5.6), окончательно было получено уравнение

$$L = 2,598d^{26,07+(1,004 \ln(s)-3,34) \ln(n)-7,85 \ln(s)} s^{1,15} n^{0,126 \ln(s)}. \quad (5.7)$$

На рис. 5.11 показаны графики изменения глубины устойчивого сверления заготовок из сплава ЛС59-1, где пунктирная линия соответствует частоте 1500 об/мин, а сплошная – 3000 об/мин.

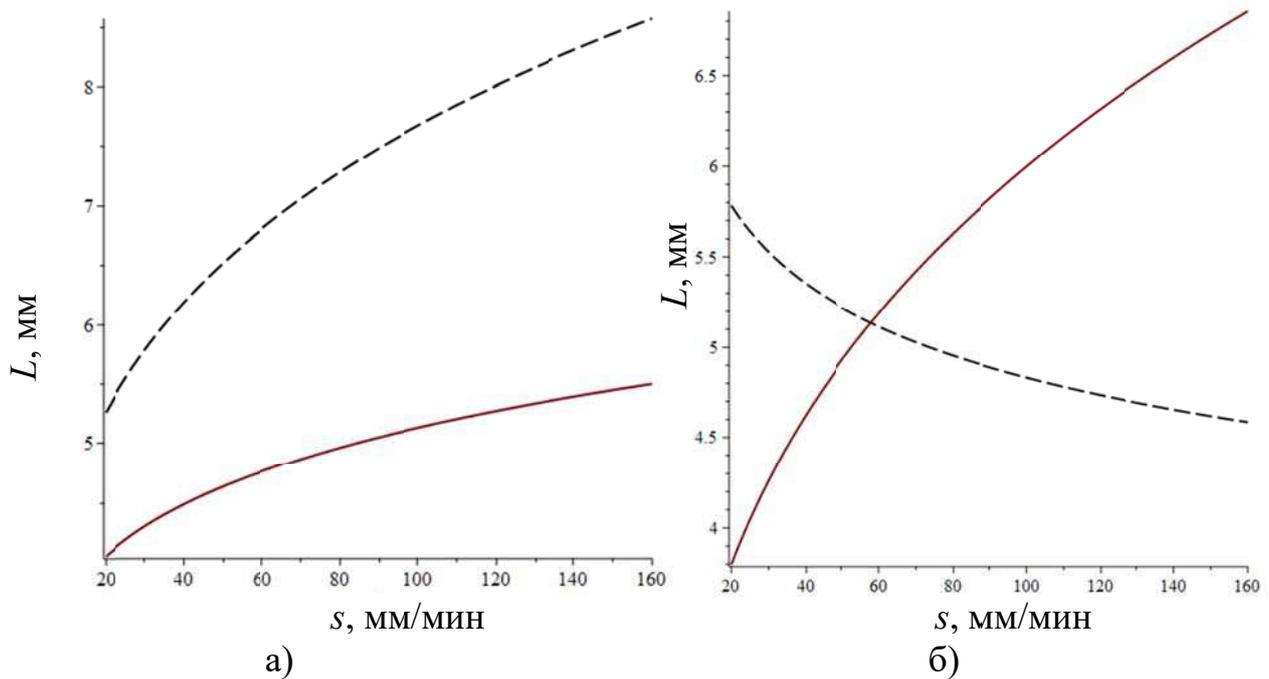


Рис. 5.11 Изменения глубины устойчивого сверления заготовок из сплава ЛС59-1: а) при диаметре сверла 1 мм; б) при диаметре сверла 2 мм

Из графиков видно, что с увеличением диаметра меняется характер зависимости глубины устойчивого сверления заготовок из сплава ЛС59-1 при увеличении числа оборотов сверла. Учет данных зависимостей позволит выполнить проектирование процесса сверления заготовок из сплава ЛС59-1 в ПУДС, обеспечивающих заданную стойкость сверла и наибольшую производительность [264].

5.2.2 Исследование глубины устойчивого сверления заготовок из сплава Д16

В таблице 5.7 показаны результаты измерения глубины устойчивого сверления заготовок из сплава Д16 в ПУДС.

Таблица 5.7 – Результаты измерения глубины устойчивого сверления заготовок из сплава Д16

№	d , мм	s , мм/мин	n , об/мин	s_o , мм/об	Время устойчивого сверления, с		Глубина устойчивого сверления (L), мм	
1.	1	20	1500	0,013	11,8	9,6	3,93	3,20
2.	1	20	3000	0,007	4,9	4,7	1,63	1,57
3.	1	160	1500	0,107	2,9	2	7,73	5,33
4.	1	160	3000	0,053	1,7	1,5	4,53	4,00
5.	2	20	1500	0,013	11	13	3,67	4,33
6.	2	20	3000	0,007	9,2	9,9	3,07	3,30
7.	2	160	1500	0,107	1,6	1,9	4,27	5,07
8.	2	160	3000	0,053	1,6	1,8	4,27	4,80

Для построения уравнения регрессии также было выполнено логарифмирование данных результатов (табл. 5.8).

Таблица 5.8 – Логарифмированные значения результатов измерения глубины устойчивого сверления заготовок из сплава Д16

№	$\ln(d)$	$\ln(s)$	$\ln(n)$	$\ln(s_o)$	$\ln(L)$	
1.	0	2,995732	7,31322	-4,31749	1,369487	1,163151
2.	0	2,995732	8,006368	-5,01064	0,490623	0,44895
3.	0	5,075174	7,31322	-2,23805	2,04554	1,673976
4.	0	5,075174	8,006368	-2,93119	1,511458	1,386294
5.	0,693147	2,995732	7,31322	-4,31749	1,299283	1,466337
6.	0,693147	2,995732	8,006368	-5,01064	1,120591	1,193922
7.	0,693147	5,075174	7,31322	-2,23805	1,450833	1,622683
8.	0,693147	5,075174	8,006368	-2,93119	1,450833	1,568616

На основании полученных данных (см. табл. 5.8) в программе Statistica был выполнен подбор уравнения регрессии, обладающего лучшими показателями по адекватности (рис. 5.12 – 5.13)

$$\ln(L) = 2,798 - 1,37 \ln(d) + 0,055 \ln(n) \ln(s_o) - 0,056 \ln(d) \ln(n) \ln(s_o). \quad (5.8)$$

SS модели и SS остатков (Таблица данных1)											
Зависим. Перемен.	Множест. R	Множест. R2	Скоррект R2	SS Модель	сс Модель	MS Модель	SS Остаток	сс Остаток	MS Остаток	F	p
ln(L)	0,941503	0,886427	0,858034	2,154282	3	0,718094	0,275015	12	0,023001	31,21978	0,000006

а)

Оценки параметров (Таблица данных1)											
Сигма-ограниченная параметризация											
Эффект	Коммент. (B/Z/P)	ln(L) Парам.	ln(L) Ст. Ош.	ln(L) t	ln(L) p	-95,00% Дов. инт	+95,00% Дов. инт	ln(L) Бета (?)	ln(L) Ст. Ош. ?	-95,00% Дов. инт	+95,00% Дов. инт
Св. член		2,79801	0,176697	15,83506	0,000000	2,41302	3,182995				
ln(d)		-1,37227	0,360511	-3,80647	0,002500	-2,15776	-0,386789	-1,22030	0,320586	-1,91880	-0,521804
ln(So)	Объедин										
ln(n)	Объедин										
ln(d)*ln(So)	Объедин										
ln(d)*ln(n)	Объедин										
ln(So)*ln(n)		0,05512	0,006039	9,12794	0,000001	0,04196	0,068276	1,25584	0,137582	0,95607	1,555603
ln(d)*ln(So)*ln(n)		-0,05623	0,012320	-4,56373	0,000651	-0,08307	-0,029383	-1,52895	0,335022	-2,25890	-0,799000

б)

Рис. 5.12 Результаты регрессионного анализа глубины устойчивого сверления заготовок из сплава Д16: а) оценка значимости модели регрессии;

б) оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии

На основании полученных данных можно говорить об адекватности построенного уравнения. Проведя математические преобразования (5.8), окончательно было получено уравнение

$$L = 16,41d^{-1,372-0,056 \ln(n) \ln(s_o)} n^{0,055 \ln(s_o)}, \quad (5.9)$$

которое путем подстановки вместо величины подачи на оборот соотношения s/n было преобразовано к следующему виду

$$L = 16,41d^{-1,372+0,056(\ln(n)^2 - \ln(n)^2 \ln(s))} n^{0,055 \ln(s)} e^{-0,055 \ln(n)^2}. \quad (5.10)$$

На рис. 5.13 показаны графики изменения глубины устойчивого сверления заготовок из сплава Д16, где пунктирная линия соответствует диаметру сверла 1 мм, а сплошная линия – диаметру сверла 2 мм.

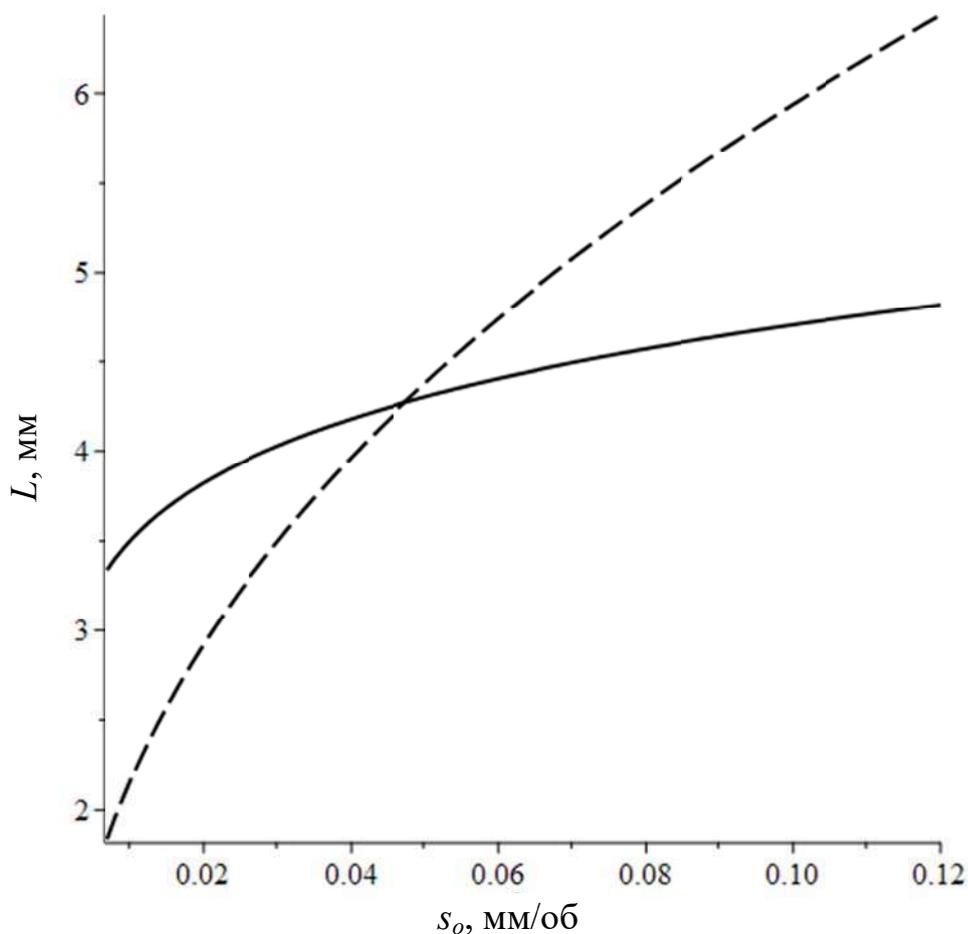


Рис. 5.13 Изменения глубины устойчивого сверления заготовок из сплава Д16

Исходя из полученных зависимостей видно, что с увеличением подачи на оборот глубина устойчивого сверления также возрастает [265].

5.3 Исследование периода стойкости сверл с учетом глубины устойчивого сверления заготовок из цветных сплавов в ПУДС

Исследование периода стойкости спиральных сверл осуществлялось с учетом глубины устойчивого сверления для рассматриваемых материалов, определяемое по ранее установленным зависимостям (5.7) и (5.10).

5.3.1 Исследование периода стойкости сверл при сверлении заготовок из сплава Д16

В таблице 5.9 показаны результаты оценки периода стойкости спиральных сверл при сверлении заготовок из сплава Д16 в ПУДС.

Таблица 5.9 – Результаты оценки периода стойкости сверл при сверлении заготовок из сплава Д16

№	d , мм	s , мм/мин	n , об/мин	Глубина устойчивого сверления (L), мм	Число проходов	T , с		
1.	1	20	1500	3,2	4	21	15	18
2.	1	20	3000	1,57	7	345	408	300
3.	1	160	1500	5,33	2	3	1,9	4,1
4.	1	160	3000	4	3	1,5	3	2,3
5.	2	20	1500	3,67	3	2730	2490	2610
6.	2	20	3000	3,07	4	1044	1176	1110
7.	2	160	1500	4,27	3	187	222	195
8.	2	160	3000	4,27	3	49,5	40,5	45

Для построения уравнения регрессии также было выполнено логарифмирование данных результатов (табл. 5.10).

Таблица 5.10 – Логарифмированные значения результатов оценки периода стойкости сверл при сверлении заготовок из сплава Д16

№	$\ln(d)$	$\ln(s)$	$\ln(n)$	$\ln(T)$		
1.	0	2,995732	7,31322	3,044522	2,70805	2,890372
2.	0	2,995732	8,006368	5,843544	6,011267	5,703782
3.	0	5,075174	7,31322	1,098612	0,628609	1,417066
4.	0	8,006368	8,006368	0,405465	1,098612	0,81093
5.	0,693147	2,995732	7,31322	7,912057	7,820038	7,867106
6.	0,693147	2,995732	8,006368	6,950815	7,069874	7,012115
7.	0,693147	8,006368	7,31322	5,229771	5,402677	5,273
8.	0,693147	8,006368	8,006368	3,901973	3,701302	3,806662

На основании полученных данных (см. табл. 5.10) в программе Statistica был выполнен подбор уравнения регрессии, обладающего лучшими показателями по адекватности (рис. 5.14)

$$\ln(T) = -75,208 + 124,1016 \cdot \ln(d) + 15,6 \cdot \ln(s) +$$

$$\begin{aligned}
 &+11,0388 \cdot \ln(n) - 19,5782 \cdot \ln(d) \cdot \ln(s) - \\
 &-15,7781 \cdot \ln(d) \cdot \ln(n) - 2,2536 \cdot \ln(s) \cdot \ln(n) + \\
 &+ 2,60077 \cdot \ln(d) \cdot \ln(s) \cdot \ln(n)
 \end{aligned} \quad (5.11)$$

Зависим. Перемен.	SS модели и SS остатков (Таблица данных1)										
	Множест. R	Множест. R2	Скоррект R2	SS Модель	сс Модель	MS Модель	SS Остаток	сс Остаток	MS Остаток	F	p
In_Tsec	0,997586	0,995177	0,993067	146,2962	7	20,89946	0,709011	16	0,044313	471,6306	0,00

а)

Эффект	Оценки параметров (Таблица данных1) Сигма-ограниченная параметризация									
	In_Tsec Парам.	In_Tsec Ст. Ош.	In_Tsec t	In_Tsec p	-95,00% Дов.инт	+95,00% Дов.инт	In_Tsec Бета (?)	In_Tsec Ст.Ош.?	-95,00% Дов.инт	+95,00% Дов.инт
Св.член	-75,2079	5,38857	-13,9569	0,000000	-86,6312	-63,7847				
In_d	124,1016	10,99419	11,2879	0,000000	100,7950	147,4032	17,3785	1,539564	14,1148	20,6422
In_s	15,6000	1,29308	12,0642	0,000000	12,8588	18,3412	6,5536	0,543226	5,4020	7,7052
In_n	11,0388	0,70277	15,7076	0,000000	9,5490	12,5236	1,5458	0,098412	1,3372	1,7544
In_d*ln_s	-19,5782	2,63824	-7,4209	0,000001	-25,1711	-13,9854	-11,7752	1,586759	-15,1390	-8,4115
In_d*ln_n	-15,7781	1,43384	-11,0040	0,000000	-18,8177	-12,7334	-16,9587	1,541136	-20,2258	-13,6916
In_s*ln_n	-2,2536	0,16864	-13,3635	0,000000	-2,6111	-1,8951	-7,3703	0,551522	-8,5395	-6,2011
In_d*ln_s*ln_n	2,6077	0,34408	7,5788	0,000001	1,8783	3,3371	12,0366	1,588190	8,6698	15,4034

б)

Рис. 5.14 Результаты регрессионного анализа периода стойкости сверл при сверлении заготовок из сплава Д16: а) оценка значимости модели регрессии; б) оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии

На основании полученных данных можно говорить об адекватности построенного уравнения. Проведя математические преобразования (5.11), окончательно было получено уравнение

$$\begin{aligned}
 T &= e^{-75,208} d^{(2,6 \cdot \ln(s) - 15,78) \cdot \ln(n) - 19,58 \cdot \ln(s) + 124,1} \times \\
 &\times s^{15,6 - 2,254 \cdot \ln(n)} n^{11,04}, \text{ с.}
 \end{aligned} \quad (5.12)$$

Также на основании уравнения (5.) путем преобразования было получено уравнение для периода стойкости, выраженное в мм

$$\begin{aligned}
 T_{\text{мм}} &= e^{-79,302} d^{(2,6 \cdot \ln(s) - 15,78) \cdot \ln(n) - 19,58 \cdot \ln(s) + 124,1} \times \\
 &\times s^{16,6 - 2,254 \cdot \ln(n)} n^{11,04}, \text{ мм.}
 \end{aligned} \quad (5.13)$$

На рис. 5.15 показаны графики изменения периода стойкости сверл при сверлении заготовок из сплава Д16 в ПУДС при частоте вращения 1500 об/мин, где

пунктирная линия соответствует подаче 160 мм/мин, а сплошная линия – подаче 20 мм/мин.

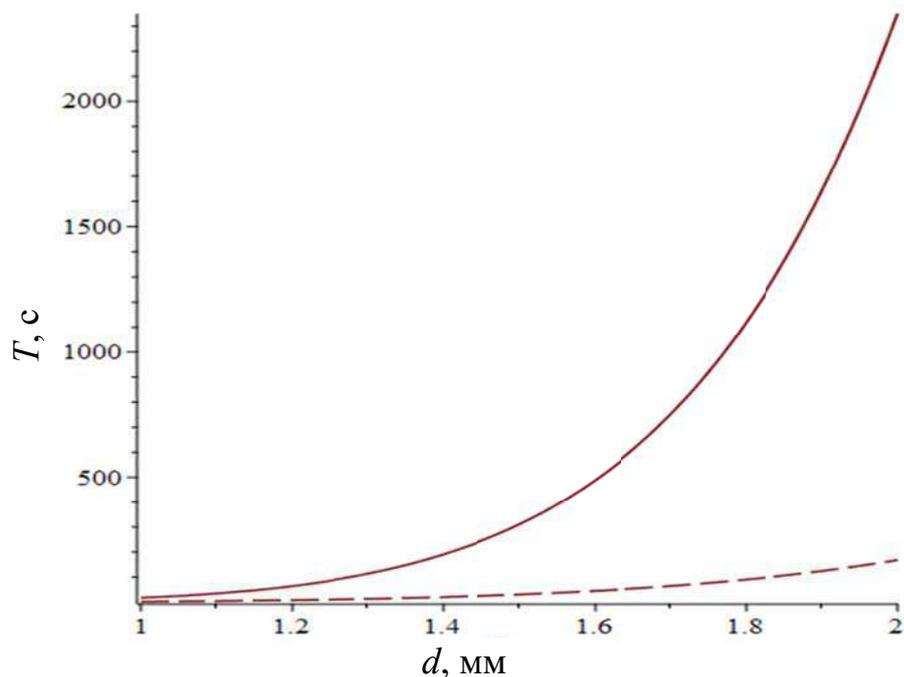


Рис. 5.15 Изменение периода стойкости сверл при сверлении заготовок из сплава Д16 в ПУДС при различной подаче сверла

Также на рис. 5.16 показаны графики изменения периода стойкости сверл при сверлении заготовок из сплава Д16 в ПУДС при подаче 20 мм/мин, где пунктирная линия соответствует частоте вращения 3000 об/мин, а сплошная линия – частоте вращения 1500 об/мин.

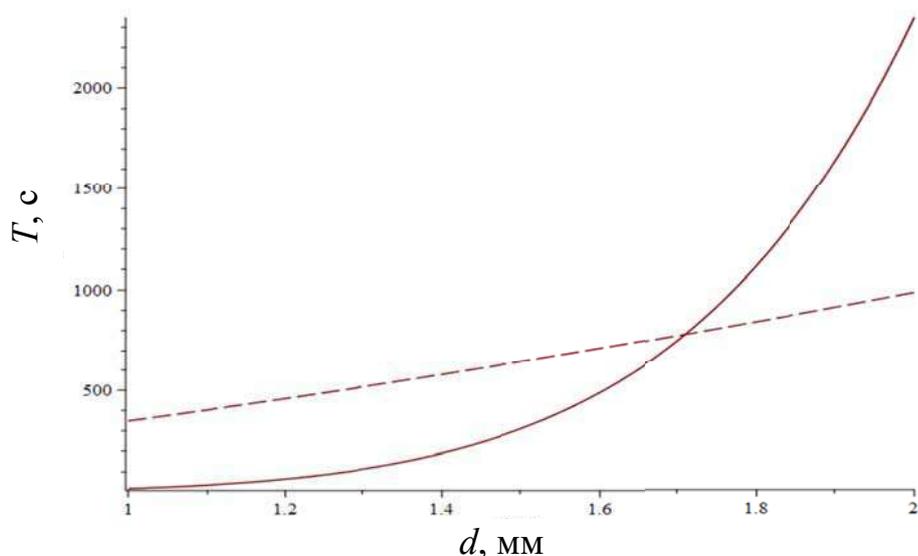


Рис. 5.16 Изменения стойкости сверл при сверлении заготовок из сплава Д16 в ПУДС при различной частоте вращения сверла

Исходя из анализа полученных зависимостей (см. рис. 5.15 и 5.16), можно утверждать, что сверла с большим диаметром обладают более высокой стойкостью при сверлении заготовок из сплава Д16 в ПУДС.

Изменение стойкости сверл (c) при сверлении отверстия диаметром 2 мм в заготовках из сплава Д16 в ПУДС от частоты вращения сверла (мм/об) показано на рисунке 5.17, где пунктирная линия соответствует подаче 20 мм/мин, а сплошная линия – подаче 160 мм/мин.

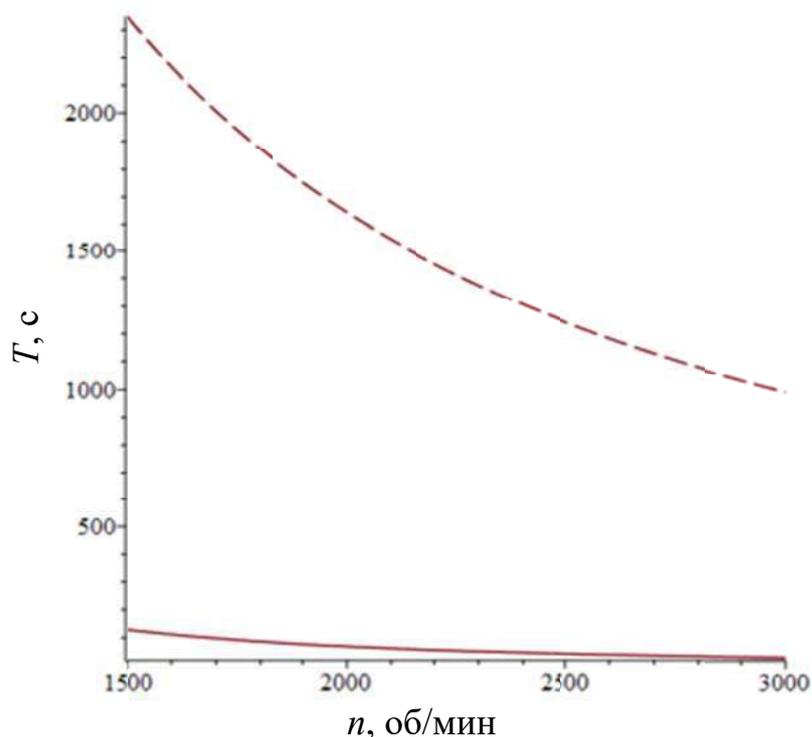


Рис. 5.17 Изменения стойкости сверла (c) диаметром 2 мм при сверлении заготовок из сплава Д16 в ПУДС от частоты вращения сверла (об/мин)

Также на рис. 5.18 показаны графики изменения периода стойкости сверл (c) диаметром 2 мм при сверлении в заготовках из сплава Д16 в ПУДС от подачи (мм/мин), где пунктирная линия соответствует частоте вращения 3000 об/мин, а сплошная линия – частоте вращения 1500 об/мин.

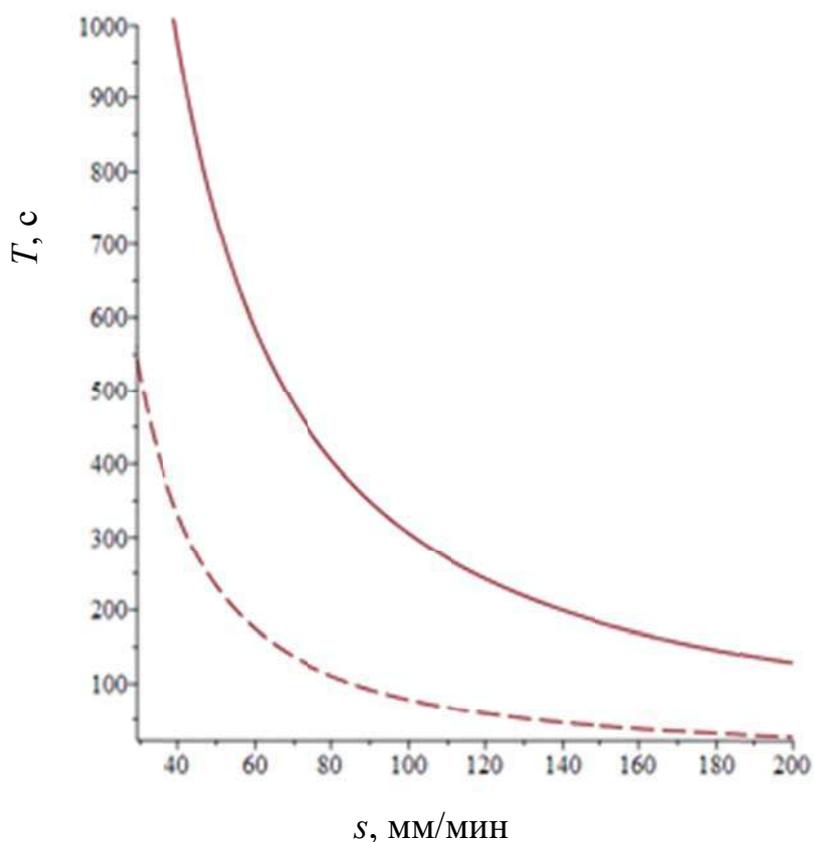


Рис. 5.18 Изменения стойкости сверла (с) диаметром 2 мм при сверлении заготовок из сплава Д16 в ПУДС от подачи (мм/мин)

Анализ полученных зависимостей (см. рис. 5.17 и 5.18) показал, что повышение режимов обработки приводит к монотонному уменьшению стойкости сверла диаметром 2 мм при сверлении заготовок из сплава Д16 в ПУДС [266].

5.3.2 Исследование периода стойкости сверл при сверлении заготовок из сплава ЛС59-1

В таблице 5.11 показаны результаты оценки периода стойкости сверл при сверлении заготовок из сплава ЛС59-1 в ПУДС.

Таблица 5.11 – Результаты оценки периода стойкости сверл при сверлении заготовок из сплава ЛС59-1

№	d, мм	n, об/мин	s, мм/мин	Глубина устойчивого сверления (L), мм	Число проходов	T, с		
	1	1500	20	3,93	3	120	138	156
2.	1	1500	160	8,27	2	1,9	2,3	2,6
3.	1	3000	20	4,07	3	1470	1590	1740,0
4.	1	3000	160	5,33	2	1,9	2,6	3,4
5.	2	1500	20	5,73	2	11940	11730	11520
6.	2	1500	200	4	3	732	699	666
7.	2	3000	160	3,7	3	1008,8	1042,5	1076,3
8.	2	3000	20	6,67	2	17790	17370	16950

Для построения уравнения регрессии также было выполнено логарифмирование данных результатов (табл. 5.12).

Таблица 5.12 – Логарифмированные значения результатов оценки периода стойкости сверл при сверлении заготовок из сплава ЛС59-1

№	ln(d)	ln(n)	ln(s)	ln(T)		
1.	0	7,31322	2,995732	4,787492	4,927254	5,049856
2.	0	7,31322	5,075174	0,628609	0,81093	0,965081
3.	0	8,006368	2,995732	7,293018	7,371489	7,46164
4.	0	8,006368	5,075174	0,628609	0,965081	1,216395
5.	0,693147	7,31322	2,995732	9,387649	9,369905	9,35184
6.	0,693147	7,31322	5,298317	6,595781	6,549651	6,50129
7.	0,693147	8,006368	5,075174	6,916467	6,949377	6,981238
8.	0,693147	8,006368	2,995732	9,786392	9,7625	9,738023

На основании полученных данных (см. табл. 5.11) в программе Statistica был выполнен подбор уравнения регрессии, обладающего лучшими показателями по адекватности (рис. 5.19)

$$\begin{aligned}
 \ln(T) = & -50,277 + 79,544 \cdot \ln(d) + 9,783 \cdot \ln(s) + \\
 & + 8,359 \cdot \ln(n) - 13,937 \cdot \ln(d) \cdot \ln(s) - \\
 & - 10,446 \cdot \ln(d) \cdot \ln(n) - 2,254 \cdot \ln(s) \cdot \ln(n) + \\
 & + 2,055 \cdot \ln(d) \cdot \ln(s) \cdot \ln(n).
 \end{aligned}
 \tag{5.14}$$

Зависим. Перемен.	SS модели и SS остатков (Таблица данных1)										
	Множест. R	Множест. R2	Скоррект R2	SS Модель	сс Модель	MS Модель	SS Остаток	сс Остаток	MS Остаток	F	p
Ln_T	0,999417	0,998834	0,998325	246,6166	7	35,23094	0,287774	16	0,017986	1958,810	0,00

а)

Эффект	Оценки параметров (Таблица данных1) Сигма-ограниченная параметризация									
	Ln_T Парам.	Ln_T Ст. Ош.	Ln_T t	Ln_T p	-95,00% Дов. инт	+95,00% Дов. инт	Ln_T Бета (?)	Ln_T Ст. Ош. ?	-95,00% Дов. инт	+95,00% Дов. инт
Св. член	-50,2768	3,432994	-14,6452	0,000000	-57,5544	-42,9992				
Ln d	79,5443	6,878977	11,5634	0,000000	64,9615	94,1271	8,59500	0,743294	7,0193	10,17071
Ln n	8,3593	0,447726	18,6707	0,000000	7,4102	9,3085	0,90325	0,048378	0,8007	1,00581
Ln S	9,7834	0,823805	11,8758	0,000000	8,0370	11,5298	3,26311	0,274769	2,6806	3,84559
Ln d*Ln n	-10,4462	0,898510	-11,6261	0,000000	-12,3509	-8,5414	-8,66358	0,745185	-10,2433	-7,08386
Ln d*Ln S	-13,9365	1,638000	-8,5083	0,000000	-17,4089	-10,4641	-6,59001	0,774543	-8,2320	-4,94805
Ln n*Ln S	-1,6087	0,107439	-14,9730	0,000000	-1,8364	-1,3809	-4,14604	0,276901	-4,7330	-3,55903
Ln d*Ln n*Ln S	2,0548	0,214093	9,5979	0,000000	1,6010	2,5087	7,44057	0,775231	5,7972	9,08398

б)

Рис. 5.19 Результаты регрессионного анализа периода стойкости сверл при сверлении заготовок из сплава ЛС59-1: а) оценка значимости модели регрессии;

б) оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии

На основании полученных данных можно говорить об адекватности построенного уравнения. Проведя математические преобразования (5.14), окончательно было получено уравнение

$$T = e^{-50,277} d^{(2,05 \cdot \ln(s) - 10,45) \cdot \ln(n) - 13,94 \cdot \ln(s) + 79,54} \times s^{9,78 - 1,61 \cdot \ln(n)} n^{8,36}, \text{ с.} \quad (5.15)$$

Также на основании уравнения (5.15) путем преобразования было получено уравнение для стойкости, выраженное в мм

$$T_{\text{мм}} = e^{-54,371} d^{(2,05 \cdot \ln(s) - 10,45) \cdot \ln(n) - 13,94 \cdot \ln(s) + 79,54} \times s^{10,78 - 1,61 \cdot \ln(n)} n^{8,36}, \text{ мм.} \quad (5.16)$$

На рис. 5.20 показаны графики изменения периода стойкости сверл при сверлении заготовок из сплава ЛС59-1 в ПУДС при частоте вращения 1000 об/мин, где пунктирная линия соответствует подаче 160 мм/мин, а сплошная линия – подаче 20 мм/мин.

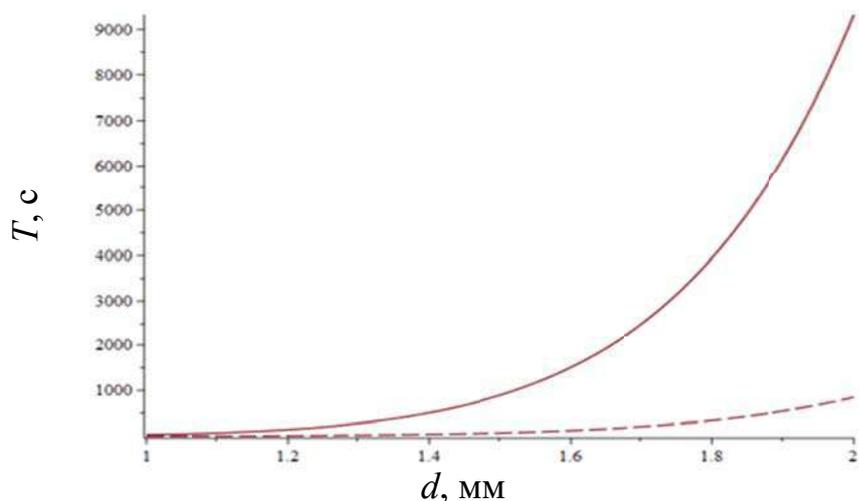


Рис. 5.20 Изменения стойкости сверл при сверлении

заготовок из сплава ЛС59-1 в ПУДС при различной подаче сверла

Также на рис. 5.21 показаны графики изменения периода стойкости сверл при сверлении заготовок из сплава ЛС59-1 в ПУДС при подаче 20 мм/мин, где пунктирная линия соответствует частоте вращения 3000 об/мин, а сплошная линия – частоте вращения 1000 об/мин.

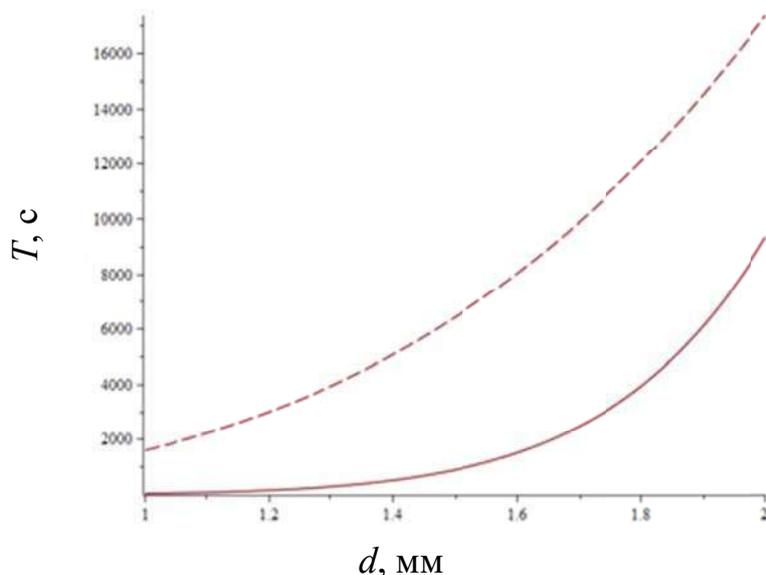


Рис. 5.21 Изменение периода стойкости сверл при сверлении

заготовок из сплава ЛС59-1 в ПУДС при различной частоте вращения сверла

Исходя из анализа полученных зависимостей (см. рис. 5.15 и 5.16) так же, как и в случае обработки сплава Д16, можно утверждать, что сверла с большим диаметром обладают более высокой стойкостью при сверлении заготовок из сплава ЛС59-1

в ПУДС. Однако из рисунка 5.21 следует, что сверление на более высоких частотах вращения характеризуется более высокими показателями по стойкости сверла.

Изменение периода стойкости сверл (c) при сверлении отверстия диаметром 2 мм в заготовках из сплава ЛС59-16 в ПУДС от частоты вращения сверла (мм/об) показано на рисунке 5.22, где пунктирная линия соответствует подаче 20 мм/мин, а сплошная линия – подаче 200 мм/мин.

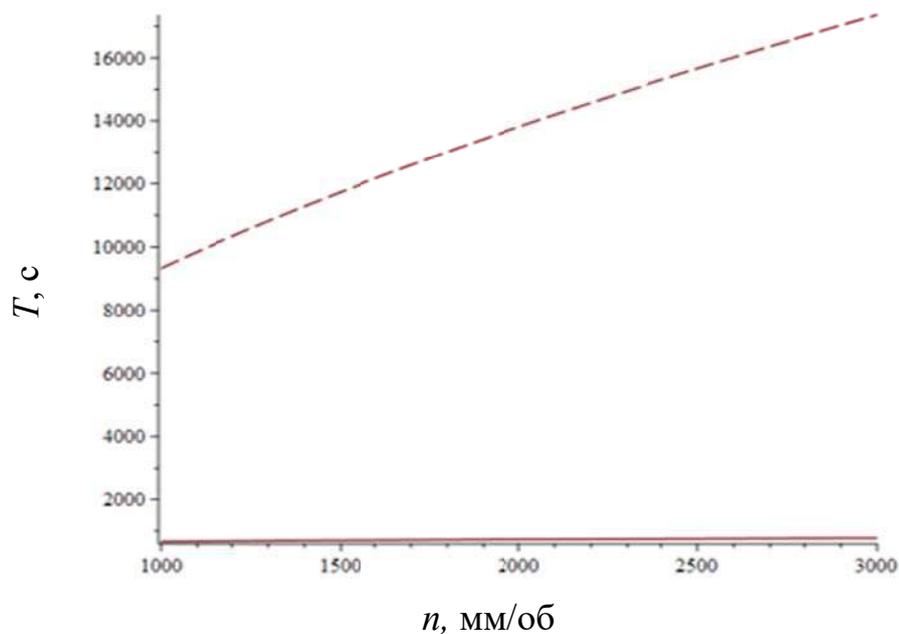


Рис. 5.22 Изменение периода стойкости сверла (c) диаметром 2 мм при сверлении заготовок из сплава ЛС59-1 в ПУДС от частоты вращения сверла (мм/об)

Также на рис. 5.23 показаны графики изменения стойкости сверл (c) диаметром 2 мм при сверлении в заготовках из сплава ЛС59-1 в ПУДС от подачи (мм/мин), где пунктирная линия соответствует частоте вращения 3000 об/мин, а сплошная линия – частоте вращения 1000 об/мин.

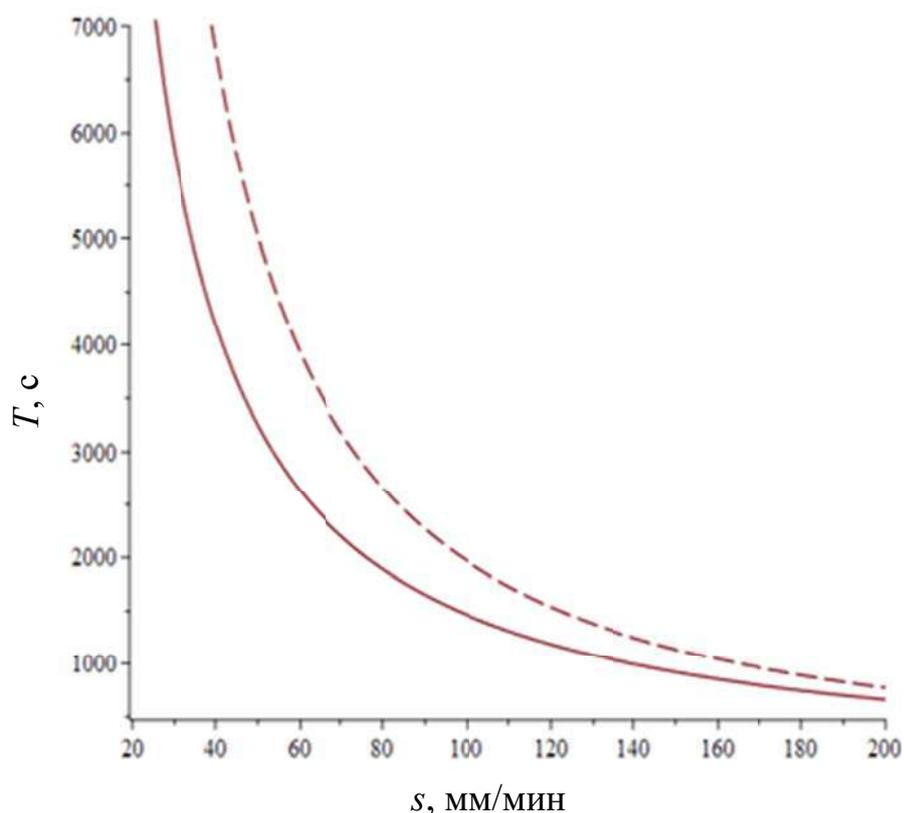


Рис. 5.23 Изменение периода стойкости сверла (с) диаметром 2 мм при сверлении заготовок из сплава ЛС59-1 в ПУДС от подачи (мм/мин)

Анализ полученных зависимостей (см. рис. 5.20- 5.23) позволяет сделать вывод, что повышение частоты вращения сверл приводит к монотонному увеличению периода стойкости сверла диаметром 2 мм при сверлении заготовок из сплава ЛС59-1 в ПУДС.

5.4 Разработка метода проектирования процесса сверления глубоких отверстий в заготовках из цветных сплавов в ПУДС

С учетом установленных зависимостей для глубины устойчивого сверления заготовок из цветных сплавов в ПУДС целесообразно сверление глубоких отверстий выполнять циклами на рабочей подаче s и глубиной каждого рабочего цикла равной величине $L(d, S, n)$, вычисленной по формулам (5.7 и 5.10). Предполагается, что после выполнения каждого рабочего цикла будет осуществляться полный вывод свер-

ла на ускоренной подаче s_u . Тогда основной задачей здесь будет являться определение суммарного перемещения сверла на ускоренных и рабочих подачах. Рассмотрим условный пример сверления отверстия глубиной L_0 за три цикла сверления с толщиной кондукторной плиты равной L_K (рис. 5.24).

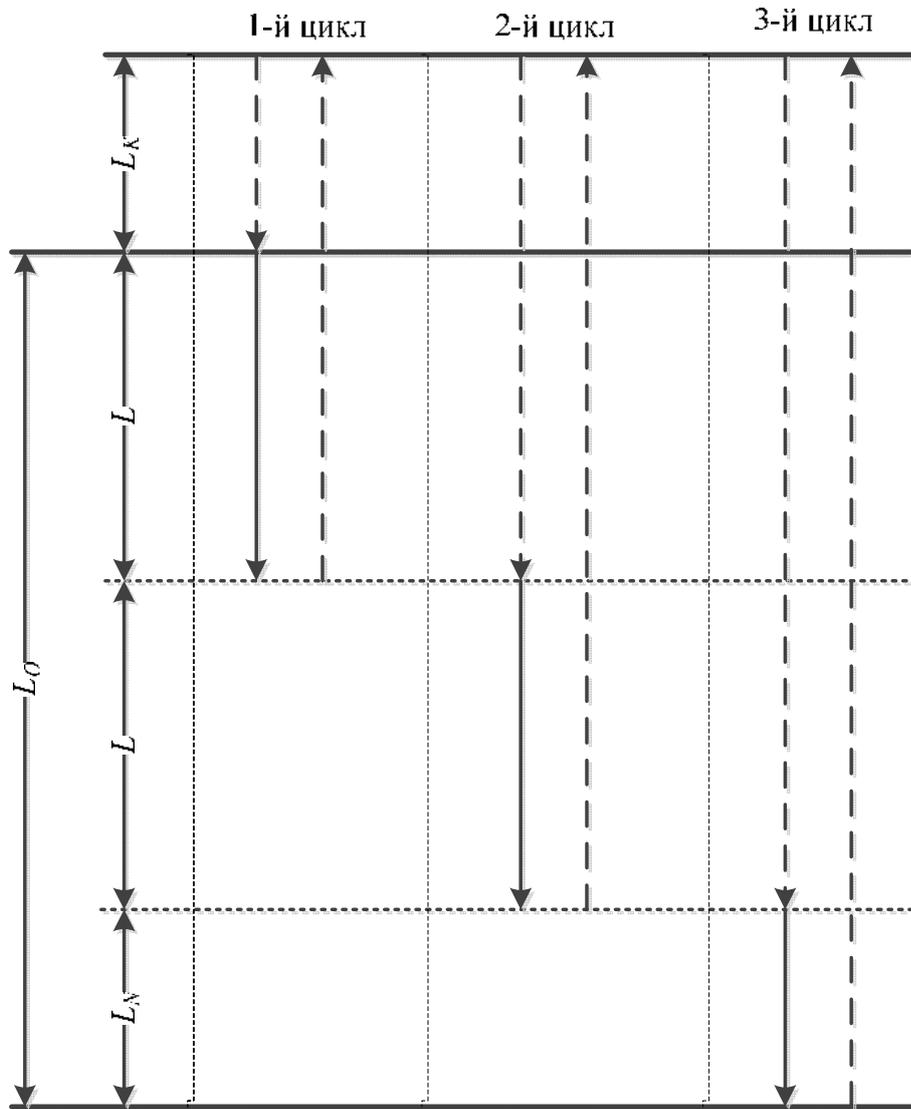


Рис. 5.24 Схема сверления условного отверстия за три цикла

Тогда на первом цикле сверления величина перемещения сверла на ускоренной подаче будет равна

$$L_{u1} = 2L_K + L(d, S, n), \quad (5.17)$$

на втором

$$L_{u2} = 2L_K + 3L(d, S, n), \quad (5.18)$$

и на последнем, третьем цикле

$$L_{u3} = 2L_K + 4L(d, S, n) + L_N, \quad (5.19)$$

где L_N – глубина сверления на последнем цикле, которую можно определить по формуле

$$L_N = L_o - 2L(d, S, n). \quad (5.20)$$

Суммарная величина перемещения сверла на ускоренной подаче в данном случае будет определяться, как

$$L_{u\Sigma} = \sum_{i=1}^3 L_{ui}. \quad (5.21)$$

Обобщая рассмотренный пример, величину перемещения сверла на ускоренной подаче на i -м цикле сверления при условии, что $i < N$, можно определить, как

$$L_{ui} = 2L_K + (2i - 1) \cdot L(d, S, n), \quad (5.22)$$

а при $i=N$

$$L_{ui} = 2L_K + 2(i - 1) \cdot L(d, S, n) + L_N, \quad (5.23)$$

где L_N рассчитывается по формуле

$$L_N = L_o - (N - 1)L(d, S, n), \quad (5.24)$$

где

$$N = \left\lfloor \frac{L_o}{L(d, S, n)} \right\rfloor + 1. \quad (5.25)$$

Величина суммарного перемещения сверла на ускоренной подаче будет определяться, как

$$L_{u\Sigma} = \sum_{i=1}^N L_{ui}. \quad (5.26)$$

Зная величину суммарного перемещения сверла на ускоренной подаче, можно вычислить время сверления одного отверстия на принятых режимах обработки в минутах

$$t_{\text{св}} = \frac{L_{u\Sigma}}{S_u} + \frac{L_o}{S} \quad (5.27)$$

или в секундах

$$t_{\text{св}} = 60 \left(\frac{L_{u\Sigma}}{S_u} + \frac{L_o}{S} \right). \quad (5.28)$$

На рис. 5.25 показана блок-схема алгоритма расчета времени сверления одного отверстия на принятых режимах сверления в условии ПУДС заготовки из цветного сплава.

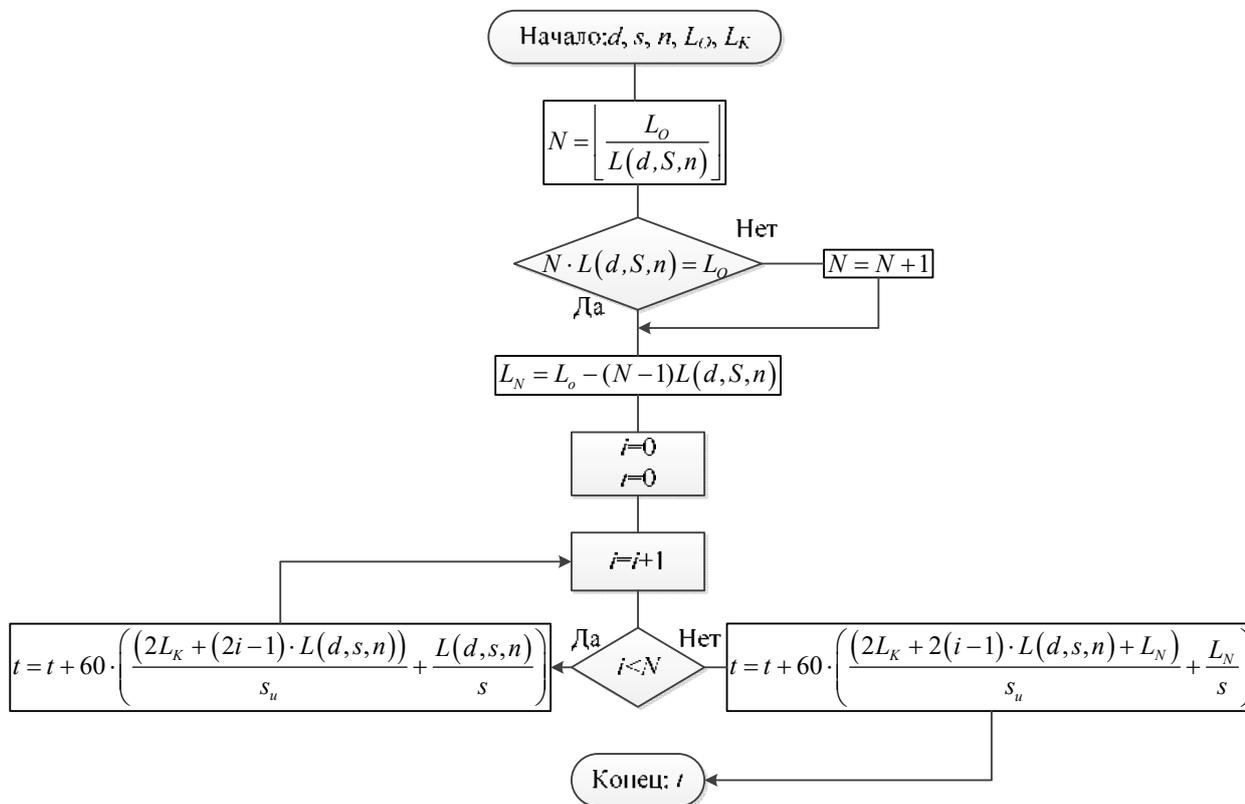


Рис. 5.25 Блок-схема расчета времени сверления одного отверстия на принятых режимах обработки

На рисунках (5.26 -5.33) показаны графики изменения времени сверления отверстия глубиной 10 мм с толщиной кондукторной плиты 15 мм и принятой величине ускоренной подачи $s_u=400$ мм/мин:

- для заготовки из сплава Д16 (рис. 5.26-5.29);
- для заготовки из сплава ЛС59-1 (рис. 5.30-5.33);

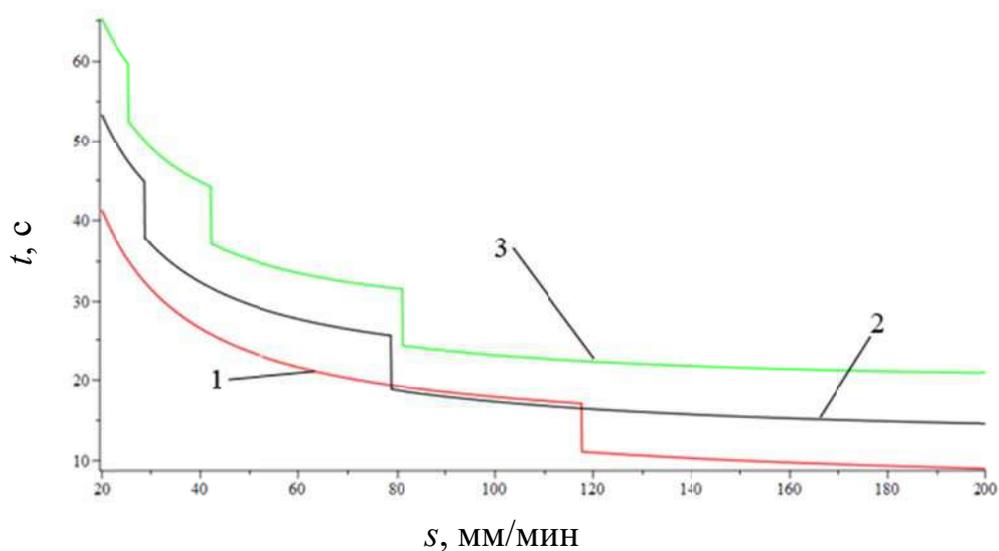


Рис. 5.26 Изменение времени сверления отверстия диаметром 1 мм и глубиной 10 мм в заготовке из сплава Д16 от принятой рабочей подачи при:
1) $n=500$ об/мин; 2) $n=1500$ об/мин; 3) $n=3000$ об/мин

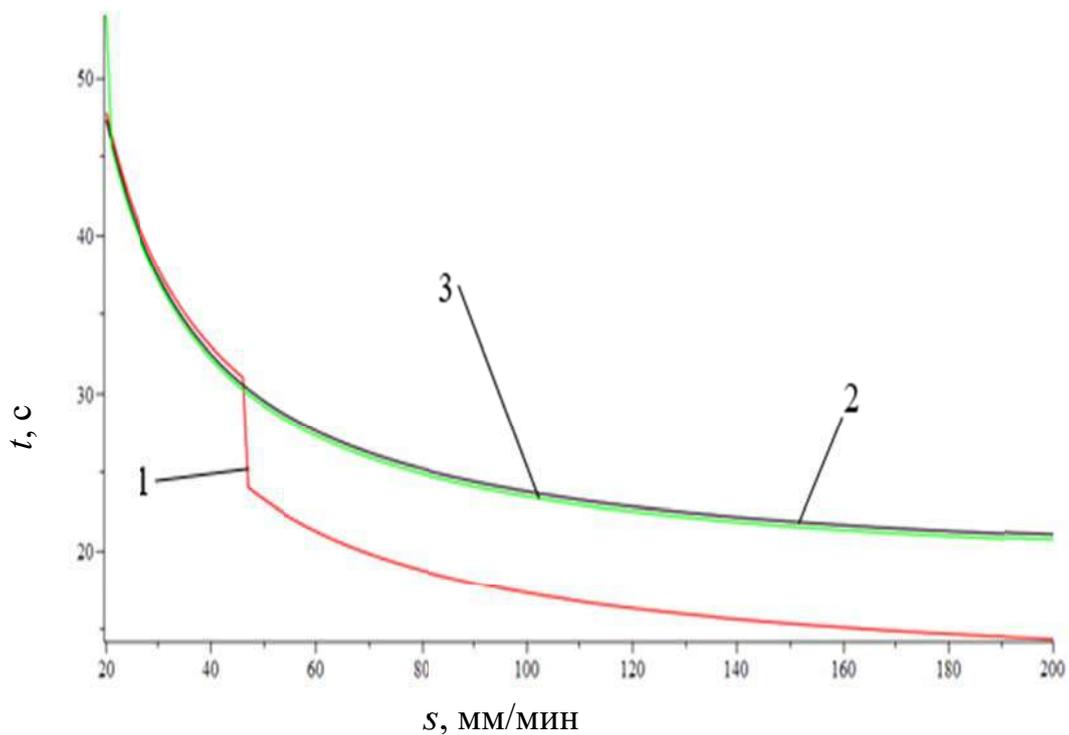


Рис. 5.27 Изменение времени сверления отверстия диаметром 2 мм и глубиной 10 мм в заготовке из сплава Д16 от принятой рабочей подачи при:
1) $n=500$ об/мин; 2) $n=1500$ об/мин; 3) $n=3000$ об/мин

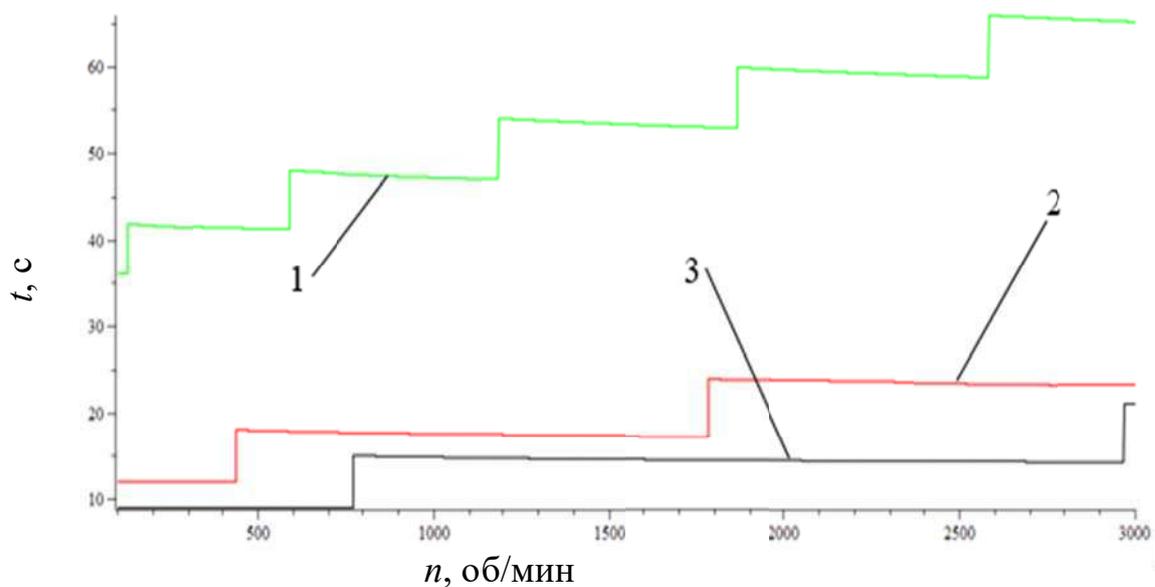


Рис. 5.28 Изменение времени сверления отверстия диаметром 1 мм и глубиной 10 мм в заготовке из сплава Д16 от принятого числа оборотов при:
1) $s=20$ мм/мин; 2) $s=100$ мм/мин; 3) $s=200$ мм/мин

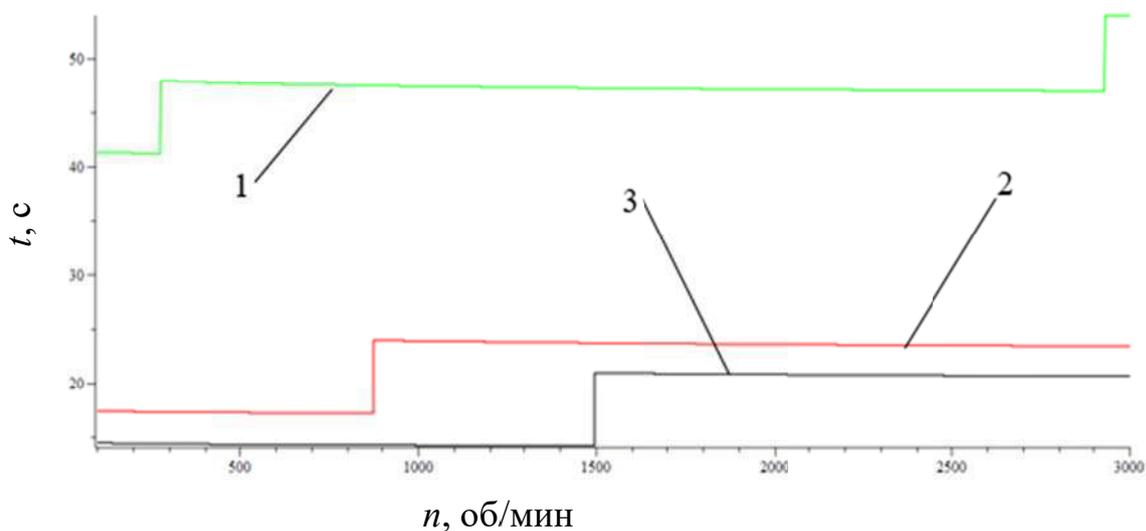


Рис. 5.29 Изменение времени сверления отверстия диаметром 2 мм и глубиной 10 мм в заготовке из сплава Д16 от принятого числа оборотов при:
1) $s=20$ мм/мин; 2) $s=100$ мм/мин; 3) $s=200$ мм/мин

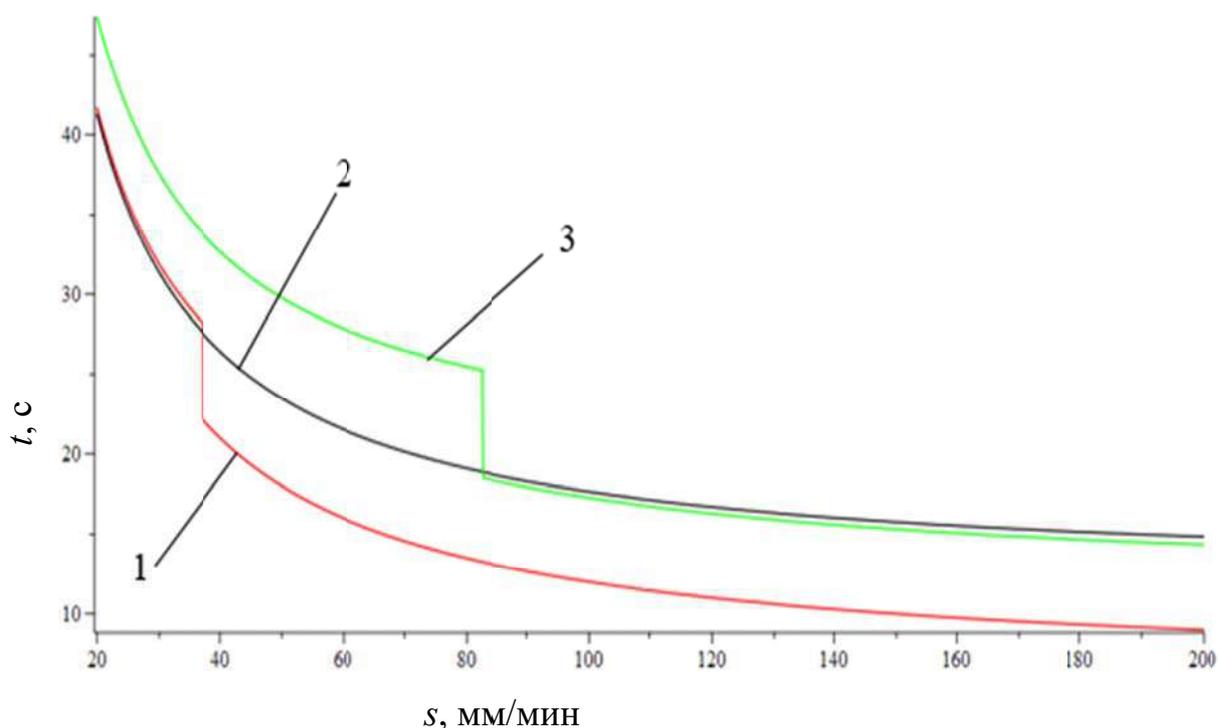


Рис. 5.30 Изменение времени сверления отверстия диаметром 1 мм и глубиной 10 мм в заготовке из сплава ЛС59-1 от принятой рабочей подачи при:
1) $n=500$ об/мин; 2) $n=1500$ об/мин; 3) $n=3000$ об/мин

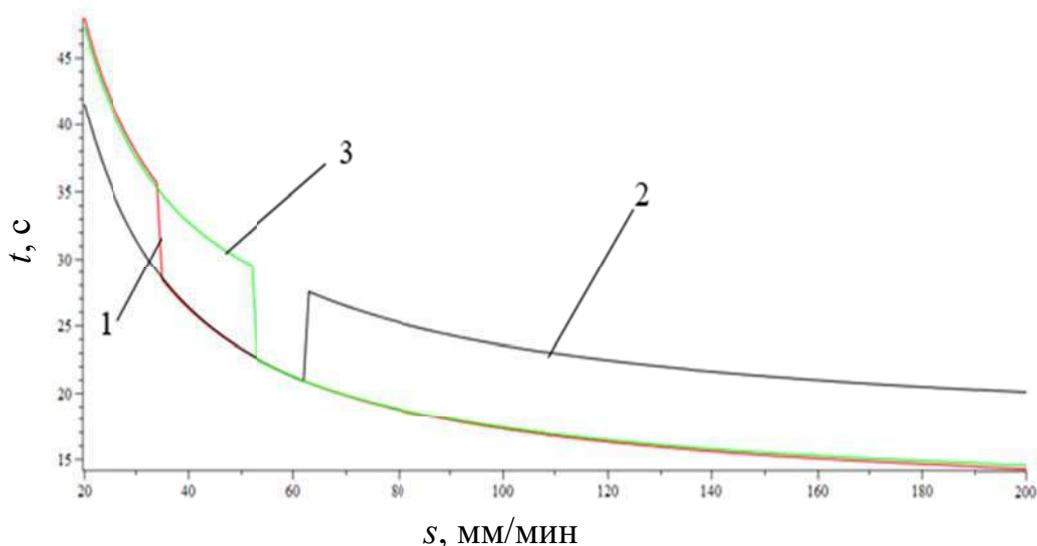


Рис. 5.31 Изменение времени сверления отверстия диаметром 2 мм и глубиной 10 мм в заготовке из сплава ЛС59-1 от принятой рабочей подачи при:
1) $n=500$ об/мин; 2) $n=1500$ об/мин; 3) $n=3000$ об/мин

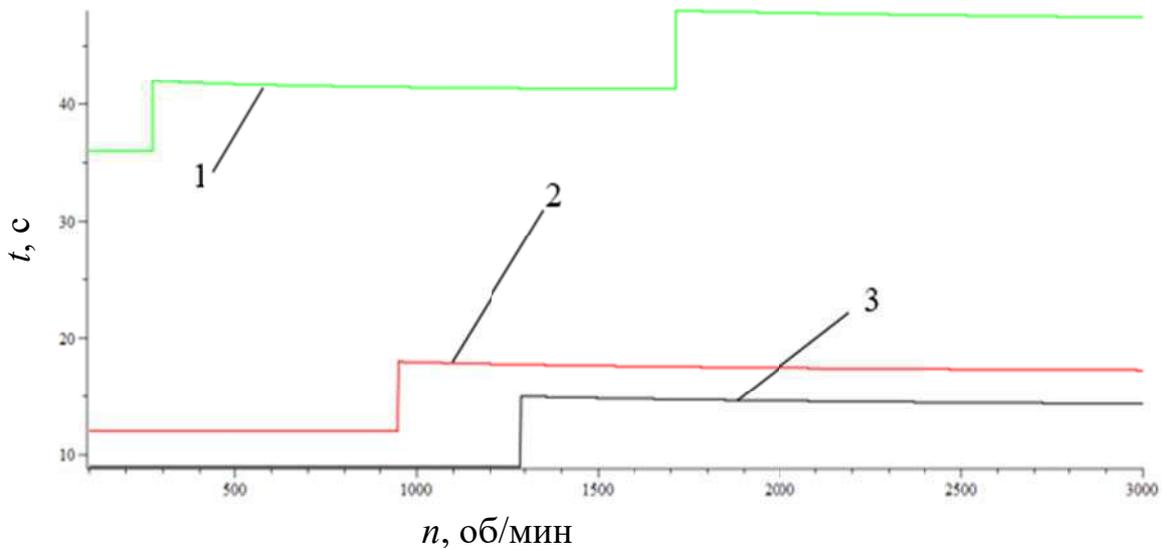


Рис. 5.32 Изменение времени сверления отверстия диаметром 1 мм и глубиной 10 мм в заготовке из сплава ЛС59-1 от принятого числа оборотов при:
1) $s=20$ мм/мин; 2) $s=100$ мм/мин; 3) $s=200$ мм/мин

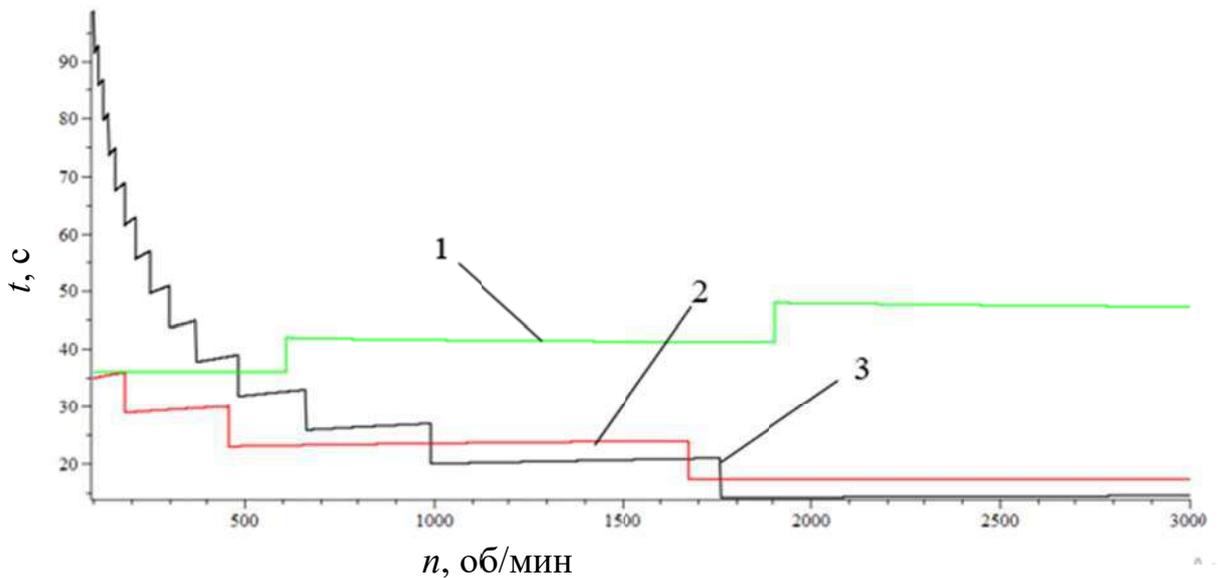


Рис. 5.33 Изменение времени сверления отверстия диаметром 2 мм и глубиной 10 мм в заготовке из сплава ЛС59-1 от принятого числа оборотов при:
1) $s=20$ мм/мин; 2) $s=100$ мм/мин; 3) $s=200$ мм/мин

На представленных рисунках функция времени обработки отверстия имеет ступенчатый характер, что связано с изменением глубины устойчивого сверления и изменением числа циклов сверления.

5.5 Построение оптимизационной модели сверления глубоких отверстий в заготовках из цветных сплавов в ПУДС

С целью обеспечения высокой производительности процесса сверления в заготовках из цветных сплавов в ПУДС и требуемого периода стойкости сверл на основе установленных зависимостей была предложена однокритериальная двухфакторная модель оптимизации с ограничениями.

Модель имеет целевую функцию

$$t_{\text{св}}(d, s, n) \rightarrow \min$$

и ограничения

$$T(d, s, n) \geq T_{\text{треб}},$$

для случая, когда требуемая стойкость сверла задается в секундах, и

$$T_{\text{мм}}(d, s, n) \geq T_{\text{треб}},$$

для случая, когда требуемая стойкость сверла задается в миллиметрах, а также ограничения на режимы

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max};$$

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}.$$

Исходя из анализа характера поведения рассматриваемых функций $t_{\text{св}}(d, s, n)$ и $T(d, s, n)$, была разработана блок-схема алгоритма оптимизации процесса сверления заготовок из цветных сплавов в ПУДС по времени обработки (рис. 5.34), а также программное обеспечение в среде Maple, представленное в приложении.

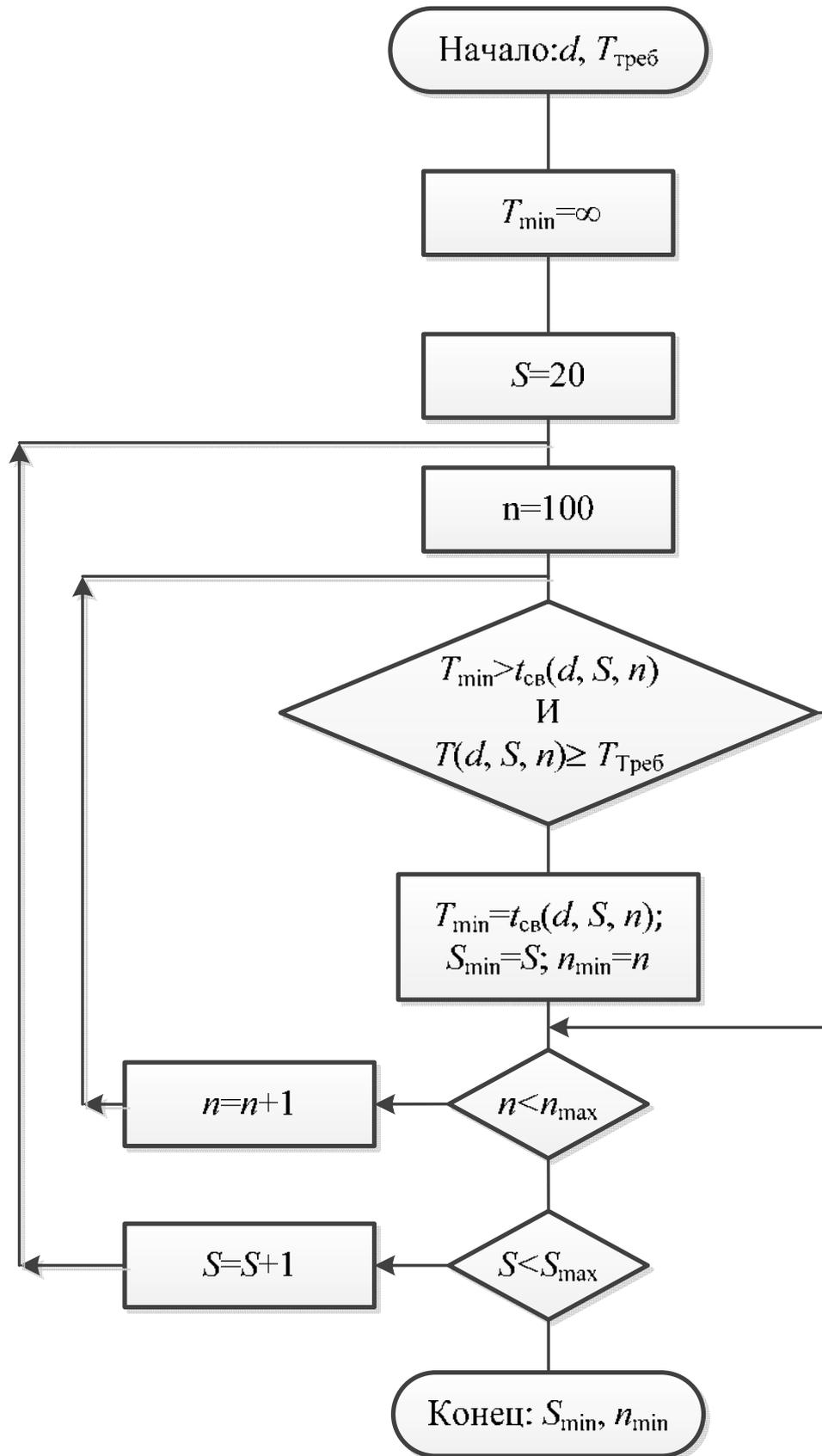


Рис. 5.34 Блок-схема алгоритма оптимизации процесса сверления заготовок из цветных сплавов в ПУДС по времени обработки

Рассмотрим реализацию данного алгоритма на примере сверления четырех отверстий диаметром 2 мм в ниппеле (рис. 5.35), изготовленном из сплава ЛС59-1.

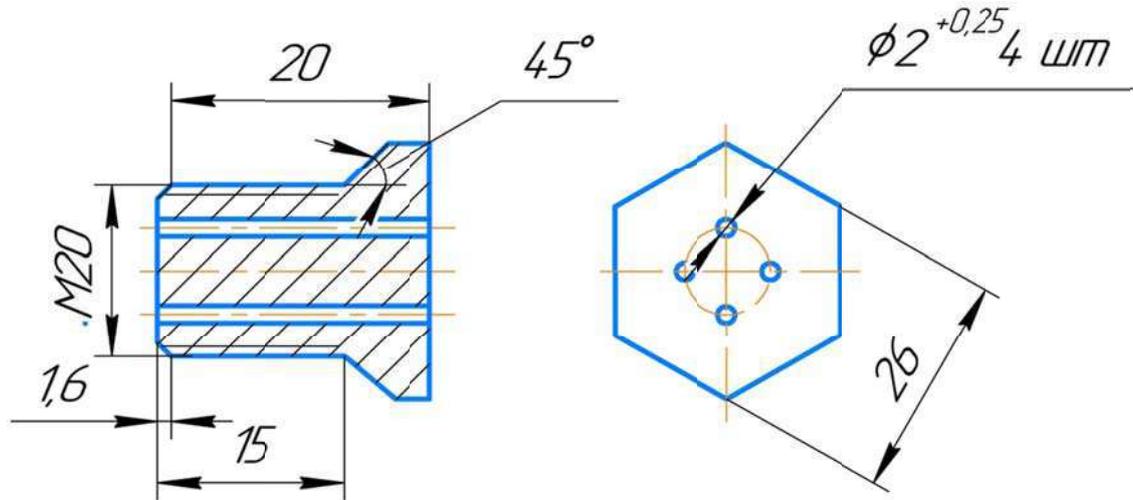


Рис. 5.35 Деталь – ниппель

При количестве обработанных деталей одним сверлом равным 50 шт. (требуемая стойкость равна $20 \times 4 \times 50 = 4000$ мм) с применением разработанной программы было получено следующее решение:

$$S=57 \text{ мм/мин}; n=3000 \text{ об/мин.}$$

Время обработки одного отверстия составило 49 секунд (время обработки всех четырех отверстий 196 секунд).

На рисунке 5.36 показан график изменения времени обработки отверстий одной детали от количества обработанных деталей одним сверлом, а также изменение минутной подачи (рис. 5.37) и числа оборотов шпинделя (рис. 5.38).



Рис. 5.36 Изменение времени обработки отверстий одной детали – ниппеля – от количества обработанных деталей одним сверлом

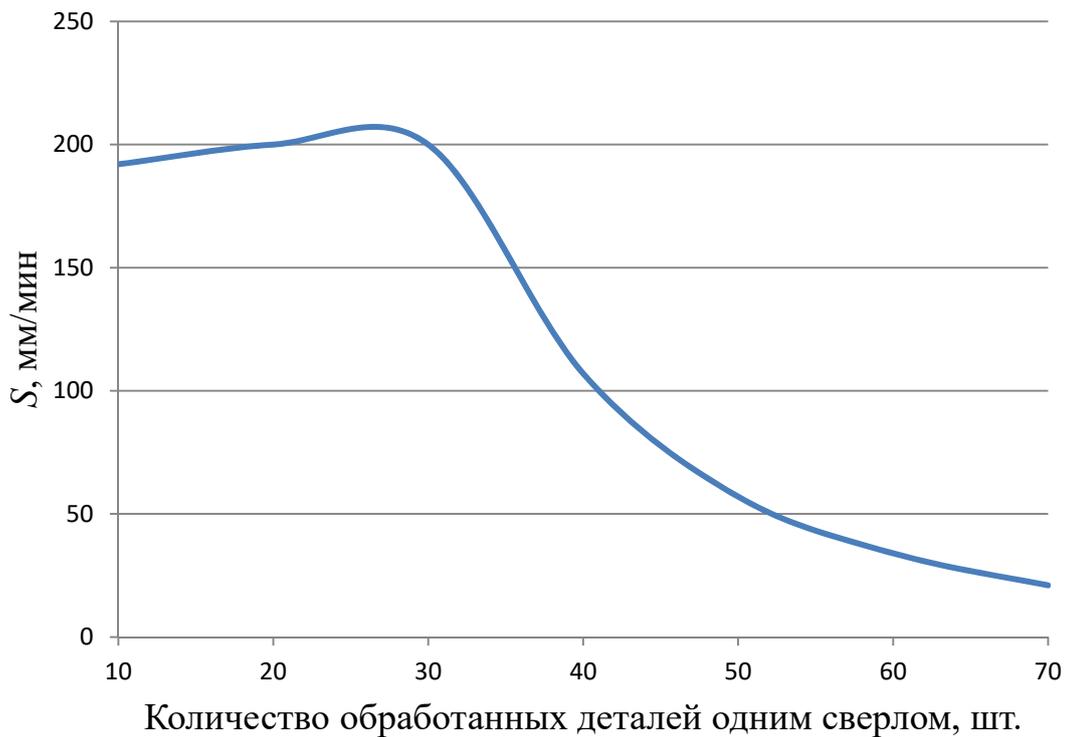


Рис. 5.37 Изменение минутной подачи при обработке отверстий одной детали – ниппеля – от количества обработанных деталей одним сверлом

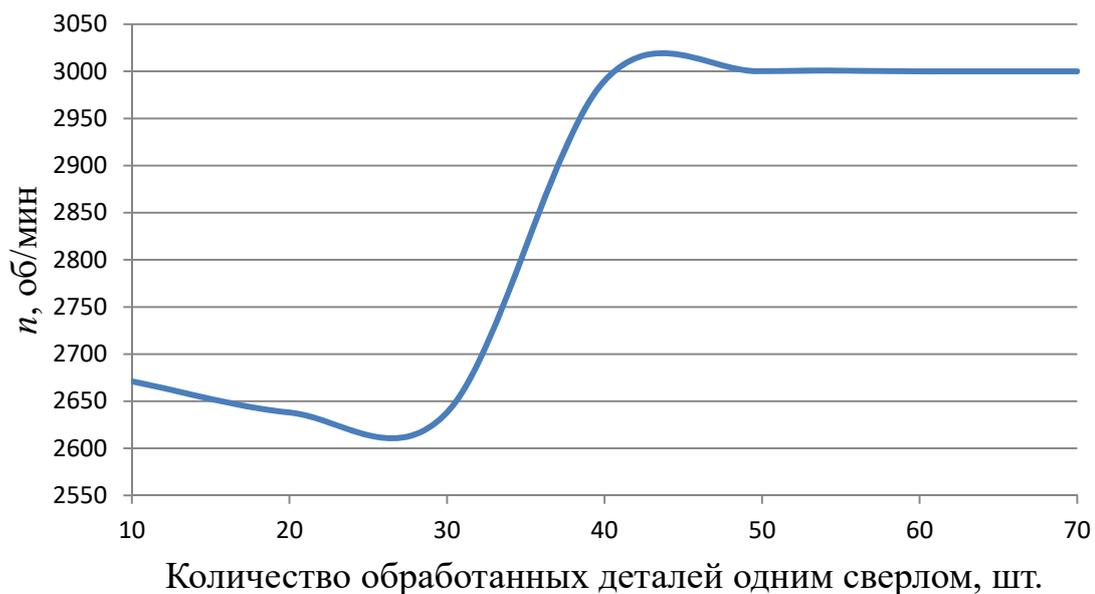


Рис. 5.38 Изменение частоты вращения шпинделя при обработке отверстий одной детали – ниппеля – от количества обработанных деталей одним сверлом

Таким образом, с применением разработанного программного обеспечения становится возможным подбор режимов сверления отверстий, обеспечивающих наименьшее время обработки.

5.6 Выводы по главе 5

Выполненное в соответствии с принятыми планами проведения экспериментов исследование процесса сверления в диапазонах подач от 20 до 200 мм/мин и частот вращения 100 до 3000 об/мин для отверстий диаметром до 2 мм позволило:

1. построить регрессионные уравнения изменения осевой силы сверления от режимов обработки для заготовок из цветных сплавов Д16 и ЛС59-1 в ПУДС;

2. построить регрессионные уравнения изменения глубины устойчивого сверления от режимов обработки для заготовок из цветных сплавов Д16 и ЛС59-1 в ПУДС;

3. построить уравнения изменения периода стойкости сверл от режимов обработки с учетом установленных величин глубины устойчивого сверления заготовок из цветных сплавов Д16 и ЛС59-1 в ПУДС;

4. разработать метод построения процесса сверления глубоких отверстий в заготовках из цветных сплавов Д16 и ЛС59-1 в ПУДС с учетом установленных величин глубины устойчивого сверления;

5. построить оптимизационную модель процесса сверления глубоких отверстий в заготовках из цветных сплавов Д16 и ЛС59-1 в ПУДС, с применением разработанного программного обеспечения провести анализ изменения времени обработки отверстий тестовой детали и режимов обработки от количества обработанных деталей одним сверлом.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации содержится решение научной задачи, имеющей существенное значение в области металлообработки – повышение периода стойкости и работоспособности спиральных сверл из быстрорежущей стали при сверлении глубоких отверстий диаметром до 2 мм в заготовках из цветных сплавов (широко используемых марок латуни и дюралюминия) путем создания в зоне обработки ПУДС.

В ходе теоретического и экспериментального исследования получены следующие результаты и сделаны выводы:

1. Разработан новый способ сверления глубоких отверстий малого диаметра в заготовках из цветных сплавов с ПУДС зоны обработки (Патент № 2779438). В работе доказана перспективность использования данного способа для интенсификации процесса сверления заготовок из сплавов Д16 и ЛС59.

2. Разработан новый способ и устройство для определения величины предела пропорциональности материалов из цветных сплавов (Патент № RU2686572С1), предложен метод расчета погрешности измерения предела пропорциональности цветных сплавов с использованием разработанного устройства.

3. Выполненное компьютерное исследование процессов сверления отверстий в заготовках из сплава Д16 в ПУДС показало, что при сверлении отверстий диаметром до 2 мм ПУДС обрабатываемого материала будет сохраняться в зоне резания на протяжении всего времени обработки, обеспечивая уменьшение осевой составляющей силы резания и крутящего момента при сверлении.

4. На основе выполненного дисперсионного анализа ПУДС заготовок на процесс сверления, установлено: повышение периода стойкости сверл (при $d=1,3$ мм, $n=2100$ об/мин и $s=100$ мм/мин на 50%); снижение осевой силы (при $d=2$ мм, $n=3000$ об/мин и $s=15$ мм/мин на 42,3%); снижение крутящего момента (при $d=2$ мм, $n=3000$ об/мин и $s=200$ мм/мин на 34,6%); отсутствие статистически значимого изменения диаметра и шероховатости обработанных отверстий.

5. Выполненное в соответствии с разработанными планами проведения экспериментов исследование процесса сверления сплавов Д16 и ЛС59-1 в ПУДС в диапазонах подач от 20 до 200 мм/мин и частот вращения 100 до 3000 об/мин для отверстий диаметром до 2 мм позволило построить зависимости для режимов обработки осевой силы при сверлении, глубины устойчивого сверления и периода стойкости сверл.

6. Разработан метод построения процесса сверления глубоких отверстий в заготовках из цветных сплавов Д16 и ЛС59-1 в ПУДС в виде циклов с глубиной равной глубине устойчивого сверления на заданных режимах обработки, предложена формула для расчета времени сверления одного отверстия. Выполненный анализ изменения времени сверления одного отверстия от режимов обработки показал, что оно изменяется ступенчато ввиду изменения глубины устойчивого сверления и изменения числа циклов сверления.

7. Разработана модель оптимизации режимов сверления заготовок из цветных сплавов с ПУДС зоны обработки для определения режимов обработки, обеспечивающих наибольшую производительность обработки при обеспечении заданной стойкости сверла. Оптимизация режимов обработки, выполненная на основе разработанного алгоритма, для случая сверления четырех отверстий диаметром 2 мм и глубиной 20 мм в заготовке из сплава ЛС59-1 при требуемом количестве обработанных деталей одним сверлом, равным 50 шт., позволила установить оптимальные значения подачи, равные 57 мм/мин, и частоты вращения, равные 3000 об/мин, время обработки одного отверстия составило 49 секунд (время обработки всех четырех отверстий составило 196 секунд).

8. Результаты проведенных исследований приняты к промышленному применению на предприятии АО «Геотехник» г. Железногорск и ООО «ГЕОМАШ» г. Щигры.

Научные и практические результаты диссертации рекомендуется применять при технологической подготовке процесса сверления глубоких отверстий диаметром до 2 мм в заготовках из сплавов Д16 и ЛС59-1.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертационной работы связаны с расширением номенклатуры марок обрабатываемых цветных сплавов и диапазона диаметров обрабатываемых отверстий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мозберг Р.К. Материаловедение / Р.К. Мозберг. – М.: Высшая школа, 1991. – 448 с.
2. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Metallurgy, 1986. – 544 с.
3. Приспособление для сверления отверстий с наложением вибраций на заготовку / М.С. Разумов, М.К. Загорин, М.Ш. Гатиев, А.С. Бышкин // Современные материалы, техника и технология: сб. науч. ст. 8-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск: Издательство: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2018. – С. 347-352.
4. Виноградова Н.В. Теоретическое исследование величины остаточных напряжений от структурно-фазовых превращений в поверхностном слое деталей после механической обработки // Актуальные вопросы техники и технологии: сб. докл. междунар. науч. заоч. конф. / под ред. А.В. Горбенко, С.В. Довженко. Липецк: Издат. центр «Де-факто», 2010. Т. 1. – С. 111-115.
5. Determining the geometric parameters of a sheared layer in drilling of nonferrous metals and alloys with the use of axial vibrations / S.G. Emel'yanov, V.V. Sidorova, V.V. Ponomarev, M.S. Razumov // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Т. 52. № 11-12. – С. 796-800.
6. Определение геометрических параметров срезаемого слоя при сверлении цветных металлов и сплавов с наложением осевых вибраций / С.Г. Емельянов, В.В. Сидорова, В.В. Пономарев, М.С. Разумов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 11. – С. 45-47.
7. Сидорова В.В., Разумов М.С. Устройство для вибрационного сверления //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. № 4 (306). – С. 51-54.
8. Сидорова В.В., Разумов М.С., Гречухин А.Н. Расчет силовых параметров вибрационного резания // Будущее машиностроения России: сб. тр. Седьмой

Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. – М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2014. – С. 10-11.

9. Патент на полезную модель RU 147317 U1, 10.11.2014. Устройство для вибрационного сверления/ Сидорова В.В., Разумов М.С., Понкратов П.А. Заявка № 2014120738/02 от 22.05.2014.

10. Automated control of process conditions during drilling with imposition of vibrations / M.S. Razumov, V.V. Sidorova, A.N. Grechukhin // Metallurgical and Mining Industry. 2014. Т. 6. № 5. – С. 19-23.

11. Сидорова В.В., Разумов М.С. Повышение производительности вибрационного сверления отверстий малого диаметра в заготовках из титановых сплавов // Интеграция науки и практики как условие экономического роста: VII Междунар. науч.-практ. конф. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2014. – С. 11-12.

12. Выявление эмпирических зависимостей конструктивных параметров устройства для наложения вибраций на осевое усилие при сверлении отверстий малого диаметра / С.Г. Емельянов, М.С. Разумов, А.Н. Гречухин, В.В. Сидорова // Фундаментальные исследования. 2015. № 10-3. – С. 484-488.

13. Сидорова В.В., Разумов М.С., Гречухин А.Н. Определение зависимости силы постоянных магнитов от расстояния при вибрационном резании // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сб. науч. тр. 5-ой Междунар. науч.-практ. конф. / Отв. ред. А.А. Горохов. Курск: Издательство: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2015. – С. 284-287.

14. Анализ зависимостей параметров постоянных магнитов и их установки на усилие вибрации при сверлении с наложением осевых колебаний / В.В. Сидорова, М.С. Разумов, А.Н. Гречухин, С.Г. Емельянов // Будущее машиностроения России: сб. докл. Восьмой Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. Москва: Издательство Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2015. – С. 34-37.

15. Сидорова В.В., Разумов М.С., Гречухин А.Н. Автоматизированное средство управления технологическими параметрами при сверлении с наложением вибраций // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сб. науч. тр. I Междунар. науч. конф. молодых ученых. Новосибирск: Издательство Новосибирский государственный технический университет, 2014. – С. 154-156.
16. Патент на полезную модель RU 179403 U1, 14.05.2018. Устройство для сверления с наложением осевых вибраций / Сидорова В.В., Пономарев В.В., Разумов М.С. Заявка № 2017107102 от 03.03.2017.
17. Подураев, В.Н. Обработка резанием с вибрациями / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1970. – 350 с.
18. Габшевичус Н.А. Установка для вибрационной обработки мотальных валов /Н.А. Габшевичус, К.Б. Топутис, И.С. Вилис // Материалы конф. Интенсификации производства, создание новых технологий. Изделий и материалов. Металловедение и литейное производство. – Вильнюс: 1984. – 23, 24 с.
19. Гечузин Я.Е. Диффузионная зона / Я.Е. Гечузин. -М.: Наука, 1975. – 344 с. 7. Глейзер А.И., Драчев О.И., Корнеев Н.В.
20. Устройство для вибростабилизации: пат. 2244755 РФ С2 С21Д1/04. № 2002135657/02; заяв. 26.12.2002. 3 с.
21. Пат. 2355546 РФ С2 В23Н25/00. Устройство для вибрационной обработки /Д.А. Расторгуев, О.И. Драчев. -2009, 2 с.: 4 ил.
22. Пат. 2376093 РФ. С2 В21Д3/00. Способ вибрационной обработки длинномерных деталей и устройство для его осуществления / Д.А.Расторгуев, О.И. Драчев. -2009. -3 с. ил.
23. Пат. 2424101 РФ С2 В23Р25/00. Способ виброобработки маложестких деталей для снижения их остаточных напряжений / О.В. Бойченко, О.И. Драчев, 2011. 3 с. ил.
24. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. – М.: Машиностроение, 1970. 350 с.

25. Расторгуев Д.А., Драчев О.И., Солдатов А.А. Способ вибрационной обработки осесимметричных длинномерных деталей и устройство для его осуществления: пат. 2254192 РФ. С1 В21 Д3/16. Оpubл. 2005. Бюл. № 17. 3 с.
26. Основы теории резания металлов Автор: В.Ф. Бобров Издательство: Машиностроение Год: 1975 Страниц: 344
27. Гильман А.М. и др. Оптимизация режимов резания на металлорежущих станках / А.М. Гильман, А.А. Брахман, Д.И. Батищев. – М.: Машиностроение, 1972.- 188 с.
28. Драчев О.И., Расторгуев Д.А., Драчев А.О. Вибратор электрогидравлический: пат. 2479758 С1 А15В21/12. 2013. 2 с.
29. Справочник машиностроителя / Под ред. Сашеля Э.А., т. 3. -М.: Машиностроение, 1964.
30. Филлипов А.П. Колебание деформируемых систем / А.П. Филлипов. - М.: Машиностроение, 1970. -736 с.
31. Уменьшение механических напряжений и стабилизации металла с помощью вибрации / Пер. с англ. № Ц-3354 0. – М.: Всесоюзный центр переводов, 1974. -425 с.
32. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко. – М.: Наука, 1967. – 444 с.
33. Кириллин Б.Н. Вибрационное сверление ружейными сверлами // Станки и инструмент, 1968, № 5. – С. 22-24.
34. Литвинов Л.П. Вибросверление глубоких отверстий // Вестник машиностроения, № 5, 1990. – С. 22-24.
35. Авторское свидетельство СССР № А.С №3532245; МКИ В23Р25/00, В23К5/213, 9/235. Способ виброобработки детали / В.Г. Горенко, П.В. Русаков, Л.П. Пилипчик, Н.Б. Закута. – 1987.
36. Троицкий В.А. Оптимальные процессы колебаний механических систем /В.А. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1976. – 248 с.

37. Пановко Н.Г. Введение и теория механических колебаний / Н.Г. Пановко. – М.: Наука, 1971. – 310 с.
38. Котельников, В.И. Резание металла с нагревом, совмещенное с поверхностным пластическим деформированием обработанной детали / В.И. Котельников // Технология машиностроения. – 2008. – № 8. – С. 23-25.
39. Ковшов, А.Н. Нетрадиционные методы обработки материалов: учеб. пособие / А.Н. Ковшов, Ю.Ф. Назаров, В.М. Ярославцев. – М.: МГОУ, 2007. – 211 с.
40. Игнатов, С.Н. Оценка эффективности лезвийной обработки с использованием безразмерного энергетического критерия / С.Н. Игнатов, А.В. Карпов, А.П. Распопин // СТИН. – 2004. – № 12. – С. 23-25.
41. Использование нагрева инфракрасным излучением при резании хромистых сталей / И.С. Егоров [и др.] // СТИН. – 1971. – № 3. – С. 33-34. 48.
42. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение / В.Л. Колмогоров. – Л.: Металлургия, 1970. – 229 с.
43. Пехович, А.И. Расчеты теплового режима твердых тел / А.И. Пехович, В.М. Жидких. – Л.: Энергия, 1976. – 410 с.
44. Плотников, А.Л. Исследование физической природы связи ЭДС естественной термопары с режущими свойствами твердосплавных инструментов и использование величины термо-ЭДС для управления процессом резания: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / А.Л. Плотников. – Тбилиси, 1982. – 184 с.
45. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.
46. Постнов, В.В. Оптимальная температура резания – основа эффективной эксплуатации мехатронных станочных систем / В.В. Постнов // СТИН. – 2009. – № 9. – С. 3-12.
47. Резание металлов: учебник для машиностр. и приборостр. спец. Вузов / Г.И. Грановский, [и др.]. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
48. Резников, А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.

49. Рехт, Р.Ф. Разрушающий термопластический сдвиг / Р.Ф. Рехт // Труды американского общества инженеров-механиков. Сер. Е. Прикладная механика. Т. 31. № 2. – 1964. – С. 34-39.
50. Давиденков И.А. Влияние температуры на диаграммы сжатия металлов / И.А. Давиденков, Т.Н. Чучман // Физика металлов и металловедение, 1960, т. 9, вып. 5. -с. (741 -750).
51. Клушин, М.И. Охлаждение и смазка распыленными жидкостями при резании металлов / М.И. Клушин, В.М. Тихонов, Д.Н. Троицкая. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1966.
52. Давиденков И.А. Об остаточных напряжениях / И.А. Давиденков//Заводская лаборатория. – М.: 1935. т. 4 – № 6, (688-698) с.
53. Кирсанов С.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства, применяемые при обработке глубоких отверстий // Справочник. Инженерный журнал № 6 (51), 2001. – С. 5-7.
54. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник/под общей ред. С.Г. Энтелиса, Э.М. Берлинера. – М.: Машиностроение, 1995. 496 с.
55. Обработка металлов резанием: справочник технолога / А.А. Панов [и др.]; под общ. ред. А.А. Панова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 784 с.
56. Кирсанов С.В. Исследование процесса глубокого сверления стали эжекторными сверлами: дис. на соискание степени канд. техн. наук. Томск: ТПИ, 1980.117 с.
57. Кирсанов С.В. Некоторые особенности сверления глубоких отверстий мелкоразмерными ружейными сверлами // Справочник. Инженерный журнал № 5 (122), 2007. – С. 40-41.
58. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М. Булыжев и др./под общ. ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. 544 с.

59. Влияние рассеяния геометрических параметров осевых инструментов на их работоспособность Древаль А.Е., Литвиненко А.В. Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 1998. № 1 (30). – С. 60-68.
60. Кирсанов С.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства, применяемые при хонинговании // Справочник. Инженерный журнал, № 3 (60) 2002 С. 7-9.
61. Быков, Ю.М. Исследование закономерностей износа твердосплавного инструмента с износостойкими покрытиями с целью повышения его работоспособности: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Ю.М. Быков. – Волгоград, 1983. – 253 с.
62. Качество инструмента и производительность [Текст] / Б.И. Гордиенко, М.А. Краплин; под ред. [и с предисл.] И.Д. Третьякова; Науч.-исслед. ин-т механизации и прикл. математики Сев.-Кавк. науч. центра высш. школы. Рост. ин-т с.-х. машиностроения. – Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 1974. – 580 с.
63. Верещака, А.С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака, И.П. Третьяков. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с. 20
64. Виноградова, Н.В. Теоретическое исследование величины остаточных напряжений от структурно-фазовых превращений в поверхностном слое деталей после механической обработки / Н.В. Виноградова // Актуальные вопросы техники и технологии: сб. докл. междунар. науч. заоч. конф. / под ред. А.В. Горбенко, С.В. Довженко. – Липецк: Издат. центр «Де-факто», 2010. – Т. 1. – С. 111-115.
65. Вульф, А.М. Резание металлов / А.М. Вульф. – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с. 30.
66. Грановский, Г.И. Резание металлов: Учебник для машиностр. И приборостр. спец. вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
67. Лоладзе Т.Н. Износ режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машгиз, 1958. – 358 с.

68. Енек, М. Влияние состава покрытия инструментальных пластин методом PVD на шероховатость поверхности при точении / М. Енек, В.И. Серебряков, Л.Э. Шварцбург // Технология машиностроения. – 2010. – № 8. – С. 25-28. 39.
69. Зорев, Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н.Н. Зорев. – М.: Машгиз, 1956. – 367 с.
70. Иванова, В.С. Природа усталости металлов / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1975. – 451 с.
71. Иванова, В.С. Усталость и хрупкость металлических материалов / В.С. Иванова, С.Е. Гуревич, И.М. Копьев. – М.: Наука, 1968. – 215 с.
72. Мокрицкий, Б.Я. Управление работоспособностью инструмента при нанесении покрытий / Б.Я. Мокрицкий // СТИН. – 2010. – № 11. – С. 11-15.
73. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
74. Табаков, В.П. Влияние состава трехэлементных нитридных покрытий на тепловое и напряженное состояние режущего инструмента и интенсивность его износа / В.П. Табаков, А.В. Чихранов // СТИН. – 2009. – № 10. – С. 20-26. Табаков, В.П. Применение многоэлементных нитридных покрытий для повышения работоспособности режущего инструмента / В.П. Табаков, А.В. Чихранов // СТИН. – 2009. – № 7. – С. 17-23.
75. Талантов, Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н.В. Талантов. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с. 134.
76. Даниелян А.М. Резание металлов и инструмент Издательство: МАШГИЗ 1950
77. Дудкин М.Е. Исследование контактных явлений и механизмов износа твердосплавного инструмента при обработке конструкционных сталей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.Е. Дудкин. – Тбилиси, 1980. – 21 с.
78. Аваков А.А. Сборник докладов объединенного семинара по физическим основам резания металлов. № 2, Тбилиси, 1946.

79. Влияние опережающего пластического деформирования на износ инструмента и качество поверхностного слоя при обработке аустенитных сталей / Ю.Н. Полянчиков [и др.] // Известия ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 4: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – № 9. – С. 35-37.

80. Общемашиностроительные нормативы режимов резания. Справочник. В 2-х т. Автор: Локтев А.Д. Издательство: Машиностроение Год: 1991

81. Денисенко, А. Тенденции зарубежного станкостроения [Электронный ресурс] / А. Денисенко // Умное производство. – 2010. – № 10. – Режим доступа: www.umpro.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=191&group_id_4=73.

82. Дрозд, М.С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

83. Ингеманссон, А.Р. Улучшение обрабатываемости нержавеющей сталей при использовании резания с опережающим пластическим деформированием / А.Р. Ингеманссон, С.О. Щедриков, Ю.Н. Полянчиков // XV региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области (Волгоград, 9-12 ноября 2010 г.): тез. докл. / ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2011. – С. 76-77.

84. Ингеманссон, А.Р. Повышение работоспособности режущего инструмента при точении коррозионностойких сталей с опережающим пластическим деформированием / А.Р. Ингеманссон // Металлообработка. – 2011. – № 6. – С. 10-15.

85. Ингеманссон, А.Р. Повышение эффективности механической обработки резанием деталей, изготавливаемых из нержавеющей сталей [Электронный ресурс] / А.Р. Ингеманссон, С.О. Щедриков // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров: матер. междунар. науч.-техн. конф. Ассоциации автомоб. инж. (ААИ), посвящ. 145- летию МГТУ «МАМИ» / Моск. гос.техн. ун-т «МАМИ». – М., 2010. – Кн. 7 (Секция 7). – С. 136-139. – Режим доступа: www.mami.ru/science/mami145/scientific/S_07.htm.

86. Ингеманссон А.Р. Повышение эффективности точения труднообрабатываемых сталей ферритного, мартенситно-ферритного и мартенситного классов с использованием опережающего пластического деформирования: дис. канд.техн. наук: 05.02.07 / А.Р. Ингеманссон. – Волгоград, 2012. – 209 с.

87. Котельников В.И. Влияние поверхностно-пластического деформирования нагретой поверхности металла на качество детали / В.И. Котельников, А.О. Краснов, И.Ю. Переведенцев // Вестник машиностроения. – 2008. – № 7. – С. 51-53.

88. Коттрелл, А. Теория дислокаций / А. Коттрелл. – М.: Изд-во Мир, 1969. – 96 с. 54. Крайнев, Д.В. Повышение эффективности процесса резания сталей перлитного и аустенитного класса путем использования предварительного пластического деформирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Д.В. Крайнев. – Волгоград, 2006. – 167 с.

89. Кудрявцев, И.В. Влияние кривизны поверхности на глубину пластической деформации при упрочнении поверхностным наклепом / И.В. Кудрявцев, Г.Е. Петушков // Вестник машиностроения. – 1966. – № 7. – С. 41- 43

90. Кузнецов, А.М. Обработка комбинированным протягиванием круглых отверстий в деталях из вязких материалов / А.М. Кузнецов, А.З. Марин // Автомобильная промышленность. –1970. – № 4. – С. 33-35.

91. Лебедев, В.А. Оценка эффективности упрочнения деталей методами ППД на основе термодинамических представлений процесса / В.А. Лебедев, М.А. Подольский // Вестник машиностроения. – 2004. – № 9. – С. 63-67.

92. Липатов, А.А. Закономерности процесса резания высоколегированных сталей и пути повышения работоспособности твердосплавного инструмента: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / А.А. Липатов. – Волгоград, 1987. – 256 с.

93. Математическая модель формирования шероховатости обработанной поверхности при точении с опережающим пластическим деформированием коррозионностойких сталей / А.Р. Ингеманссон [и др.] // Металлообработка. – 2012. – № 1.

94. Норченко П.А. Метод резания аустенитных сталей с опережающим пластическим деформированием и его преимущества с точки зрения кристаллической

теории строения металлов / П.А. Норченко, А.Р. Ингеманссон, Ю.Н. Полянчиков // XIII региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, г. Волгоград, 11-14 нояб. 2008 г.: тез. докл. / ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2009. – С. 74-77.

95. Норченко, П.А. Повышение эффективности процесса резания нержавеющей стали аустенитного класса с опережающим пластическим деформированием: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / П.А. Норченко. – Волгоград, 2010. – 127 с.

96. Норченко, П.А. Улучшение шероховатости обработанной поверхности при резании нержавеющей стали 12Х18Н10Т с опережающим пластическим деформированием / П.А. Норченко, А.Р. Ингеманссон, Ю.Н. Полянчиков // XIV региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области (Волгоград, 10-13 нояб. 2009 г.): тез. докл. / ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2010. – С. 63-64.

97. Отений, Я.Н. Особенности обработки длинных тонкостенных труб совмещенным резанием и поверхностным пластическим деформированием роликами / Я.Н. Отений // Вестник машиностроения. – 2006. – № 6. – С. 67-69. 80.

98. Отений, Я.Н. Комбинированная обработка длинных валов / Я.Н. Отений, Н.И. Никифоров, А.И. Журавлев // СТИН. – 2006. – № 6. – С. 36-38. Папшев, Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д.Д. Папшев. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.

99. Пат. 2247016 Российская Федерация, МПК В 23 Р 23/04. Способ комбинированной режущо-деформирующей обработки и устройство для его осуществления / Н.Я. Смольников, Я.Н. Отений, А.И. Журавлев, Н.И. Никифоров. – 2005. 83. Пат. 368\32399460 Российская Федерация. МПК В 23 В 1/00.

100. Способ обработки деталей резанием с опережающим пластическим деформированием / Ю.Н. Полянчиков, П.А. Норченко, Д.В. Крайнев, А.Р. Ингеманссон, Л.А. Качалова, Л.С. Ангеловская; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2009111702/02; заявл. 30.03.2009; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26.

101. Петруха, П.Г. Обработка резанием высокопрочных, коррозионностойких и жаропрочных сталей / П.Г. Петруха. – М.: Машиностроение, 1980. – 167 с.

102. Повышение обрабатываемости сталей резанием путем использования опережающего пластического деформирования / Ю.Н. Полянчиков [и др.] // Методы повышения технологических возможностей металлообрабатывающего оборудования с ЧПУ: сб. науч. тр. / ГОУ ВПО «Уфимский гос. авиационный техн. ун-т». – Уфа, 2010. – С. 40-43.

103. Повышение эффективности комбинированного протягивания отверстий на основе регуляризации микрогеометрии поверхности деформирующих элементов / А.В. Щедрин [и др.] // Вестник машиностроения. – 2009. – № 9. – С. 57-60.

104. Повышение эффективности методов комбинированного прошивания отверстий / А.М. Кузнецов [и др.] // Машиностроитель. – 1999. – № 12. – С. 36-40.

105. Подураев, В.Н. Способ обработки резанием с опережающим пластическим деформированием / В.Н. Подураев, В.М. Ярославцев, Н.А. Ярославцева // Вестник машиностроения. – 1971. – № 4. – С. 64-65.

106. Подураев, В.Н. Влияние обработки резанием с опережающим пластическим деформированием на предел выносливости обработанных деталей / В.Н. Подураев, В.М. Ярославцев, Н.А. Ярославцева // Изв. МВО СССР. Сер. «Машиностроение». – 1971. – № 8. – С. 121-124.

107. Подураев, В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. – М.: Высшая школа, 1974. – 587 с. 98. Полетика, М.Ф. О силах на задней грани резца / М.Ф. Полетика // Известия Томского политехнического института / ТПИ. – Томск, 1974. – Т. 188. – С. 84-87.

108. Положительное воздействие опережающего пластического деформирования на формирование шероховатости поверхности, обработанной резанием / Ю.Н. Полянчиков [и др.] // Изв. ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 6: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 12. – С. 41-43.

109. Получение оптимальных характеристик поверхностного слоя деталей при резании по методу с опережающим пластическим деформированием / Ю.Н. Полянчиков [и др.] // Известия ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 5: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – № 8. – С. 31-33.

110. Посвятенко, Э.К. Исследование обрабатываемости металла, упрочненного черновым деформирующим протягиванием: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Э.К. Посвятенко. – Киев, 1973. – 29 с.

111. Приспособление для токарной обработки с опережающим пластическим деформированием / Ю.Н. Полянчиков [и др.] // Изв. ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 7: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 13. – С. 39-42.

112. Производительная обработка нержавеющей и жаропрочных материалов / Н.И. Резников [и др.]. – М.: Машгиз, 1960. – 199 с.

113. Розенберг, А.М. Обрабатываемость сталей, предварительно упрочненных деформирующим протягиванием / А.М. Розенберг, Э.К. Посвятенко // Вестник машиностроения. – 1972. – №11. – С. 49-52.

114. Розенберг, О.А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании / О.А. Розенберг. – Киев: Наукова думка, 1981. – 288 с.

115. Макаров А.Д. и др. (1974) Износ инструмента, качество и долговечность деталей из авиационных материалов. Учебное пособие Уфимский авиационный институт им. Орджоникидзе. 1974

116. Сидякин, Ю.И. Оптимизация процесса повышения циклической прочности деталей, подвергаемых обкатке роликами: автореф. дисс. канд. техн. наук. / Ю.И. Сидякин – Москва, 1983. – 24 с.

117. Совершенствование методов комбинированного протягивания тел вращения / А.В. Щедрин [и др.] // Вестник машиностроения. – 2009. – № 5. – С. 36-40.

118. Совершенствование способа управления процессом стружкообразования в методах деформирующее-режущей обработки / А.В. Щедрин [и др.] // Вестник машиностроения. – 2005. – №12. – С. 41-42.

119. Современные методы конструирования, контроля качества и прогнозирования работоспособности режущего инструмента / Ю.Г. Кабалдин [и др.]. – Владивосток: Изд-во ДВГУ, 1990. – 122 с.

120. Справочник нормировщика-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2. / Е.И. Стружестрах [и др.]; под ред. Е.И. Стружестраха. – М.: Машгиз, 1961. – 892 с. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. Пер. с англ. И.Г. Арамановича [и др.]; под общ. ред. И.Г. Арамановича. – 2-е изд., перераб. – М.: Наука, 1973. – 832 с.

121. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1. / А.М. Дальский [и др.]; под ред. А.М. Дальского [и др.]. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 912 с.

122. Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1979. – 160 с.

123. Хайкевич, Ю.А. Режущие твердосплавные с прогрессивной схемой резания / Ю.А. Хайкевич // СТИН. – 2009. – № 3. – С. 18-20.

124. Черемушников Н.П. Исследование процесса пластического деформирования и его неустойчивости при резании металлов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.П. Черемушников. – Саратов, 1980. – 22 с.

125. Чигиринский, Ю.Л. Стохастическое моделирование в машиностроении: Учеб. пособие. / Ю.Л. Чигиринский, Н.В. Чигиринская, Ю.М. Быков. – Волгоград: ВолгГТУ, 2002. – 68 с.

126. Улучшение обрабатываемости резанием сталей с различным строением при опережающем пластическом деформировании / Ю.Н. Полянчиков [и др.] // СТИН. – 2010. – № 10. – С. 28-30.

127. Чистосердов П.С. Высокопроизводительные ротационные инструменты для калибрующе-упрочняющей обработки / П.С. Чистосердов, Г.С. Жуковец. – М.: Машиностроение, 1973. – 51 с.

128. Школьник, Л.М. Технология и приспособления для упрочнения и отделки деталей накатыванием / Л.М. Школьник, В.И. Шахов. – М.: Машиностроение, 1964. – 184 с.

129. Щедрин, А.В. Совершенствование способа управления процессом стружкообразования в методах деформирующе-режущей обработки / А.В. Щедрин, В.В. Ульянов, В.М. Скромнов, М.С. Ванюшкина, Д.Ч. Паул, А.А. Бекаев // Вестник машиностроения. – 2005. – №12. – С. 41-42.

130. Щедрин, А.В. Стружкообразование при деформирующе-режущей обработке / А.В. Щедрин, В.М. Скромнов, М.С. Ванюшкина, Д.Ч. Паул, А.А. Бекаев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – №2. – С. 46-48. Щедрин, А.В. Технологические возможности перспективных методов комбинированной деформирующе-режущей обработки / А.В. Щедрин, А.Ю. Андрианов, А.П. Черников, О. Фаниди // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2002. – №11. – С. 47-54.

131. Гликман Л.А. Методы определения остаточных напряжений / Л.А. Гликман // Труды Ленинградского инженерно-технического института. Издательство Ленинградского университета. Вып. 30. – Л., 1960. – С. 58-98.

132. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем / А.С. Вольмир. – М.: Наука, 1967. – 213 с.

133. Гофман О. Введение в теорию пластичности для инженеров / О. Гофман, Г. Зако. – М.: Машгиз, 1960. – 496 с., ил.

134. Гринченко Г.И. Упрочнение деталей из жаропрочных и титановых сплавов / Г.И. Гринченко. – М. Машиностроение, 1971. – 120 с.

135. Колмогоров В.Л. Пластичность и разрушение / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия 1977. – 217 с.

136. Драчев О.И. К вопросу об оптимальном управлении демпфированием колебаний стержней с использованием принципа максимума Понтрягина / О.И.

Драчев, О.И. Иванов // Сб. Технология и автоматизация машиностроения, № 46. – Киев: Техника, 1989. – 140 с.

137. Эффективность применения безвольфрамового твердого сплава ТН 20 при резании нержавеющей сталей с опережающим пластическим деформированием Ю.Н. Полянчиков [и др.] // Изв. ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 6: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 12. – С. 43-45.

138. Эффективные технологии дорнования, протягивания и деформирующе-режущей обработки: коллектив. моногр. / С.К. Амбросимов [и др.]. – М.: Издат. дом «Спектр», 2011. – 328 с.

139. Якубов, Ф.Я. Энергетические соотношения процесса механической обработки материалов / Ф.Я. Якубов. – Ташкент.: ФАН, 1985. – 104 с.

140. Ярославцев В.М. Конструктивные особенности упрочняющих устройств для точения с опережающим пластическим деформированием // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 9. – С. 15–29. DOI: 10.7463/0914.0725358.

141. Ильин Т.Н. Основы учения о пластической деформации / Т.Н. Ильин. – М.: Машиностроение, 1980. – 150 с. 110. Инструменты из сверхтвердых материалов/под ред. Н.В. Новикова. – М.: Машиностроение, 2005. 555 с.

142. Режуще-деформирующая обработка глубоких отверстий роликов машины непрерывного литья заготовок комбинированным инструментом Древаль А.Е., Рубахин А.И. Вестник машиностроения. 2013. № 10. – С. 58-61.

143. Технологические остаточные напряжения /Под ред. А.В. Подзея. – М.: Машиностроение, 1973, – 216 с.

144. Скиженок В.Ф., Лемешонок В.Д., Цегельник В.П. Высокопроизводительное протягивание. – М.: Машиностроение, 1990. 240 с.

145. Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов / О.А. Кайбышев. – М.: Металлургия, 1975. – 280 с.

146. Ярославцев В.М. Резание с опережающим пластическим деформированием: учеб. пособие по курсу «Перспективные технологии реновации» / В.М. Ярославцев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 46 с.

147. Ярославцев, В.М. Точение с опережающим пластическим деформированием: учеб. пособие / В.М. Ярославцев. – М.: Изд-во МГТУ, 1991. – 38 с.

148. Виноградова, Н.В. Теоретическое исследование величины остаточных напряжений от структурно-фазовых превращений в поверхностном слое деталей после механической обработки / Н.В. Виноградова // Актуальные вопросы техники и технологии: сб. докл. междунар. науч. заоч. конф. / под ред. А.В. Горбенко, С.В. Довженко. – Липецк: Издат. центр «Де-факто», 2010. – Т. 1. – С. 111-115.

149. Влияние опережающего пластического деформирования на износ инструмента и качество поверхностного слоя при обработке аустенитных сталей / Ю.Н. Полянчиков [и др.] // Известия ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 4: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – № 9. – С. 35-37.

150. Игнатов, С.Н. Оценка эффективности лезвийной обработки с использованием безразмерного энергетического критерия / С.Н. Игнатов, А.В. Карпов, А.П. Распопин // СТИН. – 2004. – № 12. – С. 23-25.

151. Ингеманссон, А.Р. Улучшение обрабатываемости нержавеющей сталей при использовании резания с опережающим пластическим деформированием / А.Р. Ингеманссон, С.О. Щедриков, Ю.Н. Полянчиков // XV региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области (Волгоград, 9-12 ноября 2010 г.): тез. докл. / ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2011. – С. 76-77.

152. Ингеманссон, А.Р. Повышение эффективности точения труднообрабатываемых сталей ферритного, мартенситно-ферритного и мартенситного классов с использованием опережающего пластического деформирования: дис. канд.техн. наук: 05.02.07 / А.Р. Ингеманссон. – Волгоград, 2012. – 209 с.

153. Математическая модель формирования шероховатости обработанной поверхности при точении с опережающим пластическим деформированием коррозионностойких сталей / А.Р. Ингеманссон [и др.] // *Металлообработка*. – 2012. – № 1.

154. Обеспечение надежности быстрорежущих спиральных сверл в автоматизированном производстве Рагрин Н.А., Древаль А.Е. Фрунзе, 1988.

155. Норченко П.А. Метод резания аустенитных сталей с опережающим пластическим деформированием и его преимущества с точки зрения кристаллической теории строения металлов / П.А. Норченко, А.Р. Ингеманссон, Ю.Н. Полянчиков // XIII региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, г. Волгоград, 11-14 нояб. 2008 г.: тез. докл. / ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2009. – С. 74-77.

156. Норченко, П.А. Повышение эффективности процесса резания нержавеющей сталей аустенитного класса с опережающим пластическим деформированием: дис. канд. техн. наук: 05.02.07 / П.А. Норченко. – Волгоград, 2010. – 127 с.

157. Норченко, П.А. Улучшение шероховатости обработанной поверхности при резании нержавеющей стали 12X18H10T с опережающим пластическим деформированием / П.А. Норченко, А.Р. Ингеманссон, Ю.Н. Полянчиков // XIV региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области (Волгоград, 10-13 нояб. 2009 г.): тез. докл. / ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2010. – С. 63-64.

158. А. с. 358089 СССР, МПК5 В 23 В 1/00. Способ обработки резанием с опережающим пластическим деформированием / Н.А. Ярославцева, В.М. Ярославцев, В.Н. Подураев; заявитель Московское высшее техническое училище им. Баумана. – № 1615026/25-8; заявл. 25.01.1971; опубл. 03.11.1972, Бюл. № 34.

159. Формирование отказов спиральных сверл в условиях автоматизированного производства Древаль А.Е., Рагрин Н.А., Самсонов В.А. Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. № 10. – С. 1.

160. Исследование влияния опережающей пластической деформации на эффективность процесса резания конструкционных сталей Бондарев А.А. автореферат дис. ... кандидата технических наук / Волгогр. гос. техн. ун-т. Волгоград, 2016

161. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.Г. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев: «Наукова думка», 1975 – 703 с.
162. Тимошенко С.П. Сопротивление металлов / С.П. Тимошенко. Т.2, ОТИЗ, 1946, – 456 с.
163. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. Изд. физико-математической литературы, М.: 1963. – 539 с.
164. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Часть 1 / Я.Б. Фридман. -3-изд. перераб. и допл. -М.: Машиностроение, 1974, – 472 с.
165. Мокрицкий Б.Я. Повышение работоспособности металлорежущего инструмента / Б.Я. Мокрицкий // Технология машиностроения. – 2010. – № 8. – С. 33-36.
166. Маркаръян, Ю.А. Активный мониторинг износа сверла в процессе резания / Ю.А. Маркаръян // СТИН. – 2009. – № 1. – С. 2-5.
167. Мартинов, Г.М. Современные тенденции в области числового программного управления станочными комплексами / Г.М. Мартинов, Л.И. Мартинова // СТИН. – 2010. – № 7. – С. 7-11.
168. Новая методика построения модулей расчета режимов резания в САПР ТПП механической обработки / А.Л. Плотников [и др.] // СТИН. – 2009.– № 2. – С. 19-25.
169. Овчаренко, А.Г. Комбинированная магнитно-импульсная обработка режущего инструмента / А.Г. Овчаренко, А.Ю. Козлюк, М.О. Курепин // Технология машиностроения. – 2010. – № 9. – С. 26-30.
170. Оптимизация технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей / В.Ф. Безъязычный [и др.]. – М.: МАИ, 1993. – 183 с.
171. Плотников, А.Л. Обеспечение надежности определения режимов лезвийной обработки для автоматизированного станочного оборудования на основе оперативной информации о свойствах инструмента и детали: дис. ... дра техн. наук: 05.03.01 / А.Л. Плотников. – Саратов, 2002. – 312 с.

172. Плотников, А.Л. Управление режимами резания на токарных станках с ЧПУ: монография / А.Л. Плотников, А.О. Таубе. – Волгоград: РПК «Политехник», 2003. – 184 с. 89. Повышение качества обработки сталей резанием с опережающепластическим деформированием / С.О. Щедриков [и др.] // Молодая наука XXI века: сб. науч. работ междунар. студ. науч. конф. / Минобрнауки Украины, Донбас. гос. машиностр. акад. – Краматорск, 2010. – Ч. 2. – С. 186-189.

173. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.

174. Старков В.К. Технологические методы повышения надежности обработки на станках с ЧПУ / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1984. – 119 с.

175. Режущий инструмент: учеб. пособие / Рыжкин А.А., Каганов В.С., Дмитриев В.С.; ДГТУ. — Ростов н/Д, 2000. — 309 с.

176. Суслов, А.Г. Инженерия поверхности детали при изготовлении / А.Г. Суслов, Д.И. Петрешин // Инженерия поверхности деталей / колл. авт.; под. ред. Сусллова А.Г. — М.: Машиностроение, 2008. – С. 170-193.

177. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с. 130.

178. Суслов, А.Г. Научно-технические технологии в машиностроении / Д.И. Петрешин // Технологии обработки заготовок на самообучающихся станках с адаптивным управлением / колл. авт.; под. ред. Сусллова А.Г. — М.: Машиностроение, 2012. — С. 233-268.

179. Определение влияния наноструктурированных покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей Безъязычный В.Ф., Тимофеев М.В., Фоменко Р.Н., Шустер Л.Ш. Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 11 (83). – С. 3-7.

180. Управление качеством поверхностного слоя при резании в автоматизированном производстве / Ю.Г. Кабалдин [и др.] // Вестник машиностроения. – 1993. – №3. – С. 37-41.

181. Система интеллектуального управления станками Тугенгольд А.К., Лукьянов Е.А., Ремизов Э.В., Носенков Д.А. СТИН. 2008. № 12. – С. 10-15.

182. Электрохимические и электрофизические методы обработки в современном машиностроении Полянчиков Ю.Н., Схиртладзе А.Г., Воронцова А.Н., Полянчикова М.Ю., Тибиркова М.А., Сидякин Ю.И., Кожевникова А.А. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» / Волгоград, 2015. Нанотехнология механической обработки деталей машин / Ю.Ф. Назаров [и др.] // Технология машиностроения. – 2009. – № 6. – С. 9-10.

71. Нанотехнологические процессы обработки изделий конструкционного назначения в машиностроении / В.М. Рубан [и др.] // Вестник машиностроения. – 2009. – № 4. – С. 74-76.

183. Маринин Г.В. Технология нанорезания закаленной стали / Г.В. Маринин, С.Н. Малышев, Е.М. Захаревич // Технология машиностроения. – 2009. – № 1. – С. 9-12.

184. Водопьянов А.В. Расчет размеров стружколомающих порошков у сверл для глубокого сверления // Известия Томского политехнического института, 1968. Т. 158. – С. 114-116.

185. Гольдрайх Г.М., Джутуря Т.Г., Капительман Л.В. Станки для глубокого сверления // Техника машиностроения, 1996, № 3 (9). – С. 39-41.

186. Губергриц Л.И., Дроздов Ф.М. Станки для сверления и растачивания глубоких отверстий // Станки и инструмент, № 4, 1989, с. 2-4. 14.

187. Диннебир Ю. Сверление, развертывание и зенкование / ред. и дополнения П.В. Кондратьева. – М.: ОНТИ НКТП СССР, 1934. 196 с.

188. Долецкий В.А. Увеличение ресурса машин технологическими методами / В.А. Долецкий, В.Н. Бунтов. – М.: Машиностроение. 1978. – 214 с.

189. Дольский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А.М. Дольский. – М.: Машиностроение, 1975. – 23 с.

190. Драгун А.П. Режущий инструмент. Л.: Лениздат, 1986. 271 с.

191. Кирсанов С.В. Современные конструкции инструментов для сверления и растачивания глубоких отверстий // Справочник. Инженерный журнал, № 2 (95) 2005. – С. 46-53.
192. Кирсанов С.В. Станки для обработки глубоких отверстий//Справочник. Инженерный журнал, № 8 (53), 2001. – С. 46-49.
193. Кирсанов С.В., Гречишников В.А., Схиртладзе А.Г., Кокарев В.И. Инструменты для обработки точных отверстий. – М.: Машиностроение, 2005. 336 с.
194. Кисель А.В. Станок глубокорасточной модели КЖ 1907.01Ф1 / Экспресс-информация: «Обработка резанием (технология, оборудование, инструмент)». – М.: НИИМАШ, 1981. Вып. 8. – С. 4-5.
195. Кожевников Д.В. Современная технология и инструмент для обработки глубоких отверстий: обзор. – М.: НИИМАШ, 1981. 60 с.
196. Кононенко С.Г. Обработка глубоких отверстий. – М.: Машиностроение, 1964. 41 с.
197. Коцубинский О.Ю. Стабилизация размеров чугунных отливок / О.Ю. Коцубинский. – Москва, Машиностроение. 1974. – 213 с.
198. Кравченко Б.А. Повышение выносливости и надежности деталей машин и механизмов / Б.А. Кравченко, Д.Д. Папшев, Б.И. Колесников, Н.И. Моренков. – Куйбышевское книжное издательство, 1966. – 223 с.
199. Кремень З.И., Стратиевский И.Х. Хонингование и суперфиниширование деталей/под ред. Л.Н. Филимонова. Л.: Машиностроение, 1988. 137 с. 33.
200. Кузовкин Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Н.Т. Кузовкин. – М.: Машиностроение, 1976. – 120 с.
201. Куркин С.А. Влияние деформационного старения на поведение высокопрочных сталей при двухосном растяжении /С.А. Куркин, А.И. Смирнов, Л.М. Певзнер//Известия вузов. Машиностроение. – 1969. – № 2. - С. 51-57.
202. Лещенко М.И., Оганян А.А. Технология и инструмент для обработки глубоких отверстий толстостенных цилиндров. – М.: ВНИИТЭМР, 1989. 60 с.

203. Липатов А.Н. Глубокое сверление на станках с ЧПУ // Станки и инструмент, 1991, № 5. – С. 29-31.

204. Ловыгин А.А., Васильев А.В., Кривцов С.Ю. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM-система. М: Эльф ИПР, 2006. 286 с. 39. Малиновский Г.Т. Масляные смазочно-охлаждающие жидкости для обработки металлов резанием. Свойства и применение. – М.: Химия, 1993. 160 с.

205. Мальцев О.С., Коган М.Л., Петухов В.К. и др. Сверла глубокого сверления Ø1-14 мм, оснащенные цельными твердосплавными наконечниками // Твердые сплавы и тугоплавкие материалы: сб. трудов ВНИИТС. № 14. – М.: Металлургия, 1973. – С. 110-114.

206. Маталин А.А. Технология механической обработки / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1977. – 464 с.

207. Машиностроение. Энциклопедия: металлорежущие станки и деревообрабатывающее оборудование. Т. IV-7. – М.: Машиностроение, 2002. 864 с.

208. Медведев Д.Д. Точность обработки в мелкосерийном производстве. – М.: Машиностроение, 1973. 120 с.

209. Минков М.А. Технология обработки глубоких точных отверстий. – М.–Л.: Машиностроение, 1965. 176 с.

210. Мухин В.С., Шустер Л.И. Износ инструмента, качество и долговечность деталей из авиационных материалов. Уфа: УАИ, 1987. – 287 с.

211. Обработка глубоких отверстий / Н.Ф. Уткин, Ю.И. Кижняев, С.К. Плужников и др.; под общ. ред. Н.Ф. Уткина. Л.: Машиностроение, 1988. 269 с.

212. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания на обработку глубоких отверстий (сверление, растачивание, развертывание и раскатывание). Среднесерийное, мелкосерийное и единичное производство. – М.: Экономика, 1988. 135 с.

213. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. – М.: Машиностроение, 1987. 328 с.

214. Окубо Т. Прецизионная обработка глубоких отверстий по методу БТА // Кикай то когу, 1966, т. 10, № 10, с. 8-18.
215. Осман М.О.М., Латинович В. Усовершенствование многолезвийного инструмента для расточки отверстий по способу БТА // Конструирование и технология машиностроения. 1976. № 2. – С. 93-100.
216. Остаточные, технологические напряжения / Тр. 2 Всесоюзного симпозиума. – И.: 1985. – 390 с.
217. Пастернак Н.А. Исследование холодной и горячей правки металла / Н.А. Пастернак. – М.: Машгиз, 1953. – 98 с.
218. Пат. 2254173 РФ. С2 В06 В1/16. Глейзер А.И., Драчев О.И., Корнеев Н.В. Генератор крутильных колебаний. Оpubл. 2005, Бюл. № 17, 4 с.: 3 ил.
219. Перепятыко В.Н. Исследование остаточных напряжений при изгибе: (гибка металлов) / В.Н. Перепятыко, А.А. Ковтун, Ю.Н. Рогов // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1987, № 2, 61-63 с.
220. Перескоков А.И. Изготовление сверлильных головок типа БТА//Машиностроитель, 1981, № 7. – С. 28-29.
221. Писаренко Г.С. Колебания механических систем с учетом несовершенной упругости материала / Г.С. Писаренко. – Киев.: АН УССР, 1970. – 379 с.
222. Применение способа глубокого сверления с эжекторным отводом стружки на специальном и универсальном модернизированном оборудовании: методические рекомендации. – М.: НИИМАШ, 1984. 53 с.
223. Протяжки для обработки отверстий / Д.К. Маргулис, М.М. Тверской, В.Н. Ашихмин и др. – М.: Машиностроение, 1986. 232 с.
224. Грубый С.В. Количественные показатели изнашивания твердосплавных инструментов с учетом вариации твердости Известия высших учебных заведений. Машиностроение 2023. – № 2 (755). – С. 11-20
225. Санин П.И. Химические аспекты граничной смазки (химическое модифицирование поверхностей трения) // Трение и износ, 1980. Т. 1, № 1. – С. 45-57.

226. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю. Дорнование глубоких отверстий диаметром до 2 мм. Томск: Изд-во ТПУ, 2005. 92 с.

227. Ускоренные испытания осевого режущего инструмента на надежность Древаль А.Е., Ардисламов В.К., Егоров В.Н. Вестник машиностроения. 1992. № 3. – С. 56-58.

228. Критерии предельного состояния быстрорежущих сверл Древаль А.Е. Вестник машиностроения. 2018. № 2. – С. 61-66.

229. Адаптивное управление станками / Под ред. Б.С. Балакшина.— М.: Машиностроение, 1973. — 688 с.

230. Хозирук Г.П. Влияние остаточных напряжений в заготовке на погрешность формы маложестких деталей типа пластин / Г.П. Хозирук // Совершен. технолог. процессов машиностроения. – Иркутск, 1987. – 137 – 140 с.

231. Ящерицын П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – М.: Наука и техника, 1977. – 170 с.

232. Ящерицын П.И. Технологическая и эксплуатационная наследственность и ее влияние на долговечность машин / П.И. Ящерицын, Ю.В. Скорынин. – Минск: Наука и техника, 1978. – 246 с.

233. Автоматизация типовых технологических процессов и промышленных установок: Учеб, пособие для вузов / А.М. Корытин, Н.К. Петров, С.Н. Радимов, Н.К. Шапарев. Киев-Одесса: Вища школа, 1980. 372 с.

234. Энергопотребление при обработке отверстий быстрорежущими сверлами Древаль А.Е., Щелокова П.Ю. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 12. – С. 19-23.

235. Выбор режимов резания при сверлении Даниленко Б.Д., Древаль А.Е., Жилис В.И. Инженерный журнал: наука и инновации. 1989. № 535. – С. 30.

236. Сверло Древаль А.Е., Рагрин Н.А., Рафиков Р.Ч. Авторское свидетельство SU 1437160 А1, 15.11.1988. Заявка № 4126392 от 14.07.1986.

237. Кинетика состояния поверхностных слоев быстрорежущего инструмента в процессе его изнашивания Древаль А.Е., Ардисламов В.К., Кривошей В.М., Гай-

нулин М.Р. В сборнике: Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов. Межвузовский тематический научный сборник. Уфа, 1989. – С. 132-138.

238. Обеспечение надежности осевого инструмента посредством диагностирования по физическим параметрам процесса резания Древаль А.Е., Ардисламов В.К. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1989. № 1. – С. 136-139.

239. Драчев О.И. Автоматическое управление процессом точения маложестких деталей / О.И. Драчев, А.Н. Кравцов; ВолгГТУ – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 250 с.: ил., табл.; – (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении/Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева).

240. Драчев О.И. Некоторые вопросы расчетов динамических характеристик процесса механической обработки маложестких деталей на станках с ЧПУ / О.И. Драчев, О.И. Иванов. – Куйбышев: Динамика станков с ЧПУ, 1986. – с. 100-108.

241. Драчев О.И. Новые способы обработки маложестких осесимметричных деталей / О.И. Драчев, О.И. Иванов // Сборник трудов Всесоюзной научно-технической конференции «Интенсификация технологических процессов механической обработки». – Ленинград, 1986. – с. 123-124.

242. Драчев О.И. Определение динамических характеристик процесса обработки нежестких деталей, рассматриваемых как объекты с распределенными параметрами / О.И. Драчев, О.И. Иванов. – Куйбышев: Динамика станков: Тез. докл. Всесоюзной науч.-техн. конф., 1984. – с. 62-63. Драчев О.И.

243. Особенности динамических моделей процессов механической обработки длинномерных маложестких деталей / О.И. Драчев, О.И. Ивано // Динамика станочных систем гибких автоматизированных производств. Сборник трудов третьей Всесоюзной научно-технической конференции. Тольятти, 1988. – С. 111-112.

244. Драчев О.И. Повышение точности обработки на токарных станках путем автоматического управления относительными колебаниями инструментзаготовка и положением оси детали: дис.... канд. техн. наук. Тольятти, 1976.

245. Драчев О.И., Бобровский А.В. Повышение точности обработки длинномерных маложестких деталей путем автоматического регулирования // Юбилейная научно-техническая конференция. Тольятти, 1997. – С. 59-60.

246. Драчев О.И. Автоматическая система стабилизации геометрических форм маложестких деталей при термомеханической обработке / О.И. Драчев. – Куйбышев: Тр. КПТИ, 1990. – 129 – 142 с.

247. Драчев О.И. Автоматическая система управления обработки маложестких деталей / О.И. Драчев // Алгоритмы и системы управления промышленными установками в машиностроении. – Куйбышев КПТИ, 1986. – 181 – 196 с.

248. Драчев О.И. Технологические особенности обработки маложестких деталей при автоматизированном процессе механической обработки с учетом высших случайных воздействий / О.И. Драчев, В.И. Скиданенко // Сб. Технология и автоматизация машиностроения. № 40. – Киев: Техника, 1987. – (37-40) с.

249. Драчев О.И. Технология изготовления маложестких осесимметричных деталей / О.И. Драчев. – Петербург: Политехника, 2005. – 290 с.: ил.

250. Драчев О.И. Управление уровнем относительных колебаний и процессов резания / О.И. Драчев, Ж.С. Равва, В.И. Скиданенко // Алгоритмизация и автоматизация технологических процессов и промышленных установок. – Куйбышев, 1975. – вып. 6. – 53 – 62 с.

251. Егоров К.В. Основы теории автоматического регулирования / К.В. Егоров. – М. Энергия, 1967. – 648 с.

252. Злобин Г.П. Формование изделий из порошков твердых сплавов. – М.: Металлургия, 1980. 224 с. 107. Иванов О.И. Повышение точности и производительности обработки маложестких деталей типа тел вращения путем автоматического управления упругими перемещениями технологической системы / О.И. Иванов // Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. – Тольятти, 1990.

253. Модели отказов спиральных сверл Древаль А.Е., Ткаченко И.В., Рагрин Н.А. В сборнике: Проблемы эксплуатации инструмента в металлообрабатывающей

промышленности. Материалы семинара. Общество «Знание», Центральный российский дом знаний. Москва, 1992. – С. 55-62.

254. Игошин В.В. Исследование условия рационального отвода стружки при токарной обработке металлов резцами со стружкозавивающими элементами: автореф. дисс. на соискание степени канд. техн. наук. Пенза: ПТИ, – 1967. 32 с.

255. Калмыков В.И., Петровская Т.М., Бадаева А.С., Мещеряков А.И. Разработка и исследование схемы прошивки ультразвуком глубоких отверстий в твердосплавных рабочих частях сверл одностороннего резания // Прогрессивные инструменты для обработки отверстий (конструкция, технология изготовления, эксплуатация): сб. науч. тр. – М.: ВНИИ ОНТИ, 1979. – С. 35-46.

256. Экспериментальные исследования процесса сверления отверстий медного сплава в напряженно-деформированном материале заготовки Куц В.В., Бышкин А.С., Разумов М.С., Кочергин В.С. Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 1. – С. 13-15.

257. Метод определения пределов упругости и пропорциональности материалов для последующего сверления заготовок в напряженно деформированном состоянии Куц В.В., Бышкин А.С., Разумов М.С. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 3 (341). – С. 164-170.

258. Исследование внутренних напряжений в процессе сверления заготовок из цветных сплавов, находящихся в предварительном упругодеформированном состоянии Куц В.В., Бышкин А.С., Разумов М.С. Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 3. – С. 147-154.

259. Исследование осевой силы при сверлении заготовок из латуни Л59 в предварительном упругодеформированном состоянии Куц В.В., Разумов М.С., Бышкин А.С., Глазков П.В. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. – С. 401-405.

260. Построение эмпирических зависимостей осевой силы при сверлении заготовок из сплава Д16 в упругодеформированном состоянии Куц В.В., Разумов

М.С., Бышкин А.С., Глазков П.В. Воронежский научно-технический Вестник. 2021. Т. 1. № 1 (35). – С. 49-55.

261. Сверление отверстий в напряженно-деформированном материале заготовки Куц В.В., Бышкин А.С., Разумов М.С. Современные материалы, техника и технологии. 2018. № 3 (18). – С. 20-23.

262. Приспособление для сверления отверстий с наложением вибраций на заготовку Разумов М.С., Заворин М.К., Гатиев М.Ш., Бышкин А.С. В сборнике: Современные материалы, техника и технология. сборник научных статей 8-й Международной научно-практической конференции. 2018. – С. 347-352.

263. Способ и устройство для определения предела упругости в заготовках деталей Куц В.В., Разумов М.С., Бышкин А.С., Дрынова О.И. В сборнике: Инновации, качество и сервис в технике и технологиях. Сборник научных трудов 7-ой Международной научно-практической конференции. Редколлегия: А.А. Горохов (отв. ред.). 2017. – С. 216-218.

264. Исследование глубины устойчивого сверления заготовок из латуни в предварительном упругодеформированном состоянии Бышкин А.С., Куц В.В., Разумов М.С. В сборнике: Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении. III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. Тула, 2022. – С. 81-83.

265. Исследование глубины установившегося сверления заготовок из сплава Л 59 в предварительном упругодеформированном состоянии Куц В.В., Бышкин А.С., Котуков Е.В. В сборнике: Современные технологии производства в машиностроении. Воронеж, 2022. – С. 136-142.

266. Исследование стойкости сверл при сверлении заготовок из цветных металлов и сплавов в предварительно упругодеформированном состоянии при заданных показателях качества обработки Куц В.В., Бышкин А.С., Разумов М.С. В сборнике: современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов. сборник научных статей 2-й Международной

научно-технической конференции, посвященной памяти академика А.А. Байкова. Курск, 2021. – С. 49-52.

267. Исследование погрешности формы отверстий после сверления цветных металлов и сплавов в предварительно упругодеформированном состоянии Куц В.В., Бышкин А.С., Разумов М.С. В сборнике: Прогрессивные технологии и процессы. Сборник научных статей 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Курск, 2021. – С. 83-87.

268. Приспособление для сверления отверстий с наложением вибраций на заготовку Разумов М.С., Заворин М.К., Гатиев М.Ш., Бышкин А.С. В сборнике: современные материалы, техника и технология. сборник научных статей 8-й Международной научно-практической конференции. 2018. – С. 347-352.

269. Способ определения величины предела пропорциональности материалов Куц В.В., Разумов М.С., Бышкин А.С., Щербаков П.С. Патент на изобретение RU 2686572 С1, 29.04.2019. Заявка №2017138540 от 07.11.2017.

270. Способ и устройство сверления заготовки в упруго напряженном состоянии Куц В.В., Разумов М.С., Бышкин А.С., Беседин А.В. Патент на изобретение 2779438 С1, 07.09.2022. Заявка №2021133949 от 22.11.2021.

271. Расчет температуры на площадке износа задней поверхности режущего инструмента при обработке аустенитной и перлитной сталей Липатов А.А., Чигиринский Ю.Л. Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. № 7 (110). – С. 34-37.

272. Astakhov, V. P. A methodology for practical cutting force evaluation based on the energy spent in the cutting system / V. P. Astakhov, X. Xiao // *Machining Science and Technology*. – 2008. – Vol. 12, № 3. – P. 325-347.

273. Cutting parameter optimization when machining different materials / T. M. El-Hossainy [et al.] // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2010. – Vol. 25. – P. 1101-1114.

274. Developed models for understanding and predicting the machinability of a hardened martensitic stainless steel / A. M. El-Tamimi [et al.] // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2010. – Vol. 25. – P. 758-768.

275. Effect of cold deformation on the machinability of a free cutting steel / K. K. Ray [et al.] // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2006. – Vol. 20, № 5. – P. 333-340.

276. El-Hossainy, T. M. A new technique for enhancing surface roughness of metals during turning / T. M. El-Hossainy // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2010. – Vol. 25. – P. 1505-1512.

277. El-Tamimi, A. M. Investigating the tool life, cutting force components, and surface roughness of AISI 302 stainless steel material under oblique machining / A. M. El-Tamimi, T. M. El-Hossainy // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2008. – Vol. 23. – P. 427-438.

278. Experimental investigation and performance analyses of CBN insert in hard turning of cold work tool steel (D3) / H. Bouchelaghem [et al.] // *Machining Science and Technology*. – 2010. – Vol. 14. – P. 471-501.

279. Fang N. Impulsive chip breaking in metal machining: a proof-of-concept study / N. Fang, Q. Wu // *Machining Science and Technology*. – 2006. – Vol. 10, № 2. – P. 251-262.

280. Improved cutting of steels by means of preceding plastic deformation / Yu. N. Polyanchikov [et al.] // *Russian Engineering Research*. – 2011. – Vol. 31, № 1. – P. 82-84.

281. Influence of machining parameters on the white layer formation process and its characteristics in turning of hardened steel / M. Mehmedović [et al.] // *Machining Science and Technology*. – 2007. – Vol. 11, № 3. – P. 313-334.

282. Investigation of size-effects in machining with geometrically defined cutting edges / M. Weber [et al.] // *Machining Science and Technology*. – 2007. – Vol. 11. – P. 447-473.

283. Iscar. Complete machining solutions. Turning tools : Каталог. – Израиль : Iscar, 2008. – 828 с.

284. Iscar. Complete machining solutions. Rotating tools : Каталог. – Израиль : Iscar, 2008. – 1116 с.

285. Krainev, D. V. Progressive method of cutting stainless and heatproof steels and alloys / D. V. Krainev, P. A. Norchenko, A. R. Ingemansson // European Journal of Natural History. – 2008. – № 4. – P. 94.

286. Liliherehn, A. Experimental studies and modeling of heat generation in metal machining / A. Liliherehn, V. Kalhori, M. Lundbland // Machining Science and Technology. – 2008. – Vol. 13. – P. 488-515.

287. Machining residual stresses in AISI 316L steel and their correlation with the cutting parameters / J. C. Outeiro [et al.] // Machining Science and Technology. – 2002. – Vol. 6, № 2. – P. 251-270.

288. Morehead, M. D. Chip morphology characterization and modeling in machining hardened 52100 steels / M. D. Morehead, Y. Huang, J. Luo // Machining Science and Technology. – 2007. – Vol. 11, № 3. – P. 335-354.

289. Moriwaki, T. Development of intelligent monitoring and optimization of cutting process for CNC turning / T. Moriwaki, S. Tangjitsitcharoen, T. Shibusaka // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. – 2006. – Vol. 78, № 10. – P. 217-220.

290. Cutting and deformation of deep holes in continuous-casting rollers Dreval' A.E., Rubakhin A.I. Russian Engineering Research. 2014. T. 34. № 1. – С. 22-25.

291. Nandy, A. K. Effect of coolant pressure, nozzle diameter, impingement angle and spot distance in high pressure cooling with neat oil in turning Ti-6Al-4V / A. K. Nandy, S. Paul // Machining Science and Technology. – 2008. – Vol. 12, № 4. – P. 445-473.

292. Promyoo, R. Molecular dynamics simulation of nanometric cutting / R. Promyoo, H. El-Mounayri, X. Yang // Machining Science and Technology. – 2010. – Vol. 14. – P. 423-439.

293. Role of microstructural softening events in metal cutting / S. V. Subramanian [et al.] // Machining Science and Technology. – 2002. – Vol. 6, № 3. – P. 353-364. 178.

Sandvik Coromant. Токарные инструменты: Каталог. – Швеция: Sandvik Coromant, 2011. – 917 с.

294. Sandvik Coromant. CoroKey. Точение. Фрезерование. Сверление: Каталог. – Швеция: Sandvik Coromant, 2008. – 208 с.

295. Sandvik Coromant. Руководство по металлообработке: Справочник / Sandvik Coromant. – Швеция, 2010. – 803 с.

296. Limiting state of high-speed drills Dreval' A.E. Russian Engineering Research. 2018. Т. 38. № 5. – С. 363-367.

297. Teague, J. A. Dependency of machinability in gray cast iron on nitride induced age strengthening: dis. ... PhD: Metallurgical engineering / J. A. Teague. – Missouri, 2010. – 135 p.

298. The improvement of stainless steels machining parameters at the use of cutting with advancing plastic deformation / Yu. N. Polyanchikov [et al.] // International journal of applied and fundamental research. – 2011. – № 2. – P. 42-43.

299. Experimental studies of hole drilling operations in stress-strain workpiece material Kuts V.V., Razumov M.S., Byshkin A.S.: MATEC Web of Conferences. 2018. – С. 01011.

300. The method and device for automated material elastic and proportionality limits calculation Kuts V., Byshkin A., Khodyrevskaya S. Solid State Phenomena. 2018. Т. 284. – С. 1361-1366.

301. Study of the preliminary elastic deformation state of workpieces made of non-ferrous alloys during drilling Kuts V., Razumov M., Byshkin A. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Т. 247. – С. 253-259.

302. Features of processing of corrosion resistant steels Tchigirinsky J.L., Trung P.H., Lipatov A.A. Materials Science Forum. 2016. Т. 870. – С. 598-602.

303. Formulating cad/cam modules for calculating the cutting conditions in machining Plotnikov A.L., Chigirinskii Yu.L., Frolov E.M., Krylov E.G. Russian Engineering Research. 2009. Т. 29. № 5. – С. 512-517

304. Analysis of influence of strains of technological system elements on machining accuracy under turning of non-rigid shafts based between centers Nesterenko P.S., Tchigirinsky J.L., Nesterenko E.N.: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Conference proceedings ICIE 2019. Сер. «Lecture Notes in Mechanical Engineering» Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «South Ural State University» (national research university), Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Education «Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)». 2020. – С. 1193-1201.

305. Reliability of handbook data in technological design Chigirinskii Y.L. Russian Engineering Research. 2010. Т. 30. № 8. – С. 835-837.

306. Inspecting the quality of a surface layer in non-rigid shafts turning by adaptive control over the process of cutting Chigirinskii J.L., Nesterenko P.S., Smirnova E.N. Materials Science Forum. 2019. Т. 973. – С. 212-218.

307. Information system for the design of machining processes Chigirinskii Y.L., Firsov I.V., Chigirinskaya N.V. Russian Engineering Research. 2014. Т. 34. № 1. – С. 49-51.

308. Structural optimization of technological route using simulation modeling Tchigirinsky J.L., Chigirinskaya N.V., Firsov I.V. В сборнике: Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. 2015. – С. 7414925.

309. Influence of technological factors of blade processing on the forming of the defect layer Tchigirinsky J.L., Quang T.N. В сборнике: МАТЕС Web of Conferences. 2017. – С. 01020.

310. Formalized approaches in technological design Chigirinskii Y.L. Russian Engineering Research. 2010. Т. 30. № 3. – С. 305-307.

311. Performance of hard-alloy tools in turning high-strength martensitic steel Lipatov A.A., Chigirinskii Y.L. Russian Engineering Research. 2012. Т. 32. № 3. – С. 285-287.

312. On-line monitoring and parameter control of a surface microprofile Kraynev D.V., Bondarev A.A., Tchigirinsky Y.L. сборнике: International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017. Сер. «Procedia Engineering» 2017. – С. 1285-1291.

313. INFLUENCE OF FINISHING METHODS OF TREATMENT ON CONDITION OF STEEL 36NICRMO16 PART SURFACE LAYER Tchigirinsky J.L., Firsov I.V., Nesterenko P.S. ике: International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017. Сер. «Procedia Engineering» 2017. – С. 1252-1257.

314. Новацкий, В. Теория упругости [Текст] / Пер. с польск. Б. Е. Победри. - Москва : Мир, 1975. - 872 с. : черт.; 22 см.

315. Горбачев В.И. Основы механики сплошных сред [Электронный ресурс] // URL: <https://teach-in.ru/file/synopsis/pdf/continuum-mechanics-gorbachev-part1-M.pdf?ysclid=litxxtsexi474916216> (дата обращения: 17.12.2022)

316. Сплав алюминиевый Д16 (Д16ч., Д16П, 1163) с медью и магнием (дуралюмин) конструкционный // <https://inzhener-info.ru/razdely/materialy/deformiruemye-alyuminievye-splavy/splavy-alyuminiya-s-medyu-i-magniem-duralyumin/konstruktsionnye/splav-alyuminievyj-d1-d1ch-s-medyu-i-magniem-duralyumin-konstruktsionnyj-2.html?ysclid=lity5tblyg402619319> (дата обращения: 17.12.2022).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

4734

13.05.19

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2686572

**Способ определения величины предела пропорциональности
материалов**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования " Юго-
Западный государственный университет " (ЮЗГУ) (RU)*

Авторы: *Куц Вадим Васильевич (RU), Разумов Михаил
Сергеевич (RU), Бышкин Александр Сергеевич (RU), Щербаков
Павел Сергеевич (RU)*

Заявка № 2017138540

Приоритет изобретения 07 ноября 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 29 апреля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 07 ноября 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

5323

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2779438

**Способ и устройство сверления заготовки в упруго
напряженном состоянии.**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования "Юго-
Западный государственный университет" (ЮЗГУ) (RU)*

Авторы: *Куц Вадим Васильевич (RU), Разумов Михаил
Сергеевич (RU), Бышкин Александр Сергеевич (RU),
Беседин Андрей Владимирович (RU)*

Заявка № 2021133949

Приоритет изобретения 22 ноября 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 07 сентября 2022 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 22 ноября 2041 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ 3



АО «Геомаш»
306530, Россия,
г. Щигры, Курская область,
ул. Красная, д. 54
тел.: +7 (47145) 4-22-59,
факс: +7 (47145) 4-33-93
e-mail: mail@geomash-zavod.ru
www.geomash.ru
Дата _____ № _____

На № _____ от _____



/Кочергин В.С.
10 2022 г.

ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА СВЕРЛЕНИЯ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА В ЗАГОТОВКАХ ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ В ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ УПРУГОДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

Настоящим актом подтверждается, что результаты научного исследования «РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА СВЕРЛЕНИЯ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА В ЗАГОТОВКАХ ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ В ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ УПРУГОДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ», выполненной совместно с Юго-Западным государственным университетом в период с 2017 по 2021 г.г., внедрены в практическую деятельность в масштабах ОАО «Геомаш».

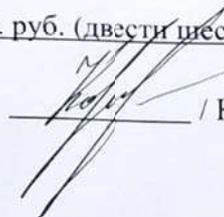
Вид результатов внедрения: Специальное приспособление для сверления глубоких отверстий малого диаметра в заготовках из цветных сплавов в предварительном упругодеформированном состоянии.

Область внедрения: технологические процессы изготовления деталей, содержащих отверстия.

Эффект от внедрения (ожидаемый, фактический):

- а) социальный: снижение трудозатрат при изготовлении деталей, содержащих отверстия;
- б) годовой экономический эффект: 267,2 тыс. руб. (двадцать шесть тысяч двести рублей).

Главный технолог АО «Геомаш»

 / Корниенко А.Н.



Сертифицировано
Русским Регистром



ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Утверждаю:
Директор ООО «Геотехник»
Н. В. Бредихин
» 20 г.

ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ**внедрения в производство комплекса для сверления заготовок цветных металлов и сплавов в напряженно деформированном состоянии**

Настоящий акт подтверждает, что в ООО «Геотехник» г. Железногорск, испытан и внедрен в промышленную эксплуатацию комплекс для сверления заготовок цветных металлов и сплавов в напряженно деформированном состоянии, предназначенный для сверления глубоких отверстий малого диаметра в заготовках из цветных металлов и сплавов, разработанный аспирантом МТиО Юго-Западного государственного университета Бышкиным Александром Сергеевичем.

Предложенная методика п для сверления заготовок цветных металлов и сплавов в напряженно деформированном состоянии позволила скорректировать режимы сверления, что повысило производительность операции на 30% без потери стойкости инструмента.

В результате внедрения вышеуказанного комплекса экономическая эффективность на общую номенклатуру изготавливаемых деталей составила 195 000 рублей в год.

Технический директор ООО «Геотехник»

Р. А. Халин