

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ТОРОП Юрий Алексеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
КАЛИБРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ДОРНОМ
С НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА НА ДЕТАЛЬ**

2.5.6 – «Технология машиностроения»

2.5.5 «Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук,
профессор
Лебедев Валерий Александрович

Ростов-на-Дону
2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ ДОРНОМ	11
1.1. Физико-технологические основы отделочно-упрочняющей обработки отверстий дорном	11
1.2. Особенности обработки дорном отверстий термообработанных деталей...	18
1.3. Применение ультразвука в технологических процессах отделочно- упрочняющей обработки деталей методами поверхностного пластического деформирования	20
1.3.1. Влияние УЗК на свойства металла и процесс ППД.....	20
1.3.2. Ультразвуковые колебательные системы, применяемые при обработке ППД	23
1.4. Цели и задачи исследования	29
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАЛИБРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ДЕТАЛЬ	33
2.1. Структурная схема технологической системы калибрования отверстий ...	33
с наложением ультразвуковых колебаний на деталь	33
2.2. Технологические параметры управления процессом калибрования.....	35
2.3. Исследование состояния поверхностного слоя.....	39
отверстия деформированного дорном.....	39
с наложением ультразвуковых колебаний на деталь	39
2.4. Расчет силовых и акустических параметров процесса калибрования отверстий в условиях ультразвукового воздействия на деталь.....	48
2.4.1. Расчет силы калибрования	48
2.4.2. Обоснование и расчет параметров основных элементов УЗКС.....	53
2.4.3. Закономерности распространения ультразвуковых колебаний в детали..	59

2.5. Определение параметров качества поверхностного слоя отверстия, сформированного в процессе калибрования отверстия с применением ультразвуковых колебаний.....	64
2.5.1. Оценка микротвёрдости деформированного поверхностного слоя отверстия	64
2.5.2. Оценка высоты неровностей профиля поверхности отверстия после калибрования	67
2.6. Задачи экспериментальных исследований	69
3. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	74
3.1. Экспериментальный комплекс калибрования отверстий	74
с применением ультразвуковых колебаний.....	74
3.3. Технические средства контроля	81
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КАЛИБРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ	85
4.1. Исследование эффективности ультразвукового воздействия на деталь	85
4.1.1. Определение коэффициента затухания УЗК в детали.....	85
4.1.2. Оценка влияния УЗК на микротвердость	99
4.2. Исследования силы калибрования и параметров качества поверхности отверстий с применением ультразвукового воздействия на деталь.....	105
4.2.1. Условия проведения исследований	105
4.2.2. Сила калибрования отверстий дорном.....	107
4.2.3. Микротвердость поверхностного слоя отверстия	108
4.2.4. Шероховатость поверхности и точность отверстия	110
ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПЕРАЦИЙ КАЛИБРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ	119
5.1. Методика проектирования технологических операций калибрования отверстий дорном с наложением ультразвуковых колебаний на деталь.....	119
5.2. Инструментальное обеспечение процесса калибрования отверстий дорном	122

5.3. Рекомендации по обеспечению эффективности ультразвуковых колебательных систем процесса калибрования отверстий дорном	125
5.4. Практическое применение результатов исследований	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	132
Библиографический список.....	135
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	149

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Одним из эффективных методов отделочно-упрочняющей обработки отверстий, в основе которого лежит процесс поверхностного пластического деформирования (ППД), является обработка дорном. Этот метод позволяет осуществлять обработку различных по форме отверстий без применения сложного оборудования и оснастки. Наиболее востребован он для калибрования отверстий, обеспечивающих точное центрирование на валу деталей типа зубчатых колес и дисков, подвергаемых термической обработке для повышения износостойкости.

Существенный вклад в разработку этого метода внесли отечественные ученые: Ю.Г. Проскуряков, Д.Д. Розенберг, И.В. Поздняков, В.П. Монченко, А.И. Осколков, В.М. Менщиков, Ф.Ф. Валяев, А.Н. Исаев, С.А. Берберов и др. В результате проведенных ими исследований разработаны конструкции дорнов, определены геометрические параметры их рабочих поверхностей, установлены технологические параметры процесса, определяющие механизм поверхностного пластического деформирования отверстий.

Вместе с тем, как показал анализ, несмотря на достаточную теоретическую и экспериментальную проработанность, существующая технология калибрования отверстий дорном широкого практического применения не получила. В качестве основных причин, сдерживающих её применение для калибрования отверстий, можно выделить следующие:

- отсутствие расчетных зависимостей, устанавливающих связь параметров качества калиброванной поверхности отверстия с её исходными параметрами и технологическими режимами, что не позволяет на этапе обоснования технологии калибрования обеспечить управляемость процессом и проводить технико-экономическую оценку результативности её применения;

- не решен вопрос, связанный с обоснованием одного из ключевых технологических режимов процесса калибрования дорном – натягом калибрования. Сложившаяся практика применения натягов, превышающих (с учетом шероховатости) величину половины допуска на размер исходного

отверстия, показала, что процесс обработки дорном имеет не калибрующий, а формообразующий эффект и становится трудно прогнозируемым с точки зрения достижения требуемой точности отверстия, зависящим от остаточных напряжений, формируемых в поверхностном слое. Кроме того, превышение натягов свыше указанной величины приводит к молекулярному сцеплению частичек дорна и обрабатываемого металла и, как следствие, к наросту на дорне, рискам, обуславливающим рост шероховатости, увеличению сопротивления деформированию обрабатываемого материала, для преодоления которого требуются большие силы, что отрицательно сказывается на работе инструмента.

Не получили своего развития результаты исследований, представленные в работах В.П. Северденко, В.В. Клубовича, А.В. Степаненко, по влиянию ультразвуковых колебаний (УЗК) на процесс ППД путем наложения их на деталь. Введение УЗК в очаг деформации через деталь, как показал анализ, в отличие от схемы введения УЗК через инструмент - дорн, имеет ряд существенных технико-экономических преимуществ: автономность от технологического оборудования и компактность ультразвуковой колебательной системы, сокращение количества элементов волноводной колебательной системы, обеспечение концентрации акустической энергии непосредственно в очаге деформации, возможность использования малогабаритного и универсального оборудования для осуществления процесса калибрования. Однако неизученность этой схемы сдерживает выработку научно обоснованных зависимостей и рекомендаций по внедрению её в технологическую практику калибрования отверстий.

Решение вышеперечисленных вопросов, направленных на совершенствование технологии калибрования отверстий дорном, предопределяет актуальность и цель настоящего диссертационного исследования.

Целью работы является совершенствование технологии калибрования отверстий дорном на основе наложения ультразвуковых колебаний на деталь, установление закономерностей их влияния на качество и силу деформирования поверхности, разработка методики проектирования операций калибрования и рекомендаций по их практической реализации.

Задачи:

1. Разработать технологическую схему калибрования отверстий дорном с наложением ультразвуковых колебаний на деталь и обосновать параметры управления процессом.

2. Разработать модель процесса формирования деформированного поверхностного слоя отверстия в условиях воздействия УЗК на деталь.

3. Установить зависимости для расчета технологических параметров, силы деформирования, акустических характеристик ультразвуковой колебательной системы, являющихся исходной предпосылкой для выбора технических средств реализации технологической схемы калибрования отверстий дорном с наложением ультразвуковых колебаний на деталь.

4. Разработать акустическую модель, раскрывающую закономерности изменения механических свойств детали типа дисков под воздействием УЗК.

5. Предложить и экспериментально обосновать расчетные зависимости геометрических параметров качества калиброванной поверхности отверстия от её исходных параметров и степень влияния на них ультразвуковых колебаний.

6. Разработать методику проектирования операций калибрования отверстий в условиях УЗК на деталь и рекомендации по их практической реализации.

Объектом исследования является технология калибрования отверстий.

Предмет исследования – калибрование отверстий в условиях воздействия УЗК на деталь.

Положения, выносимые на защиту: технологическая схема калибрования отверстий с наложением ультразвуковых колебаний на деталь; модель формирования поверхностного слоя отверстия при комбинированном воздействии инструмента и УЗК; модель геометрии ультразвукового поля, создаваемого в цилиндрической детали с отверстием; расчетные зависимости по определению силовых и акустических параметров процесса калибрования отверстий с учетом воздействия УЗК на деталь; аналитические зависимости для определения высоты неровностей профиля поверхностного слоя, сформированного в процессе калибрования отверстия с применением ультразвуковых колебаний; методика

проектирования операций калибрования отверстий в условиях воздействия УЗК на деталь.

Научная новизна проведённых исследований:

1. Разработана аналитическая модель, позволяющая определить величину удельного давления дорна на обрабатываемую поверхность отверстия, с учетом УЗК, подводимых в очаг деформации через деталь, а также силу воздействия на дорн, необходимую для реализации процесса калибрования (п. 3 паспорта научной специальности 2.5.6).

2. Установлены зависимости для расчета натяга обработки отверстий дорном, характеристик качества поверхностного слоя (микротвердость, высота неровностей профиля), модифицированного в процессе калибрования с наложением УЗК на деталь (п. 5 паспорта научной специальности 2.5.6).

3. Предложена акустическая модель, раскрывающая закономерности распространения ультразвуковых волн в деталях типа дисков с отверстием и их влияние на изменение микротвёрдости и шероховатость поверхностного слоя калиброванного отверстия (п. 2 паспорта научной специальности 2.5.5).

4. Разработана методика расчета концентратора - волновода ультразвуковой колебательной системы, обеспечивающего усиление амплитуды воздействия УЗК на деталь, и снижение энергозатрат акустического блока технологической системы калибрования отверстий (п. 4 паспорта научной специальности 2.5.5).

Теоретическая значимость. Разработаны математические модели, описывающие закономерности процесса калибрования отверстий дорном в условиях воздействия УЗК на деталь, и расчетные зависимости по определению параметров качества поверхности и управлению процессом калибрования.

Практическая значимость. Разработана методика проектирования операций калибрования отверстий в условиях наложения УЗК на деталь; спроектирована и изготовлена экспериментальная установка, обеспечивающая реализацию процесса калибрования дорном с наложением УЗК на деталь; разработаны рекомендации по выбору технологического оборудования и оснастки, решающих задачу калибрования отверстий в условиях воздействия УЗК на деталь.

Методы исследования и достоверность результатов. Теоретические исследования базируются на фундаментальных положениях технологии машиностроения, ультразвуковой обработки, теории прочности и упругопластической деформации. Экспериментальные исследования выполнены на специально разработанной опытно-экспериментальной установке с применением методов математической статистики и с использованием современных средств измерения НИИ «Вибротехнология», НОЦ «Материалы» ДГТУ. Достоверность результатов решения поставленных задач подтверждается охватом достаточного объема научной литературы, согласованностью теоретических выводов с результатами их экспериментальной проверки, внедрением процесса калибрования для изготовления деталей в условиях РТЦ «Технология» г. Азова.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования докладывались: на научном симпозиуме технологов-машиностроителей «Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий», Ростов-на-Дону, 2020–2023 гг.; международной научно-технической конференции "Машиностроительные технологические системы" (METS21), Ростов-на-Дону, 2021–2023 гг.; всероссийской научно-технической конференции «Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов» 2022–2024 гг.; международной научно-технической конференции «Современное перспективное развитие науки, техники и технологий», Воронеж, 2023 г.; всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники», Ростов-на-Дону, 2023–2024 гг.; XXV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектива-2022», Нальчик; VIII Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», Сочи, 2023 г.

Публикации. Опубликовано 15 научных работ, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 2 статьи, рецензируемые в системе Scopus; получен патент РФ на изобретение № 2817100.

Личный вклад автора. Предложены и реализованы: технологическая схема калибрования отверстий с наложением УЗК на деталь; модель деформирования поверхностного слоя отверстия в процессе калибрования с учетом УЗК; модель ультразвукового поля, создаваемого в цилиндрическом диске с отверстием; методы экспериментальных исследований, результаты которых положены в основу выводов и опубликованных работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, библиографический список, состоящий из 142 источников. Работа изложена на 158 страницах, содержит 83 рисунка, 19 таблиц, 8 приложений.

ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ ДОРНОМ

1.1. Физико-технологические основы отделочно-упрочняющей обработки отверстий дорном

Способ обработки отверстий дорном представляет процесс проталкивания (протягивания) инструмента (дорна) определённой формы через отверстие, имеющее несколько меньшие размеры по сравнению с размером дорна (рис. 1.1).

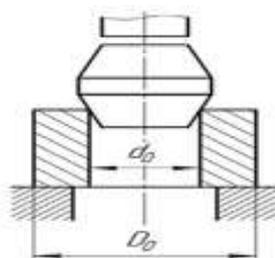


Рис. 1.1. Схема обработки отверстия дорном

В результате обработки дорном диаметр отверстия за счет упругопластических деформаций увеличивается, а поверхностный слой металла отверстия упрочняется. Этим способом можно осуществлять не только калибрование круглых отверстий, но и отверстий фасонного профиля, предварительно обработанных другими способами (рис. 1.2), а также производить полное выдавливание дорном новых профилей.

Многочисленные исследования, представленные в работах [10, 16–18, 40, 42–44, 48, 70, 71, 76, 78, 82, 89, 90, 96, 101, 102, 110, 127, 133, 134], свидетельствуют об эффективности применения процесса обработки дорном в технологических процессах отделочно-упрочняющей обработки отверстий и являются исходной предпосылкой для его дальнейшего развития и совершенствования.

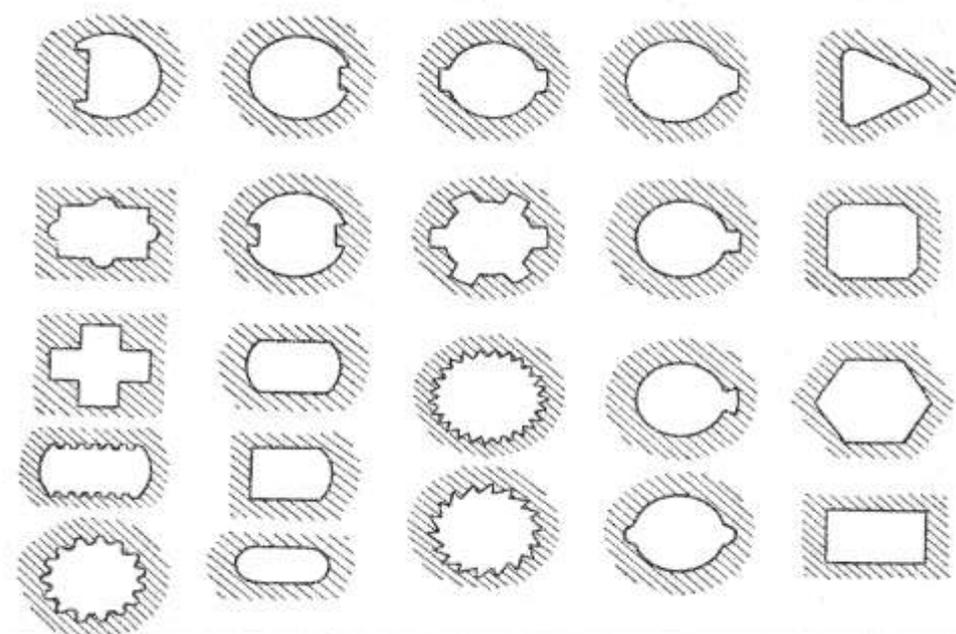


Рис. 1.2. Разновидности формы отверстий

Значительный вклад в разработку и внедрение этого способа внесли отечественные ученые: И.В. Кудрявцев, Ю.Г. Шнейдер, Ю.Г. Проскуряков, М.Я. Шашин, Д.Д. Розенберг, И.В. Поздняков, В.П. Монченко, А.И. Осколков, В.М. Менщиков, Ф.Ф. Валяев, А.Н. Исаев, С.А. Берберов и др.

В фундаментальных работах Проскурякова Ю.Г. были заложены научные основы процесса обработки дорном, получившие развитие в научных трудах его учеников в части технологических схем обработки и конструкции инструмента [16, 18, 48, 78, 89, 90], методов расчета и проектирования технологических процессов обработки дорном [48, 70, 71, 89, 90].

Обобщая результаты проведенных ими исследований, можно констатировать следующие результаты, раскрывающие конструкторско-технологические особенности и возможности этого способа обработки отверстий.

1. В результате пластической деформации поверхности обработка дорном позволяет получить высокую точность отверстий, модифицировать параметры качества поверхностного слоя, повысить эксплуатационные свойства поверхности отверстий: износостойкость и усталостную прочность прессовых и подвижных соединений и деталей в целом.

2. Применяемые в качестве инструмента для калибрования отверстий дорны, несмотря на различия как по своим размерам, так и по конструктивному оформлению, имеют общие конструктивные элементы:

- заборную часть, представляющую собой коническую поверхность с углом наклона образующей α , которая производит основную работу деформирования металла;

- заднюю часть, представляющую собой коническую поверхность с углом наклона образующей α_1 , предназначенную для плавного схода деформированного металла с рабочей части дорна и уменьшения сил трения при обработке дорном, т. е. для уменьшения тягового усилия;

- калибрующую часть, представляющую собой цилиндрическую ленточку шириной b , расположенную между заборной и задней частями, которая помимо обеспечения размеров и формы отверстий повышает износостойкость и улучшает качество обработанной поверхности.

3. Изменение параметров качества обрабатываемой поверхности при обработке дорном с натягами, превышающими высоту неровностей профиля, происходит как за счет радиального смятия микронеровностей, так и за счет упругопластической деформации их основания. При этом немаловажную роль играет геометрия дорна. Так, например, на изменение высоты неровностей профиля поверхности отверстий оказывает влияние величина заборного угла α дорна (рис. 1.3). Из представленной зависимости следует, что оптимальный заборный угол дорна составляет $\alpha = 4-6^\circ$.

Также установлено [10, 14, 16, 21, 31, 38, 89], что шероховатость обрабатываемой дорном поверхности отверстий уменьшается до определённого значения натяга (рис. 1.4). При больших натягах свыше 0,2 мм возникают явления, приводящие к молекулярному сцеплению частичек дорна и обрабатываемого металла, наросту на дорне, рискам, обуславливающим повышение шероховатости.

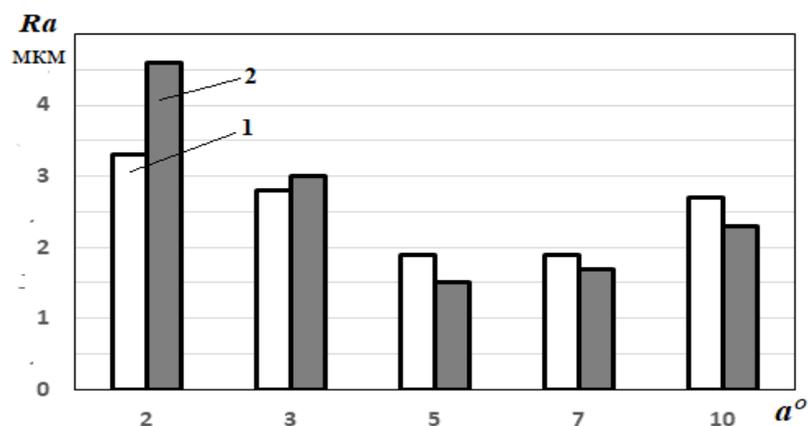


Рис. 1.3. Зависимость высоты шероховатости поверхности Ra от величины заборного конуса при обработке дорном образцов из стали: 1 – 20X; 2 – 40X

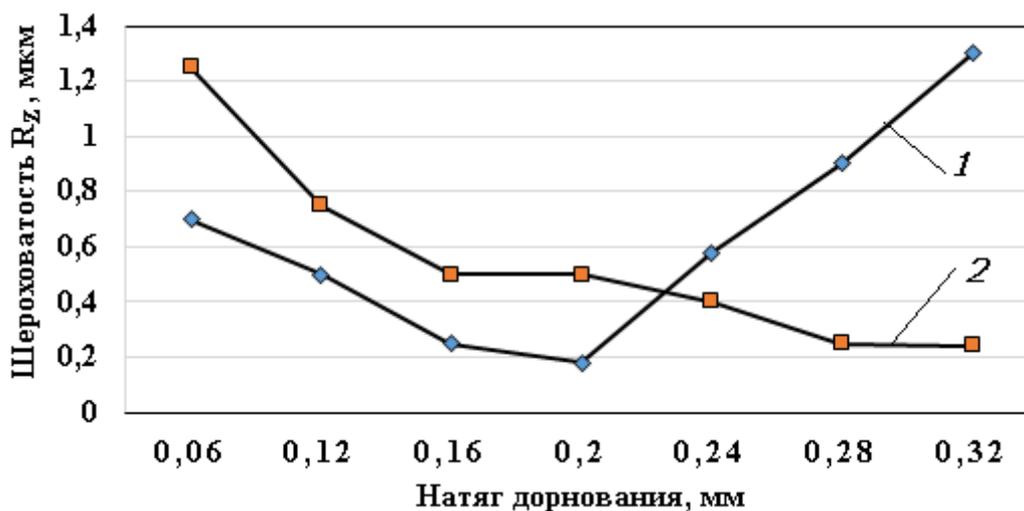


Рис. 1.4. Зависимость шероховатости поверхности от величины натяга при обработке дорном втулок из стали 45 [40, 89]. Исходная шероховатость:

$$1 - R_z = 1,3- 3,2 \text{ мкм}; 2 - R_z = 0,7-1,3 \text{ мкм}$$

4. На точность обработки при обработке дорном существенное влияние оказывают погрешности формы исходных поверхностей профиля отверстия, которые вызывают появление неравномерного по сечениям обрабатываемого дорном отверстия натяга и, как следствие, возникновение неравномерных остаточных напряжений, влияющих на точность отверстий. Зависимость остаточных деформаций металла от натяга обработки дорном, как показано на рис. 1.5, имеет прямолинейный характер [16, 78, 89].

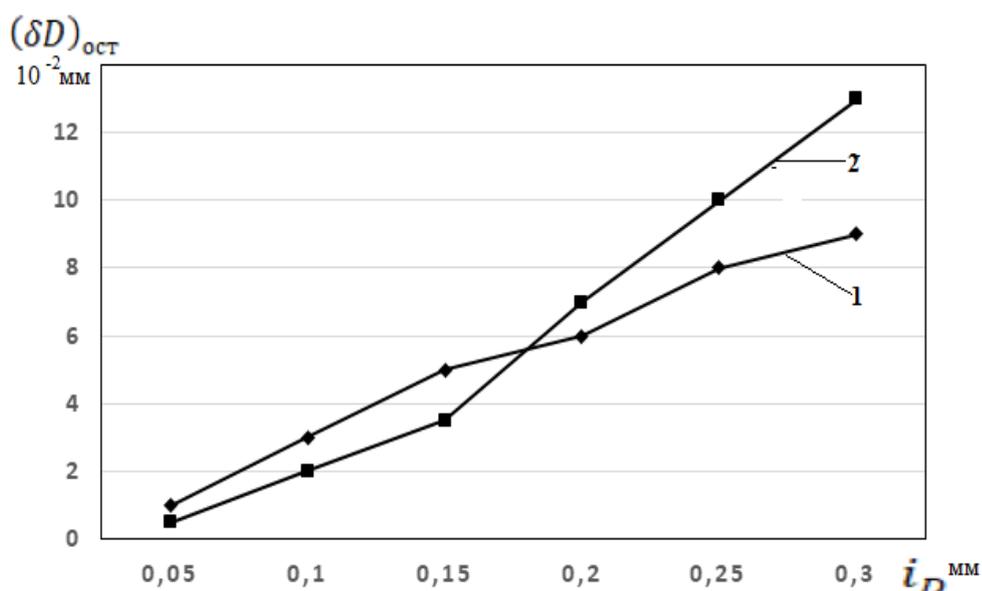


Рис. 1.5. Изменение остаточных деформаций $(\delta D)_{\text{ост}}$ отверстия от величины натяга i_D при обработке дорном образцов из стали: 1 – 40X; 2 – сталь 20X

Для оценки величины остаточных деформаций по поверхности наружного диаметра $(\delta D)_{\text{ост}}$ и боковым поверхностям профильных элементов $(\delta B)_{\text{ост}}$ фасонного отверстия в работе [16] предложены формулы:

$$(\delta D)_{\text{ост}} = \frac{3,93 \cdot i_D \cdot \left(2 - \frac{1,72 \cdot D_1}{D_H}\right)}{HRC^{0,65}} - 0,011, \text{ мм}; \quad (1.1)$$

$$(\delta B)_{\text{ост}} = \frac{9,66 \cdot i_B \cdot \left(2 - \frac{1,72 \cdot D_1}{D_H}\right)}{HRC^{0,7}} - 0,01, \text{ мм}, \quad (1.2)$$

где i_D – натяг по поверхности наружного диаметра фасонного отверстия; i_B – натяг по боковым поверхностям профильных элементов отверстия; D_1 – наружный диаметр фасонного отверстия; D_H – наружный диаметр детали; HRC – твердость поверхностного слоя обрабатываемого материала, $HRC \approx 0,35 - 0,4 \sigma_T$.

5. Обработка дорном, по данным работ [10, 21, 42, 50, 57, 62, 89], формирует упрочнённый поверхностный слой отверстия глубиной 0,04 мм (рис. 1.6) и обеспечивает увеличение исходной микротвердости у поверхности на 20–25 %.

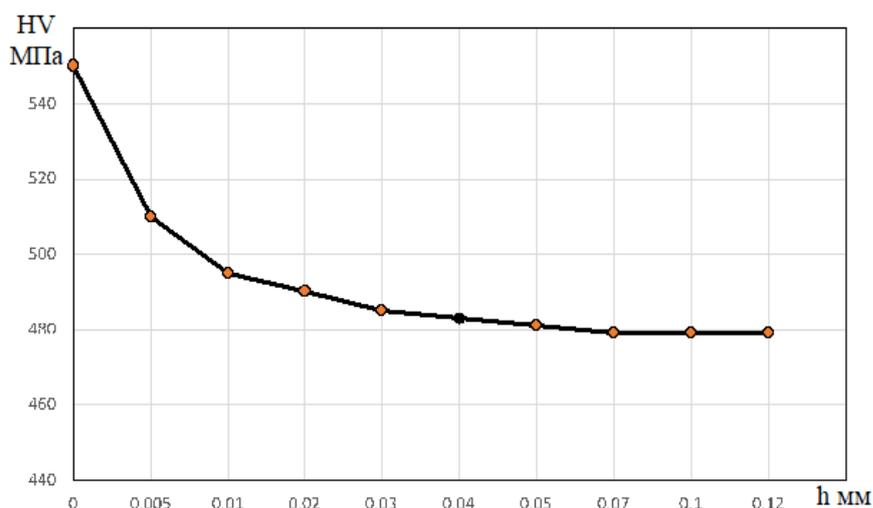


Рис. 1.6. Изменение микротвердости поверхностного слоя отверстия образца из стали 40X, обработанной с натягом $i_D = 0,3$ мм

Отмечается, что повышение микротвердости поверхностного слоя отверстий в процессе обработки дорном является предпосылкой замены высокопрочных материалов материалами с относительно низкими прочностными характеристиками. Наклеп при сравнительно малой глубине распространения существенно влияет на эксплуатационные свойства металла: износостойкость, сопротивление схватыванию и пластическому деформированию.

6. Основным технологическим параметром процесса обработки дорном являются натяг, который во многом определяет величину силы, необходимой для реализации процесса обработки дорном отверстий, и от которой, как было показано выше, зависит качество обрабатываемой поверхности. Следовательно, наиболее предпочтительная величина натяга должна выбираться из соображений обеспечения требуемых по условиям эксплуатации параметров качества поверхностного слоя. Однако, как показал анализ проведённых исследований в этом направлении, вопрос выбора наиболее предпочтительной величины натяга не получил своего разрешения и базируется на результатах экспериментальных исследований для конкретных условий обработки отверстий дорном. Зависимость усилий P от натяга i_D представлена на рис. 1.7.

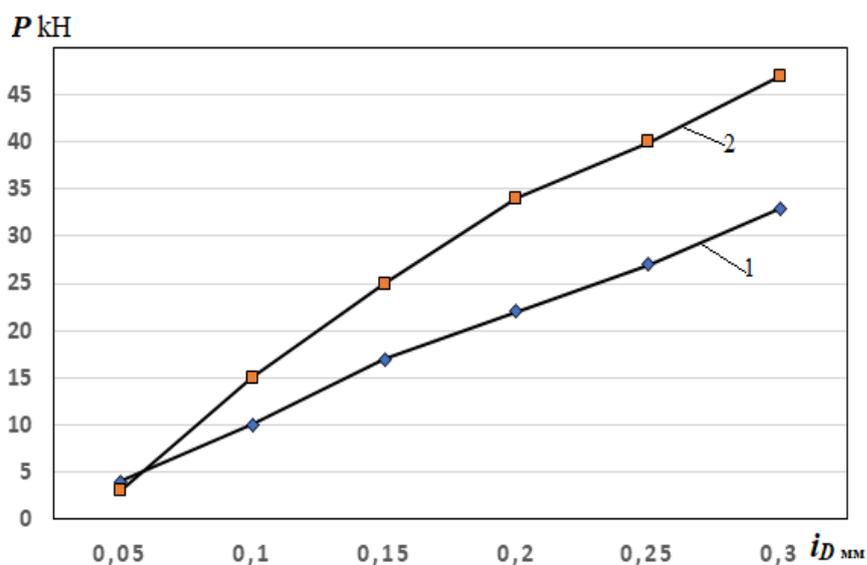


Рис. 1.7. Изменение величины тяговых силы дорнования P в зависимости от величины натяга обработки дорном образцов из стали: 1 – 40X; 2 – 20X

7. Величина силы обработки отверстий дорном предопределяет выбор средств технологического оснащения и технико-экономические показатели технологической операции. Поэтому её оценка на этапе проектирования, как отмечается в работе [89], имеет большое практическое значение. Так, например, для оценки величины силы обработки дорном P цилиндрических отверстий в работах [89–91] предложена формула

$$P = p \left[\left(\frac{1 + \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha}}{1 - \mu \operatorname{tg} \alpha} \right) \ln \left(1 + \frac{i}{d_3} \right) + \frac{2\mu}{d} b \right] F + \frac{0,28(2 \operatorname{tg} \alpha + \mu) F_1}{J}, \quad (1.3)$$

где p – контактное давление при деформации; μ – коэффициент трения; d_3 – диаметр обрабатываемого отверстия; i – натяг; F – площадь контакта дорна с поверхностью; d – диаметр ленточки дорна; b – ширина ленточки; F_1 – площадь пластически деформируемой области, где происходят дополнительные сдвиги.

Расчет силы обработки отверстий дорном, проведенный по предложенным в работах [17, 89, 101] формулам, и опыт их практического применения на реальных операциях свидетельствуют, что для обработки дорном отверстий, предварительно полученных протягиванием, в деталях из стали 45, имеющей предел текучести 32, диаметром более 30 мм с натягом 0,12 мм необходимо

применение прессов, развивающих силу от 2,5 т и выше. Это, как правило, крупногабаритное и дорогостоящее оборудование, что актуализирует задачу поиска путей снижения величины усилия обработки дорном.

8. В работах [48, 78, 89–91] установлено, что применение смазок в процессе обработки отверстий дорном способствует снижению силы дорнования. Наилучший эффект при любых натягах и для разных материалов достигается при использовании в качестве смазки сухого молибдена, а из жидких смазок – сульфозфрезола. При натягах обработки дорном более 0,2 мм рекомендуется применять омеднение или в жидкие смазки добавлять наполнители (тальк, графит, дисульфид молибдена). Следует отметить, что данный способ не получил широкого применения из-за необходимости оснащения дополнительными техническими средствами подвода смазок и жидкостей в зону обработки.

9. Скорость обработки дорном в диапазоне скоростей применяемого оборудования (протяжные станки, прессы и т.п.) почти не влияет на стойкость дорнов, качество поверхности и силу дорнования. Однако при обработке дорном вязких материалов чрезмерно высокая скорость может повлечь за собой высокий нагрев детали и инструмента, снижающий стойкость последнего и возможность появления нароста.

1.2. Особенности обработки дорном отверстий термообработанных деталей

Повышение точности отверстий в деталях, подвергаемых термической обработке, методами лезвийной обработки всегда вызывает определённые технологические и технико-экономические трудности. Это связано с тем, что термическая обработка, как правило, приводит к усадке отверстия по диаметру, а также повышению физико-механических свойств поверхности. Применение для решения этой задачи процесса обработки дорном, как показали исследования, приведённые в работах [16–18, 85], является наиболее эффективным способом финишной отделки отверстий. На рис. 1.8 представлены результаты исследований изменения в процессе обработки дорном точности отверстия диаметром $\varnothing 38$ мм

зубчатого колеса, изготовленного из стали 18ХГТ, цементированной и закаленной до твердости HRC 55...61 после протягивания.

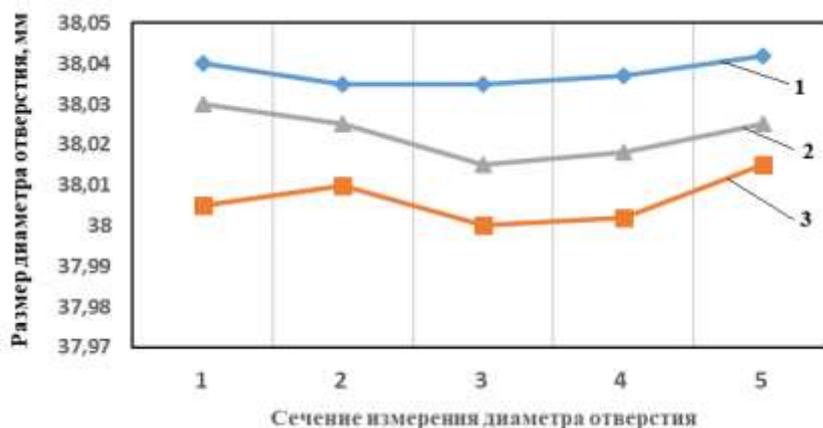


Рис. 1.8. Изменение диаметра отверстия зубчатого колеса после протягивания (1), термической обработки (2) и обработки дорном (3) [16]

Как следует из рис. 1.8, обработка дорном в значительной степени исправила отверстие (кривая 3), искажённое термической обработкой.

Анализ исследований процесса обработки дорном термически обработанных отверстий свидетельствует, что, несмотря на высокую твердость поверхности, он позволяет не только повышать точность посадочных размеров, формы поперечного и продольного сечений, но также и улучшать качество обрабатываемых поверхностей [16–18, 85, 96, 102]. Установлено, что снижение шероховатости поверхности после обработки дорном с натягом 0,3 мм цилиндрических отверстий диаметром \varnothing 21 мм с поверхностной твердостью HRC 58...60 происходит с $Rz = 10...20$ мкм до $Rz = 3,2...6,3$ мкм. При обработке дорном отверстий с натягом 0,2 мм в объёмно-закаленных деталях твердостью HRC 35...37 шероховатость улучшилась до $Rz = 0,8...1,6$ мкм [16, 41]. Установлено, что при увеличении натяга (от 0,2 до 0,3 мм) при обработке дорном отверстий шероховатость уже не уменьшается и выглаживание практически прекращается.

Обработка отверстий дорном в термообработанных деталях позволяет несколько повысить микротвердость поверхностного слоя [1, 10, 26, 36, 37, 79, 85, 101] на 20–25 % по сравнению с исходной микротвердостью в пределах глубины, примерно равной 0,02 мм.

Как показал анализ литературных данных и производственного опыта, обработка отверстий дорном обладает рядом отрицательных явлений, которые не позволяют эффективно использовать возможности этого процесса. В качестве таковых можно выделить следующие:

- при больших натягах свыше 0,2 мм происходит молекулярное сцепление частичек дорна и обрабатываемого металла, приводящее к наросту на дорне, рискам, обуславливающим повышение шероховатости;

- отсутствие практических зависимостей параметров высотных шероховатости и механических характеристик поверхностного слоя отверстия после обработки дорном от его исходного состояния;

- значительное сопротивление деформированию обрабатываемого материала, для преодоления которого требуются большие силы, что отрицательно сказывается на работе инструмента.

Уменьшить отрицательное проявление рассмотренных факторов возможно за счет создания наиболее благоприятных условий протекания процесса, например, как было показано в п. 1.1, применением смазок или введением в очаг деформации ультразвуковых колебаний, являющихся предметом настоящего диссертационного исследования.

1.3. Применение ультразвука в технологических процессах отделочно-упрочняющей обработки деталей методами поверхностного пластического деформирования

1.3.1. Влияние УЗК на свойства металла и процесс ППД

О влиянии ультразвуковых колебаний на эффективность протекания процессов при различных видах обработки металлов методами ППД свидетельствуют исследования отечественных и зарубежных ученых, представленные в работах [5, 6, 11, 46, 52, 63, 66, 72–74, 77, 88, 97, 122, 126, 128]. Исследованию процесса резания с применением ультразвука посвящены работы [8, 9, 11, 50, 53, 66, 73, 74, 86, 106].

Применительно к тематике диссертационного исследования особенно важно выделить ряд положений, получивших в вышеуказанных работах теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение:

1. Одним из наиболее существенных преимуществ применения ультразвука является его влияние не только на условия контактного взаимодействия инструмента с деталью, но и на свойства и структуру обрабатываемого металла без изменения формы и размеров деталей. Кроме того, изменение тонкого кристаллического строения металлов при ультразвуковой обработке сопровождается изменением их механических свойств с получением положительного эффекта, недостижимого другими известными способами обработки. В подтверждение этого заключения ниже приведены результаты экспериментальных исследований влияния ультразвука на механические свойства образцов из сплава Д16Т и стали 45 при растяжении, сжатии (рис. 1.9, 1.10).

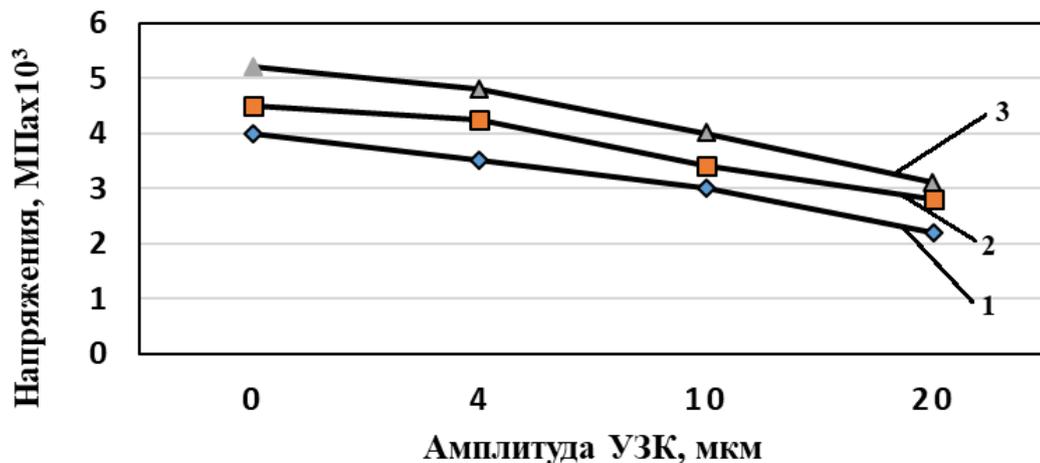


Рис. 1.9. Влияние ультразвука на напряжённое состояние образцов из стали 45 при сжатии со степенью деформации: 1 – 0,1 %; 2 – 0,2 %; 3 – 0,3 % [95]

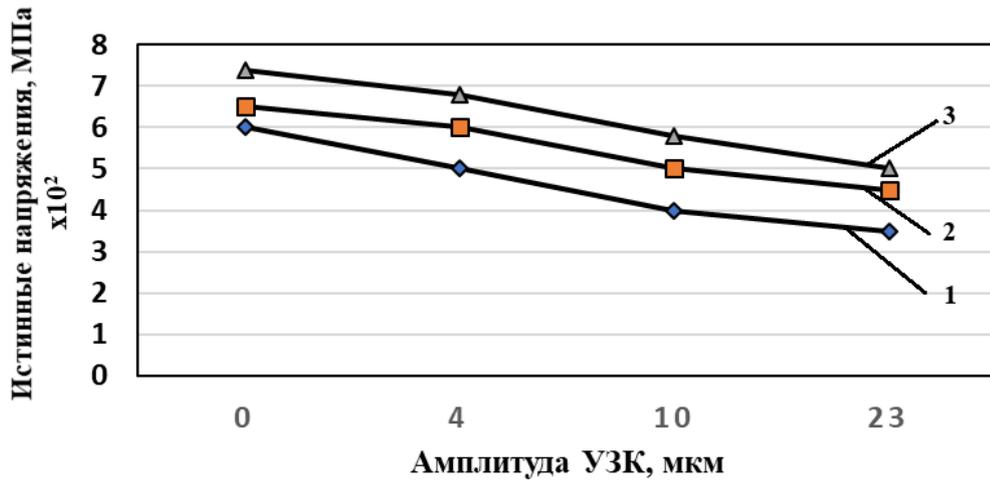


Рис. 1.10. Влияние ультразвука на напряжённое состояние образцов из стали 45 при растяжении со степенью деформации: 1 – 5 %; 2 – 10 %; 3 – 15 % [95]

2. Ультразвуковые колебания, аналогично нагреву, снижают статическое напряжение текучести (рис.1.11). Однако для достижения одного и того же эффекта при воздействии УЗК требуется значительно меньше энергии, чем при нагреве.

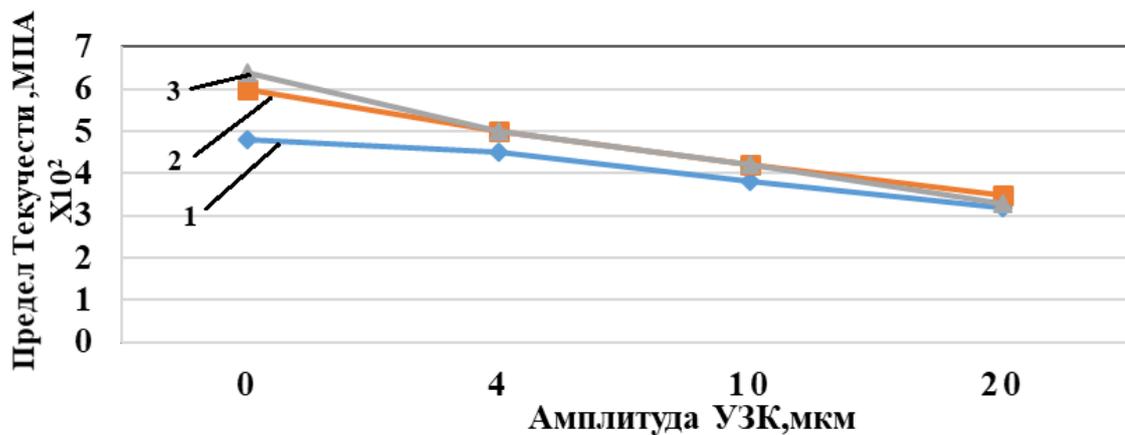


Рис. 1.11. Изменение предела текучести σ_T^y материала образцов из стали 45 при отжиге под воздействием УЗК при различной деформации: 1 – 5 %; 2 – 10 %; 3 – 15 %

Представленные на рис. 1.11 результаты в диапазоне амплитуд УЗК A от 8 до 20 мкм аппроксимируются выражением

$$\sigma_T^y = \sigma_T^c - m A, \quad (1.4)$$

где σ_T^c – исходный предел текучести; m — коэффициент, зависящий от материалов образцов и условий нагружения; для стали 40X $m = 0,8$; для стали 45.

Аналогичные закономерности установлены для твердости материалов, подвергаемых ультразвуковому воздействию (рис. 1.12).

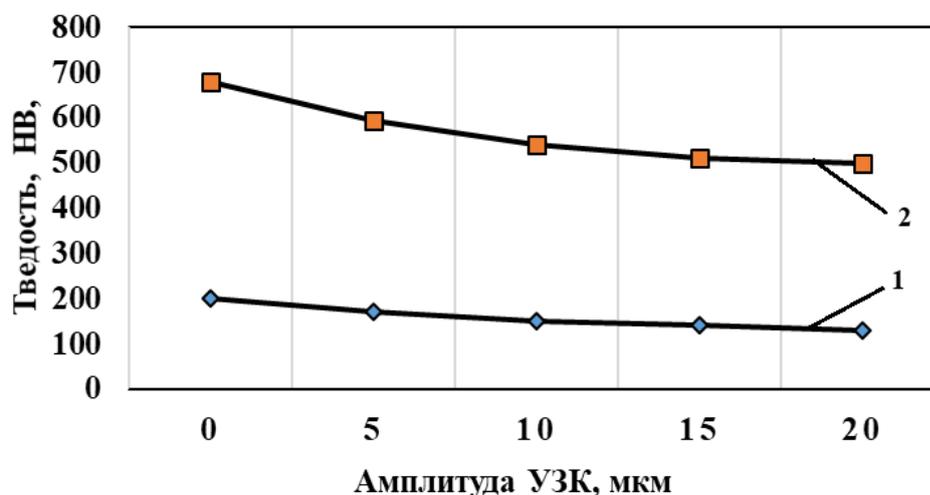


Рис. 1.12. Изменение твердости материала образцов под воздействием ультразвуковых колебаний: 1 – сталь 45; 2 – сталь ШХТЗСГ

Из графиков (рис. 1.12) следует, что с увеличением амплитуды от 5 до 20 мкм твердость стали ШХТЗСГ снижается в 1,11–1,42 раза, а стали 45 – в 1,17–1,61 раза.

3. При реализации процессов механической обработки металлов, независимо от состава и исходных механических свойств, применение УЗК обеспечивает снижение силы деформирования. Так, согласно исследованиям [95], при деформации в ультразвуковом поле в диапазоне амплитуд 4-10 мкм работа деформации снижается в среднем при нагружении образцов из сплава Д16 в 1,8-3 раза, а стали 45 – на 25–50 %, что обусловлено изменениями характера контактного взаимодействия поверхностей сопряжения и их трибологических показателей.

1.3.2. Ультразвуковые колебательные системы, применяемые при обработке ППД

На практике техническое оснащение ультразвуковой колебательной системы (УЗКС), предназначенной для механической обработки деталей, предусматривает в обязательном порядке наличие следующих основных технических средств: генератора УЗК, одного или нескольких преобразователей электрических колебаний в упругие, концентраторов, волноводных элементов и излучателя [5, 96, 123].

В работах [5, 6, 52, 55, 72, 97, 122, 124, 126] сформулирован целый ряд акустических и конструктивных требований, которым должна удовлетворять УЗКС. Основными из них являются:

- обеспечение эффективной передачи акустической энергии в зону контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемым металлом;
- минимальные потери энергии в элементах УЗКС;
- стабильность работы УЗКС.

Важными с точки зрения обеспечения передачи акустической энергии в зону контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью являются вопросы о реализации способа подведения колебаний к очагу деформации и об акустическом согласовании нагрузки с колебательной системой. В работах [6, 31, 48, 131] отмечается два основных пути его реализации – подвод через обрабатывающий инструмент или через деформируемый металл (заготовку). В последнем случае заготовку следует рассматривать как часть колебательной системы, к размерам и конфигурации которой должны предъявляться требования, связанные с необходимостью обеспечения работы всей колебательной системы в резонансном режиме.

Следует отметить, что предложенные на сегодняшний день технологические решения применения ультразвука для повышения эффективности процессов механической обработки ППД предусматривают в основном приложение ультразвуковых колебаний к инструменту, играющему роль излучателя [68, 77].

На рис. 1.13 представлены УЗКС, применяемые для обработки наружных цилиндрических поверхностей.

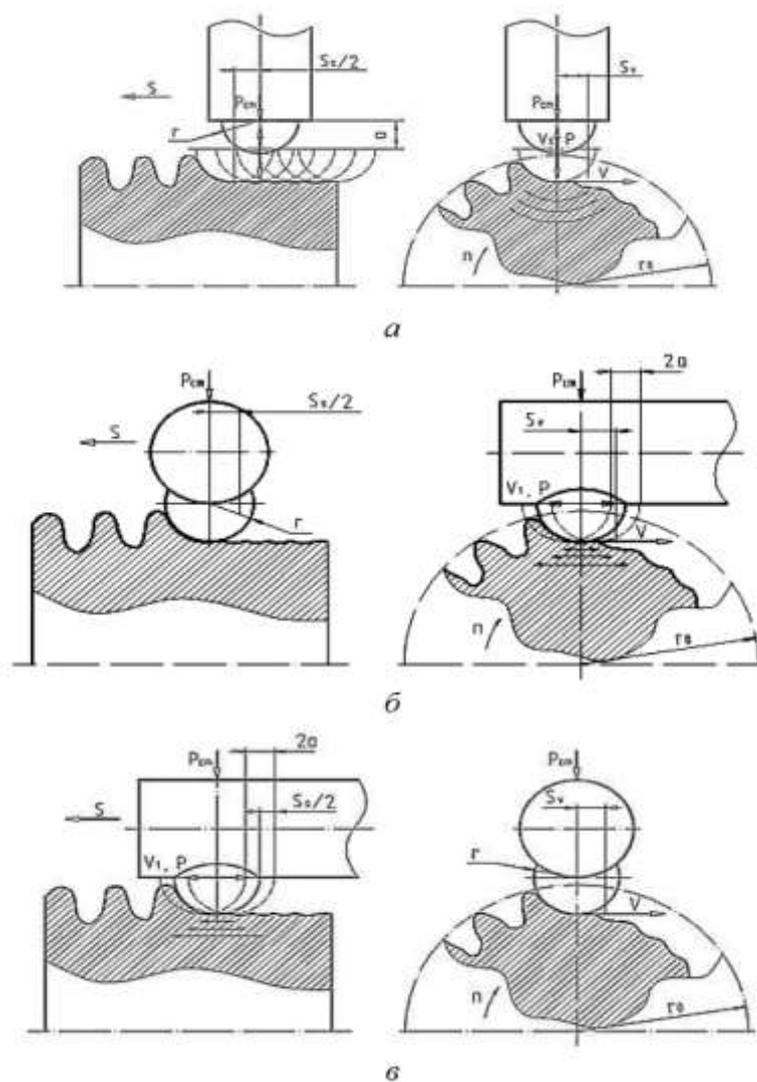


Рис. 1.13. Схемы обработки наружных поверхностей инструмента с применением УЗК: *а* – по нормали; *б* – тангенциально; *в* – в осевом направлении

По данным работ [68, 77, 99, 122], применение этих технологических схем, получивших широкое практическое применение, позволяет:

- снизить R_a с 4,5–2,5 до 0,32–0,08 мкм;
- устранить микронадрезы после полирования абразивами;
- повысить износостойкость поверхности деталей в 2 раза, по сравнению с шлифованием, и долговечность – на 90–100 %.

На рис. 1.14 представлена кинематическая схема обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей с наложением на инструмент ультразвуковых крутильных колебаний [77].

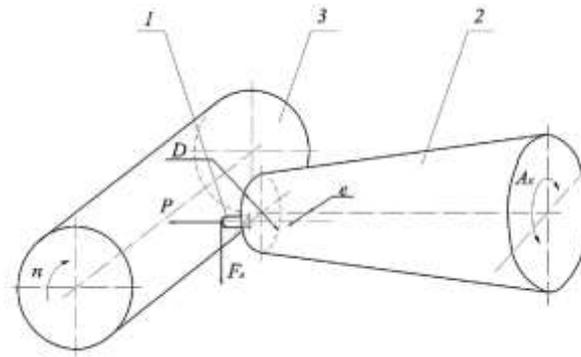


Рис. 1.14. Схема применения крутильных УЗК для обработки деталей типа тел вращения:

1 – инструмент-индентор; 2 – концентратор; 3 – обрабатываемая деталь

В работе [131] представлено технологическое решение ультразвукового поверхностного пластического деформирования деталей типа тел вращения, обеспечивающее формирование поверхностных слоёв с повышенными микрогеометрическими и физико-механическими характеристиками на деталях из пластичных металлов и сплавов (рис. 1.15).

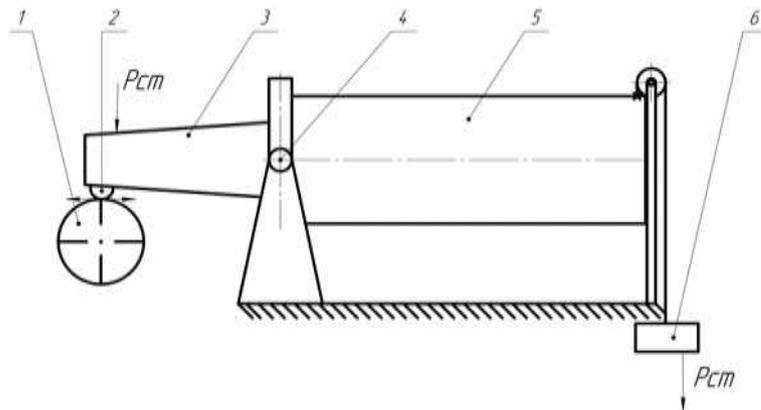


Рис.1.15. Тангенциальная схема установки для УЗПД:

1 – деталь; 2 – индентор; 3 – волновод; 4 – ось качания;
5 – магнитострикционный преобразователь; 6 – груз

Об эффективности применения УЗК для повышения эффективности процессов обработки свидетельствуют также результаты научных исследований, представленные в работах [63, 139]. Так, в работе [139] показаны технологические возможности применения ультразвукового воздействия для интенсификации виброабразивной обработки. Особенностью этой работы является то, что

достигаемый посредством ультразвука эффект повышения производительности обработки обеспечивается главным образом за счет воздействия его на обрабатываемые детали.

Применение УЗК для повышения механических и триботехнических свойств полимерных материалов путем активации компонентов непосредственно при синтезе композита исследовано в работе [124].

Для реализации процесса обработки дорном с применением ультразвуковых колебаний в работе [131] предложены две технологические схемы, представленные на рис. 1.16.

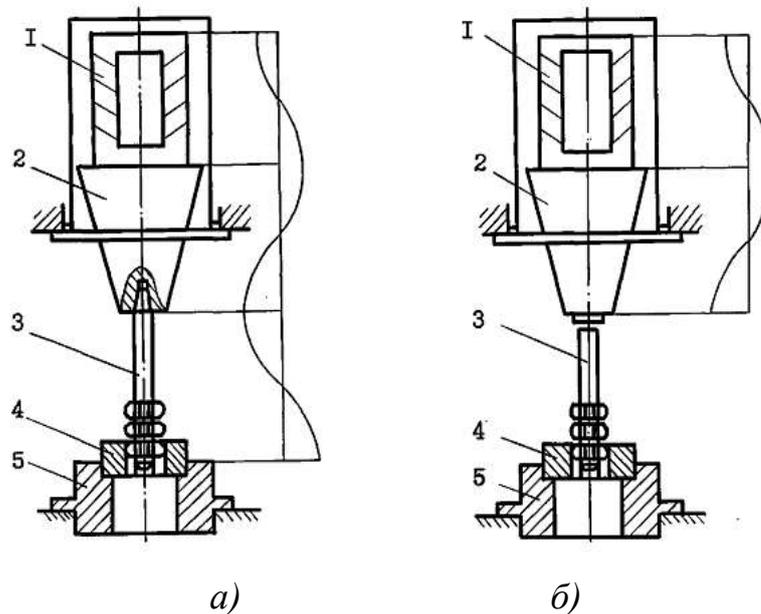


Рис. 1.16. УЗКС для обработки дорном отверстий:

а – с закрепленным инструментом; *б* – с незакрепленным инструментом; 1 – преобразователь; 2 – волновод; 3 – инструмент; 4 – деталь; 5 – опора

Первый вид УЗКС между концентратором и инструментом создает плотный акустический контакт (рис. 1.16, а). Второй вид УЗКС (рис. 1.16, б) характеризуется дискретным контактом между концентратором и инструментом. Наложение ультразвуковых колебаний на инструмент-дорн интенсифицирует процесс за счет изменения динамического характера нагрузки, воспринимаемого поверхностным слоем обрабатываемого отверстия, снижения сопротивления поверхностному пластическому деформированию в поле деформации, уменьшения контактного

трения между рабочей поверхностью инструмента и обрабатываемой поверхностью и, как следствие, обеспечивается снижение статических усилий обработки дорном шлицевых отверстий.

Несмотря на положительный эффект, достигнутый в вышерассмотренном устройстве путем воздействия УЗК на инструмент-дорн в части снижения усилия обработки дорном, предложенное решение является труднореализуемым на практике по ряду технико-экономических причин.

Во-первых, такая схема введения ультразвуковых колебаний в очаг деформации возможна только при вмонтировании ультразвукового преобразователя в конструкцию прессового оборудования, что приводит к неоправданному выбору оборудования с завышенными высотными габаритными размерами и высокой материалоемкостью.

Во-вторых, применяемая в этом случае УЗКС характеризуется многоэлементностью, которая влечет за собой снижение степени концентрации акустической энергии непосредственно в очаге деформации из-за потерь энергии в элементах колебательной системы.

В-третьих, наложение УЗК на инструмент-дорн приводит к значительной разбивке торцов отверстий и, как следствие, увеличению размеров у торцов.

В заключение обзора следует отметить следующее. Вопрос о технически целесообразном способе подведения колебаний к очагу деформации во многом зависит от особенностей технологического процесса и тех эффектов воздействия ультразвука (уменьшение нагрузки, повышение допустимой степени обработки и др.), которые желательно получить в первую очередь. С учетом последнего обстоятельства весьма существенным является вопрос о расположении очага деформации в области, близкой к точке смещения или напряжения в колебательной системе, а также вопрос о выборе типа колебаний (продольные, крутильные, изгибные и др.).

Вопрос об акустическом согласовании колебательной системы с деформацией металла в зоне контактного взаимодействия инструмента с заготовкой может решаться как путем подстройки колебательной системы

в резонансный режим работы, так и учетом характера распределения колебательных величин в деформируемой заготовке для рационального выбора мест расположения отражательных устройств, которые обеспечивают реализацию на определенной части обрабатываемой заготовки ультразвуковой волны с весьма малым коэффициентом бегучести, приближающейся к стоячей [72, 126].

Все эти факторы очень важно учесть при применении способа подвода ультразвуковых колебаний к детали, который применительно к процессу обработки дорном не изучен и требует проведения соответствующих исследований.

1.4. Цели и задачи исследования

Анализ работ, посвящённых обработке отверстий дорном различного профиля и применению ультразвуковых колебаний для повышения эффективности технологических процессов механической обработки металлов, позволяет сделать следующие выводы.

Обработка дорном, в основу которой заложен процесс поверхностного пластического деформирования, по сравнению с другими методами отделочно-упрочняющей обработки является наиболее производительным методом обработки отверстий деталей разнообразной формы и размеров, изготовленных из различных материалов. Процесс не требует применения специального технологического оснащения и наиболее востребован для повышения точности отверстий в деталях, подвергаемых термической обработке, приводящей к усадке отверстия по диаметру.

Для реализации процесса обработки дорном отверстий разработаны конструкции дорнов, определены геометрические параметры их рабочих поверхностей, установлены технологические параметры процесса, обуславливающие механизм поверхностного пластического деформирования, которые представлены в фундаментальных работах Ю.Г. Проскурякова и научных трудах его учеников.

Анализ результатов, проведенных на сегодняшний день исследований процесса обработки дорном отверстий, показал, что все они получены в условиях натягов, значительно превышающих величину допуска, с учетом шероховатости, исходной поверхности. Подтверждением этого заключения являются данные, рекомендуемые в справочной литературе [89, 91] по выбору оптимального значения относительного натяга обработки дорном, представляющего собой отношение фактического натяга к диаметру обрабатываемого отверстия. Из рекомендуемых данных следует, что при обработке отверстия дорном, например, диаметром 30 мм, с исходной шероховатостью 8–10 мкм и соотношением наружного и внутреннего диаметров заготовки, равным 2, необходимо применить относительный натяг 0,005–0,006. Таким образом, оптимальный фактический натяг составит 0,15–0,18 мм.

Такой подход не отвечает сути калибрования, так как сопровождается формированием качественно нового поверхностного слоя, делает процесс калибрования трудно прогнозируемым с точки зрения достижения требуемой точности отверстия и зависимым от остаточных напряжений, формируемых в поверхностном слое, и нуждается в его корректировке для обоснования связи параметров качества калиброванной поверхности с её исходными параметрами и установления усилий обработки дорном.

Другим важным фактором, обеспечивающим повышение эффективности отделочной и упрочняющей обработки, как свидетельствуют исследования отечественных и зарубежных ученых, обобщенные в работах Ф. Блаха, Е.Г. Коновалова, Б. Лангенекера, А. И. Маркова, В.Д. Мартынова, В.Л. Заковоротного, И.И. Муханова, В.П. Северденко и др., является применение дополнительных источников энергии в процессе механической обработки и, в частности, ультразвуковых колебаний. Перспективность применения ультразвуковых колебаний к процессу обработки дорном путем их наложения на инструмент показали в своих исследованиях Р.Н. Шадуро, Д.А. Негров.

Вместе с тем такая схема введения УЗК в очаг деформации при обработке дорном является трудно реализуемой на практике по ряду технико-экономических

причин: применение оборудования с завышенными высотными габаритными размерами; многоэлементность и малая жесткость волноводной колебательной системы; разбивка отверстия у торцов.

Одним из предпочтительных путей устранения этих недостатков при обработке дорном может быть введение в очаг деформации через деталь ультразвуковых колебаний. Однако неизученность этой схемы ультразвукового воздействия на процесс обработки дорном сдерживает выработку научно обоснованных зависимостей и рекомендаций по внедрению её в технологическую практику калибрования отверстий. Исходя из вышеизложенного, была сформулирована цель диссертационной работы, направленная на совершенствование технологии калибрования отверстий дорном на основе наложения ультразвуковых колебаний на деталь.

Целью работы является совершенствование технологии калибрования отверстий дорном на основе наложения ультразвуковых колебаний на деталь, установление закономерностей их влияния на качество и силу деформирования поверхности, разработка методики проектировании операций калибрования и рекомендаций по их практической реализации.

Задачи:

1. Разработать технологическую схему калибрования отверстий дорном с наложением ультразвуковых колебаний на деталь и обосновать параметры управления процессом.
2. Разработать модель процесса формирования деформированного поверхностного слоя отверстия в условиях воздействия УЗК на деталь.
3. Установить зависимости для расчета технологических параметров, силы деформирования, акустических характеристик ультразвуковой колебательной системы, являющихся исходной предпосылкой для выбора технических средств реализации технологической схемы калибрования отверстий дорном с наложением ультразвуковых колебаний на деталь.

4. Разработать акустическую модель, раскрывающую закономерности изменения механических свойств детали типа дисков под воздействием УЗК.

5. Предложить и экспериментально обосновать аналитические зависимости геометрических параметров качества калиброванной поверхности отверстия от её исходных параметров и степень влияния на них ультразвуковых колебаний.

6. Разработать методику проектирования операций калибрования отверстий в условиях воздействия УЗК на деталь и рекомендации по их практической реализации.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАЛИБРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ДЕТАЛЬ

2.1. Структурная схема технологической системы калибровки отверстий с наложением ультразвуковых колебаний на деталь

В отличие от технологической системы, представленной в п. 1.3, предусматривающей при обработке дорном воздействие УЗК на инструмент-дорн, предлагается в качестве объекта ультразвукового воздействия использовать деталь (рис. 2.1).

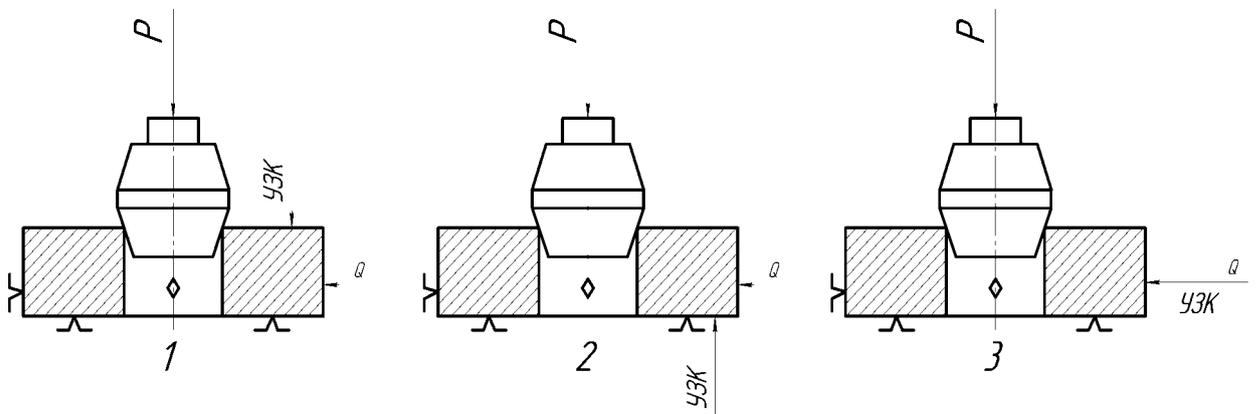


Рис. 2.1. Варианты ультразвукового воздействия на деталь в процессе обработки отверстий дорном: 1 – направление воздействия УЗК совпадает с направлением усилия обработки дорном; 2 – направление воздействия УЗК противоположно направлению усилия обработки дорном; 3 – направление воздействия УЗК перпендикулярно направлению усилия обработки дорном

Введение через деталь в зону контактного взаимодействия дорна с обрабатываемой поверхностью ультразвуковых колебаний позволяет за счет уменьшения коэффициента внешнего трения между дорном и поверхностью, изменения напряжённого состояния поверхностного слоя и снижения внутреннего трения в материале обеспечить снижение силовых факторов процесса калибровки и при этом улучшить геометрические параметры качества поверхности отверстия.

Экспресс-анализ эффективности предложенных на рис. 2.1 вариантов ультразвукового воздействия на деталь в процессе обработки дорном, проведённый

с помощью индукционного метода (см. гл. 4), позволил установить, что по величине амплитуды ЭДС, развиваемой в зоне отверстия, как показано в нижеприведенной таблице, наибольший эффект обеспечивает вариант 3, предусматривающий направление воздействия УЗК перпендикулярно направлению усилия обработки дорном:

Параметр	Варианты ультразвукового воздействия на деталь		
Амплитуда ЭДС, В	1	2	3
	1,26	1,5	3,502

Кроме того, вариант 3 наиболее предпочтителен с организационно-технической стороны реализации подвода УЗК к детали. В качестве преимущества этого варианта следует выделить свободный доступ к поверхности детали без затрагивания конструкции прессового оборудования. Для реализации вариантов 1 и 2 подвод волноводов к детали потребует дополнительной модернизации оборудования, связанной с обеспечением их установки и монтажом.

Исходя из вышеизложенных предпосылок, в качестве базовой технологической схемы наложения УЗК на деталь при калибровании отверстия дорнами принята схема, предусматривающая направление воздействия УЗК перпендикулярно направлению усилия обработки дорном (рис. 2.2).

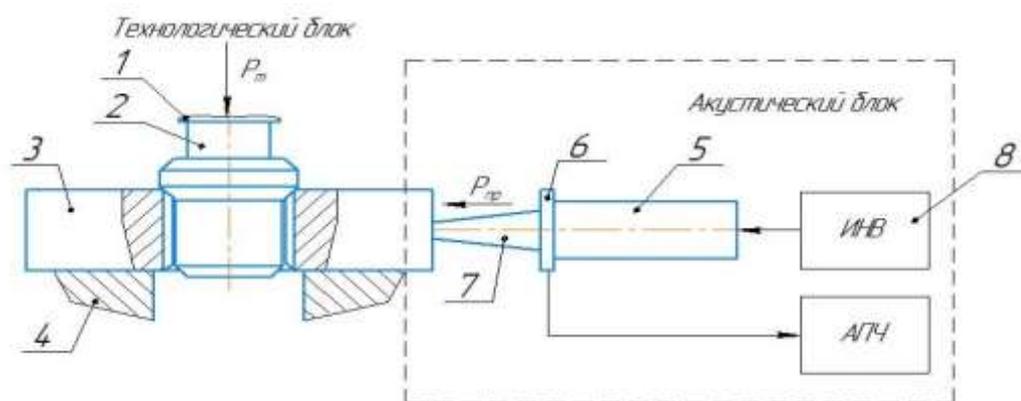


Рис. 2.2. Технологическая схема калибровки отверстий дорнами с наложением УЗК на деталь перпендикулярно её оси: 1 – силовой шток; 2 – дорн; 3 – деталь; 4 – установочный стол; 5 – магнестрикционный преобразователь; 6 – датчик акустической обратной связи; 7 – волновод; 8 – генератор (АПЧ-система автоподстройки частоты, ИНВ- инвентор)

Предлагаемая на рис. 2.2 технологическая система состоит из двух блоков: технологического, реализующего процесс поверхностной пластической деформации отверстия дорном, и акустического, создающего в материале детали сложное акустическое поле.

Для осуществления процесса калибрования деталь 3 устанавливается на плоскость рабочего стола 4 и центрируется установочными элементами относительно оси дорна 2. Силу обработки дорном осуществляется с помощью силового штока 1 прессы. Для выхода дорна после калибрования отверстий в рабочем столе предусмотрено специальное отверстие.

Основными элементами акустического блока являются: ультразвуковой генератор, преобразующий электрический ток промышленной частоты в электрические колебания высокой частоты; магнитострикционный преобразователь, преобразующий электрическую частоту в механические перемещения; волновод-концентратор, который формирует в детали сложное акустическое поле.

Преимуществом предлагаемой технологической системы калибрования отверстий является автономность от технологического оборудования и компактность УЗКС, сокращение количества элементов волноводной колебательной системы, обеспечение концентрации акустической энергии непосредственно в очаге деформации, возможность использования малогабаритного и универсального оборудования для осуществления процесса калибрования.

2.2. Технологические параметры управления процессом калибрования

Основным параметром, определяющим технологический эффект калибрования отверстия, является натяг. Следует отметить, что выбор величины натяга осуществляется в основном путем подбора и экспериментальной проверки отверстия на качество поверхности. В работе [16] на основе экспериментальных

исследований предложена эмпирическая зависимость для определения суммарного натяга обработки дорном:

$$i_d = \frac{(\Delta_d + 0,011)HRC^{0,653}}{3,93\left(2 - \frac{1,72}{K}\right)}, \quad (2.1)$$

где K – относительная толщина стенки детали, $K = \frac{D_H}{D_1}$; D_1 – диаметр отверстия; D_H – наружный диаметр детали; Δ_d – величина дефектного слоя.

Однако из выражения (2.1) следует, что натяг зависит от твердости материала и толщины стенки детали, что не совсем корректно отражает реальность протекания процесса. Эти факторы влияют на величину силы обработки дорном и величину остаточных напряжений, но ни как на величину натяга, который является геометрическим параметром, задаваемым из точностных соотношений размеров дорна и отверстия.

Если считать, что обработка отверстий дорном имеет калибрующий (выглаживающий) эффект, то величина натяга обработки дорном, как принято в научно-технической литературе, посвященной отделочной обработке поверхностей ППД, должна находиться в пределах половины допуска на размер исходного отверстия с учетом шероховатости поверхности, полученной на предшествующей калиброванию механической и термической операции. Превышение натяга выше указанной величины сопровождается формированием качественно нового поверхностного слоя отверстия с труднопрогнозируемой точностью из-за создания в нем значительных остаточных напряжений, и процесс обработки дорном уже имеет не калибрующий, а формообразующий эффект, при котором поверхностный слой характеризуется новыми, более повышенными механическими свойствами.

Отверстия поступают на операцию калибровки с уже сформировавшимися на предыдущих операциях формообразования в соответствии с заданными техническими требованиям чертежа, размерами и шероховатостью. В процессе обработки дорном осуществляется их поверхностное упругопластическое деформирование, в результате чего происходит уменьшение как высоты неровностей профиля поверхности отверстия, так и повышение точности его линейных размеров. В этой связи очень важно обеспечить такой натяг, при котором после ППД параметры шероховатости и линейные размеры отверстия не выходили за пределы установленного техническими требованиями допуска (рис. 2.3).

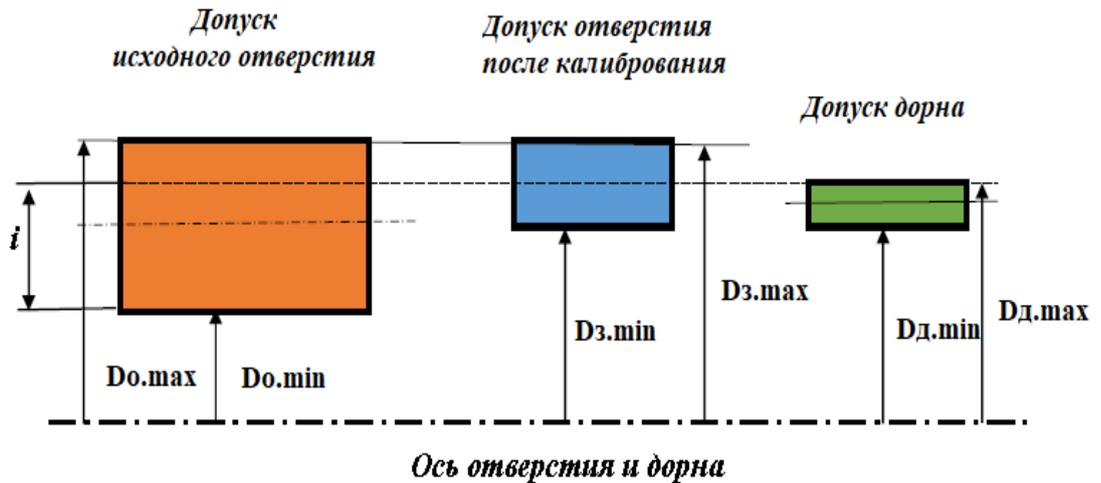


Рис. 2.3. Схема к определению натяга калибрования отверстия

На основе представленной на рис. 2.3 схемы, иллюстрирующей относительное расположение полей допусков дорна и отверстия (исходного и после калибрования), запишем условие по определению величины натяга:

$$i \cong \frac{D_{д.мах} - D_{о.мин}}{2}, \quad (2.2)$$

где i – среднестатистическая величина натяга; $D_{д.мах}$ – среднестатистический максимальный размер дорна; $D_{о.мин}$ – среднестатистический минимальный размер исходного отверстия.

Структурно величину поверхностного слоя отверстия, сформированного в процессе предшествующей калиброванию механической и термической обработки, можно представить в виде

$$\Delta = \frac{IT}{2} + R_z + \Delta_T,$$

где IT – допуск на размер исходного (до калибрования) отверстия; R_z – высота неровностей профиля исходной поверхности; Δ_T – высота дефектного слоя, образованного на поверхности в результате термообработки детали.

С целью исключения формообразующего эффекта и обеспечения калибрования отверстия, при котором будут достигнуты предусмотренные ТУ точность и шероховатость поверхности получаемого отверстия, необходимо, чтобы величина натяга обработки дорном, как отмечалось выше, не превышала величину Δ .

Исходя из вышеизложенных рассуждений и с учетом протекания упругопластических деформаций, для практического применения, на основе накопленного экспериментального и практического опыта рекомендовано величину натяга калибрования принимать на уровне

$$i \approx \frac{2}{3} \Delta .$$

С учётом данных, раскрывающих величину поверхностного слоя отверстия, сформированного в процессе предшествующей калиброванию механической и термической обработки, запишем:

$$i \approx \frac{2}{3} \left(\frac{IT}{2} + R_z + \Delta_T \right).$$

Согласно рекомендациям [108], для поверхностей квалитетов с 5-го по 10-й рекомендуемая высота неровностей профиля $R_z \leq 0,25IT$. Примем, что

$$R_z + \Delta_T = 0,3IT,$$

получим соотношение, определяющее наиболее предпочтительную величину натяга калибрования отверстия, обеспечивающее предусмотренную ТУ точность отверстия

$$i = 0,53IT . \quad (2.3)$$

Скорость перемещения дорна в процессе калибрования оказывает существенное влияние на волнистость формируемой поверхности и производительность процесса. Анализ результатов исследований, приведенных в работах [89, 90, 91] и представленных в гл. 1, показал, что наиболее предпочтительный диапазон скорости перемещения дорна находится в пределах 0,02–0,05 м/мин. В этом диапазоне обеспечиваются наиболее благоприятные условия для протекания упругопластической деформации в зоне контактного взаимодействия дорна с обрабатываемой поверхностью и практически исключается ее волнистость.

Особенность рассматриваемой схемы калибрования отверстий заключается в том, что процесс обработки осуществляется в условиях воздействия ультразвукового поля на деталь, реализуемого ультразвуковой колебательной системой. Основными выходными параметрами ультразвуковой колебательной

системы являются частота и амплитуда колебаний, от величины которых во многом зависят силовые характеристики процесса калибровки и формируемое при этом качество поверхности отверстия.

Вопросам обоснования характеристик структурных элементов ультразвуковой колебательной системы и их влияния на технологические параметры калибровки отверстий посвящены следующие главы диссертационного исследования.

2.3. Исследование состояния поверхностного слоя отверстия деформированного дорном с наложением ультразвуковых колебаний на деталь

Рассмотрим деформированный поверхностный слой отверстия в виде цилиндра толщиной, равной s , и высотой, равной длине отверстия H , соизмеримой с высотой детали (рис. 2.4). При этом считаем, что поверхностный слой сформирован в результате упругопластической деформации поверхности, что соответствует сути калибровки, остаточные деформации очень малы и ими можно пренебречь, а сформировавшийся поверхностный слой подчиняется закону Гука.

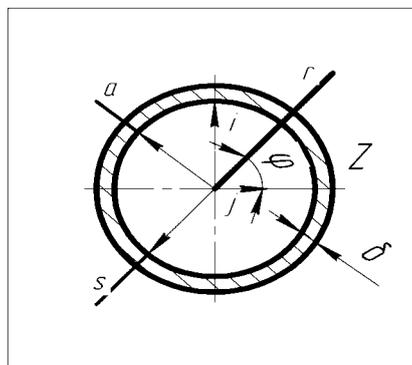
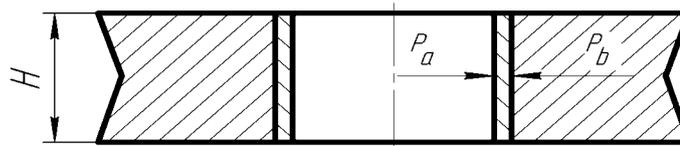


Рис. 2.4. Схема цилиндра, охватывающего деформированный поверхностный слой отверстия под давлением на него внутренних и внешних сил

На цилиндр воздействуют одновременно радиальное контактное давление дорна p_a и ультразвуковое давление p_b (см. рис. 2.4) при постоянной температуре $T = T_0$, соответствующей температуре при отсутствии деформаций.

Используя основные кинематические уравнения теории упругости, принятые при исследовании механики сплошных сред [98], запишем:

- уравнение равновесия (без учета массовых сил):

$$\nabla_j p^{ij} = 0, \quad (2.4)$$

где p^{ij} – компоненты тензора напряжений;

$$\nabla_j p^{ij} = \frac{dp^{ki}}{dx^i} + \sum p^{ij} \Gamma_{ij}^k;$$

Γ_{ij}^k – символ Кристоффеля;

- закон Гука для изотропной среды в произвольной криволинейной системе координат:

$$p^{ij} = \lambda I_1(\varepsilon) g^{ij} + 2\mu \varepsilon^{ij}, \quad (2.5)$$

где λ, μ – коэффициенты Ламе; g^{ij} – метрический тензор в системе координат, $g^{ij} = (\varepsilon^i, \varepsilon^j)$; ε^i – базисные векторы метрического тензора; $I_1(\varepsilon)$ – первый инвариант тензора деформаций;

- выражение тензоров деформации через перемещения при условии малых деформаций:

$$\varepsilon_{ij} = 0,5(\nabla_i w_j + \nabla_j w_i), \quad (2.6)$$

где w_j, w_i – компоненты вектора перемещений;

$$\nabla_i w_j = \frac{dw_j}{dx^i} - w_k \Gamma_{ij}^k.$$

Установим граничные условия на внутренней и внешней стороне цилиндра (см. рис. 2.4), записав:

$$\begin{aligned} p_n &= -p_a n, \text{ при } r = a; \\ p_n &= -p_b n, \text{ при } r = b, \end{aligned} \quad (2.7)$$

где a – радиус внутренней поверхности цилиндра, $a = D_{д.мах}/2$; b – внешний радиус цилиндра, $b = D_{д.мах} / 2 + s$; n – нормаль к боковым поверхностям цилиндра; $D_{д.мах}$ – максимальный диаметр дорна.

Для выполнения граничных условий считаем, что перемещения частиц цилиндра в радиальном направлении малы. Граничные условия для цилиндра длиной H на торцах при $z = 0$ и $z = H$ запишем в виде:

$$w_{n\tau} = 0; p_{n\tau} = 0, \text{ при } z = 0 \text{ и } z = H, \quad (2.8)$$

где $n\tau$ – нормаль к торцевым поверхностям цилиндра.

Условие $p_{n\tau} = 0$ связано с допущением, что в осевом направлении перемещения отсутствуют.

Если принять, что процесс деформирования отверстия при калибровании и ультразвуковом воздействии носит осесимметричный характер, для дальнейших рассуждений целесообразно использовать цилиндрическую систему координат, в которой координаты точек обозначим через $x^1 = r$, $x^2 = \varphi$, $x^3 = z$.

Согласно работе [98], квадрат модуля вектора перемещения dr в цилиндрической системе координат определяется из выражения

$$ds^2 = g_{ij} dx^i dx^j = dr^2 + r^2 d\varphi^2 + dz^2. \quad (2.9)$$

В соответствии с выражением (2.9) матрицы метрического тензора имеют вид:

$$\| g_{ij} \| = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \| g^{ij} \| = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{r^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.10)$$

а определяющие их базисные векторы равны:

$$\begin{aligned} [\partial_1] &= 1; [\partial_2] = r; [\partial_3] = 1; \\ [\partial^1] &= 1; [\partial^2] = \frac{1}{r}; [\partial^3] = 1. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Для определения символов Кристоффеля Γ_{ij}^k в цилиндрической системе координат воспользуемся формулой (2.6):

$$\Gamma_{ij}^k = 0,5 g^{ks} \left(\frac{dg_{is}}{dx^i} + \frac{dg_{js}}{dx^j} - \frac{dg_{ij}}{dx^s} \right). \quad (2.12)$$

На основе формулы (2.12) и матрицы (2.10) получим следующие значения символов:

$$\Gamma_{22}^1 = -r ; \Gamma_{12}^2 = 1/r ; \Gamma_{21}^2 = 1/r ;$$

для всех остальных вариаций матрицы $\Gamma_{ij}^k = 0$. (2.13)

С целью оценки влияния ультразвуковых колебаний на изменение напряженного состояния деформированного в процессе калибрования поверхностного слоя, при наложении их на деталь, в рамках настоящего исследования решим задачу, предусматривающую, что все искомые функции зависят только от координаты r . Тогда для вектора перемещений w можно записать

$$w_1 = w(r) , w_2 = w_3 = 0. \quad (2.14)$$

Составим уравнения компонент тензора деформаций, применив выражение (2.6):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \nabla_1 w_1 = \left(\frac{dw_1}{dr} - w_k \Gamma_{11}^k \right) = \frac{dw}{dr} ; \\ \varepsilon_{22} &= \nabla_2 w_2 = \left(\frac{dw_2}{d\varphi} - w_k \Gamma_{22}^k \right) = wr ; \\ \varepsilon_{33} &= \nabla_3 w_3 = \left(\frac{dw_3}{dz} - w_k \Gamma_{33}^k \right) = 0 ; \\ \varepsilon_{12} &= 0,5(\nabla_1 w_2 + \nabla_2 w_1) = 0,5 \left(\frac{dw_2}{dr} + \frac{dw_1}{d\varphi} - 2w_k \Gamma_{12}^k \right) = 0 ; \\ \varepsilon_{13} &= 0,5(\nabla_1 w_3 + \nabla_3 w_1) = 0,5 \left(\frac{dw_3}{dr} + \frac{dw_1}{dz} - 2w_k \Gamma_{13}^k \right) = 0 ; \\ \varepsilon_{23} &= 0,5(\nabla_2 w_3 + \nabla_3 w_2) = 0,5 \left(\frac{dw_3}{d\varphi} + \frac{dw_2}{dz} - 2w_k \Gamma_{23}^k \right) = 0. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Первый инвариант тензора деформаций, согласно [98], определим, как сумму его основных компонент:

$$I_1(\varepsilon) = (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})g^{ij} = \frac{dw}{dr} + \frac{w}{r}. \quad (2.16)$$

Подставив (2.16) в формулу закона Гука (2.5), получим выражения для компонент тензора напряжений:

$$\begin{cases} p^{11} = \lambda \left(\frac{dw}{dr} + \frac{w}{r} \right) + 2\mu \frac{dw}{dr} ; \\ p^{22} = \lambda \left(\frac{dw}{dr} + \frac{w}{r} \right) \frac{1}{r^2} + 2\mu \frac{w}{r^3} ; \\ p^{33} = \lambda \left(\frac{dw}{dr} + \frac{w}{r} \right). \end{cases} \quad (2.17)$$

Из выражений (2.14) и (2.17) запишем граничные условия на боковых поверхностях условно выделенного цилиндра, охватывающего деформированный в процессе калибрования и ультразвукового воздействия поверхностный слой:

$$p^{11} = (\lambda + 2\mu) \frac{dw}{dr} + \lambda \frac{w}{r} = -(p_a + p_b) \text{ при } r = a ; \quad (2.18)$$

$$p^{11} = (\lambda + 2\mu) \frac{dw}{dr} + \lambda \frac{w}{r} = -p_b \text{ при } r = b . \quad (2.19)$$

Запишем уравнение равновесия (2.4) в проекции на ось $x^1 = r$ в соответствии с условием (2.14):

$$\frac{dp^{11}}{dr} + p^{22}\Gamma_{22}^1 + p^{11}\Gamma_{12}^2 = 0. \quad (2.20)$$

С учетом выражений (2.20) и значений Γ_{ij}^k (2.16) уравнение равновесия будет иметь вид

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{dw}{dr} + \frac{w}{r} \right) = 0. \quad (2.21)$$

Продифференцировав (2.21), получим соотношение

$$\left(\frac{dw}{dr} + \frac{w}{r} \right) = \frac{1}{r} \frac{dwr}{dr} = \text{const},$$

из которого следует зависимость вида

$$w = Cr + \frac{B}{r} , \quad (2.22)$$

где C и B – коэффициенты, которые можно найти, используя граничные условия (2.18) и (2.19), представив их следующим образом:

$$2((\lambda + \mu)C - \frac{2\mu B}{a^2}) = -(p_a + p_b); \quad (2.23)$$

$$2((\lambda + \mu)C - \frac{2\mu B}{b^2}) = -p_b. \quad (2.24)$$

Путем совместного решения (2.23) и (2.24) получены следующие формулы для определения коэффициентов C и B :

$$C = \frac{a^2 p_a - (b^2 - a^2) p_b}{2(\lambda + \mu)(b^2 - a^2)} ; \quad (2.25)$$

$$B = \frac{a^2 b^2 p_a}{2\mu(b^2 - a^2)}. \quad (2.26)$$

Установленные в результате проведенного исследования зависимости (2.15), (2.17), (2.22), (2.25), (2.26) являются основой оценки деформаций и напряжений в различных точках цилиндра и, как следствие, поверхностного слоя, модифицируемого в процессе малых упругопластических деформаций.

Используя эти зависимости, проведем анализ напряженного состояния стенок цилиндра, ограничивающего деформированный поверхностный слой. Для этого

применим подход, предложенный в работе [98], суть которого заключатся в том, что для наилучшего представления о действительной величине напряжений предлагается использовать так называемые физические компоненты тензоров напряжений, т.е. компоненты единичного базисного вектора p_{Φ}^{ij} [98]. Поскольку в нашем случае компоненты единичного базисного вектора совпадают с главными компонентами тензора напряжений, можно записать:

$$p_{\Phi}^{11} = p^{11}; p_{\Phi}^{22} = r^2 p^{22}; p_{\Phi}^{33} = p^{33}. \quad (2.27)$$

Введя обозначения $p_{\Phi}^{11} = p_{rr}$, $p_{\Phi}^{22} = p_{\varphi\varphi}$, $p_{\Phi}^{33} = p_{zz}$, из формулы (2.17) и с учетом (2.22), (2.25), (2.26) после преобразований получим в общем виде уравнения, описывающие напряженное состояние точек деформированного поверхностного слоя, охватываемого условным цилиндром:

$$\begin{cases} p_{rr} = p^{11} = - \left[\frac{a^2 p_a (b^2 - r^2)}{r^2 (b^2 - a^2)} + p_b \right]; \\ p_{\varphi\varphi} = r^2 p^{22} = \frac{a^2 p_a (b^2 + r^2)}{r^2 (b^2 - a^2)} - p_b; \\ p_{zz} = p^{33} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \left(\frac{a^2 p_a}{b^2 - a^2} - p_b \right). \end{cases} \quad (2.28)$$

Выразим коэффициенты λ и μ через постоянные Ламе:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (2.29)$$

где E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона,

а также a и b как $a = D_{д.маx}/2$, $b = D_{д.маx}/2 + s$.

Уравнения (2.28) преобразуются к виду:

$$\begin{cases} p_{rr} = - \left[\frac{D_{д.маx}^2 p_a [(D_{д.маx} + 2s)^2 - 4r^2]}{4r^2 [(D_{д.маx} + 2s)^2 - D_{д.маx}^2]} + p_b \right]; \\ p_{\varphi\varphi} = \left[\frac{D_{д.маx}^2 p_a [(D_{д.маx} + 2s)^2 + 4r^2]}{4r^2 [(D_{д.маx} + 2s)^2 - D_{д.маx}^2]} - p_b \right]; \\ p_{zz} = \frac{2\nu}{(1-\nu)} \left(\frac{d^2 p_a}{(D_{д.маx} + 2s)^2 - D_{д.маx}^2} - p_b \right). \end{cases} \quad (2.30)$$

На рис. 2.5 показано распределение напряжений в деформированном поверхностном слое отверстия при отсутствии ультразвукового воздействия на деталь $p_b = 0$ (сплошная линия) и при ультразвуковом воздействии (пунктирная линия).

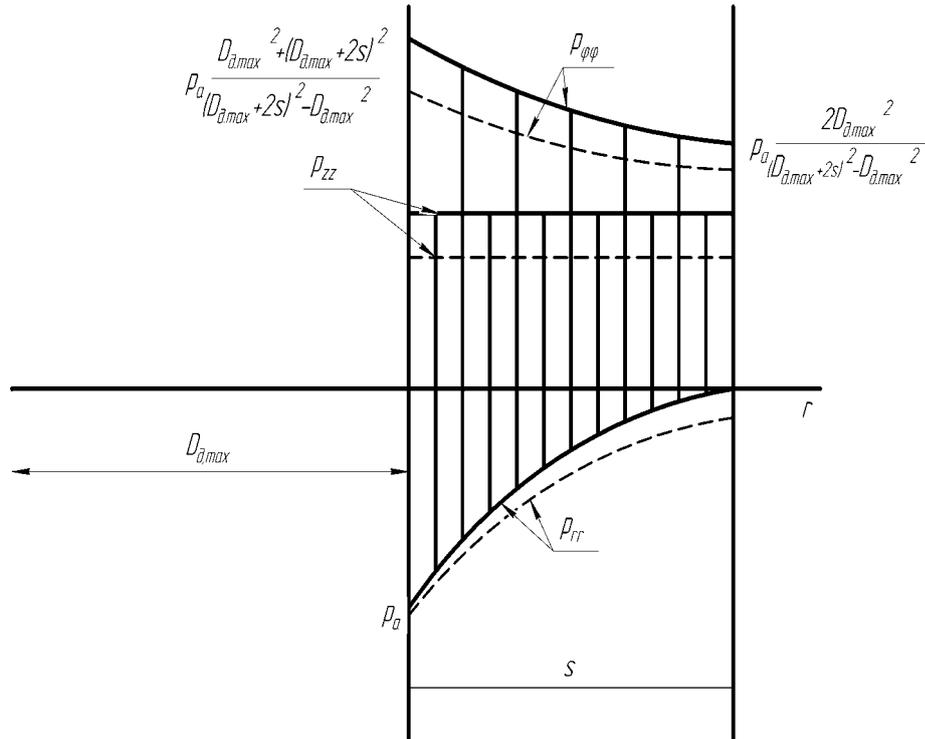


Рис. 2.5. Распределение напряжений в деформированном поверхностном слое отверстия

От величины контактного давления существенно зависит сила калибрования. Учитывая, что процесс калибрования протекает при натягах, не превышающих половины допуска на размер отверстия, пластическими деформациями на внеконтактных зонах, за пределами калибрующей ленточки и в осевом направлении можно пренебречь. Предположим, металл локального объёма при деформации упрочняется одинаково по всему объёму. Это позволяет приближенное уравнение пластичности в полярных координатах записать в виде

$$\sigma_r - \sigma_\varphi = \beta \sigma_s, \quad (2.31)$$

где σ_s – величина сопротивления пластическому деформированию; β – коэффициент Луде, $\beta \approx 1.1$.

Принимая $\sigma_r = p_{rr}$, $\sigma_\varphi = p_{\varphi\varphi}$ и используя уравнение (2.30), запишем соотношение

$$\left[\frac{d^2 p_a [(D_{д.маx} + 2s)^2 - 4r^2]}{4r^2 [(D_{д.маx} + 2s)^2 - D_{д.маx}^2]} + p_b \right] - \left[\frac{d^2 p_a [(D_{д.маx} + 2s)^2 + 4r^2]}{4r^2 [(D_{д.маx} + 2s)^2 - D_{д.маx}^2]} - p_b \right] = \beta \sigma_s,$$

из которого получим выражение для определения давления на поверхности контакта дорна с находящимся в пластичном состоянии локальным участком поверхности отверстия:

$$p_a = \frac{(\beta\sigma_s - 2p_b)[(D_{д.маx} + 2s)^2 - D_{д.маx}^2]}{2D_{д.маx}^2}. \quad (2.32)$$

В процессе калибрования величину пластически деформированного поверхностного слоя, как следует из п. 2.2, примем равной

$$s \approx \frac{1}{3}\Delta = \left(\frac{IT}{2} + R_z + \Delta_T\right),$$

а с учетом, что $R_z + \Delta_T = 0,3IT$, величина пластически деформированного поверхностного слоя составит

$$s = 0,27IT.$$

Таким образом, запишем формулу для определения внутреннего контактного радиального давления, обеспечивающего требуемую точность калибрования отверстий в условиях воздействия ультразвукового поля на деталь:

$$p_a = \frac{(\beta\sigma_s - 2p_b)[(D_{д.маx} + 0,27IT)^2 - D_{д.маx}^2]}{2D_{д.маx}^2}. \quad (2.33)$$

Из формулы (2.33) следует, что варьирование величиной ультразвукового импульса p_b на деталь позволяет обеспечить требуемую точность отверстия при более пониженных давлениях в зоне контакта дорна с обрабатываемой поверхностью и, как следствие, уменьшить величину силы обработки дорном в процессе калибрования, что особенно важно при обработке отверстий в деталях, подвергаемых термообработке и изготавливаемых из высокопрочных материалов.

На основе формулы (2.33) вытекают зависимости, позволяющие определить величину удельного давления в точке контактного взаимодействия дорна с поверхностью при калибровании отверстий, полученных после механической обработки при $\sigma_s \geq \sigma_T$:

$$p_a = \frac{(\beta\sigma_T - 2p_b)[(D_{д.маx} + 0,27IT)^2 - D_{д.маx}^2]}{2D_{д.маx}^2}, \quad (2.34)$$

и после термообработки при $\sigma_s = \sigma_B$:

$$p_a = \frac{(\beta\sigma_b - 2p_b)[(D_{д.мах} + 0,27IT)^2 - D_{д.мах}^2]}{2D_{д.мах}^2}. \quad (2.35)$$

Следует отметить, что в большинстве случаев к отверстиям, особенно фасонным, предъявляют повышенные требования по точности, надежности, долговечности. Для обеспечения этих требований детали изготавливают из легированных сталей, подвергающихся термической обработке: объемной закалке или поверхностному цементированию, а также другим видам обработки. В результате температурной деформации отверстия теряют свои первоначальные размеры и имеют высокую твердость, достигаемую до HRC 58...62, что приводит к повышению силы калибрования.

Известно [5], что давление в продольной звуковой волне определяется формулой

$$p_b = \rho c v, \text{ Па}, \quad (2.36)$$

где ρ – плотность среды, кг/м³; c – скорость волны в среде, $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ для продольных волн, м/с; E – модуль упругости, Па; v – колебательная скорость частиц, м/с.

Представим (2.36) в виде

$$p_b = \rho c \omega A, \quad (2.37)$$

где ω – частота колебаний, с⁻¹; A – амплитуда смещения колеблющихся частиц в волне в конкретной точке среды, м.

В соответствии с выражением (2.37) получим формулы для определения величины удельного давления в точке контактного взаимодействия дорна с поверхностью для обеспечения процесса калибрования отверстий с учетом ультразвукового воздействия на деталь:

$$\begin{cases} p_a = \frac{[\beta\sigma_T - 2\rho c \omega A][(D_{д.мах} + 0,27IT)^2 - D_{д.мах}^2]}{2D_{д.мах}^2} \\ p_a = \frac{[\beta\sigma_b - 2\rho c \omega A][(D_{д.мах} + 0,27IT)^2 - D_{д.мах}^2]}{2D_{д.мах}^2} \end{cases} \quad (2.38)$$

2.4. Расчет силовых и акустических параметров процесса калибровки отверстий в условиях ультразвукового воздействия на деталь

2.4.1. Расчет силы калибровки

Сила калибровки отверстий, как было отмечено в гл. 1, зависит от размеров обрабатываемого отверстия, величины натяга, механических характеристик обрабатываемого материала, шероховатости исходной поверхности и условий трения в зоне контакта дорна с обрабатываемой поверхностью.

В работах [43, 89] показано, что в процессе обработки дорном имеют место три основные зоны деформации (рис. 2.6): зона активного деформирования, ограниченная заборным конусом дорна 1, в пределах которой протекает упругое и пластическое деформирование металла; зона установившегося напряженного состояния металла, ограниченная цилиндрической ленточкой 2; зона частичного упругого восстановления размера отверстия в пределах обратного конуса 3.

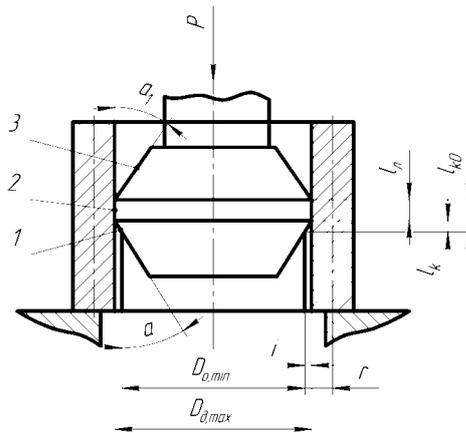


Рис. 2.6. Схема к расчету силы обработки дорном: 1 – заборный конус; 2 – калибрующая часть (цилиндрическая ленточка); 3 – обратный конус

Таким образом, в общем виде величина силы обработки дорном P представляет собой сумму силы, затрачиваемой на деформирование поверхности контакта дорна с отверстием по всему контуру отверстия P_c , силы, затрачиваемого на преодоление силы трения в направлении перемещения дорна P_μ , и силы, необходимой для преодоления потерь, связанных с неравномерностью деформации P_d :

$$P = P_c + P_\mu + P_d. \quad (2.39)$$

Результаты исследований силы P_c , расходуемой на упругую и пластическую деформацию металла в условиях обработки дорном [89], показали, что ее величина в большей степени зависит от истинного сопротивления обрабатываемого материала деформации. Для определения величины P_c в работе получено уравнение

$$P_c = F \frac{p_a \left(1 + \frac{f_{\text{тр}}}{\text{tg } \alpha}\right)}{1 - f_{\text{тр}} \text{tg } \alpha} \ln \left(1 + \frac{i}{D_{o.min}}\right), \text{ Н}, \quad (2.40)$$

где p_a – истинное давление при деформации, Па; α – угол наклона заборного конуса, град.; $f_{\text{тр}}$ – коэффициент внешнего трения; $D_{o.min}$ – минимальный диаметр исходного отверстия детали, м; i – натяг обработки дорном, м; F – площадь деформируемой поверхности отверстия, охватываемой периметром рабочей части дорна, м², $F = l_{\text{п}} l_k$; $l_{\text{п}}$ – длина периметра рабочей части дорна в радиальном сечении, м; l_k – длина контакта заборного конуса дорна с деформируемой поверхностью в осевом направлении,

$$l_k = \frac{i}{\text{tg } \alpha}, \text{ м}.$$

Используя рекомендации по обоснованию натяга обработки дорном при выполнении операции калибрования отверстия, сделанные в п. 2.2 (соотношение), и приняв за диаметр исходного отверстия детали его минимальный размер $D_{o.min}$, формулу для определения силы P_c представим в виде

$$P_c = p_a \frac{0.53 IT l_{\text{п}} \left(1 + \frac{f_{\text{тр}}}{\text{tg } \alpha}\right)}{(1 - f_{\text{тр}} \text{tg } \alpha) \text{tg } \alpha} \ln \left(1 + \frac{0.53 IT}{D_{o.min}}\right), \text{ Н}. \quad (2.41)$$

Для расчета силы P_{μ} , необходимой для преодоления сил трения дорна об обрабатываемую поверхность отверстия детали, в работе [89] предложена формула

$$P_{\mu} = 2 p_a f_{\text{тр}} l_{k.o} l_{\text{п}}, \text{ Н}, \quad (2.42)$$

где $l_{k.o}$ – общая длина контакта дорна с деформируемой поверхностью в осевом направлении,

$$l_{k.o} = l_{\text{л}} + \frac{i}{\text{tg } \alpha}, \text{ м};$$

$l_{\text{л}}$ – ширина ленточки дорна, м.

Учитывая равенство (2.42) и используя соотношение $i = 0,53 IT$, где IT – допуск исходного отверстия, формулу для определения силы P_μ представим в виде

$$P_\mu = p_a 2f_{\text{тр}} l_\Pi \left(l_\Pi + \frac{0,53 IT}{\text{tg } \alpha} \right), \text{ Н.} \quad (2.43)$$

Из анализа зависимостей (2.41) и (2.42) следует, что при одном и том же коэффициенте внешнего трения, согласно (2.41), с увеличением угла наклона заборного конуса α сила P_c и, как следствие, сила обработки дорном увеличиваются.

Однако с ростом α уменьшается длина контакта дорна с деформируемой поверхностью, которая приводит к уменьшению силы P_μ , согласно выражению (2.42), в совокупности сила обработки дорном P будет меньше.

Третья часть силы обработки дорном P_d затрачивается на преодоление потерь, связанных с неравномерностью деформации, т.е. на дополнительные деформации металла, вызванные в основном протеканием в деформируемом слое микро- и субструктурных изменений. В работах [17, 43, 89] авторы на примере оценки напряжений сдвига локального объёма показали, что эти изменения тем больше, чем ближе рассматриваемый деформируемый элемент расположен к обрабатываемой поверхности детали и зависит от угла заборного конуса. По мере удаления от поверхности отверстия они уменьшаются и на расстоянии $r \approx 2i$ равны нулю. На основе этих исследований предложена следующая формула для обоснования величины силы обработки дорном P_d :

$$P_d = 0,28 p_a (2 \text{tg } \alpha + f_{\text{тр}}) F, \text{ Н} \quad (2.44)$$

или с учетом $F = l_\Pi l_k$:

$$P_d = p_a \frac{0,15 IT l_\Pi}{\text{tg } \alpha} (2 \text{tg } \alpha + f_{\text{тр}}), \text{ Н.} \quad (2.45)$$

На основе выражений (2.41), (2.43), (2.45) формула для определения величины технологической силы обработки дорном P будет иметь вид

$$P = p_a l_\Pi \left[\frac{0,53 IT \left(1 + \frac{f_{\text{тр}}}{\text{tg } \alpha} \right)}{(1 - f_{\text{тр}} \text{tg } \alpha) \text{tg } \alpha} \ln \left(1 + \frac{0,53 IT}{D_{o.min}} \right) + 2f_{\text{тр}} \left(l_\Pi + \frac{0,53 IT}{\text{tg } \alpha} \right) + \frac{0,15 IT}{\text{tg } \alpha} (2 \text{tg } \alpha + f_{\text{тр}}) \right], \text{ Н.} \quad (2.46)$$

Исследования, проведённые в п. 2.2, позволяют представить зависимость для расчёта технологической силы калибрования P с применением ультразвукового воздействия на деталь, используя формулы (2.37), (2.38) для определения величины удельного давления в точке контактного взаимодействия дорна с поверхностью с учетом ультразвукового воздействия на деталь:

$$P = \frac{[\beta\sigma_T - 2\rho c\omega A] [(D_{o.min} + 0,53IT)^2 - D_{o.min}^2]}{2D_{o.min}^2} l_{II} \left[\frac{0,53 IT \left(1 + \frac{f_{TP}}{\operatorname{tg} \alpha}\right)}{(1 - f_{TP} \operatorname{tg} \alpha) \operatorname{tg} \alpha} \ln \left(1 + \frac{0,53 IT}{D_{o.min}}\right) + 2f_{TP} \left(l_L + \frac{0,53 IT}{\operatorname{tg} \alpha}\right) + \frac{0,15 IT}{\operatorname{tg} \alpha} (2 \operatorname{tg} \alpha + f_{TP}) \right], \text{ Н.} \quad (2.47)$$

На рис. 2.7–2.10 показано влияние основных факторов процесса калибрования с применением ультразвуковых колебаний, входящих в формулу (2.47), на силу калибрования (приложение 5).

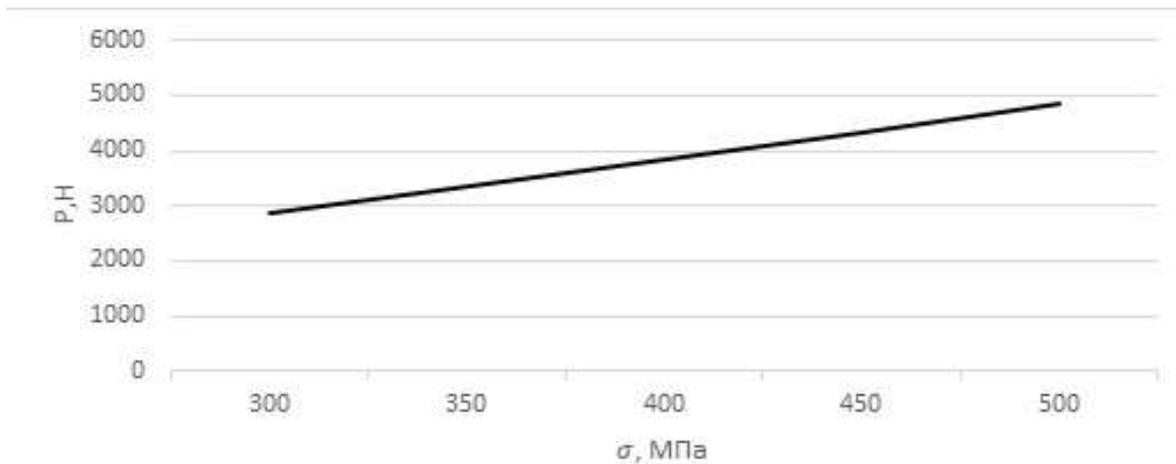


Рис. 2.7. Зависимость силы калибрования от механических свойств материала

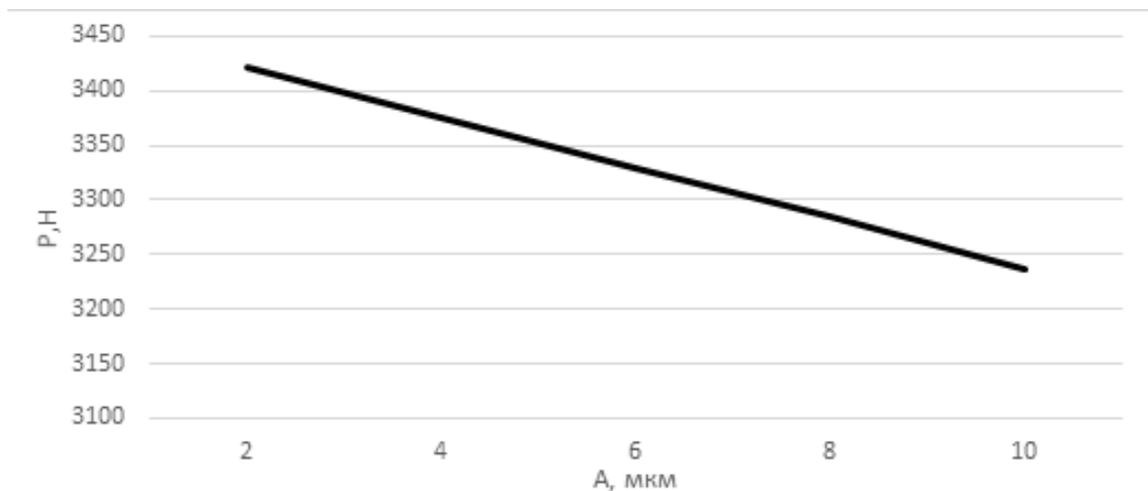


Рис. 2.8. Зависимость силы калибрования от амплитуды ультразвуковых колебаний

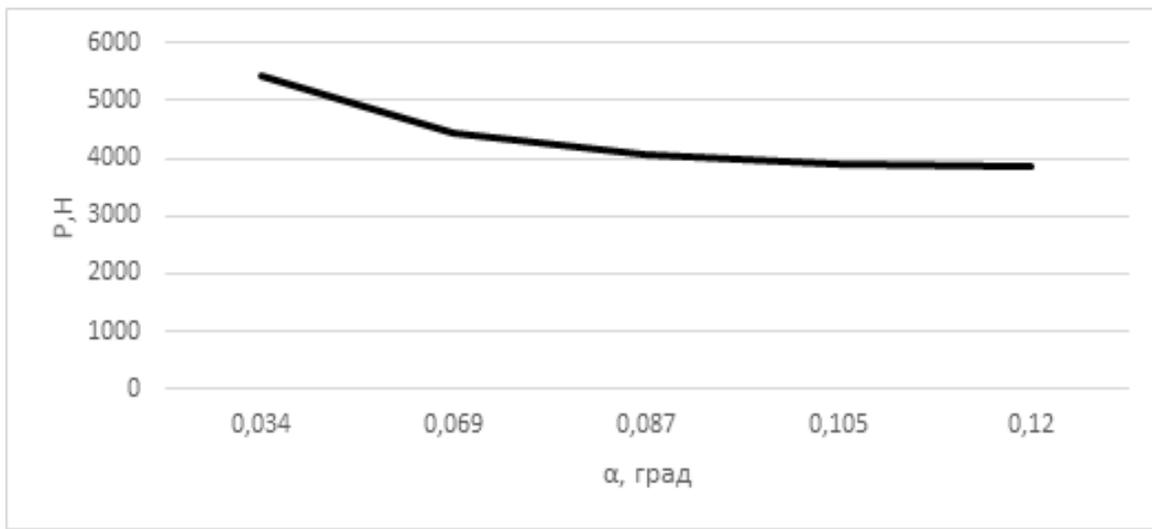


Рис. 2.9. Зависимость силы калибрования от величины угла заборного конуса

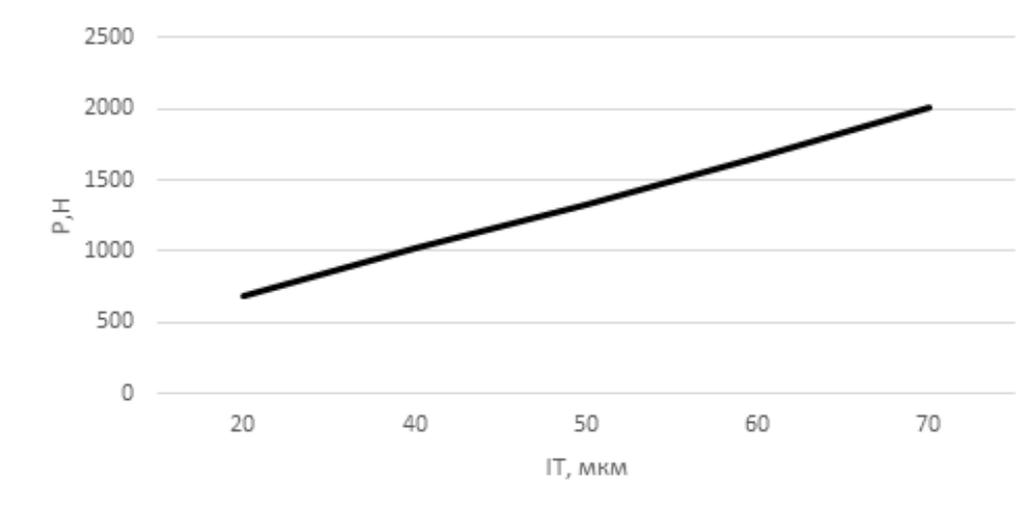


Рис. 2.10. Зависимость силы калибрования от величины натяга

Из зависимости (2.47) следует, что основным эффективным фактором, обеспечивающим снижение силы калибрования, является амплитуда УЗК (см. рис. 2.8), что согласуется с исследованиями, приведёнными в работах [5, 97]. Изменения остальных факторов, определяющих процесс калибрования, приводят к росту усилия. Кроме того, предложенная зависимость (2.47) может являться предпосылкой при выборе технологического оборудования и технических средств УЗКС.

2.4.2. Обоснование и расчет параметров основных элементов УЗКС

Источником УЗК являются ультразвуковые генераторы [5, 72], которые при небольших габаритных размерах и малой себестоимости изготовления и эксплуатации обеспечивают стабильность частоты, возможность плавного регулирования частоты, возможность регулирования выходной мощности в заданном диапазоне и надежность в работе.

Для выполнения определенных функций и конкретных технологических операций широкое применение получили УЗ-генераторы с весьма малым диапазоном подстройки, например 18–25 кГц. В табл. 2.1 представлены наиболее распространенные типы ультразвуковых генераторов, которые можно использовать в структуре акустического блока технологической системы калибрования отверстий.

Таблица 2.1

Характеристики ультразвуковых генераторов

Модель	Мощность, Вт		Рабочая частота, кГц	Напряжение, В
	выходная	потребляемая		
УЗГ4	0,1	0,15	18	220
УЗГ3	0,4	0,6	22	220/380
УЗГ2	0,63	1,0	18	220/380
УЗГ1	0,25	0,4	18	220
УГЗ-2			18-24	220

На рис. 2.11 дана принципиальная схема акустического блока технологической системы калибрования отверстий, УЗКС которой осуществляет возбуждение колебаний в зоне деформации через деформируемый материал (деталь).

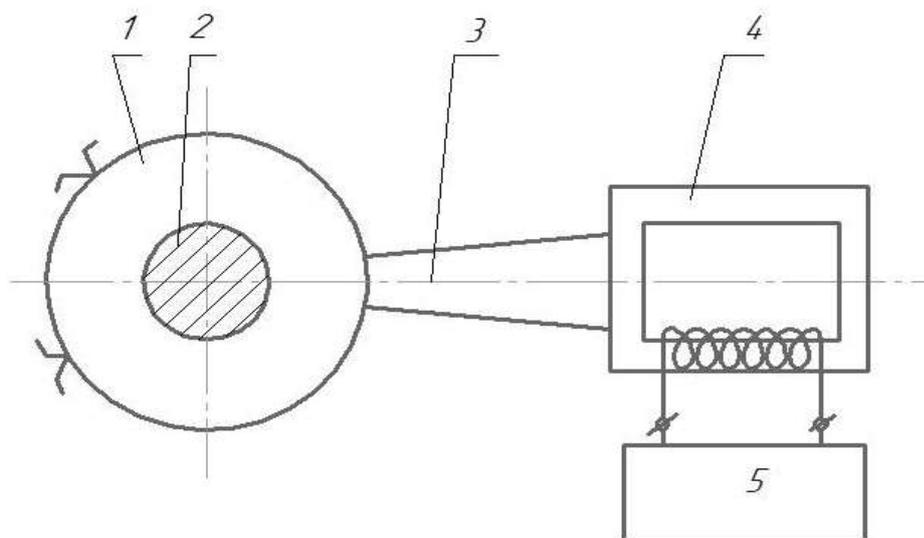


Рис. 2.11. Принципиальная схема акустического блока технологической системы калибровки отверстий: 1 – деталь; 2 – дорн; 3 – волновод-концентратор; 4 – преобразователь; 5 – ультразвуковой генератор

В представленной на рис. 2.11 УЗКС предлагается использовать стандартные преобразователи колебаний, а в качестве трансформатора упругих колебаний – продольно-изгибную систему, состоящую из концентратора продольных колебаний, являющихся наиболее распространённым типом колебаний, подводимых к заготовке. Следует отметить, что такое решение не исключает применение других типов подвода колебаний: радиальных, крутильных, поперечных.

Анализ УЗКС, обобщённый в работах [52, 97], позволяет рекомендовать для технологической системы калибровки отверстий УЗКС замкнутого типа. Следует отметить очень важный установленный в этих работах факт, что как в этой УЗКС, так и во всех других, предназначенных для обработки материалов, очаг деформации представляет собой нагрузку на колебательную систему, причем сопротивление этой нагрузки непрерывно изменяется в процессе деформации при изменении конфигурации и размеров заготовки.

В качестве ультразвукового преобразователя акустического блока технологической системы калибровки отверстий, представленной на рис. 2.11, рекомендуется по технико-экономическим соображениям (простота конструкции,

надежность, дешевизна) использовать симметричный магнестрикционный преобразователь, представляющий собой систему трех последовательно соединенных стержней.

Для определения амплитуды колебаний на выходе магнестрикционного преобразователя при заданной величине напряжения на входе в работе [58] рекомендуется формула

$$A_{\text{п}} = \frac{\mu M}{2\pi^2 f^2 W (R_{\text{м.н.}} + R_{\text{н}})} U_0, \text{ м}, \quad (2.48)$$

где M – корректирующий коэффициент, учитывающий конструкцию преобразователя; μ – магнестрикционная постоянная; f – заданная частота преобразователя; U_0 – напряжение на входе преобразователя; W – полное число витков обмотки возбуждения; $R_{\text{м.н.}}$ – сопротивление механических потерь преобразователя; $R_{\text{н}}$ – нагрузка на преобразователь.

Из формулы (2.48) следует, что отношение амплитуды колебаний на выходе к амплитуде электрического напряжения на входе зависит только от свойств преобразователя и характера нагрузки. Таким образом, чтобы найти амплитуду колебаний на выходе преобразователя при заданной нагрузке $R_{\text{н}}$, необходимо знать чувствительность и сопротивление механических потерь $R_{\text{м.п.}}$.

При заданной величине амплитуды колебаний на выходе преобразователя задачей последующих расчетов является выбор материала, определение размеров (высоты окна l_2 , толщины накладки l_1 , ширины преобразователя a , ширины окна b) и других параметров магнестрикционного преобразователя. Если конструкция преобразователя выбрана, то для оценки величины амплитуды используют зависимость (2.48).

В структуре ультразвуковой колебательной системы механические трансформаторы, называемые концентраторами, обеспечивают увеличение амплитуды смещения или скорости колебаний, создаваемых ультразвуком. Концентраторы – это полуволновые настраиваемые стержни с уменьшающимся вдоль оси сечением (коническим, криволинейным, ступенчатым и др.).

Для обоснования коэффициента усиления амплитуды УЗК и геометрических размеров стержневого цилиндрического концентратора переменного сечения, рекомендуемого для применения в ультразвуковой колебательной системе, рассмотрим расчётную схему (рис. 2.12) при следующих условиях:

- длина стержня превышает его диаметр;
- поперечные деформации невелики и ими можно пренебречь;
- волновой фронт напряжений остается плоским, а напряжения равномерно распределяются по сечению.

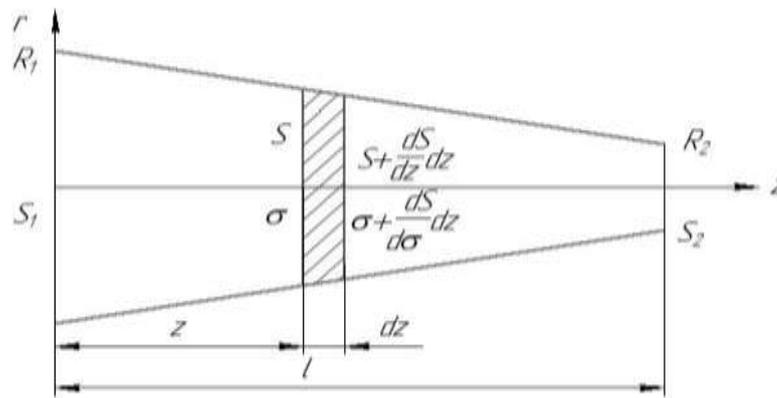


Рис. 2.12. Схема к расчету стержневого цилиндрического концентратора переменного сечения

Исходя из этих условий, запишем уравнение движения напряжений для произвольно выделенного слоя (рис. 2.12):

$$\rho S dz \frac{d^2 u_z}{dt^2} = \frac{d\sigma_{zz}}{dz} S dz + \frac{dS}{dz} \sigma_{zz} dz, \quad (2.49)$$

где ρ – плотность материала стержня.

Выразив тензор напряжений как $\sigma = E \frac{du}{dz}$, запишем следующее уравнение смещений для случая установившихся синусоидальных колебаний:

$$\ddot{u} + \frac{1}{S} \dot{S} \dot{u} + k^2 u = 0, \quad (2.50)$$

где $k = \frac{\omega^2 \rho}{E} = \frac{\omega}{c}$; (2.51)

ω – частота колебаний, c^{-1} ; c – скорость продольных волн в стержне, м/с.

Поскольку колебательная скорость частиц равна $V = \frac{du}{dt}$, уравнение для скорости V имеет аналогичный вид:

$$\ddot{V} + \frac{1}{S} \dot{S} \dot{V} + k^2 V = 0. \quad (2.52)$$

Установим граничные условия, сделав следующие допущения:

- внешняя нагрузка на концентратор со стороны детали при $z = l$ практически отсутствует, что позволяет принять условие $\dot{V}(l) = 0$;

- концентратор достаточно плотно присоединяется к резонансному магнитострикционному преобразователю, в результате чего его режим работы согласуется с режимом работы преобразователя, т. е. можно считать, что соблюдаются следующие условия:

$$\dot{V}(0) = 0; \quad V = V_{\Pi},$$

где V_{Π} – резонансное значение амплитуды колебательной скорости на поверхности преобразователя (при отсутствии концентратора).

В качестве исходной характеристики резонансного концентратора примем отношение его диаметральных линейных размеров торцов (см. рис. 2.12):

$$N = \frac{D_{\text{ТП}}}{D_{\text{ТК}}}, \quad (2.53)$$

где $D_{\text{ТК}}$ – диаметр торца концентратора на расстоянии $z = l$, контактирующего с обрабатываемой деталью; $D_{\text{ТП}}$ – диаметр торца концентратора на расстоянии $z = 0$, контактирующего с преобразователем.

Для концентратора конической формы площадь в произвольном сечении равна

$$S = S_1(1 - \gamma z)^2, \quad (2.54)$$

$$\text{где } \gamma = \frac{D_{\text{ТП}} - D_{\text{ТК}}}{D_{\text{ТП}} l}.$$

С учетом (2.54) уравнение колебательной скорости (2.52) преобразуется к виду

$$\ddot{V} + \frac{2}{\left(z - \frac{1}{\gamma}\right)} \dot{V} + k^2 V = 0. \quad (2.55)$$

Решая уравнение (2.55), представляющее собой однородное линейное дифференциальное уравнение 2-го порядка, получим:

$$V = \frac{1}{\left(z - \frac{1}{\gamma}\right)} (C_1 \cos kz + C_2 \sin kz). \quad (2.56)$$

Продифференцировав (2.56), запишем:

$$\dot{V} = \frac{1}{\left(z - \frac{1}{\gamma}\right)^2} (C_1 \cos kz + C_2 \sin kz) + \frac{1}{\left(z - \frac{1}{\gamma}\right)} (C_2 k \cos kz - C_1 k \sin kz). \quad (2.57)$$

Для определения C_1 и C_2 рассмотрим уравнение (2.57), используя граничные условия:

-при $z = l$, $\dot{V}(l) = 0$:

$$\frac{1}{\left(l - \frac{1}{\gamma}\right)^2} (C_1 \cos kl + C_2 \sin kl) + \frac{1}{\left(l - \frac{1}{\gamma}\right)} (C_2 k \cos kl - C_1 k \sin kl) = 0; \quad (2.58)$$

-при $z = 0$, $\dot{V}(0) = 0$:

$$\frac{1}{\left(0 - \frac{1}{\gamma}\right)^2} (C_1 \cos k0 + C_2 \sin k0) + \frac{1}{\left(0 - \frac{1}{\gamma}\right)} (C_2 k \cos k0 - C_1 k \sin k0) = 0. \quad (2.59)$$

Из выражений (2.58) и (2.59) следует:

$$C_2 = C_1 \left[\frac{(k(1-\gamma l) \sin kl - \gamma \cos kl)}{(k(1-\gamma l) \cos kl + \gamma \sin kl)} \right]; \quad (2.60)$$

$$C_2 = -C_1 \frac{\gamma}{k}; \quad (2.61)$$

$$-\frac{\gamma}{k} = \left[\frac{(k(1-\gamma l) \sin kl - \gamma \cos kl)}{(k(1-\gamma l) \cos kl + \gamma \sin kl)} \right]. \quad (2.62)$$

После преобразований соотношения (2.56) получим уравнение, которое определяет в функции от N те значения kl , при которых возбуждаются резонансные колебания коническим концентратором:

$$tgkl = \frac{kl(1-N)^2}{(kl)^2 + (1-N)^2}. \quad (2.63)$$

Распределение амплитуды колебательной скорости по длине резонансного конического концентратора определим на основе уравнения (2.56), применив граничное условие: $z = 0$, $V = V_0$. При этом условии расчетное значение показателя C_1 равно

$$C_1 = -\frac{V_0}{\gamma}.$$

Подставляя его в (2.56) и учитывая соотношение (2.61), получим расчетную формулу амплитуды колебательной скорости по длине резонансного конического концентратора:

$$V = \frac{V_0}{(1-z\gamma)} \left(\cos kz - \frac{\gamma}{k} \sin kz \right). \quad (2.64)$$

Из формулы (2.64), при условии, что $\gamma = \frac{D_{\text{ТП}} - D_{\text{ТК}}}{D_{\text{ТП}} l}$ и $N = \frac{D_{\text{ТП}}}{D_{\text{ТК}}}$, вытекает соотношение, определяющее коэффициент усиления по колебательной скорости (амплитуда смещения):

$$K = \left| \frac{V}{V_0} \right| = N \left(\cos kz - \frac{N-1}{Nkl} \sin kz \right). \quad (2.65)$$

На основе проведённых исследований предлагается следующий порядок расчета конических концентраторов УЗК, используемых в технологических системах калибрования с применением ультразвукового поля:

1. Расчет величины длины волны λ для принятого материала концентратора:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (2.66)$$

2. Исходя из принятых размеров торцевых поверхностей концентратора, обоснование величины их соотношения – N .

3. Определение длины концентратора по формуле

$$l = \frac{\lambda}{2} \frac{(kl)}{\pi}. \quad (2.67)$$

4. По известным N и l рассчитывается коэффициент усиления K по формуле (2.65).

5. Определение амплитуды УЗК на выходе концентратора, являющейся исходным параметром возбуждаемого в детали ультразвукового поля:

$$A_k = K A_{\text{П}}, \quad (2.68)$$

где $A_{\text{П}}$ – амплитуда УЗК, развиваемая магнитоотрицательным преобразователем.

Поскольку приведенный расчет конического концентратора основывается на приближенной теории, то при практическом изготовлении целесообразно осуществлять его экспериментальную проверку для уточнения данных расчета.

2.4.3. Закономерности распространения ультразвуковых колебаний в детали

В работах [5, 29] показано, что при распространении волн в реальных средах происходит уменьшение амплитуды колебаний частиц в волне, обусловленное расхождением лучей (дифракционным ослаблением), характерным для сферических и цилиндрических волн, а также затуханием волн в среде. Этот

экспериментально подтверждённый факт приводит к уменьшению амплитуды и интенсивности всех типов волн, включая плоские волны (рис. 2.13).

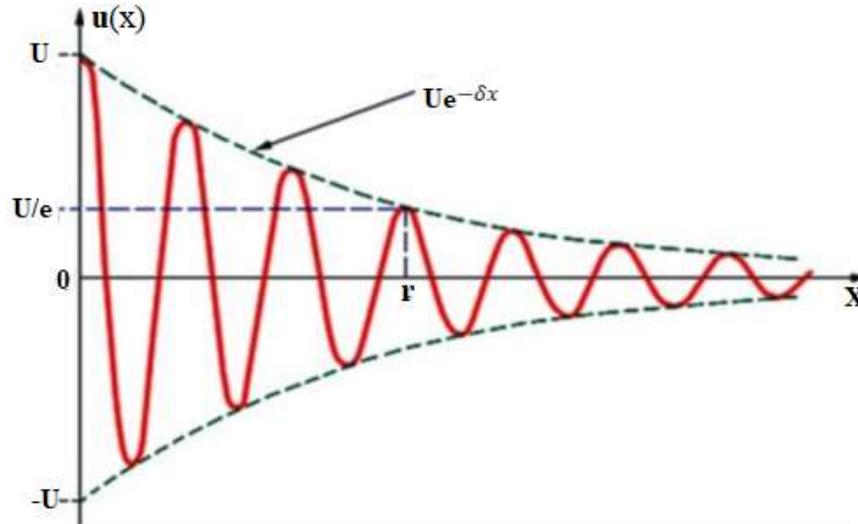


Рис. 2.13. График затухающих колебаний

Уравнение для плоской волны, распространяющейся в положительном направлении оси X , имеет вид

$$A(x, t) = A_K e^{-\delta x} e^{\omega(t - \frac{x}{c})}, \quad (2.69)$$

где t – время; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота колебаний; c – скорость звука в материале; A , A_K – текущее и входное значения амплитуды колебаний.

Затухание УЗК характеризуется коэффициентом затухания δ , определяемым как обратная величина того расстояния, на котором амплитуда продольной волны, бегущей вдоль оси X , уменьшается в e раз. Амплитуда плоской продольной звуковой волны, бегущей вдоль оси X , убывает с расстоянием по закону $e^{-\delta x}$, а интенсивность – по закону $e^{-2\delta x}$.

Помимо коэффициента затухания δ характеристиками затухания являются добротность, определяемая по формуле

$$Q = \frac{\pi}{\delta} c, \quad (2.70)$$

и логарифмический декремент затухания

$$\gamma = \frac{\pi}{Q}. \quad (2.71)$$

Если в направлении распространения ультразвуковой волны в материале выделить участок толщиной h , то для амплитуды акустического давления в начале и конце этого участка можно записать

$$p = p_0 e^{-\delta h}, \quad (2.72)$$

где p_0, p – амплитудные значения давления в начале и конце участка.

Прологарифмировав уравнение (2.72), получим формулу для оценки коэффициента затухания ультразвука:

$$\delta = -\frac{\ln\left(\frac{p}{p_0}\right)}{h} = \frac{1}{h} \ln\left(\frac{p_0}{p}\right), \text{ Нп/мм}, \quad (2.73)$$

или

$$\delta = \frac{20}{h} \log\left(\frac{p_0}{p}\right), \text{ дБ/мм}. \quad (2.74)$$

Таким образом, затухание амплитуды ультразвуковых колебаний в детали, передаваемых ей концентратором, можно представить следующим образом:

$$A(h) = A_0 e^{-\delta h}, \quad (2.75)$$

где $A(h)$ – амплитуда в точке измерения; A_0 – амплитуда волны в начальный момент времени; δ – коэффициент затухания (имеет размерность обратной длины (1/м) либо выражается в неперах на метр (Нп/м) и децибелах на метр (дБ/м); коэффициент определяется как величина, обратная расстоянию, на котором амплитуда волны уменьшается в e раз); h – расстояние, проходимое волной.

При поглощении звуковая энергия переходит в тепловую и тем самым обуславливает изменение, как правило, в сторону уменьшения механических характеристик материала за счет микро- и субструктурных преобразований [58, 59, 60].

Установлено [29], что распространение ультразвуковых волн в твердом теле происходит по законам геометрической (лучевой) акустики, согласно которым распространение упругих волн в однородных упругих средах рассматривается как совокупность ультразвуковых лучей-линий, вдоль которых распространяется звуковая энергия. В однородной изотропной упругой среде лучи прямолинейны, ортогональны к волновым поверхностям и направлены в сторону внешних нормалей к этим поверхностям.

В соответствии с законами геометрической акустики модель геометрии ультразвукового поля, создаваемого в детали типа дисков с отверстием, имеет вид, представленный на рис. 2.14, при следующих условиях: твёрдое тело изотропно, однородно, упруго, имеет гладкие ограничивающие поверхности, звуковое поле не сопровождается явлениями интерференции и дифракции.

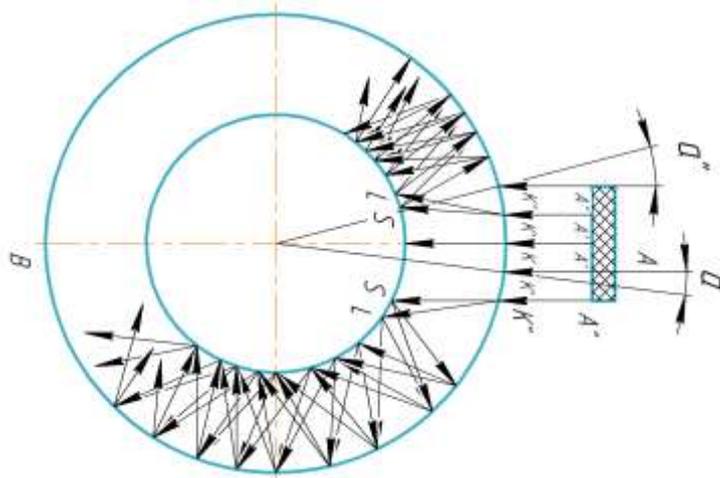


Рис. 2.14. Схема хода лучей преломленных волн при ультразвуковом воздействии на деталь - диск с отверстием

Из схемы, представленной на рис. 2.14, следует, что лучи продольных и сдвиговых УЗК отражаются попеременно от выпуклой и вогнутой поверхностей и таким образом приводят к рассеиванию УЗК и распространению большей части их по окружности. Убывание амплитуды УЗК, как было отмечено выше, обусловлено наличием потерь в среде, приводящих к постепенному затуханию колебаний в процессе прохождения лучей от поверхности к поверхности. Таким образом, можно предположить, что в условиях установившегося ультразвукового поля в соответствии с принятой геометрической схемой движения ультразвуковых волн в цилиндрическом образце формируются по концентричным окружностям кольцевые волновые фронты (рис. 2.15) различной амплитуды, снижающейся от наружной поверхности образца к поверхности отверстия и оказывающие определенное акустическое давление в локальной зоне их действия.

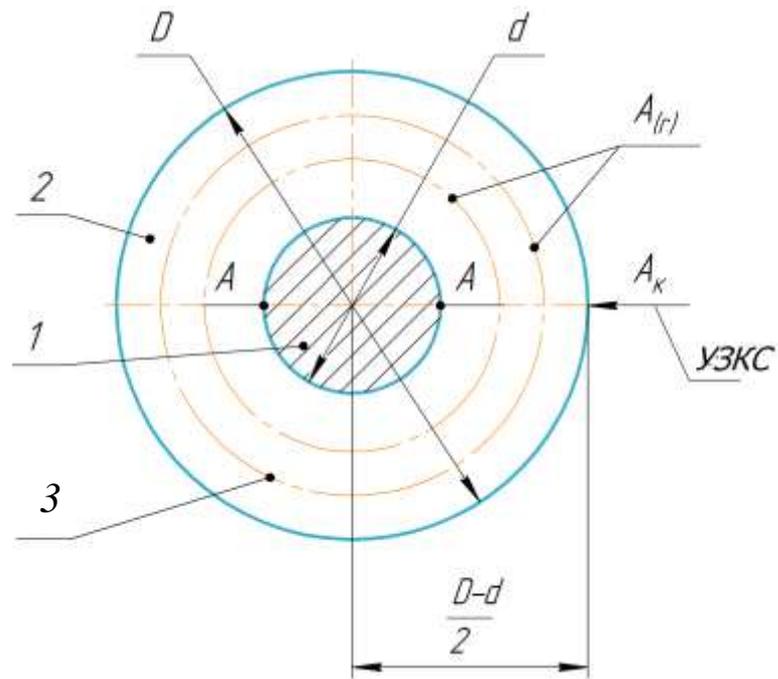


Рис. 2.15. Модель воздействия УЗК на деталь – диск с отверстием: 1 – дорн; 2 – деталь; 3 – фронт ультразвуковой волны

Моделируя ультразвуковое поле, возбуждаемое в детали типа диск, как совокупность волновых фронтов с амплитудой, убывающей от наружной окружности детали к отверстию, величину амплитуды колебаний в точках контакта дорна с отверстием можно оценить по формуле

$$A = A_k \exp\left(-\delta_D \frac{D-d}{2}\right), \quad (2.76)$$

где A_k – амплитуда волны, возбуждаемой концентратором в точке его контакта с деталью; δ_D – коэффициент затухания волны при прохождении через деталь с наружным номинальным габаритным размером D и диаметром отверстия, соответствующим номинальному диаметру дорна d (уточняется исходя из свойств обрабатываемого материала).

Результаты проведённого исследования позволяют представить обобщённую формулу для определения амплитуды УЗК, развиваемой УЗКС с выбранными конструктивными параметрами на поверхности обрабатываемого отверстия, с учетом (2.48), (2.65), (2.76), следующим образом:

$$A = N \frac{\left(\cos kl - \frac{N-1}{Nkl} \sin kl\right) \mu M U_0}{2\pi^2 f^2 W (R_{M.H.} + R_H)} \exp\left(-\delta_D \frac{D-d}{2}\right), \text{ м.} \quad (2.77)$$

В соответствии с формулой (2.77) при выборе и обосновании УЗКС может быть решена как прямая задача, предусматривающая по заданной величине амплитуды УЗК выбор конструктивных и акустических параметров составляющих элементов УЗКС, так и обратная, предусматривающая по выбранным конструктивным параметрам структурных элементов УЗКС определение амплитуды УЗК, подводимой к отверстию в очаг деформации отверстия через деталь.

2.5. Определение параметров качества поверхностного слоя отверстия, сформированного в процессе калибрования отверстия с применением ультразвуковых колебаний

2.5.1. Оценка микротвёрдости деформированного поверхностного слоя отверстия

Анализ исследований, представленный в п. 1.3, показал, что под воздействием ультразвуковых колебаний происходит изменение механических свойств материалов, обусловленное протеканием в них физических явлений различной природы, микро- и субструктурных преобразований. Эти изменения, используя результаты исследований, представленные в гл. 1, предлагается оценивать зависимостью вида

$$\sigma_{\text{узк}} = \sigma_{\text{исх}} - m A, \quad (2.78)$$

где $\sigma_{\text{узк}}$ – механическая характеристика материала после ультразвукового воздействия (предел текучести, предел прочности); $\sigma_{\text{исх}}$ – механическая характеристика материала в исходном состоянии; m – коэффициент, зависящий от материалов образцов и условий нагружения; A – амплитуда УЗК при воздействии на образцы, подвергаемые в последствии растяжению и сжатию.

Однако следует отметить, что, несмотря на экспериментальную подтвержденность, предложенная эмпирическая зависимость не раскрывает в полной мере влияние ультразвуковых колебаний на изменение механических свойств материалов. С целью устранения этого недостатка предлагается эффект

ультразвукового влияния на изменение механических свойств, описываемый зависимостью (2.78), в соответствии с исследованиями, проведенными в п. 2.1, представить в виде

$$mA = \rho c \omega A, \quad (2.79)$$

где ρ – плотность материала, кг/м³; c – скорость ультразвуковой волны, м/с; ω – круговая частота колебаний, Гц.

С учетом (2.79) эти изменения могут быть охарактеризованы и оценены выражением

$$\sigma_{\text{узк}} = (\sigma_{\text{и}} - \rho c \omega A) \eta, \quad (2.80)$$

где η – корректирующий коэффициент, учитывающий наследственные структурно-фазовые отклонения обрабатываемого материала на предшествующих калибровке операциях механической обработки.

Используя в качестве основного показателя механических свойств материала его микротвердость, можно записать выражение для оценки микротвердости материала в зоне непосредственного контакта дорна с деталью с учетом воздействия на деталь ультразвуковых колебаний:

$$HV_{\text{узк}} = (HV_{\text{исх}} - \rho c \omega A) \eta, \text{ Па}, \quad (2.81)$$

где $HV_{\text{узк}}, HV_{\text{исх}}$ – микротвердость материала после и до ультразвукового воздействия.

Для определения изменения поверхностной микротвердости отверстия после обработки дорном используем соотношение, применимое для широкой номенклатуры сталей и других материалов [19] и устанавливающее с высокой степенью корреляции (0,956) связь твёрдости и интенсивности напряжения, представив его в виде

$$\sigma_i = 0,067 HV_{\text{пс}}. \quad (2.82)$$

Анализ исследований, посвящённых изучению явлений разрушения и течения твёрдого тела, проведённых в работах [1, 4, 21, 35], позволяет функциональную зависимость интенсивности напряжения локального микрообъёма от внешнего давления, оказываемого на него в процессе деформирования, выразить следующим образом:

$$\sigma_i = \sqrt{6Gp_a}, \text{ Па}, \quad (2.83)$$

где G – модуль сдвига, Па; p_a – радиальное контактное давление дорна в зоне его взаимодействия с обрабатываемой поверхностью, определяемое по формуле (2.38), Па.

На основе равенств (2.82) и (2.83) получим формулу для определения поверхностной микротвердости отверстия после обработки дорном:

$$HV_d = \sqrt{1,3 \cdot 10^3 \cdot Gp_a}, \text{ Па}. \quad (2.84)$$

В условиях ультразвукового воздействия на деталь микротвердость поверхностного слоя в соответствии с (2.81) будет равна

$$HV_k = \eta(HV_d - \rho c \omega A), \quad (2.85)$$

или с учетом выражений (2.84) и (2.85):

$$HV_k = \eta(\sqrt{1,3 \cdot 10^3 \cdot G \cdot p_a} - \rho c \omega A), \text{ Па}. \quad (2.86)$$

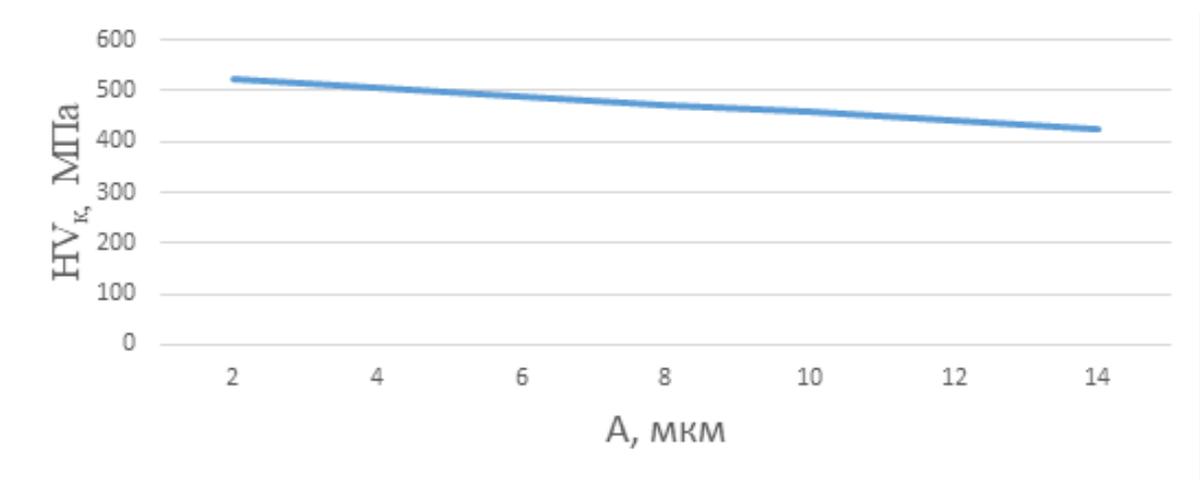


Рис. 2.16. Влияние амплитуды УЗК на поверхностную микротвердость калиброванного отверстия образцов из стали 45 ($\sigma_T = 355$ МПа) при $\omega = 20$ кГц

Полученные зависимости (2.81) и (2.86), проиллюстрированные на рис. 2.16, позволяют дать количественную и качественную оценку влияния УЗК, подводимых к детали, на изменение механических свойств в локальной точке обрабатываемых деталей (приложение 6). Кроме того, как следует из этих зависимостей, ультразвуковое воздействие на деталь приводит к уменьшению поверхностной микротвердости, достигаемой в процессе ППД, на величину,

соизмеримую

с величиной давления фронта ультразвуковой волны в очаге деформации.

2.5.2. Оценка высоты неровностей профиля поверхности отверстия после калибрования

Обработка отверстий дорном, как было показано в гл. 1 (см. рис. 1.3), позволяет улучшать геометрические параметры качества поверхности обрабатываемых отверстий. Установлено, что высота неровностей профиля поверхности отверстий уменьшается с увеличением натяга обработки дорном до 1,5–0,2 мм (см. рис. 1.4). При натягах свыше 0,2 мм возникают явления, вызывающие молекулярное сцепление частичек дорна и обрабатываемого металла, приводящее к наросту на дорне, рискам, обуславливающим повышение высоты неровностей профиля поверхности.

Оценивая этот экспериментально подтверждённый факт, свидетельствующий о снижении высоты неровностей профиля поверхности после обработки дорном, необходимо учитывать следующее обстоятельство. При обработке дорном отверстий в процессе (полной или частичной) упругопластической деформации микронеровностей исходной поверхности формируется качественно новый поверхностный слой, с более повышенными механическими свойствами и новой шероховатостью поверхности, отличающейся от шероховатости исходной поверхности.

Анализ выглаживающих методов ППД [14, 23, 49] показал, что основными технологическими факторами, определяющими эффект снижения высоты неровностей профиля при выглаживании, являются величина натяга, характер микропрофиля и микротвердость исходной поверхности. Кроме того, в этих работах установлено, что изменение высоты неровностей профиля формируемой в процессе обработки поверхности в сторону уменьшения носит, как правило, экспоненциальный характер. Исходя из этих предпосылок, зависимость для оценки

изменения высоты неровностей профиля поверхности, формируемой в процессе калибрования, представим в виде

$$R_z = R_{z \text{ исх}} \exp(-\xi), \quad (2.87)$$

где ξ – коэффициент интенсивности уменьшения высоты неровностей профиля в процессе обработки отверстий.

Коэффициент интенсивности уменьшения высоты неровностей профиля является комплексным параметром, зависящим от механических свойств обрабатываемого материала и деформируемого в процессе ППД поверхностного слоя, а также акустических параметров ультразвукового поля, оказывающих, как было установлено в предыдущих исследованиях, влияние на их изменение при воздействии через деталь. Таким образом, интенсивность уменьшения высоты неровностей профиля при калибровании в условиях УЗК есть функция вышеотмеченных факторов:

$$\xi = f(HV_{\text{исх}}, HV_{\text{к}}, A). \quad (2.88)$$

Для уточнения степени влияния этих факторов на снижение высоты неровностей профиля в работе запланировано проведение многофакторного эксперимента, результаты которого представлены в п. 4.2.4.

Для практических расчетов величины высоты неровностей профиля калиброванной поверхности отверстия по формуле (2.87) сделано допущение, что коэффициент интенсивности уменьшения высоты неровностей профиля соизмерим с величиной соотношения

$$\xi \approx \frac{HV_{\text{исх}}}{HV_{\text{к}}},$$

где $HV_{\text{исх}}$ – исходная микротвердость поверхности отверстия, Па; $HV_{\text{к}}$ – микротвердость поверхностного слоя отверстия, калиброванного в условиях ультразвукового воздействия на деталь, определяемого по формуле (2.86).

С учетом этого допущения предложена следующая расчетная зависимость для определения высоты неровностей профиля калиброванной поверхности с применением УЗК:

$$R_z = R_{z \text{ исх}} \exp\left(-\frac{HV_{\text{исх}}}{HV_k}\right), \text{ мкм.} \quad (2.89)$$

Графическая интерпретация этой зависимости показана на рис. 2.17 (приложение б).

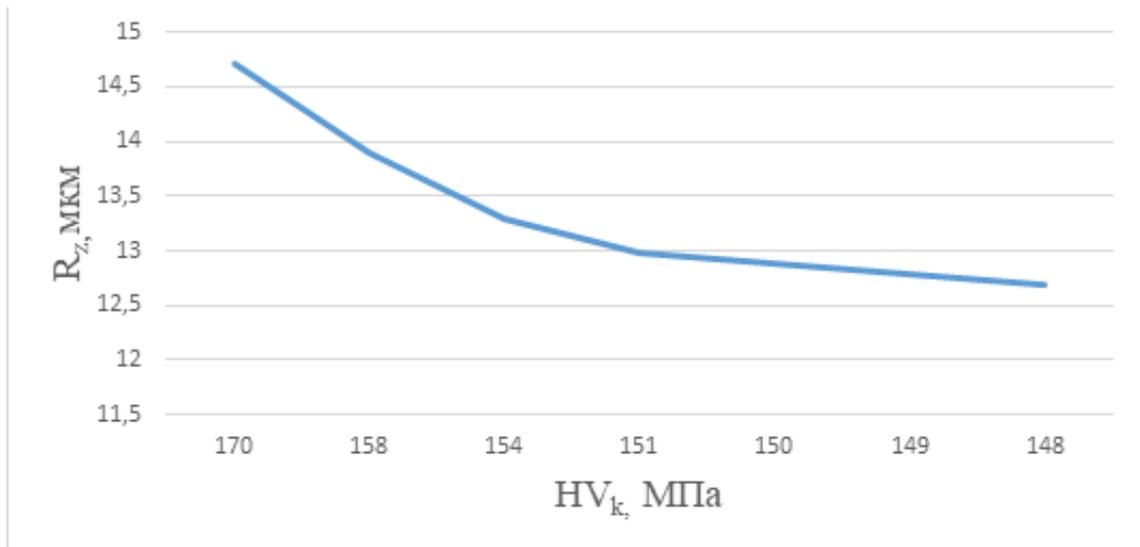


Рис. 2.17. Влияние исходной микротвердости на высоту неровностей профиля отверстия, калиброванного в условиях УЗК

($d = 28,83$ мм, материал сталь 45, $A = 6$ мкм, $\omega = 20$ кГц, $i = 80$ мкм)

Отсутствие в предложенной расчетной зависимости в явном виде амплитуды УЗК вполне обосновано, потому что эффект ультразвукового поля, согласно рассмотренной в п. 2.5 модели, определяется влиянием его на изменение механических свойств материала поверхности.

2.6. Задачи экспериментальных исследований

Результаты теоретических исследований и установленные при этом закономерности процесса калибрования с применением ультразвукового воздействия на деталь не решают в полной мере задачу технологического обеспечения качества обработки отверстий деталей без количественной оценки

дополнительных параметров и предложенных в гл. 2, которые могут быть установлены на основе экспериментальных исследований.

Для прогнозирования процесса в зоне контактного взаимодействия дорна с деталью при калибровании, а также оценки эффекта влияния на него ультразвуковых колебаний представлена следующая логическая последовательность экспериментального исследования.

Исследование процесса калибрования отверстий проводилось посредством цилиндрических дорнов на образцах типа дисков с разной толщиной стенки, находящихся под воздействием ультразвуковых колебаний, озвучиваемых с помощью акустического блока.

На первом этапе исследовалась эффективность ультразвукового воздействия на образец. В результате этих исследований обосновывались коэффициенты, оценивающие изменения амплитуды колебаний и механических свойств обрабатываемого материала образца непосредственно в зоне контактного взаимодействия дорна с обрабатываемой поверхностью отверстия образца.

На втором этапе проводились исследования процесса калибрования в условиях воздействия ультразвуковых колебаний на образец. В результате этих исследований устанавливалась степень активности влияния ультразвуковых колебаний на процесс обработки отверстий, адекватность аналитических зависимостей, предложенных для определения силы калибрования.

Третий этап предусматривал оценку влияния ультразвукового воздействия на образец и условий калибрования на качество поверхностного слоя калиброванных отверстий, а также обоснование области их рационального применения.

Проведение этих исследований позволило проверить правильность допущений и выводов теории, усовершенствовать процесс калибрования отверстий, решить вопрос выбора наиболее рациональных режимов обработки и выявить особенности, существенные при внедрении в промышленных условиях.

Планирование экспериментов и статистическая обработка данных производились по методикам, апробированным на практике. Эксперименты над

образцами проводились на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» и в научно-образовательном центре «Материалы» ДГТУ.

Выводы по главе 2

1. Разработана структурная схема технологической системы калибрования отверстий, предусматривающая наложение ультразвуковых колебаний на деталь. Показано, что предложенный способ ультразвукового воздействия на процесс калибрования позволяет обеспечить снижение силовых факторов процесса калибрования и при этом уменьшить высоту неровностей профиля поверхности отверстия. Кроме того, этот способ ультразвукового воздействия позволяет обеспечить автономность от технологического оборудования и компактность УЗКС, сокращение количества элементов волноводной колебательной системы, концентрацию акустической энергии непосредственно в очаге деформации, возможность использования малогабаритного и универсального оборудования для осуществления процесса калибрования.

2. Основными управляющими параметрами, определяющими технологический эффект калибрования отверстия в условиях ультразвукового воздействия на деталь, являются натяг, скорость обработки дорном и амплитуда УЗК, развиваемая ультразвуковой колебательной системой акустического блока.

3. Для практического применения рекомендовано величину натяга калибрования, который предопределяет геометрические размеры дорна и обеспечивает точность получаемого отверстия, предусмотренного ТУ, принимать на уровне $i \approx 0,53IT$. Превышение этой величины натяга сопровождается формированием поверхностного слоя отверстия с труднопрогнозируемой точностью из-за создания в нем значительных остаточных напряжений, и процесс обработки дорном уже имеет не калибрующий, а формообразующий эффект.

4. На основе моделирования пластически деформированного слоя при комбинированном воздействии инструмента и УЗК установлена зависимость,

раскрывающая влияние УЗК на величину удельного давления дорна в точке его локального контактного взаимодействия с поверхностью отверстия.

5. С учетом ультразвукового воздействия на деталь уточнена расчетная формула для определения силы калибрования отверстий. Установлено, что основным эффективным фактором, обеспечивающим снижение силы калибрования, является амплитуда УЗК. Изменения остальных факторов, определяющих процесс калибрования, приводят к росту усилия.

6. Для создания ультразвукового поля в детали предложена структура акустического блока технологической системы калибрования отверстий.

7. В качестве ультразвукового преобразователя акустического блока технологической системы калибрования отверстий рекомендуется по технико-экономическим соображениям (простота конструкции, надежность, дешевизна) использовать симметричный магнитострикционный преобразователь. Предложена зависимость для определения амплитуды колебаний на выходе магнитострикционного преобразователя при заданной величине напряжения на входе.

8. Предложена расчетная зависимость конического концентратора, рекомендуемого для применения в ультразвуковой колебательной системе, устанавливающая связь коэффициента усиления амплитуды УЗК с его геометрическими размерами.

9. На основе законов геометрической (лучевой) акустики выдвинута гипотеза, что в условиях установившегося ультразвукового поля в соответствии с принятой геометрической схемой движения ультразвуковых волн в образце типа диска по концентричным окружностям формируются кольцевые волновые фронты различной амплитуды, снижающейся от наружной поверхности образца к поверхности отверстия и оказывающие определенное акустическое давление в локальной зоне их действия.

10. Предложена зависимость для оценки микротвердости материала, взятой в качестве основного показателя его механических свойств, в зоне непосредственного контакта дорна с деталью с учетом воздействия на деталь ультразвуковых колебаний, из которой следует, что ультразвуковое воздействие на деталь в процессе калибрования отверстий приводит к уменьшению поверхностной

микротвердости, достигаемой в процессе ППД, на величину, соизмеримую с величиной давления фронта ультразвуковой волны в очаге деформации.

11. Предложена расчетная зависимость для определения высоты неровностей профиля калиброванной поверхности с применением УЗК, устанавливающая, что изменение высоты неровностей профиля формируемой в процессе обработки поверхности в сторону уменьшения носит экспоненциальный характер. Основным фактором, определяющим снижение высоты неровностей профиля, является изменение поверхностной микротвердости калиброванной поверхности под воздействием УЗК, подводимых к детали.

3. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Экспериментальный комплекс калибровки отверстий с применением ультразвуковых колебаний

Для реализации технологической схемы (см. рис. 2.1) калибровки отверстий с наложением ультразвуковых колебаний на деталь разработан и изготовлен экспериментальный комплекс (рис. 3.1), позволивший обеспечить решение экспериментальных задач, сформулированных в п. 2.6.

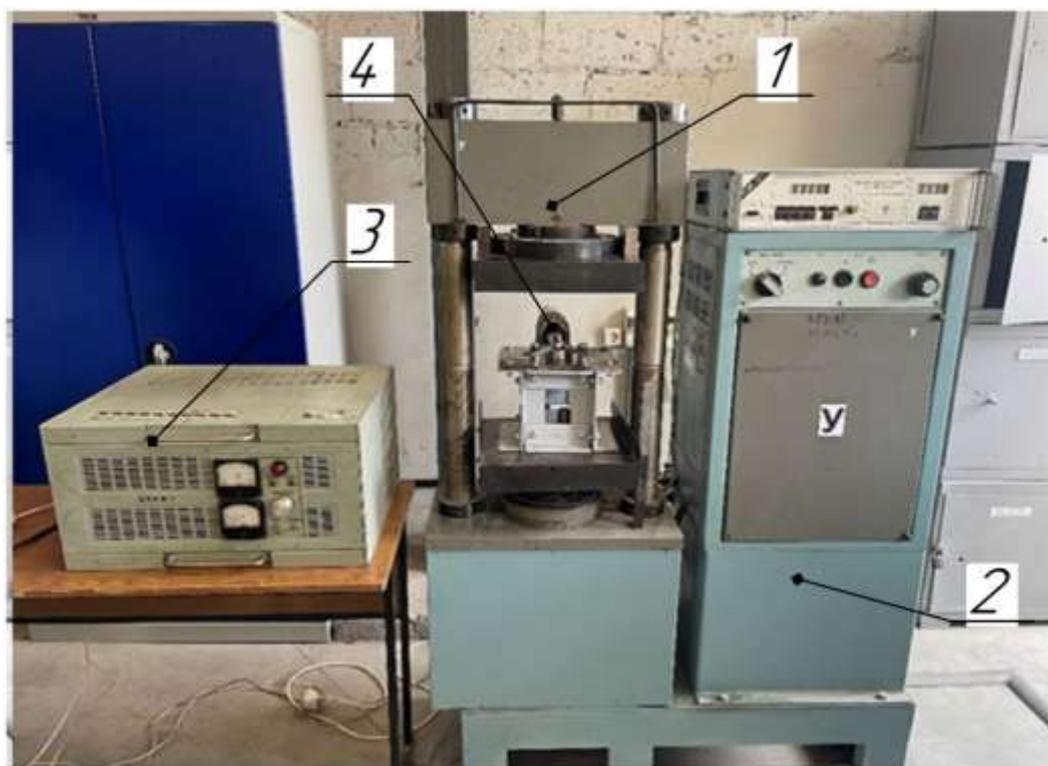


Рис. 3.1. Экспериментальный комплекс для калибровки отверстий:

1 – гидропресс; 2 – пульт управления; 3 – генератор УЗГ 2-1;

4 – преобразователь ПМС 1-1

В качестве технологического оборудования для осуществления процесса обработки дорном отверстий использовалась испытательная машина ИП 500, схема которой показана на рис. 3.2. Испытательная машина, выполняющая функции пресса, установлена на фундаменте 11 и состоит из нагружающего устройства 10, приводимого в действие с помощью электрогидравлического привода, пульта управления 2 и блока измерения 1. Нагружающее устройство установлено на двух

вертикальных резьбовых колоннах 7, соединенных траверсой 5, в которой крепится верхняя опорная плита 6. Для отображения данных испытания используется цифровой циферблат. Технические характеристики испытательной машины приведены в прил. 2.

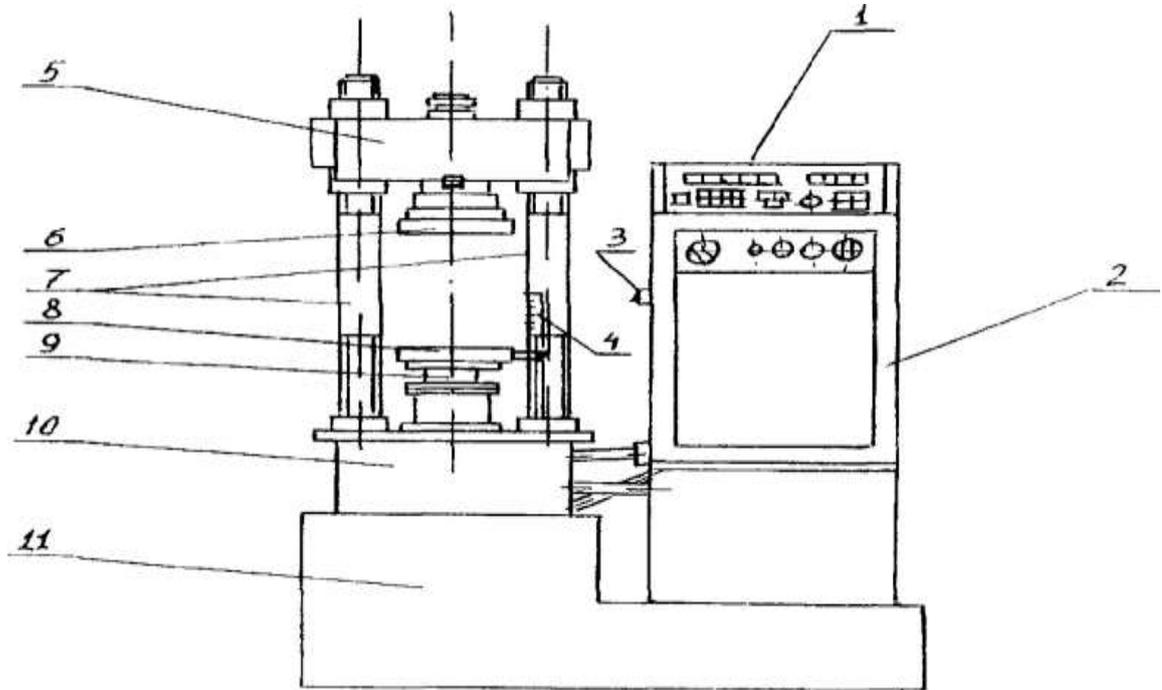


Рис. 3.2. Схема испытательной машины ИП 500:

- 1 – блок измерения; 2 – пульт управления; 3 – лампа; 4 – линейка;
 5 – траверса; 6 – верхняя опорная плита; 7 – вертикальные резьбовые колонны;
 8 – нижняя опорная плита; 9 – поршень; 10 – нагружающее устройство; 11 – фундамент

Для установки исследуемых образцов для калибрования применялось *специальное приспособление* (рис. 3.3), корпус которого собран из стальных уголков размером 45x45 мм, соединённых между собой резьбовыми соединениями. В уголках нижней части корпуса выполнены четыре отверстия, обеспечивающие крепление приспособления к поверхности нагружающего устройства испытательной машины. На верхней части корпуса с помощью резьбовых соединений установлена плита 1, в которой просверлено отверстие диаметром 36 мм, обеспечивающее свободный выход дорна после калибрования отверстия в образце.

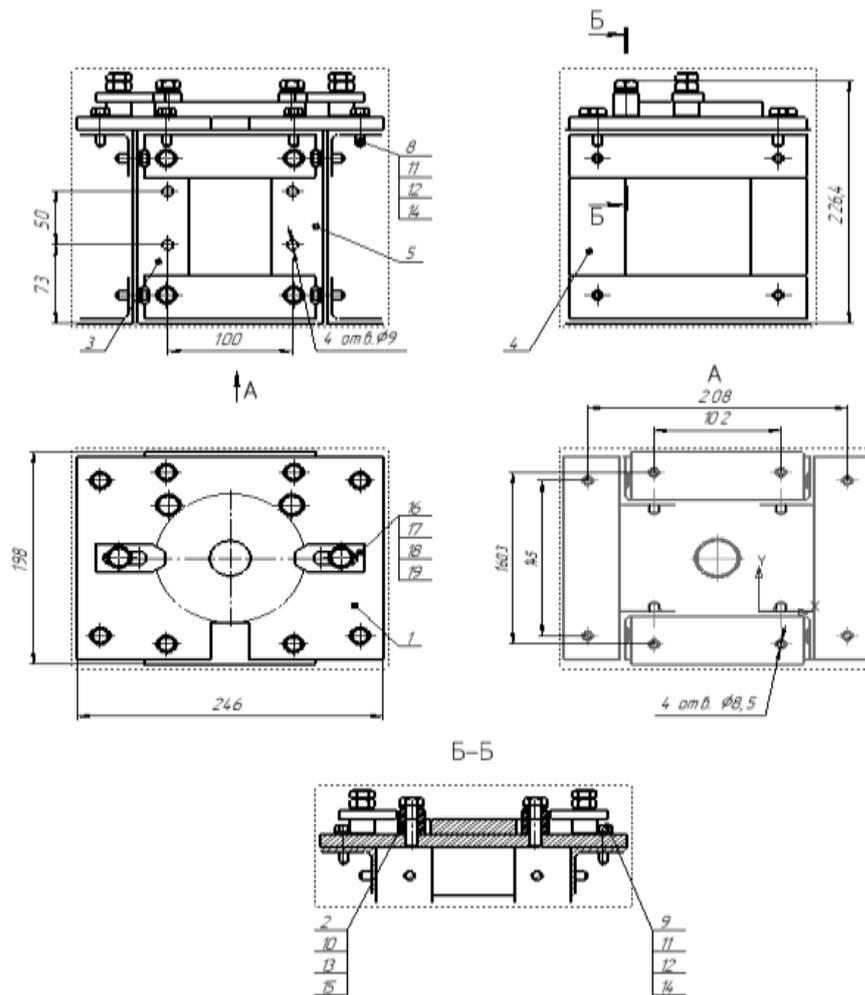


Рис. 3.3. Конструкция специального приспособления для установки образцов:

1 – плита верхняя; 2 – упорные штыри; 3–5 – уголки, образующие каркас;
8–10, 16 – болт; 11, 17 – гайка; 12–15, 18 – шайба; 19 – прижим станочный

Установка образцов в приспособлении осуществляется по схеме, приведенной на рис. 3.4. Для её реализации используется плоскость плиты 1, два упорных цилиндрических штыря и станочные прижимы.

Для возможности подвода к образцам источника ультразвуковых колебаний в корпусе приспособления предусмотрены 4 отверстия диаметром 9 мм, с помощью которых осуществляется крепление кронштейна, предназначенного для установки источника ультразвуковых колебаний. На рис. 3.5 представлено специальное приспособление в сборе с источником ультразвуковых колебаний.

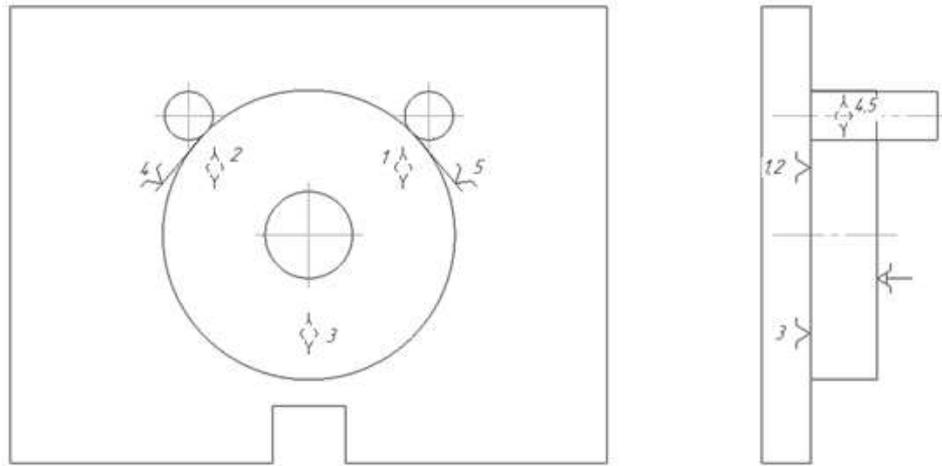


Рис. 3.4. Схема установки заготовки в приспособлении



Рис. 3.5. Специальное приспособление для установки образцов в сборе с преобразователем и концентратором УЗК

УЗКС экспериментального комплекса была спроектирована и организована в соответствии с рекомендациями, изложенными в гл. 2.

В качестве источника электрических колебаний использовался ультразвуковой генератор УЗГ 2-1,0/22 (см. рис. 3.1), обеспечивающий электрические колебания частотой 18–22 кГц, технические характеристики которого приведены в прил. 3.

Преобразование электрических колебаний в механические осуществлялось с помощью магнестрикционного преобразователя ПМС 1-1 (рис. 3.6),

обеспечивающего на выходе амплитуду ультразвуковых колебаний 1-2 мкм. Технические характеристики представлены в прил. 4.



Рис. 3.6. Магнитострикционный преобразователь ПМС 1-1

С целью обеспечения доступа и подвода к детали наиболее предпочтительной амплитуды ультразвуковых колебаний в пределах 4–6 мкм применялся волновод – концентратор, изготовленный в виде конического стержня с размерами, представленными на рис. 3.7.

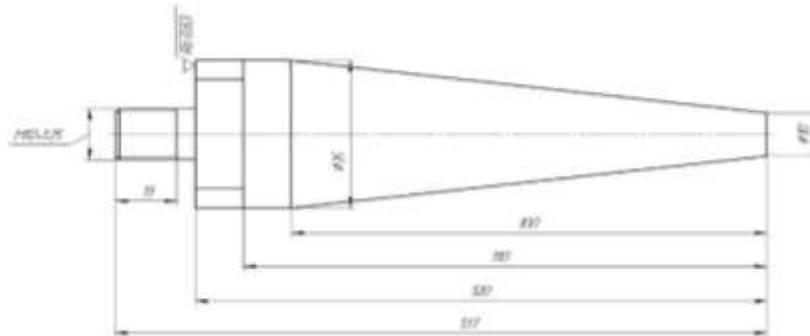


Рис. 3.7. Чертеж концентратора

Принятая и изготовленная конструкция концентратора в соответствии с расчетом по формуле (2.65)

$$K = 3,5 \left(\cos \left(\frac{2200}{5900} 0,12 \right) - \frac{3,5-1}{3,5 \left(\frac{2200}{5900} 0,12 \right)} \sin \left(\frac{2200}{5900} 0,12 \right) \right) = 3,43$$

позволила увеличить амплитуду колебаний на выходе в 3,43 раза и осуществлять её варьирование в принятом выше диапазоне.

Для исключения потерь в УЗКС концентратор по наибольшему торцу (диаметром 35 мм) плотно совмещался с торцом преобразователя путем винчивания его до упора. Плотность контакта концентратора с деталью осуществлялась вручную с последующей фиксацией преобразователя в приспособлении с помощью специальных скоб.

Стабильность резонансного режима и его подналадка осуществлялись с помощью датчика акустической обратной связи (АОС), связанного с устройством автоматической поднастройки частоты (АПЧ).

3.2. Образцы и инструменты

Образцы для проведения исследований процесса калибрования в условиях УЗК были изготовлены в виде цилиндрических дисков (рис. 3.8) с номинальным наружным диаметром $D_n = 60, 80, 100$, высотой $L = 20$ мм и внутренним диаметром отверстия $d_{o.min} = 28,83-31,20$ мм из сталей 35, 45 и 30ХГСА. Исходное отверстие в дисках получалось методом растачивания, с высотой неровностей профиля поверхности, равной $Rz = 10-12,5$ мкм. Механические свойства материала образцов представлены в табл. 3.1.



Рис. 3.8. Образцы для экспериментальных исследований

Механические свойства исследуемых образцов

Материал образцов	Исходное состояние	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Микротвердость, МПа	
				НВ	НV
Сталь 35	Нормализованная	530	315	163	170
Сталь 30ХГСА	Нормализованная	800	600	241	255
Сталь 45	Нормализованная	600	355	197	210
Сталь 45	Закаленная	850	580	260	275

Для калибрования отверстий были применены цилиндрические дорны (рис. 3.9), изготовленные из стали Р6М5 твердостью HRC 63...66. Геометрические параметры дорнов: угол заборного конуса $\alpha = 5^\circ \pm 10'$, угол обратного конуса 4° , ширина калибрующей ленточки $b = 2,3 \pm 0,2$ мм, диаметр дорна $d = 28,97-30,46$ мм.



Рис. 3.9. Общий вид инструмента-дорна

3.3. Технические средства контроля

Для установления высоты неровностей профиля исходной и формируемой в процессе калибрования поверхности отверстия применялся профилометр с цифровым отсчетом Mitutoyo SurfTest SJ-210 (рис. 3.10), позволяющий осуществлять измерение параметров шероховатости с погрешностью 5% с выводом результатов измерения на дисплей.



Рис. 3.10. Профилометр SURFTEST SJ-210

Микротвердость поверхности исследуемых образцов оценивалась методом индентирования по Виккерсу с помощью микротвердомера ПМТ-3М (рис. 3.11) с диапазоном нагрузки от 0,0196 до 4,9 Н и увеличением микроскопа в 130, 500, 800 крат.



Рис. 3.11. Прибор для измерения микротвердости ПМТ-3М

Для наблюдения состояния поверхности до и после калибрования использовался микроскоп металлографический исследовательский инвертированный ЛабоМет-И (рис. 3.12) с диапазоном увеличения $\times 40-400$, возможностью перемещения препарата в горизонтальной плоскости в продольном и поперечном направлениях и размерами предметного столика 180×200 мм.



Рис. 3.12. Микроскоп ЛабоМет-И

3.4. Порядок калибрования отверстий на экспериментальном комплексе

Калибрование отверстий предусматривает следующую последовательность действий:

1. Приспособление устанавливается на подвижной плите испытательной машины таким образом, чтобы оси отверстия в верхней плите приспособления и упорного штока, прикрепленного к траверсе, совпадали (предельное отклонение 0,5 мм).

2. Образец базируется на плоскость верхней плиты приспособления и центрируется относительно оси отверстия в верхней плите с помощью направляющего ступенчатого валика. Занятое образцом положение фиксируется штырями и прижимами.

3. Концентратор, расположенный на кронштейне перпендикулярно оси образца, приводится в соприкосновение с наружной поверхностью образца со статическим усилием 140 Н и фиксируется в этом положении.

4. Дорн вручную устанавливается в отверстие образца и поджимается к нему штоком, в котором предусмотрено цилиндрическое упорное глухое отверстие, обеспечивающее центрирование дорна относительно оси отверстия.

5. Включается ультразвуковой генератор, который через преобразователь и концентратор наводит в образце ультразвуковое поле.

6. Включается испытательная машина, приводящая в движение подвижную плиту вместе с приспособлением, и проталкивает дорн через отверстие образца.

7. После прохождения отверстия образца дорн через отверстие в верхней плите приспособления свободно удаляется из приспособления.

На рис. 3.13 представлена схема калибровки отверстия на экспериментальном прессе.

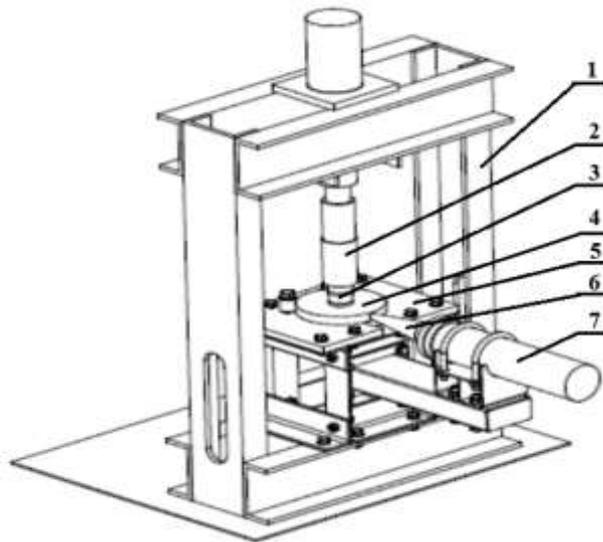


Рис. 3.13. Вариант рабочей схемы калибровки отверстия на экспериментальном прессе:

1 – рама; 2 – шток; 3 – дорн; 4 – заготовка; 5 – специальное приспособление;

6 – концентратор; 7 – преобразователь

Методика проведения экспериментальных исследований обработки опытных данных приведена в следующих главах диссертации.

Выводы по главе 3

1. Выбранные и изготовленные оборудование и технические средства отвечают современным требованиям, обеспечивают реализацию технологической схемы калибрования отверстий с наложением ультразвуковых колебаний на деталь, а также выполнение экспериментальных исследований, предусмотренных планом диссертации.

2. Образцы и инструмент соответствуют реальным деталям и средствам инструментального оснащения технологических операций калибрования, применяемым в производственных условиях.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КАЛИБРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

4.1. Исследование эффективности ультразвукового воздействия на деталь

4.1.1. Определение коэффициента затухания УЗК в детали

Для оценки коэффициента затухания колебаний в различных точках заготовки при воздействии на неё УЗК была проведена серия экспериментальных исследований. Контрольно-измерительная схема исследований коэффициента затухания УЗК, представленная на рис. 4.1, была реализована на базе опытно-экспериментальной установки процесса калибровки отверстий.

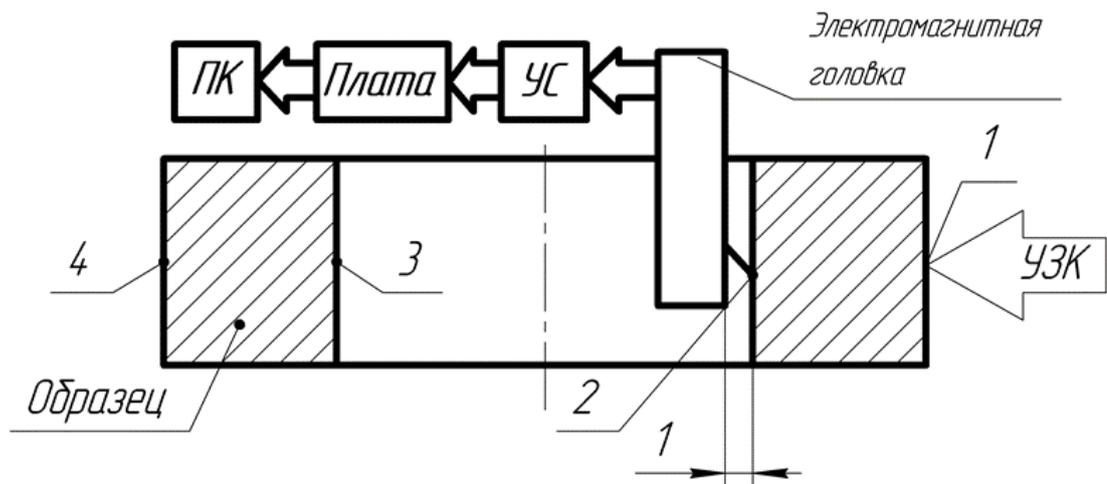


Рис. 4.1. Контрольно-измерительная схема исследований коэффициента затухания УЗК: 1–4 – точки измерения выходного сигнала ЭДС

Исследования осуществлялись следующим образом: возбуждаемая концентратором УЗКС волна распространяется по образцу и регистрируется электромагнитной головкой модели 2К05-04 (рис. 4.2), которая жёстко закреплена на стойке и имеет характеристики, приведённые в табл. 4.1.



Рис. 4.2. Общий вид электромагнитной головки модели 2K05-04

Таблица 4.1

Основные характеристики электромагнитной головки модели 2K05-04

Параметр	Значение
Количество каналов, шт.	2
Прижимная сила, г	1,5-2
Тип иглы	ММ
Частотный диапазон, Гц	20-20000
Выходное напряжение при 1000 Гц, мВ	5
Чувствительность при 1000 Гц, см / с	5

В корпусе электромагнитной головки размещены две катушки. В отверстии корпуса предусмотрен резиновый держатель, в котором закреплена игла. Она может свободно перемещаться в двух направлениях. На конце иглы, расположенной в корпусе, закреплён постоянный магнит. Таким образом, при перемещении иглы магнит перемещается относительно катушек, наводя в их обмотках ЭДС. Уровень выходного напряжения зависит от величины углового перемещения иглы и скорости ее перемещения. Уровень выходного напряжения с головки (порядка 5 мВ) низкий и измерение его весьма проблематично. Для увеличения уровня напряжения использовался усилитель сигнала рис. 4.3. Усилитель позволил увеличить выходное напряжение в 100 раз, т.е. до 500 мВ. Для его функционирования требовалось питание от 12 до 24 В. Для реализации питания использовались две последовательно подключенные батарейки типа «Крона», обеспечивающие напряжение питания порядка 18 В. Согласно рассмотренной схеме изготовлена плата, показанная на рис. 4.4.

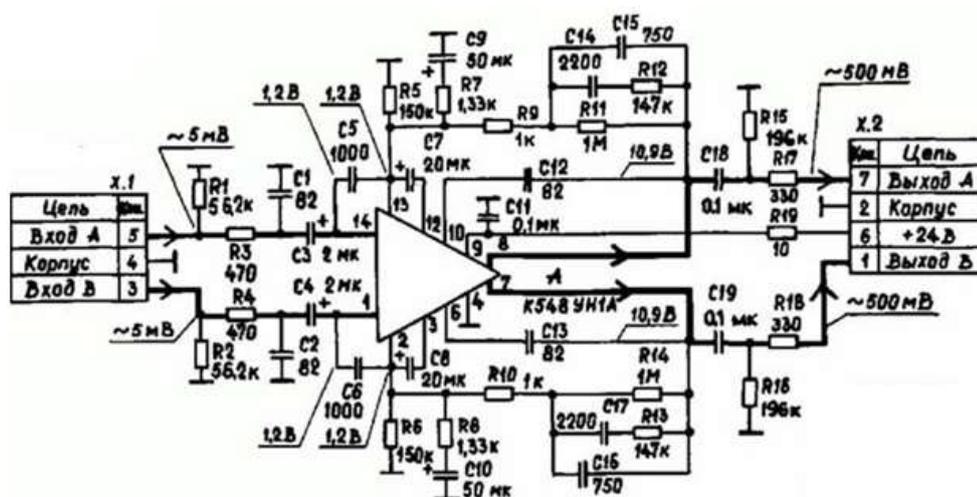


Рис. 4.3. Электрическая принципиальная схема усилителя сигнала



Рис. 4.4. Плата усилителя сигнала

Для визуализации измерительного сигнала и возможности отслеживания его во времени к усилителю подключалась плата Arduino Uno R3 (рис. 4.5).



Рис. 4.5. Плата Arduino Uno R3

Плата, в свою очередь, подключалась к персональному компьютеру. С помощью программного обеспечения Arduino IDE сигнал отображался в графическом виде и в виде конкретных значений. На рис. 4.6, 4.7 проиллюстрирован акустический сигнал, регистрируемый электромагнитной

головкой. Дискретность измерения составляла 1 мс. По величине амплитуды ЭДС оценивалась амплитуда колебаний УЗК в исследуемых точках.

Для имитации единичного импульса измерения производились при установившихся параметрах ультразвуковых колебаний, воздействующих на заготовку, и при их прекращении. Таким образом, измерялись амплитуды рабочих и затухающих колебаний.

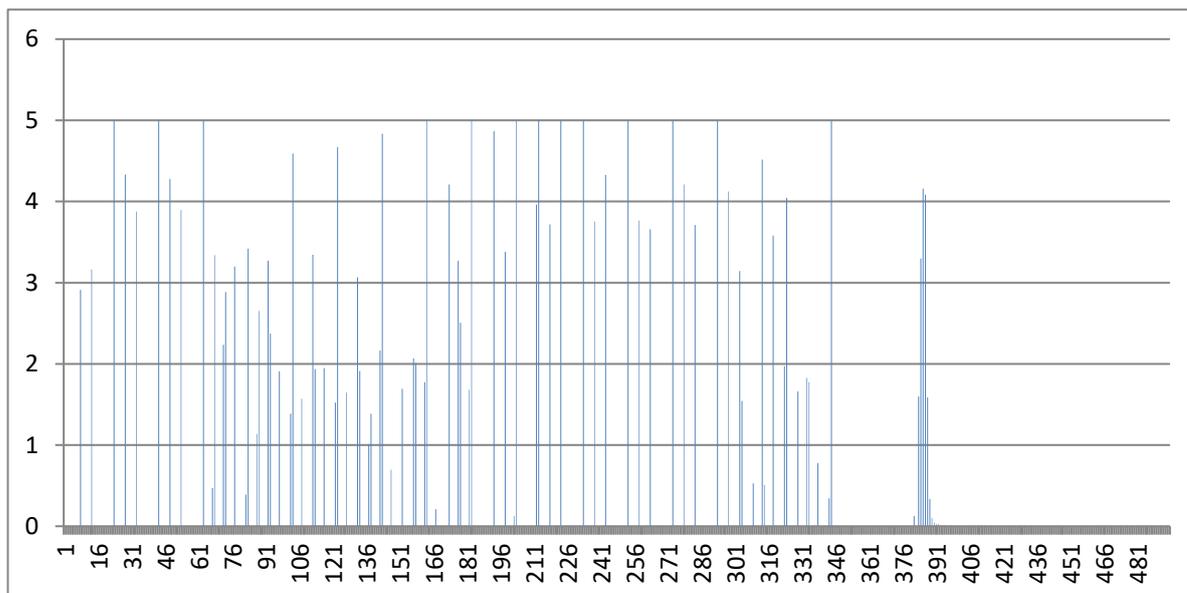


Рис. 4.6. Иллюстрация сигнала, зафиксированного в точке 2,
на экране компьютера

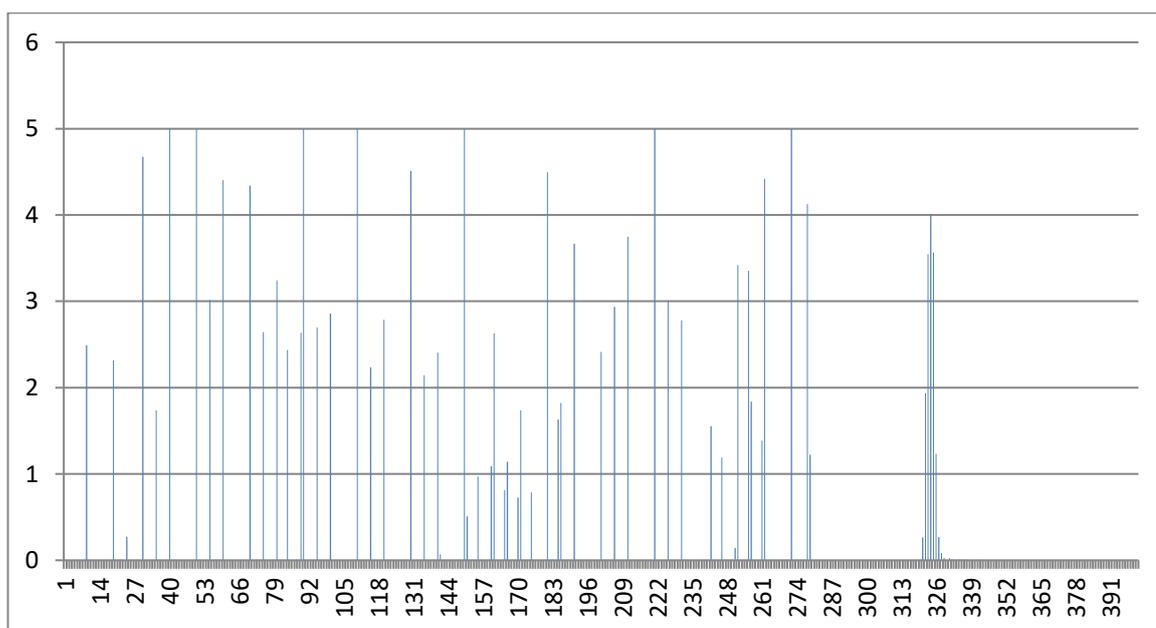


Рис. 4.7. Иллюстрация сигнала, зафиксированного в точке 3,
на экране компьютера

В качестве образцов для исследования коэффициента затухания УЗК использовались цилиндрические образцы в виде дисков толщиной 20 мм с диаметром отверстия $D_0=29$ мм и разными наружными диаметрами $D_H = 60, 80, 100$ мм, изготовленные из сталей 35 (НВ 163), 45 (НВ197), 30ХГСА (НВ241), 45 (закалённая до НВ260). Образцы устанавливались торцевой поверхностью на установочную плоскость приспособления и фиксировались прижимами.

Измерения величин выходного сигнала УЗК проводились в точках образцов, представленных на рис. 4.8, и оценивались по величине изменений амплитуды напряжений наводимой в электромагнитной головке ЭДС в B . Измерения в каждой точке проводились до 5 раз.

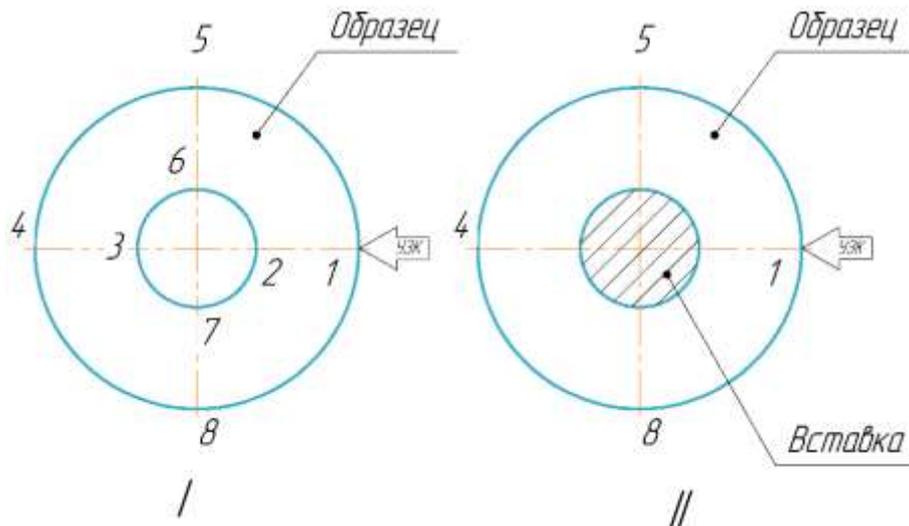


Рис. 4.8. Точки оценки величины амплитуды УЗК в образцах:

I – без цилиндрической вставки; *II* – с запрессованной цилиндрической вставкой

Величина первоначального поджатия датчика *l* была принята равной 2 мм и оставалась постоянной для всех проведенных измерений. Ее контроль осуществлялся с помощью щупа. В табл. 4.2 представлены результаты измерений выходного сигнала УЗК в исследуемых точках образцов.

Экспериментальные средние значения выходного сигнала УЗК (мВ)
в исследуемых точках образцов из разных материалов и с разным диаметром
наружной цилиндрической поверхности D_n

Материал образцов и D_n , мм	Точки измерений							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>I. Образцы без цилиндрической вставки</i>								
Сталь 35, $D_n=60$ мм	3,77	3,502	3,270	3,468	3,393	3,185	3,311	3,543
Сталь 45, $D_n=60$ мм	3,77	3,518	3,572	3,72	3,651	3,49	3,435	3,67
Сталь 30ХГСА, $D_n=80$ мм	3,77	3,343	3,231	3,553	3,592	3,258	3,107	3,460
Сталь 45, $D_n=80$ мм	3,77	3,335	3,349	3,628	3,615	3,328	3,275	3,62
Сталь 45, $D_n=100$ мм	3,77	3,232	3,2	3,63	3,62	3,18	3,142	3,64
Сталь 45 (закалённая), $D_n=60$ мм	3,77	3,54	3,428	3,581	3,524	3,369	3,302	3,506
<i>II. Образцы с запрессованной цилиндрической вставкой из стали</i>								
Сталь 45, $D_n=60$ мм	3,77	х	х	3,69	3,536	х	х	3,551
Сталь 45 (закалённая), $D_n=60$ мм	3,77	х	х	3,51	3,6	х	х	3,57

Полученные результаты экспериментальных исследований проиллюстрированы на рис. 4.9–4.11. Так, представленные диаграммы изменения величины амплитуды ультразвукового импульса воздействия в исследуемых точках цилиндрических образцов с отверстием показали, что они имеют идентичный характер изменения выходного сигнала как в направлении ультразвукового воздействия, так и в перпендикулярном направлении.

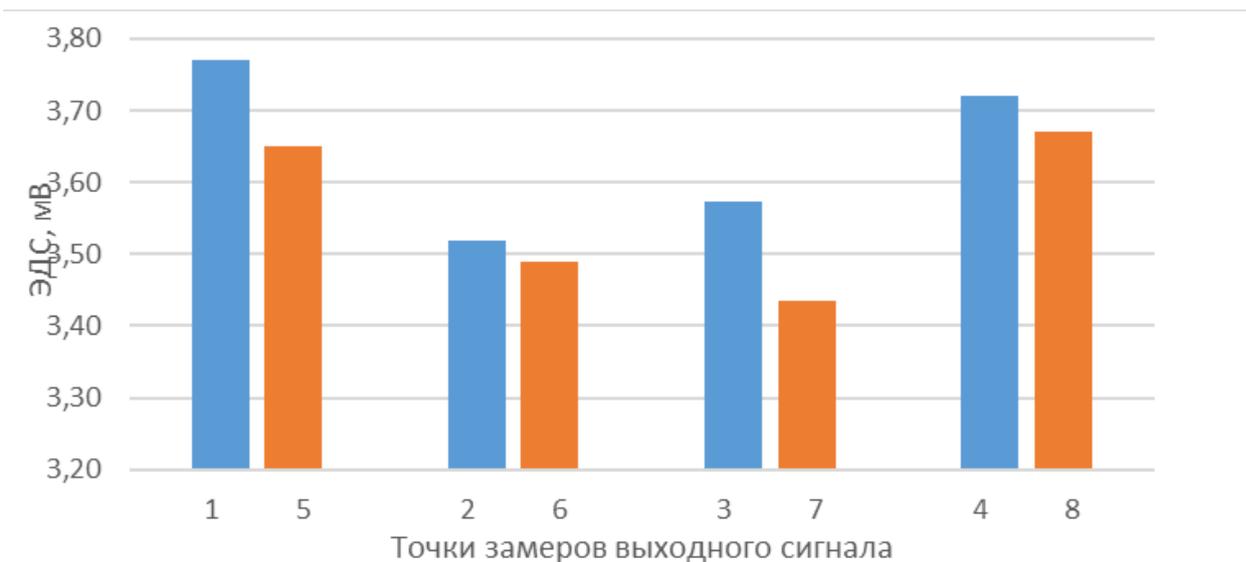


Рис. 4.9. Значения величин амплитуды выходного сигнала УЗК в исследуемых точках 1–4 (расположенных в направлении действия импульса) и 5–8 (расположенных перпендикулярно действию импульса) образцов из стали 45 с $D_n = 60$ мм

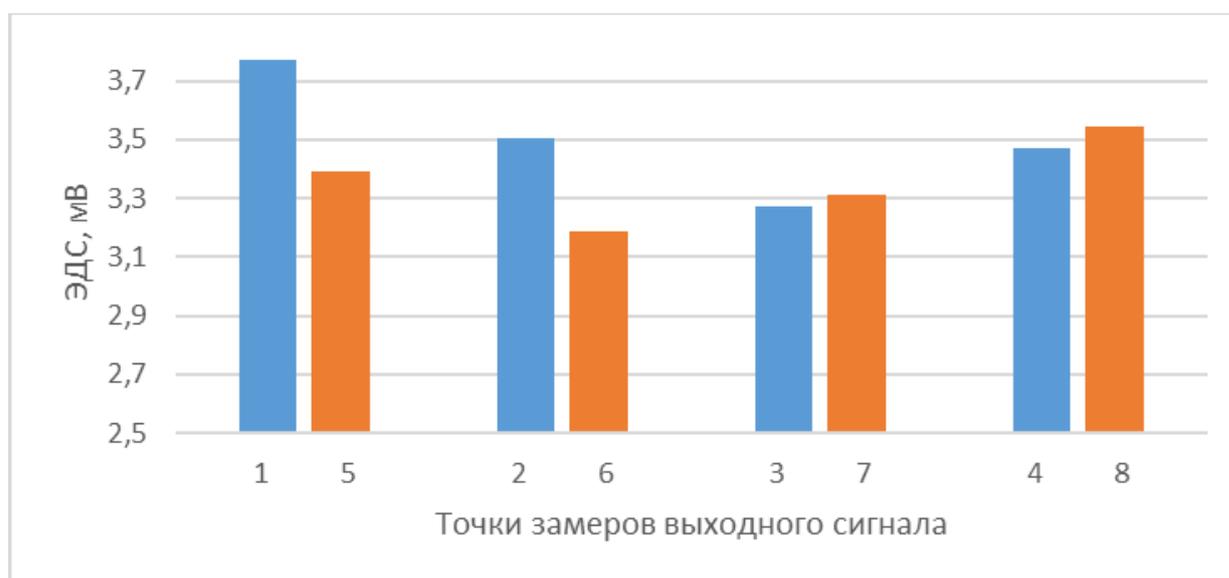


Рис. 4.10. Значения величин амплитуды выходного сигнала УЗК в исследуемых точках 1–4 (расположенных в направлении действия импульса) и 5–8 (расположенных перпендикулярно действию импульса) образцов из стали 35 с $D_n = 60$ мм

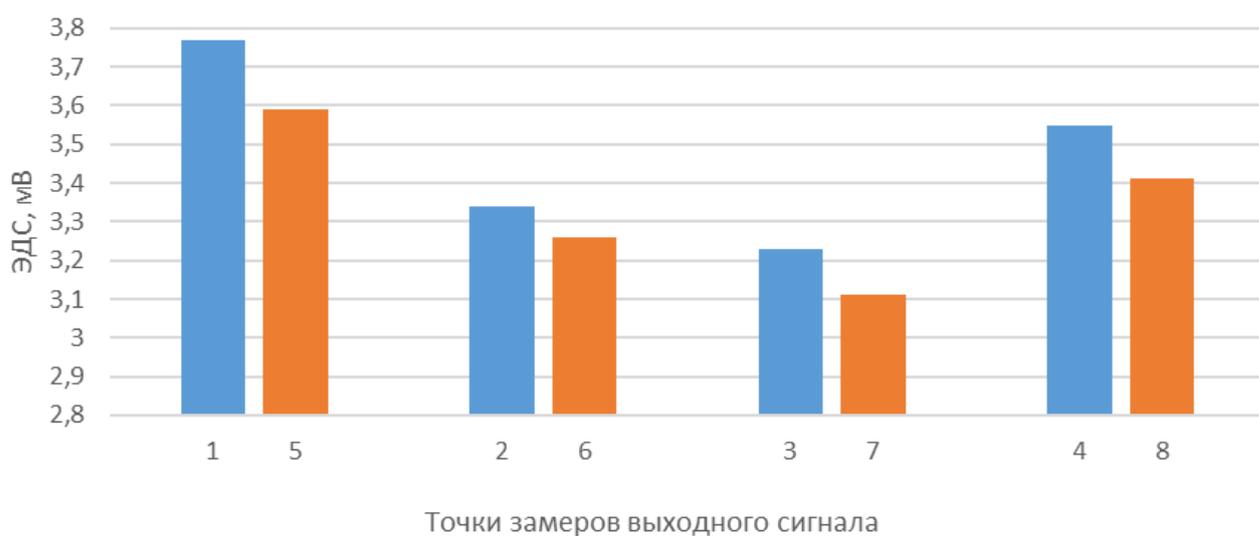


Рис. 4.11. Значения величин амплитуды выходного сигнала УЗК в исследуемых точках 1–4 (расположенных в направлении действия импульса) и 5–8 (расположенных перпендикулярно действию импульса) образцов из стали 30ХГСА, $D_n = 80$ мм

Идентичный характер изменения выходного сигнала в контрольных точках образцов обусловлен одинаковым механизмом распространения ультразвуковых волн и формированием акустического поля, которое свойственно только исследуемому типу образцов.

Об адекватности предложенной в п. 2.4.3 геометрической модели ультразвукового поля, создаваемого в цилиндрической детали с отверстием, свидетельствуют результаты исследований, представленные в табл. 4.3–4.5 и на рис. 4.12–4.18. Отклонение величин выходного сигнала УЗК в исследуемых точках, расположенных на наружной цилиндрической поверхности образцов и на поверхности отверстия, не превышает 10 %, что находится в пределах допустимой экспериментальной ошибки.

Таблица 4.3

Оценка отклонения величины выходного сигнала УЗК в точках, расположенных на наружной поверхности образцов

Материал образцов и D_n , мм	Средняя величина сигнала E_{cp}	Точки измерений			
		1	5	4	8
Сталь 35, $D_n=60$ мм	3,581	3,77	3,393	3,468	3,543
	% отклон. от E_{cp}	5,3	5,2	3,2	1,06
Сталь 45, $D_n=60$ мм	3,702	3,77	3,651	3,72	3,67
	% отклон. от E_{cp}	1,8	1,4	0,5	0,9
Сталь 30ХГСА, $D_n=80$ мм	3,593	3,77	3,592	3,553	3,460
	% отклон. от E_{cp}	4,9	0,03	1,1	3,7
Сталь 45, $D_n=80$ мм	3,658	3,77	3,615	3,628	3,62
	% отклон. от E_{cp}	3,1	1,2	0,8	1
Сталь 45, $D_n=100$ мм	3,665	3,77	3,62	3,63	3,64
	% отклон. от E_{cp}	2,9	1,2	1	0,7
Сталь 45 (закаленная), $D_n=60$ мм	3,595	3,77	3,524	3,581	3,506
	% отклон. от E_{cp}	4,9	2	0,4	2,5

Таблица 4.4

Оценка отклонения величины выходного сигнала УЗК в точках, расположенных на поверхности отверстия образцов

Материал образцов и D_n , мм	Средняя величина сигнал E_{cp}	Точки измерений			
		2	6	3	7
Сталь 35, $D_n=60$ мм	3,317	3,502	3,185	3,27	3,311
	% отклон. от E_{cp}	5,6	4	1,4	0,2
Сталь 45, $D_n=60$ мм	3,504	3,518	3,49	3,572	3,435
	% отклон. от E_{cp}	0,4	0,4	1,9	2

Окончание табл. 4.4

Материал образцов и D_n , мм	Средняя величина сигнала E_{cp}	Точки измерений			
		2	6	3	7
Сталь 30ХГСА, $D_n=80$ мм	3,235	3,343	3,258	3,231	3,107
	% отклон. от E_{cp}	3,3	0,7	0,1	4
Сталь 45, $D_n=80$ мм	3,322	3,335	3,328	3,349	3,275
	% отклон. от E_{cp}	0,09	0,2	0,8	1,4
Сталь 45, $D_n=100$ мм	3,189	3,232	3,18	3,2	3,142
	% отклон. от E_{cp}	1,4	0,3	0,4	1,5
Сталь 45 (закаленная), $D_n=60$ мм	3,41	3,54	3,369	3,428	3,302
	% отклон. от E_{cp}	3,8	1,2	0,5	3,2

Таблица 4.5

Оценка отклонения величины выходного сигнала УЗК в точках, расположенных на наружной поверхности образцов с запрессованной втулкой

Материал образцов и D_n , мм	Средняя величина сигнала E_{cp}	Точки измерений			
		1	5	4	8
Сталь 45, $D_n=60$ мм	3,637	3,77	3,536	3,69	3,551
	% отклон. от E_{cp}	3,7	2,8	1,5	2,4
Сталь 45, (закалённая) $D_n=60$ мм	3,613	3,77	3,6	3,51	3,57
	% отклон. от E_{cp}	4,4	0,4	2,9	1,2

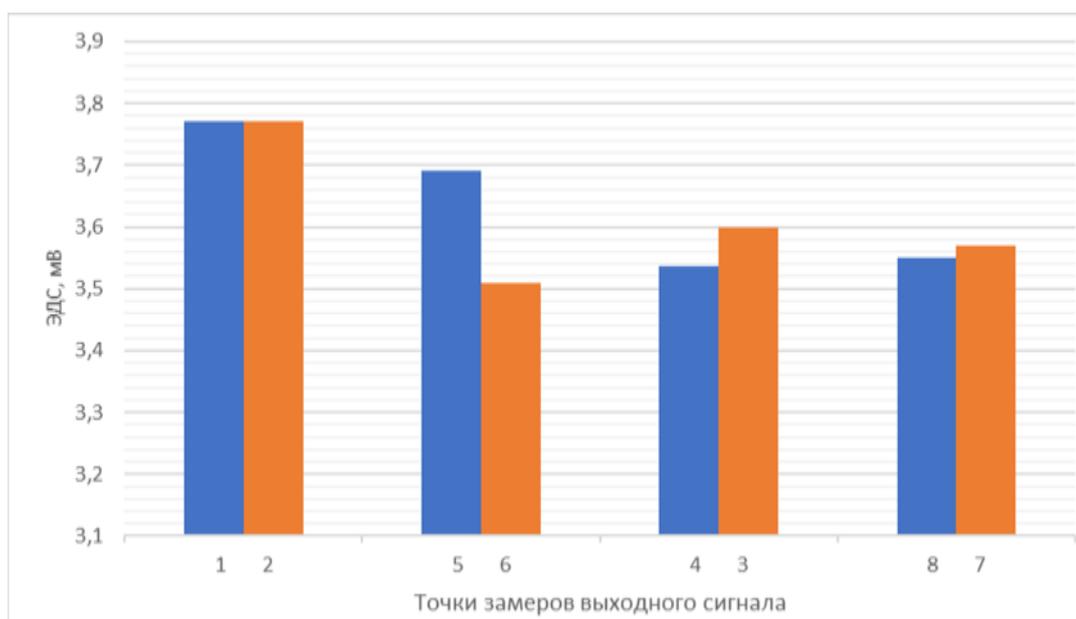


Рис. 4.12. Значения величин амплитуды выходного сигнала УЗК в исследуемых точках 1, 5, 4, 8 (расположенных на наружной цилиндрической поверхности) и 2, 6, 3, 7 (расположенных на поверхности отверстия) образцов из стали 45 с $D_n = 60$ мм

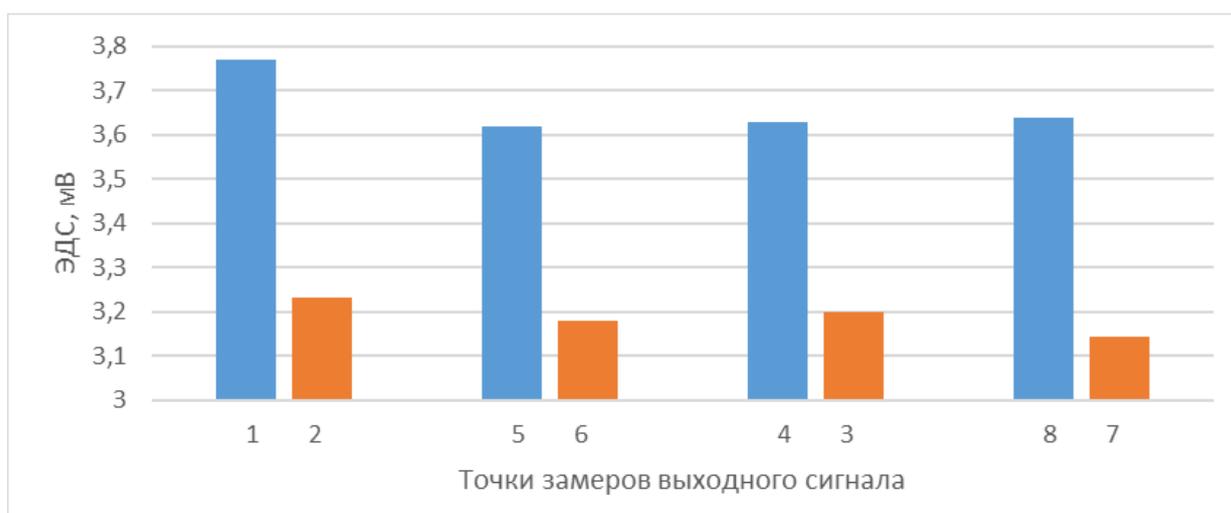


Рис. 4.13. Значения величин амплитуды выходного сигнала УЗК в исследуемых точках 1, 5, 4, 8 (расположенных на наружной цилиндрической поверхности) и 2, 6, 3, 7 (расположенных на поверхности отверстия) образцов из стали 45 с $D_n = 100$ мм

Анализ результатов изменения выходного сигнала УЗК в исследуемых точках образцов с запрессованной в отверстие цилиндрической вставкой (имитирующей дорн), приведённый на рис. 4.14 и в табл. 4.5, показал, что её наличие в отверстии не оказывает существенного влияния на изменение модели геометрии ультразвукового поля в образце.

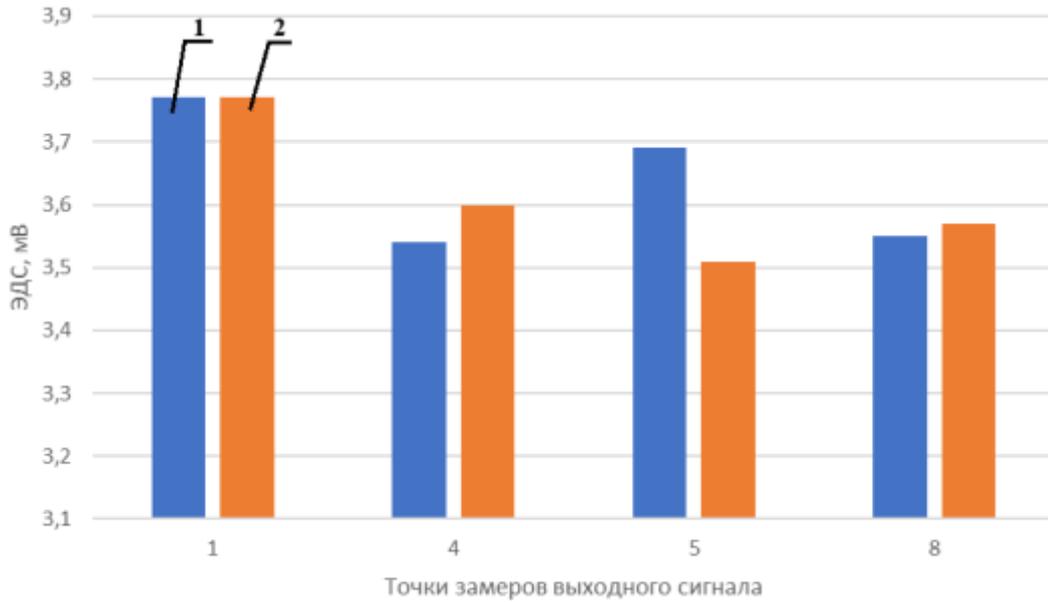


Рис. 4.14. Значения величин амплитуды выходного сигнала УЗК в исследуемых точках 1, 5, 4, 8 (расположенных на наружной цилиндрической поверхности) образцов с запрессованной втулкой: 1 – сталь 45; 2 – сталь 45 (закалённая); $D_n = 60$ мм

Вышеприведённые исследования изменения выходного сигнала УЗК в цилиндрических образцах с различным наружным диаметром показали, что по мере удаления от источника УЗК амплитуда напряжения ЭДС, фиксируемая электромагнитной головкой в исследуемых точках, постепенно убывает в радиальном направлении к оси образца (см. рис. 4.15).

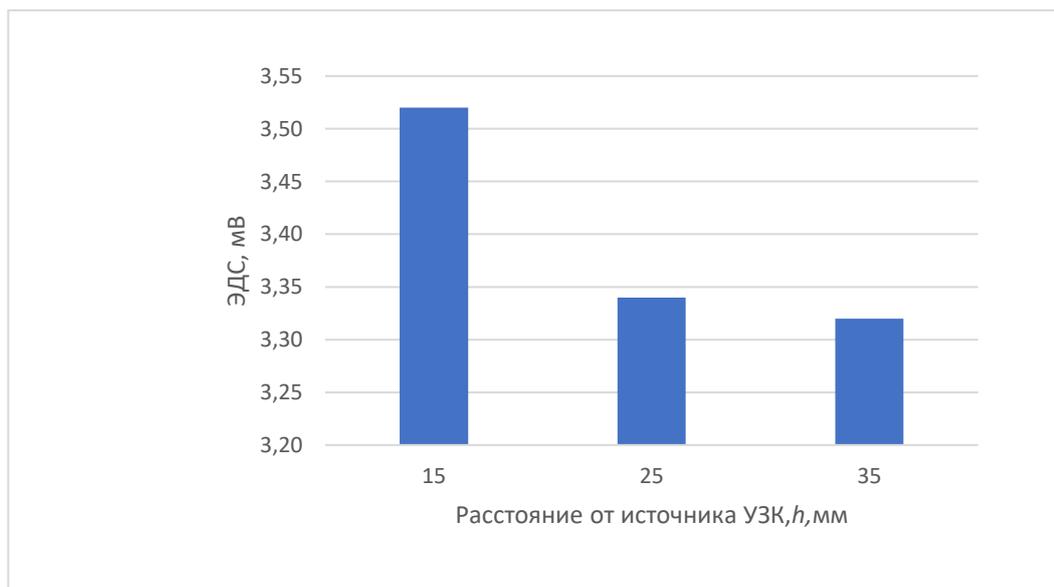


Рис. 4.15. Изменение амплитуды ультразвукового сигнала при удалении от точки ультразвукового воздействия. Материал образцов – сталь 45

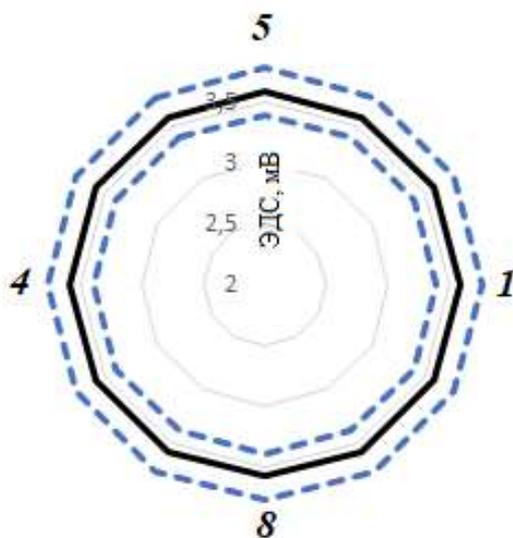
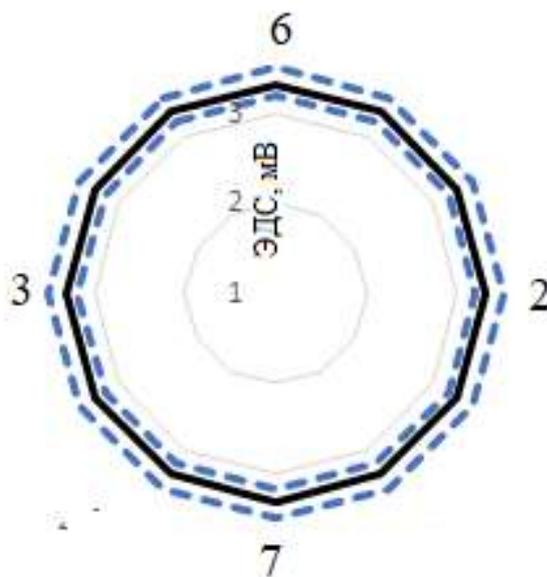


Рис. 4.16. Круговая диаграмма, иллюстрирующая отклонения величины выходного сигнала УЗК (амплитуды ЭДС) в точках, расположенных на наружной поверхности образцов из стали 35, $D_n = 60$ мм



4.17. Круговая диаграмма, иллюстрирующая отклонения величины выходного сигнала УЗК (амплитуды ЭДС) в точках, расположенных на образцах из стали 35, $D_n = 60$ мм

Убывание амплитуды напряжения ЭДС обусловлено наличием потерь в среде, приводящих к постепенному затуханию колебаний в процессе прохождением лучей от поверхности к поверхности. При этом в условиях установившегося ультразвукового поля в соответствии с принятой моделью в цилиндрическом образце формируются по концентричным окружностям кольцевые волновые фронты (см. рис. 4.16) различной напряженности,

снижающейся от наружной поверхности образца к поверхности отверстия и оказывающие определенное акустическое давление в локальной зоне их действия. Именно этот эффект и был положен в основу теоретических исследований напряженного состояния поверхностного слоя отверстия, обработанного методом калибрования с наложением ультразвуковых колебаний на деталь, рассмотренный в гл. 2.

Результаты экспериментальных исследований и установленные при этом закономерности влияния УЗК на формирование акустического поля деталей типа дисков с отверстием показали, что применённый для исследований индукционный метод вполне обоснованно отражает реалии процесса, приведенные в научно-технической литературе [3, 58]. Таким образом, результаты исследования могут быть приняты для определения коэффициента затухания УЗК в исследуемых материалах (табл. 4.6) с использованием корреляционного соотношения

$$\delta = \frac{1}{h} \ln \left(\frac{p_0}{p} \right) \approx \frac{1}{h} \ln \left(\frac{E_0}{E} \right). \quad (4.1)$$

Таблица 4.6

Экспериментальная оценка коэффициента затухания δ
в материалах исследуемых образцов

Материал и размер образца	δ в сечениях образца				$\delta_{\text{ср}}$
	1-2	4-3	5-6	7-8	
Сталь 35, $D_H=60$ мм	0,005	0,0039	0,0042	0,0045	0,0044
Сталь 45, $D_H=60$ мм	0,0046	0,0027	0,003	0,0044	0,0038
Сталь 45, $D_H=80$ мм	0,0049	0,0032	0,0033	0,004	
Сталь 45, $D_H=100$ мм	0,0044	0,0036	0,0037	0,0042	
Сталь 30ХГСА ($D_H=80$ мм)	0,0048	0,0038	0,0039	0,0043	0,0042
Сталь 45 (закалённая), $D_H=60$ мм	0,0042	0,0029	0,003	0,004	0,0035

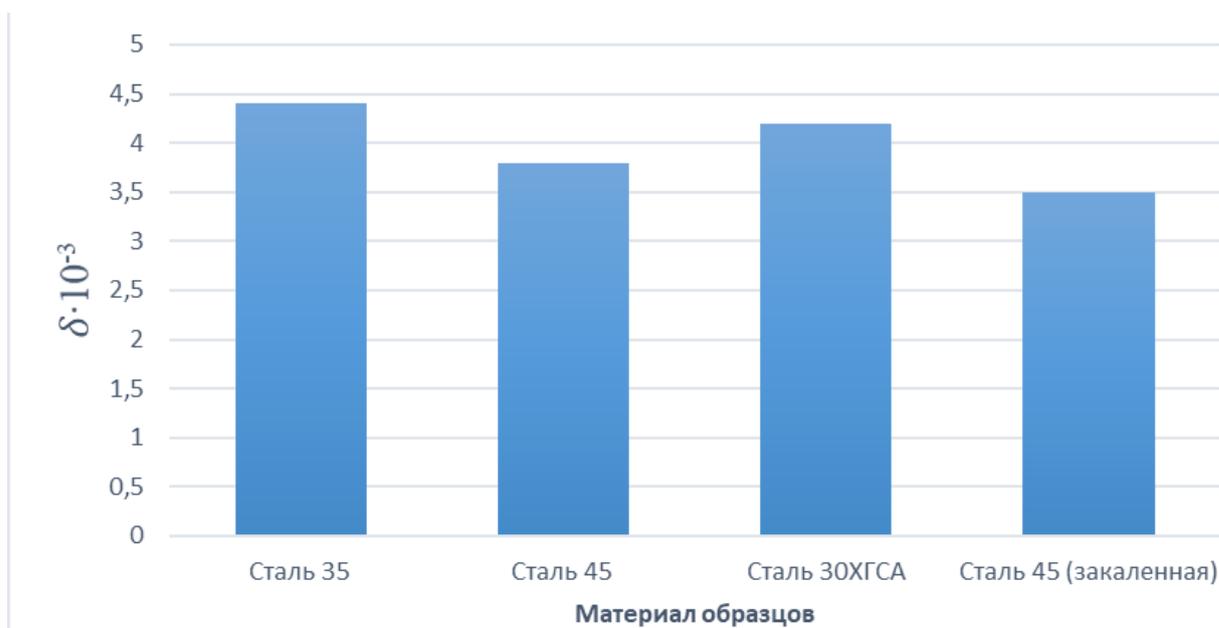


Рис. 4.18. Значения коэффициентов затухания в исследуемых материалах образцов

Полученные значения коэффициента затухания, как следует из рис. 4.18, зависят от физико-механических свойств и структурного состояния материала образцов. Так, снижение коэффициента затухания для стали 45 по сравнению со сталью 35 обусловлено повышением углерода в стали. Наличие в стали карбидообразующих элементов, таких как хром и другие, приводит к его повышению, а закалка к снижению.

Эти значения коэффициента затухания ультразвуковых волн удовлетворительно согласуются с исследованиями, приведенными в работах [34, 52, 58, 75, 77], и могут быть использованы при проектировании операций калибрования отверстий в условиях воздействия УЗК на деталь.

4.1.2. Оценка влияния УЗК на микротвердость

В связи с тем, что микротвердость поверхности является наиболее комплексной характеристикой механических свойств материала, в п. 2.5.1 предложена зависимость (2.81). При оценке механических свойств материала по микротвердости эта зависимость будет иметь вид

$$H_{\mu_{\text{узк}}} = (H_{\mu_{\text{исх}}} - \rho c \omega A) \eta, \text{ Па.} \quad (4.2)$$

Для подтверждения эффекта, вытекающего из зависимостей (2.81), (4.2), отражающих линейный характер снижения микротвердости материала в условиях воздействия ультразвукового поля, были проведены экспериментальные исследования, которые выполнялись в следующей методической последовательности.

В качестве образцов использовались цилиндрические диски из сталей 45 и 30ХГСА, полученные путем точения (с отверстием диаметром $D_0 = 30$ мм, толщиной 20 мм и наружным диаметром 60 мм). Диски устанавливались на рабочем столе экспериментального комплекса и подвергались ультразвуковому воздействию в течение 60 с с частотой $\omega = 22$ кГц и амплитудой $A = 6$ мкм.

Исходные диски и диски после ультразвукового воздействия разрезались на сегменты, на основе которых изготавливались микрошлифы поверхности (рис. 4.19) согласно ГОСТ 5640-68.

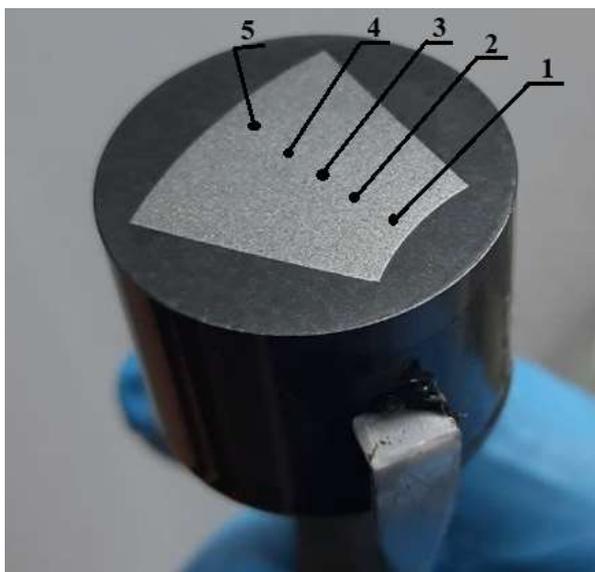


Рис. 4.19. Вид шлифов образцов для исследования микротвердости:

1–5 – точки измерения микротвердости

Замеры микротвердости проводились с помощью ПМТ-3М в точках поверхности микрошлифа на расстоянии 5 мм в радиальном направлении и с пятикратной повторяемостью замера по радиусу сегмента. Результаты

проведённых исследований представлены в табл. 4.7. В этой же таблице приведены расчетные значения микротвердости, выполненные на основе выражения (4.2).

Таблица 4.7

Расчетные и экспериментальные значения микротвердости материала образцов, подвергнутых ультразвуковому воздействию

Материал образца	Точки замера	Исходный		После УЗК			
		H_{μ} , МПа	$H_{\mu_{\text{ср}}}$	H_{μ}	$H_{\mu_{\text{экс.ср}}}$	$H_{\mu_{\text{расч}}}$	Погрешность, %
Сталь 45	1	229	210	195	179	164	8,23
	2	206		176			
	3	211		180			
	4	226		193			
	5	210		179			
Сталь 30ХГСА	1	258	255	222	220	240	9,18
	2	255		219			
	3	248		213			
	4	258		222			
	5	259		223			

Изменение микротвердости материала образцов после ультразвукового воздействия схематично показано на рис. 4.20.

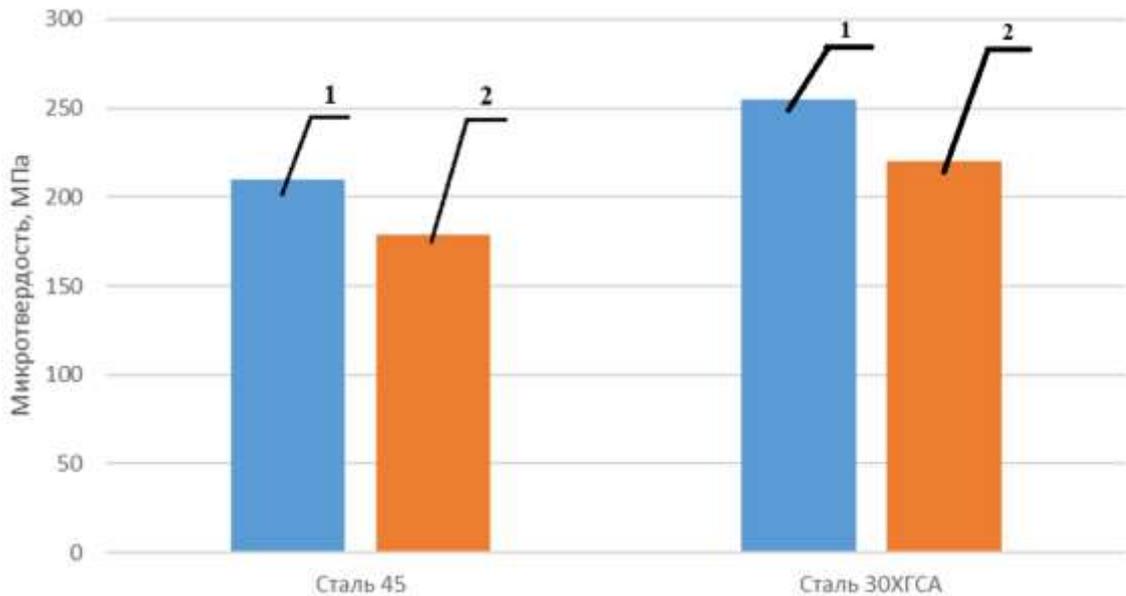
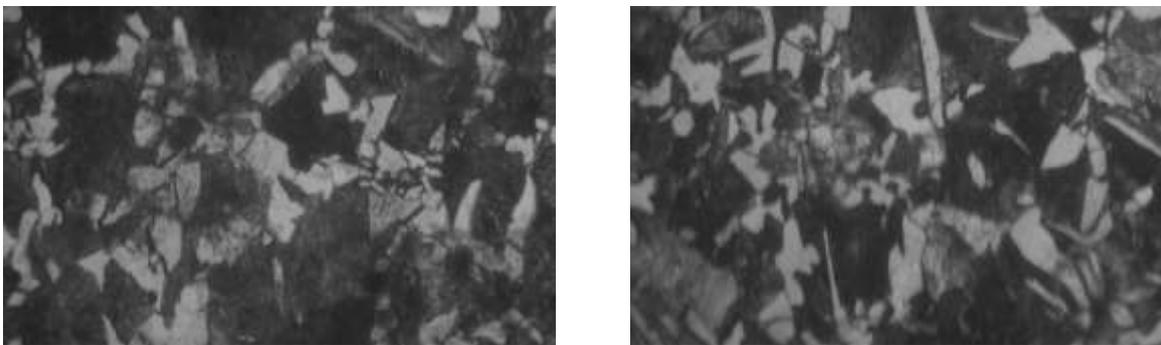


Рис. 4.20. Изменение микротвердости материала образцов в результате ультразвукового воздействия на образец ($A=6$ мкм; $\omega = 22$ кГц):

1 – исходная микротвердость; 2 – микротвердость после УЗК

Различие расчетных и экспериментальных значений микротвердости в пределах 10 % позволяет значение корреляционного коэффициента η в формуле (4.2) принять равным 0,9.

Снижение микротвердости и, как следствие, механических свойств материала образцов подтвердили результаты исследований в этой области, изложенные в работах [5, 6, 72, 97], которые показали, что эта закономерность является следствием структурных и субструктурных изменений, происходящих под воздействием ультразвуковых колебаний (рис. 4.21).



a)

б)

Рис. 4.21. Морфология структуры образцов из стали 45:

a – исходных; *б* – после УЗК при x 400 ($A=6$ мкм; $\omega = 22$ кГц)

Оценка изменения микротвердости поверхности отверстия образцов, подвергнутых ультразвуковому воздействию, проводилась на цилиндрических дисках из сталей 45 и 30ХГСА, полученных путем точения (с отверстием диаметром $D_o = 30$ мм, толщиной 20 мм и наружным диаметром $D_n = 60$ мм). Диски устанавливались на рабочем столе экспериментального комплекса и подвергались ультразвуковому воздействию в течение 60 с с частотой $\omega = 18\text{--}22$ кГц и амплитудой $A = 6$ мкм.

Исходные диски и диски после ультразвукового воздействия посредством электроэрозионной обработки разрезались на 4 сегмента (рис. 4.22, жирные линии разреза). Каждый сегмент дополнительно разрезался на две части по касательной, проходящей через точку, делящую сегмент в радиальном направлении пополам (рис. 4.22, тонкие линии разреза).

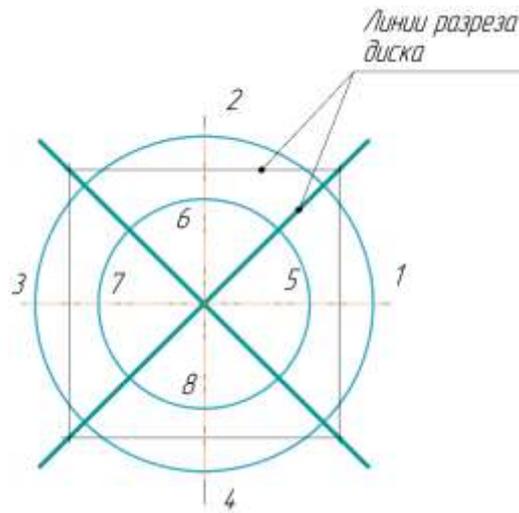


Рис. 4.22. Схема разрезки образцов для измерения твёрдости:

1–8 – точки замера микротвердости поверхности

Средние значения микротвердости наружной и внутренней поверхности, измеренные в точках, обозначенных на рис. 4.22, с пятикратной повторяемостью замера, приведены в табл. 4.8 и проиллюстрированы на рис. 4.23.

Таблица 4.8

Экспериментальные значения микротвердости наружной и внутренней поверхности образца после воздействия УЗК

Материал образца	Исходная микротвердость $HV_{исх}$, МПа	Микротвердость в точках наружной поверхности $HV_{н.узк}$, МПа				Микротвердость в точках поверхности отверстия $HV_{о.узк}$, МПа			
		1	2	3	4	5	6	7	8
Сталь 45	210	176	181	173	175	203	196	195	200
		175				198			
Сталь 30ХГСА	255	214	207	210	212	224	226	220	222
		213				223			

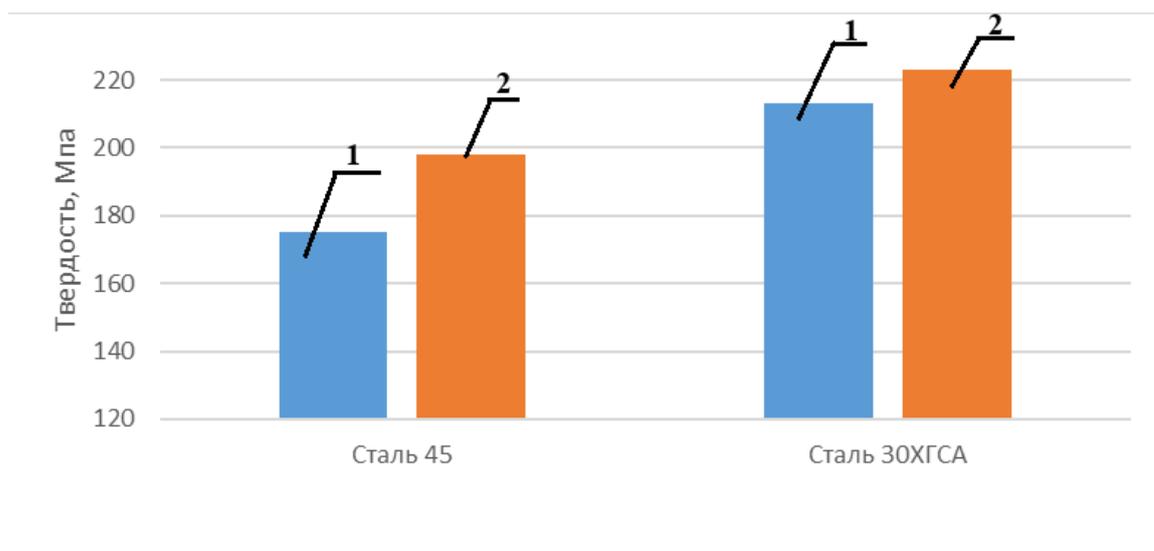


Рис. 4.23. Влияние УЗК на изменение микротвердости наружной и внутренней поверхностей образцов ($A = 6$ мкм; $\omega = 22$ кГц):
 1 – наружная поверхность; 2 – внутренняя поверхность

Проведённые исследования показали, что при ультразвуковом воздействии микротвердость наружной цилиндрической поверхности по сравнению с исходной микротвердостью образца уменьшается в 1,21–1,32 раза, а поверхностная микротвёрдость отверстия уменьшается в 1,1–1,15 раза (см. рис. 4.23), что является следствием затухания амплитуды колебаний ультразвуковых волн по мере удаления их от наружной цилиндрической поверхности. Исходя из этого, можно оценить величину микротвердости поверхности отверстия по сравнению с микротвердостью наружной поверхности образца, подвергнутого воздействию УЗК, следующей зависимостью:

$$HV_{н.узк}/HV_{о.узк} \approx e^{-\delta h}$$

где h – расстояние от наружной цилиндрической поверхности до поверхности отверстия, определяемое как $(D_n - D_o)/2$.

На основе этих допущений формулу для оценки поверхностной микротвёрдости поверхностного слоя отверстия образцов после воздействия на них УЗК (2.81) можно представить в виде

$$HV_{о.узк} = (HV_{исх} - \rho\omega A_k e^{-\delta h})\eta. \quad (4.3)$$

Экспериментальная и расчетная оценка влияния УЗК на изменение
поверхностной микротвердости отверстия

Материал образца	Микротвердость наружной поверхности после УЗК $HV_{н.узк}$, МПа	Микротвердость поверхности отверстия после УЗК $HV_{о.узк}$, Мпа (экс.)	Микротвердос ть поверхности отверстия после УЗК $HV_{о.узк}$, Мпа (расч.)	Погреш- ность, %
Сталь45	175	198	182	9,2
Сталь 30ХГСА	213	223	212	9,5

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных, представленных в табл. 4.9, позволяет рекомендовать расчетную зависимость (2.81) для оценки поверхностной микротвердости деталей, находящихся под воздействием УЗК, при коэффициенте её корреляции η , равном 0,9.

4.2. Исследования силы калибрования и параметров качества поверхности отверстий с применением ультразвукового воздействия на деталь

4.2.1. Условия проведения исследований

В п. 2.3 и 2.4 предложены аналитические зависимости для расчета силы калибрования, микротвердости и высоты неровностей профиля поверхности отверстия, пластически деформируемого как без применения, так и с применением УЗК. Для проверки их адекватности и приемлемости проведен комплекс экспериментальных исследований в условиях, представленных в табл. 4.10.

Обработка отверстий проводилась на экспериментальной установке (см. рис. 3.1). Для исследований использовались образцы в виде дисков толщиной 20 мм с диаметром отверстия $D_o = 29_{-0,035}^{+0,01}$ мм и высотой неровностей профиля поверхности, равной $Rz = 12$ мкм, наружным диаметрам $D_n = 60$ мм, с различными механическими свойствами (см. табл. 3.4) в количестве не менее 10 штук для каждого опыта. В качестве инструмента использовался однозубый цилиндрический дорн, изготовленный из быстрорежущей стали марки Р6М5 по

ГОСТ 19265-73*, с HRCэ 62...65, с углом заборного конуса $\alpha = 5^\circ \pm 30'$, шириной цилиндрической ленточки $l_d = 2,3$ мм и диаметром $D_d = 29h5_{(-0,01)}$ мм. Величина натяга составляла $i = 0,53IT = 0,024$ мм. Скорость обработки дорном – 0,02–0,05 м/мин.

Таблица 4.10

План проведения экспериментальных исследований силы калибрования
и качества поверхности отверстий

Номер опыта	Материал	σ_B , МПа	ρ , кг/м ³	A, мкм	ω , кГц
1	Сталь 45	600	7800	0	0
2	Сталь 45	600	7800	5	18-22
3	Сталь 45 закаленная	850	7800	0	0
4	Сталь 45 закаленная	850	7800	5	18-22
5	30ХГСА	800	7800	0	0
6	30ХГСА	800	7800	5	18-22

Экспериментальные значения силы фиксировались с помощью датчика давления, встроенного в систему испытательной машины ИП 500, на базе которой изготовлен экспериментальный комплекс. Опытные величины микротвердости поверхности, высоты неровностей профиля исходной и калиброванной поверхности отверстия устанавливались с помощью профилометра SURFTEST SJ-210 (см. рис. 3.10), микротвердомера ПМТ-3М (см. рис. 3.11). Размеры исходного и калиброванного отверстия определялись с помощью нутромера оснащенного измерительной головкой часового типа с точность 0,001 мм.

Измерения проводились в пяти сечениях каждого образца. Результаты измерений заносились в протокол, затем обрабатывались для определения среднестатистического значения исследуемой величины.

Расчетные значения величины силы калибрования, величины микротвердости поверхности и высоты неровностей профиля исходной и калиброванной поверхности отверстия определялись по зависимостям (2.47), (2.81), (2.89) и сравнивались с экспериментальными значениями.

Геометрические размеры отверстия образцов устанавливались и выполнялись исходя из размеров калибрующей ленточки, изготовленной для экспериментальных исследований согласно расчетной схеме, приведённой на рис. 2.2, и принятого условия, что величина натяга при калибровании отверстий не превышает величину $i = 0,53IT$ мкм.

4.2.2. Сила калибрования отверстий дорном

Проведённые исследования силы калибрования отверстий показали, что ультразвуковое воздействие на заготовку при удалении источника УЗК от очага деформации на расстояние 15–36 мм позволяет снизить силу калибрования в среднем в 1,15–1,18 раза. Результаты исследований представлены в табл. 4.11 и на рис. 4.24.

Отличие расчетных значений силы от экспериментальных обусловлено недоучетом в аналитической зависимости физических явлений, протекающих в детали в процессе воздействия на неё УЗК.

Таблица 4.11

Экспериментальные (средние) и расчетные значения силы калибрования P , Н

Номер опыта	Эксперимент	Расчет	Погрешность, %
1	692	616	11
2	604	531	12,04
3	931	815	12,5
4	792	702	11,28
5	813	723	11,1
6	695	631	9,3

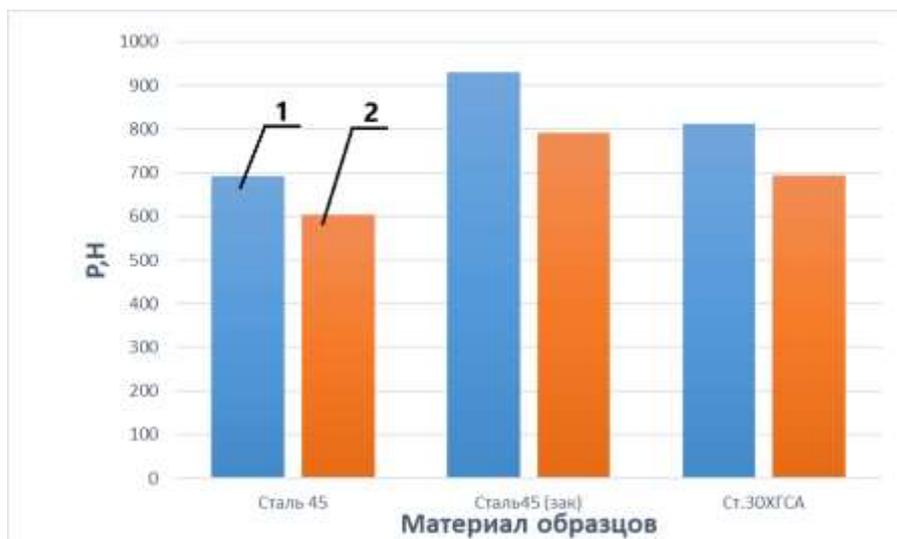


Рис. 4.24. Влияние воздействия УЗК на величину силы калибрования отверстия
($A = 6 \text{ мкм}$; $\omega = 22 \text{ кГц}$): 1 – без УЗК; 2 – с УЗК

Вместе с тем сравнительный анализ значений сил, приведённых в табл. 4.11, показал, что степень расхождения расчётных и экспериментальных данных находится в пределах допустимой экспериментальной ошибки 15 %, что свидетельствует о корректности применения установленной аналитической зависимости для определения силы калибрования отверстий.

4.2.3. Микротвердость поверхностного слоя отверстия

В табл. 4.12 и на рис. 4.25 представлены результаты исследований микротвердости поверхностного слоя отверстия, модифицированного в процессе калибрования. Как следует из полученных экспериментальных данных, ультразвуковое воздействие на деталь в процессе калибрования не оказывает существенного влияния на повышение микротвердости деформированного поверхностного слоя, обеспечиваемого в процессе обработки дорном (отклонение экспериментальных и расчетных данных с применением ультразвукового воздействия на деталь и при калибровании отверстия без ультразвукового воздействия не превышает 5 %).

Экспериментальные (средние) и расчетные значения микротвердости
поверхностного слоя отверстий HV , МПа

Номер опыта	Исходная микротвердость	Эксперимент	Расчет	Погрешность, %
1	210	239	278	14
2	210	221	260	15,2
3	275	300	357	16,1
4	275	284	333	14,8
5	255	283	333	15,1
6	255	267	317	16

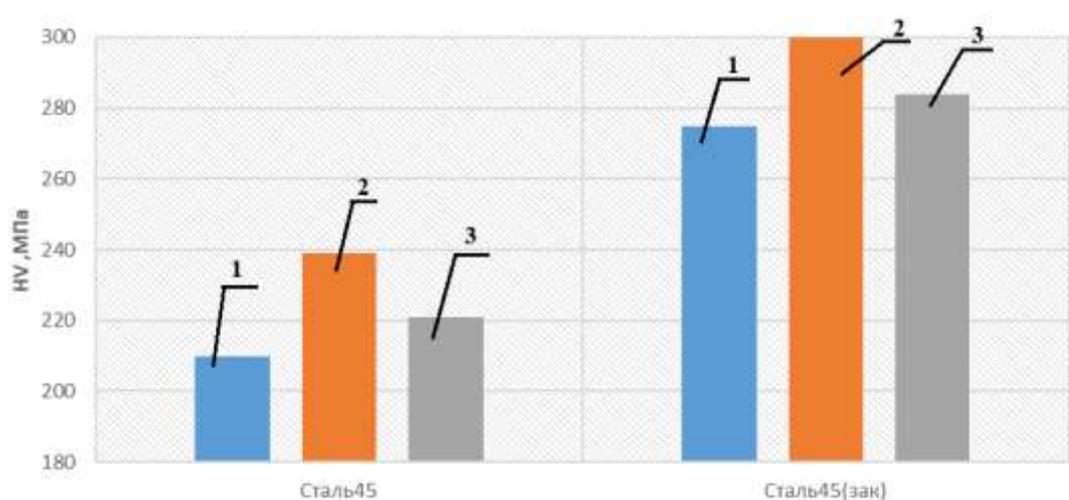


Рис. 4.25. Влияние УЗК-воздействия на микротвёрдость поверхностного слоя калиброванного отверстия ($A = 6$ мкм; $\omega = 22$ кГц): 1 – исходная микротвердость поверхностного слоя; 2 – твёрдость поверхностного слоя после калибрования без УЗК; 3 – микротвёрдость поверхностного слоя после калибрования с УЗК

Отличие расчетных значений микротвердости (без учета коэффициента корреляции) от экспериментальных в пределах 14–16 %, очевидно, обусловлено также неучётом физических эффектов, протекающих в поверхностном слое в процессе его деформирования и ультразвукового воздействия на него. Тем не менее это превышение в пределах экспериментальной ошибки позволяет рекомендовать предложенную аналитическую зависимость по определению микротвердости поверхностного слоя после калибрования дорном в условиях УЗК для практического применения.

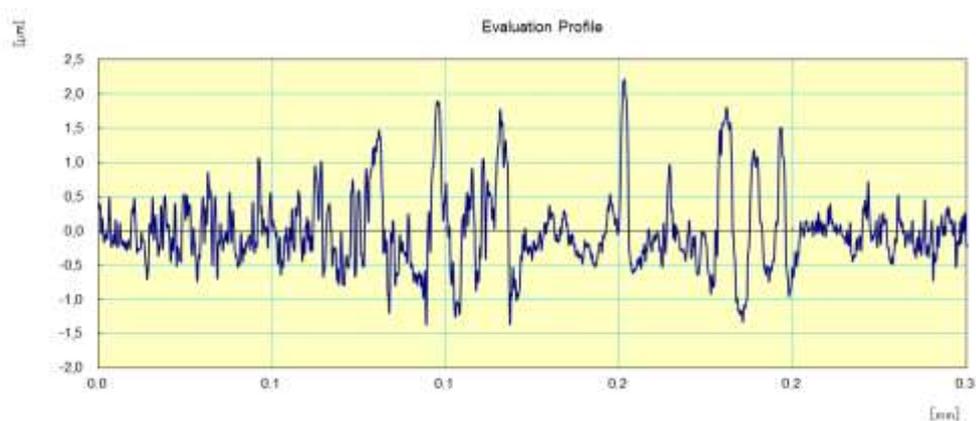
4.2.4. Шероховатость поверхности и точность отверстия

Результаты исследований влияния УЗК на высоту неровностей профиля калиброванного отверстия приведены в табл. 4.13 и на рис. 4.26, 4.27.

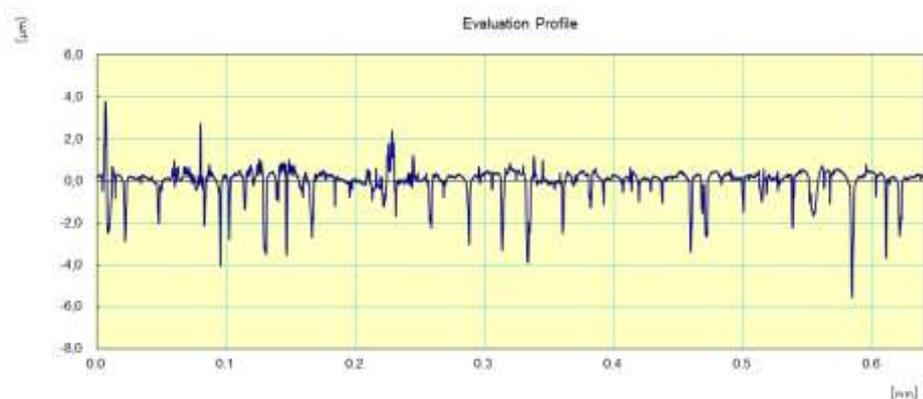
Таблица 4.13

Экспериментальные (средние) и расчетные значения высоты неровностей профиля калиброванной поверхности отверстия Rz , мкм

Номер опыта	Исходная шероховатость	Эксперимент	Расчет	Погрешность, %
1	12	3,097	3,408	9,1
2	12	1,147	1,017	11,3
3	12	2,932	3,348	10,6
4	12	1,33	1,176	11,5
5	12	2,961	3,364	12
6	12	1,161	1,044	10



а)



б)

Рис. 4.26. Профилограммы шероховатости поверхности отверстия:
а – исходной; *б* – калиброванной в условиях УЗК



Рис. 4.27. Влияние УЗК на изменение высоты неровностей профиля поверхности при калибровании отверстия (материал образцов сталь 45; $A = 6$ мкм; $\omega = 22$ кГц):

1 – исходная шероховатость; 2 – после калибрования с УЗК

Анализ полученных результатов показал, что калибрование отверстий в условиях ультразвукового воздействия на образец позволяет снизить высоту неровностей профиля поверхности в 10 раз по сравнению с исходной поверхностью. Расхождение экспериментальных и расчетных значений находится в пределах экспериментальной ошибки и составляет 9–12 %.

Предложенная расчетная зависимость для определения высоты неровностей профиля поверхности, калиброванной с применением ультразвукового воздействия на деталь, может быть рекомендована для оценки качества поверхности и практического применения при проектировании технологии калибрования отверстий.

В п. 2.5.2 было показано, что уменьшение высоты неровностей профиля и, как следствие, улучшение геометрических параметров обработанной поверхности в процессе калибрования с применением УЗК есть многофакторная функция вида

$$Rz = f(i, HV_{исх}, A),$$

где i – натяг калибрования; $HV_{исх}$ – микротвердость исходной поверхности; A – амплитуда колебаний ультразвукового поля, развиваемая в очаге деформации.

Если натяг устанавливается исходя из геометрических соображений согласно схеме, предложенной на рис. 2.2, то два других фактора $HV_{исх}$ и A для оценки

степени их влияния на шероховатость обработанной поверхности требуют экспериментального обоснования.

Для решения этой задачи на основе методики оптимального планирования [142] был проведен полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^2 (приложение 7). Согласно этой методике модели имеют мультипликативный вид с использованием в качестве сомножителей показательных функций.

В нашем случае запишем исследуемую модель в виде

$$Rz = b_0 \cdot HV_{исх}^{b_1} \cdot A^{b_2}, \quad (4.4)$$

где b_0, b_1, b_2 – коэффициенты.

Линеаризацию модели осуществим путем логарифмирования выражения (4.4):

$$\ln Rz = \ln b_0 + b_1 \ln HV_{исх} + b_2 \ln A. \quad (4.5)$$

Этапы обработки экспериментальных исследований включали:

- оценку однородности дисперсии по критерию Кохрена [87];
- определение дисперсии воспроизводимости выхода в натуральных значениях переменных и в логарифмах натуральных значений;
- определение коэффициентов уравнения регрессии;
- проверку значимости коэффициентов уравнения регрессии с помощью критерия Стьюдента;
- переход от кодовых к натуральным значениям переменных;
- оценку адекватности модели с помощью критерия Фишера.

В результате обработки экспериментальных данных получена полиномиальная модель, уточняющая степень влияния исходной микротвердости обрабатываемого отверстия и амплитуды подводимых к детали ультразвуковых колебаний на изменение высоты неровностей профиля поверхности, калиброванной в процессе обработки (рис. 4.28):

$$Rz = 6,399 \cdot 10^3 \cdot HV_{исх}^{-3,151} \cdot A^{-6,599+2,673 \cdot \ln(HV_{исх})}.$$

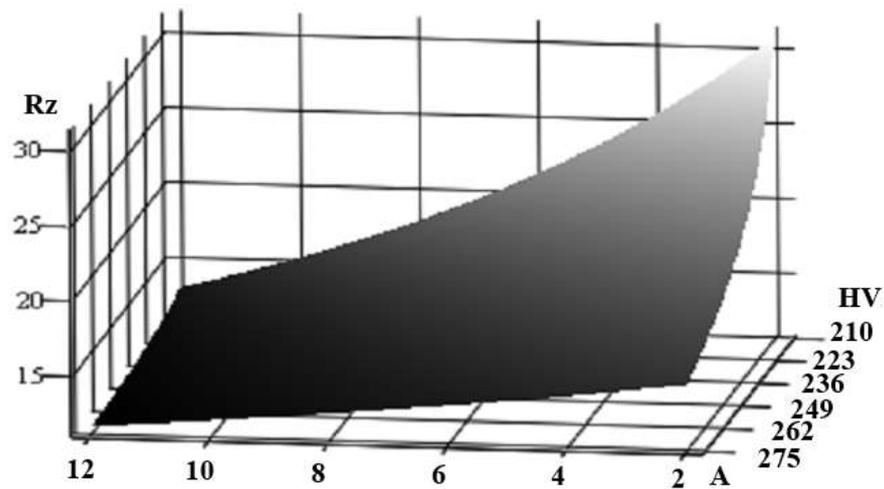


Рис. 4.28. Влияние исходной микротвердости и амплитуды УЗК на изменение высоты неровностей профиля поверхности калиброванного отверстия в условиях воздействия УЗК на деталь

В результате проведения оптимального планирования эксперимента была получена диаграмма изолиний уровня зависимости $Rz = f(HV_{исх}, A)$ (рис. 4.29), которая позволяет провести прогнозирование микротвердости и высоты неровностей поверхности получаемой в процессе калибрования с применением УЗК на деталь и оптимизацию процесса калибрования по критерию минимизации приведённых затрат.

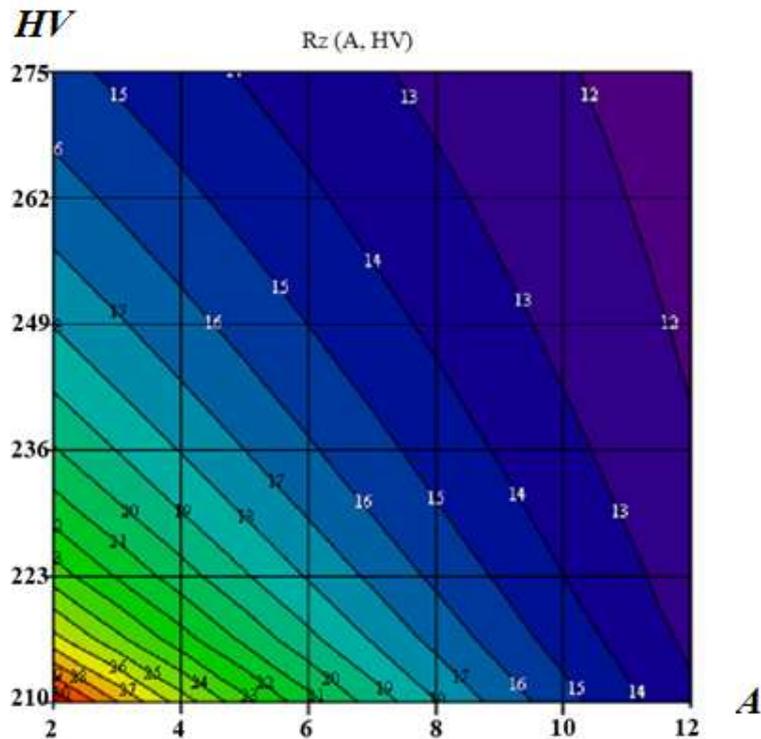


Рис. 4.29. Диаграмма изолиний уровня зависимости $Rz = f(HV_{исх}, A)$

Согласно предлагаемой методике для отверстия задаём требуемое значение высоты неровностей профиля поверхности (например, 15 мкм) и среди всех изолиний выбираем линию со значением 15 мкм, каждая точка которой соответствует заданному значению высоты неровностей профиля. Для определения режима обработки определяем значение микротвердости исходной поверхности отверстия. Пусть она лежит в заданном интервале от 249 до 262 HV. По оси ординат находим заданный диапазон и проводим параллельно оси абсцисс через данные значения прямые линии до пересечения с изолинией 15 мкм. Затем определяем точки пересечения с ней и опускаем перпендикулярные линии на ось абсцисс, точки пересечения с которой определяют минимальное и максимальное значение действующей амплитуды. В нашем случае амплитуда колебаний акустической системы составляет от 4,5 до 6 мкм (в этом диапазоне мы получаем гарантированное значение требуемой высоты неровностей профиля 15 мкм). Из полученных двух значений мы выбираем то, которое соответствует минимальному значению амплитуды – 4,5 мкм. Данное значение повышает энергоэффективность технологического процесса в связи с тем, что чем ниже значение амплитуды, тем меньше расход электроэнергии системы и потери УЗКС, связанные с преобразованием электрической энергии.

С целью подтверждения эффективности влияния ультразвуковых колебаний через деталь на улучшение высоты неровностей профиля поверхности отверстия был проведен сравнительный эксперимент. В работе [131], посвященной исследованию качества поверхностей отверстий при обработке дорном, предусматривающей наложение ультразвуковых колебаний на инструмент-дорн, на основе экспериментальных исследований получены результаты, представленные на рис. 4.30.

Для установления данных о величии изменения высоты неровностей поверхности отверстия при калибровании с применением ультразвукового воздействия на деталь были проведены экспериментальные исследования в условиях, идентичных условиям исследований, принятых в работе [131] и указанных на рис. 4.30.

Под дорн с диаметром $D_d = 29h5(-_{0,01})$ мм были изготовлены образцы из стали 40X HRC 46...50, $\frac{D_H}{D_0} = 2$, обеспечивающие исходную высоту неровной профиля поверхности отверстия $R_z = 21$ мкм. Калибрование осуществлялось на опытно-экспериментальном комплексе с натягом $i = 20$ мкм, амплитудой УЗК, подводимой к детали на уровне $A = 6$ мкм.

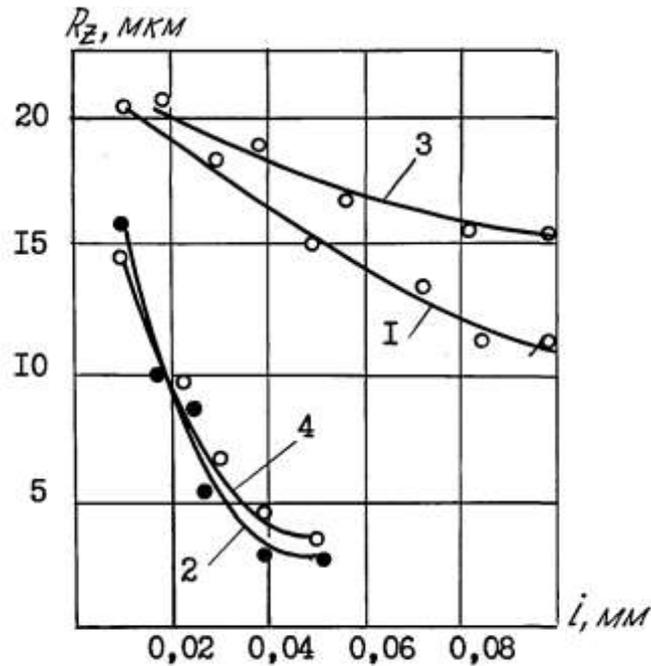


Рис. 4.30. Зависимость высоты неровностей профиля поверхности отверстий от натягов при обработке дорном без УЗК (1, 3) и с наложением УЗК на дорн (2, 4) с амплитудой $t = 0,026$ мм:

1, 2 – сталь 40X, HRC 46...50, $\frac{D_H}{D_0} = 2,5$; 3, 4 – сталь 40X // HRC 46...50, $\frac{D_H}{D_0} = 1,43$ [131]

Результаты сравнительных исследований, показывающие влияние вариантов введения ультразвуковых колебаний в очаг деформации при калибровании отверстий на высоту неровностей профиля поверхности, проиллюстрированы на рис. 4.31.

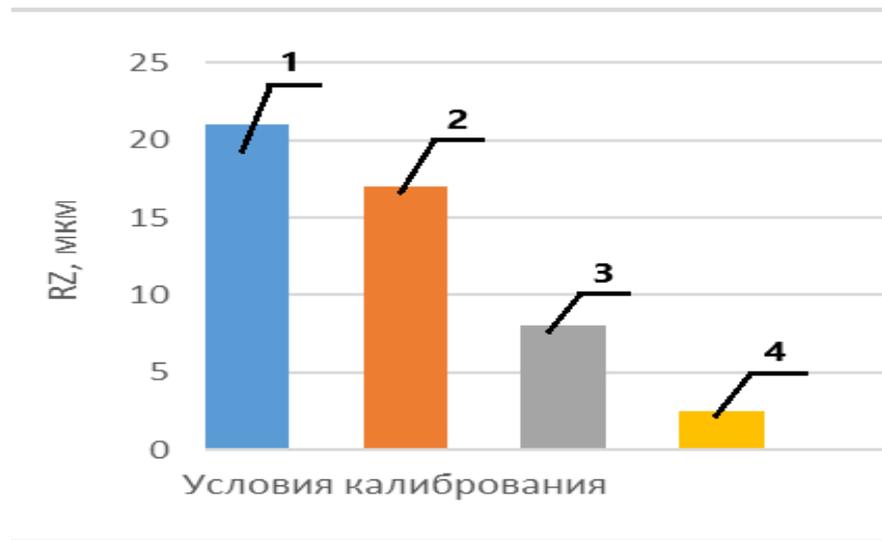


Рис. 4.31. Изменение высоты неровностей профиля поверхности отверстий в зависимости от силы калибровки: 1 – исходная высота неровностей профиля; 2 – калибрование; 3 – калибрование с воздействием УЗК на дорн; 4 – калибрование с воздействием УЗК на деталь

Полученные результаты показали, что введение ультразвуковых колебаний в очаг деформации через деталь, наряду с другими преимуществами, отмеченными в гл. 2, по сравнению с введением ультразвуковых колебаний в очаг деформации через инструмент, позволяют улучшить высоту неровностей профиля качества поверхности отверстий при калибровании в 3,2 раза и таким образом доказать эффективность применимости предложенного в рамках диссертационного исследования способа комбинированного воздействия на деталь дорна и ультразвуковых колебаний при реализации процесса калибрования отверстий.

В таблице. 4.14 представлены результаты оценки точности отверстия, получаемого в процессе калибрования дорном с наложением УЗК на деталь

Таблица 4.14

Размеры(средние) отверстия, получаемого в процессе калибрования дорном диаметром $D_d = 29h5_{(-0,01)}$ мм с наложением УЗК на деталь

В сечении перпендикулярном оси отверстия на расстоянии от	Направление замера в сечении отверстия	
	В направлении воздействия УЗК	В направлении перпендикулярном воздействию УЗК

верхнего торца заготовки (начало калибрования), мм		
2	28,995	28,995
10	28,995	28,995
18	28,998	28,998

Выводы по главе 4

1. Предложен индукционный метод, позволяющий провести анализ характера и интенсивности распространения ультразвуковых волн в материале деталей типа дисков.

2. На основе индукционного метода:

- подтверждена адекватность предложенной акустической модели ультразвукового поля, создаваемого в детали типа дисков с отверстием, устанавливающей, что в условиях установившегося ультразвукового поля в цилиндрическом образце формируются по концентричным окружностям кольцевые волновые фронты различной амплитуды, снижающейся от наружной поверхности образца к поверхности отверстия и оказывающие определенное акустическое давление в локальной зоне их действия;

- установлены значения коэффициента затухания ультразвуковых волн в исследуемых материалах образцов, которые удовлетворительно согласуются с исследованиями, приведенными в научно-технической литературе, и могут быть использованы при проектировании операций калибрования отверстий в условиях воздействия УЗК на деталь.

3. Подтверждена разработанная аналитическая модель формирования деформированного поверхностного слоя отверстия при комбинированном воздействии инструмента и УЗК, раскрывающая влияние УЗК на изменение контактного давления в очаге деформации и микротвердости поверхности обрабатываемого отверстия. Установлено, что ультразвуковое воздействие на деталь приводит к снижению микротвердости материала, являющегося комплексной характеристикой его механических свойств, на величину, соизмеримую с величиной

давления фронта ультразвуковой волны в очаге деформации, определяющим параметром которого является амплитуда колебаний, создаваемых УЗКС. Подтверждена приемлемость расчетной зависимости для оценки поверхностной микротвердости деталей, находящихся под воздействием УЗК, при коэффициенте её корреляции η , равном 0,9.

4. Предложенная расчетная зависимость для определения силы калибрования отверстий в условиях УЗК позволяет в пределах допустимой экспериментальной ошибки 15 % производить его расчетную величину для выбора требуемого для реализации процесса калибрования оборудования и УЗКС.

5. Ультразвуковое воздействие на деталь в процессе калибрования не оказывает существенного влияния на повышение микротвердости деформированного поверхностного слоя, обеспечиваемого в процессе обработки дорном, что является следствием снижения механических свойств материала под воздействием УЗК.

6. Установлено, что ультразвуковое воздействие на деталь в процессе калибрования позволяет значительно (в 10 раз) улучшить высоту неровностей профиля обработанной поверхности. Подтверждено, что аналитическая зависимость, предложенная для определения высоты неровностей профиля калиброванной с применением ультразвукового воздействия на деталь поверхности, может быть рекомендована практического применения при проектировании технологии калибрования отверстий.

7. На основе многофакторного эксперимента получена диаграмма изолиний уровня зависимости высоты неровностей профиля поверхности, калиброванной с применением ультразвукового воздействия на деталь, от микротвердости исходной поверхности отверстия и амплитуды УЗК, позволяющая осуществить выбор рациональных условий калибрования отверстий с наложением УЗК на деталь.

8. Достигаемая в процессе калибрования точность отверстия находится в пределах допуска на дорн.

ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПЕРАЦИЙ КАЛИБРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

5.1. Методика проектирования технологических операций калибрования отверстий дорном с наложением ультразвуковых колебаний на деталь

Проведённые исследования и полученные при этом результаты позволяют предложить методику проектирования технологических операций калибрования отверстий дорном с наложением ультразвуковых колебаний на деталь, представленную в табл. 5.1. Методика предусматривает ряд последовательных функциональных этапов, обеспечивающих выбор средств технологического оснащения, силовых и акустических параметров процесса калибрования и, как следствие, получение требуемого по условиям эксплуатации качества отверстий различного профиля в деталях.

Таблица 5.1

Функциональное назначение этапов методики проектирования
операций калибрования отверстий дорном
с наложением ультразвуковых колебаний на деталь

Этап	Функциональное назначение	Содержание этапа
1	Анализ исходных данных для проектирования ТС калибрования	Аналізу подлежат: - характеристика детали и её заготовки; - параметры качества получаемого в процессе изготовления детали отверстия; - технологический процесс обработки отверстия; - наличие на предприятии прессового оборудования и его технологические возможности; - амплитудные и частотные характеристики технических средств УЗКС (при их наличии)

Этап	Функциональное назначение	Содержание этапа
2	Обоснование операции (или перехода), предшествующего калиброванию отверстия	<p>Рассчитывается предельно допустимый допуск, обеспечивающий точность отверстия, заданного ТУ по формуле</p> $IT_z + R_{z,зад} \leq s = 0,27IT.$ <p>Обоснование операции производится на основе сравнительного анализа расчетного предельно допустимого допуска для получения отверстия, заданного ТУ, с допусками, достигаемыми на технологических операциях (переходах). Допуск технологической операции, меньший или равный IT, принимается за исходный $IT_{исх}$ для дальнейших расчетов.</p> <p>Если технологический процесс обработки предусматривает закалку детали до твердости HRC 50...60 то предшествующей калиброванию принимается операция термообработки</p>
3	Выбор конструкции и определение геометрических параметров дорна	<p>Исходя из конструктивной формы отверстия выбирается конструкция дорна, определяются точностные размеры калибрующей ленточки дорна, назначаются углы наклона заборного и обратного конуса согласно рекомендациям, изложенным в п. 2.2 и п. 5.1 по конструктивному исполнению дорнов</p>
4	Определение технологических параметров процесса калибрования	<p>Натяг калибрования определяется по формуле</p> $i = 0,53IT_{исх},$ <p>где $IT_{исх}$ – допуск исходной технологической операции, после которой проводится калибрование с применением УЗК</p> <p>Скорость калибрования выбирается в пределах 0,02–0,05 м /мин.</p> <p>Рекомендуемая амплитуда колебаний УЗК в зоне контакта дорна с поверхностью отверстий A – 4–6 мкм</p>

Этап	Функциональное назначение	Содержание этапа
5	Расчет силы калибрования	На данном этапе проводится ориентировочный расчет контактного удельного давления в зоне взаимодействия дорна с поверхностью, подвергаемой УЗК p , и определяется необходимая сила калибрования для обеспечения требуемого качества поверхности отверстия (по формуле (2.47))
6	Выбор технологического оборудования	На основе расчетной силы определяется приемлемость имеющегося оборудования или выбирается оборудование
7	Выбор и расчет ультразвуковой колебательной системы	<p>В соответствии с рекомендациями раздела 2.4.2 выбирается генератор и преобразователь УЗК. Определяются геометрические размеры стержневого концентратора. Для конического концентратора это: диаметр торца, с помощью которого осуществляется контакт его с ультразвуковым преобразователем; диаметр торца, посредством которого он воздействует на деталь, и длина, кратная длине полуволны по формуле (2.67):</p> $l = \frac{\lambda}{2} \frac{(kl)}{\pi}.$ <p>При выборе и расчете элементов УЗКС должно соблюдаться условие, вытекающее из формулы (2.77):</p> $N \frac{(\cos kl - \frac{N-1}{Nkl} \sin kl) \mu M U_0}{2\pi^2 f^2 W (R_{м.н.} + R_{н})} = \frac{A}{\exp(-\delta_{д} \frac{D-d}{2})},$ <p>учитывающее обеспечение заданной величины амплитуды УЗК в зоне очага деформации, габаритные размеры обрабатываемой детали, величину амплитуды, развиваемой ультразвуковым преобразователем</p>

Этап	Функциональное назначение	Содержание этапа
8	Оценка микротвердости поверхностного слоя, модифицированного в процессе калибрования	Проводится оценка микротвердости поверхностного слоя отверстия, модифицированного в результате обработки дорном с применением УЗК, по зависимости (2.86): $HV_k = \eta(\sqrt{1,3 \cdot 10^3 \cdot G \cdot p} - \rho\omega A), \text{ Па}$
9	Определение высоты неровностей профиля калиброванного отверстия	Определяется высота неровностей профиля поверхности калиброванного в условиях УЗК отверстия на основе зависимости (2.89): $R_z = R_{z \text{ исх}} \exp\left(-\frac{HV_{\text{исх}}}{HV_k}\right), \text{ мкм}$
10	Разработка компоновочной схемы технологической системы комбинированного калибрования с применением УЗК и средств её технического оснащения	
11	Оформление технологической документации на операцию калибрования	

5.2. Инструментальное обеспечение процесса калибрования отверстий дорном

Для осуществления процесса калибрования отверстий поверхностным пластическим деформированием применяют дорны различных размеров и формы, которые по конструктивному оформлению разделяют на два вида: однозубые и многозубые (рис. 5.1). В отличие от однозубых дорнов у многозубых изменение размеров наружного диаметра и ширины зубьев происходит от первого к последнему зубу по калибрующим ленточкам, остальные геометрические параметры (углы α , α_1 и ширина ленточки b) в пределах всех зубьев обычно остаются постоянными. Для обеспечения лучшего центрирования и большей точности обработки многозубые дорны имеют переднюю и заднюю направляющие части. Распределение натяга по наружному диаметру между зубьями многозубого дорна преимущественно производится по прямолинейному или логарифмическим

законам. Общим для многозубых дорнов (прошивок) является определенное число деформирующих, калибрующих и концевых зубьев. Применение логарифмического закона распределения подъемов на зуб обеспечивает наилучшие условия деформирования как по качеству обработанной поверхности, так и по плавности изменения величины силы обработки дорном в процессе прохождения инструмента сквозь обрабатываемую деталь.

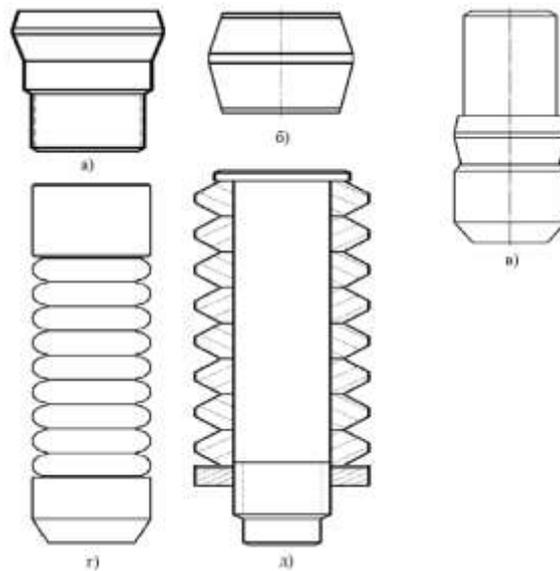


Рис. 5.1. Типы дорнов для калибрования цилиндрических отверстий:
a, б – однозубый; *в* – однозубый с направляющим пояском;
г – многозубый; *д* – сборный

На рис. 5.2, 5.3 приведены разработанные в Донском государственном техническом университете конструкции дорнов для калибрования фасонных отверстий, прошедших апробацию на ряде промышленных предприятий и включенных в отраслевые стандарты.

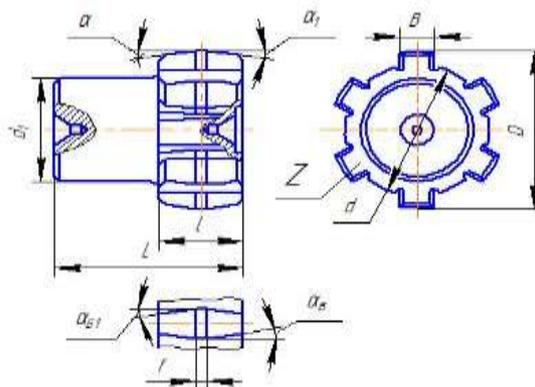


Рис. 5.2. Однозубый фасонный дорн

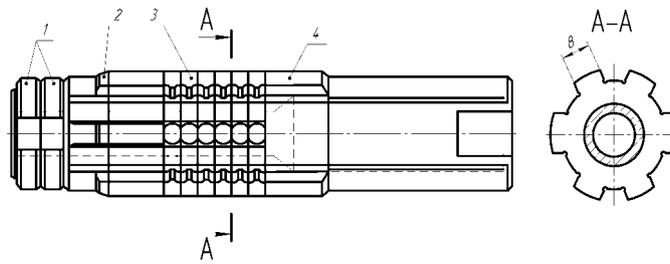


Рис. 5.3. Многозубый фасонный дорн:

1 – гайка; 2 – переднее направление; 3 – дорнующие зубья; 4 – оправка

В табл. 5.2 представлены рекомендуемые значения геометрических параметров рабочей части дорнов [89].

Таблица 5.2

Геометрические параметры рабочей части дорнов

Геометрические параметры	Калибрование предварительно обработанного профиля в деталях из стали	
	нормализованных	закаленных до твердости HRC 45-62
Угол заборного конуса, град.	3-6	6-12
Угол обратного конуса, град.	3-6	5-10
Ширина цилиндрической ленточки b , мм	0,5-2,5	0,3-1,5
Шаг между зубьями (многозубого дорна) T , мм	$T = (1,5 \div 2,2) \sqrt{L}$ (L – длина дорнуемого отверстия, мм)	
Подъем на зуб по наружному диаметру (для многозубого дорна) i , мм	0,01-0,05	0,005-0,02

Рекомендуемые марки сталей для изготовления дорнов: У12А, Х12М, Х12Ф, Р5М6, ХВ. Наилучшие результаты по стойкости дают фасонные дорны с твердосплавными пластинами из ВК6 и ВК8 (рис. 5.4).

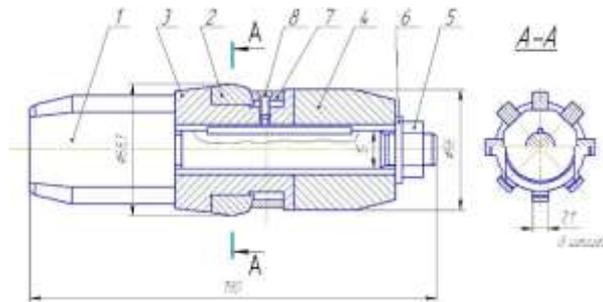


Рис. 5.4. Фасонный дорн с пластинами из твёрдого сплава:

1 — оправка; 2 — твердосплавные пластины; 3 — корпус; 4 — хвостовик;
5 — гайка; 6 — шайба; 7 — сухарь; 8 — винт

Процесс калибрования отверстий может осуществляться на разнообразных протяжных станках или прессах с меньшей длиной хода рабочего штока. Поскольку, как показали исследования, при калибровании отверстий требуются небольшие силы в пределах до 500–800 Н, то процесс обработки дорном может быть реализован на универсальных станках.

Применяемая технологическая оснастка при обработке дорном: опорные и центрирующие приспособления для детали, хвостовики и направляющие части инструментов, захватывающие патроны станков и др.

5.3. Рекомендации по обеспечению эффективности ультразвуковых колебательных систем процесса калибрования отверстий дорном

В целях обеспечения акустических требований к УЗКС, сформулированных в работах [6, 50, 72, 77, 123] применительно к колебательным системам для калибрования отверстий дорном, ниже изложен ряд основных рекомендаций, выполнение которых будет способствовать эффективной работе УЗКС в процессе эксплуатации:

1. Работа УЗКС должна осуществляться в резонансном режиме.

2. Для изготовления концентраторов целесообразно использовать углеродистые и легированные инструментальные стали, а также конструкционные среднеуглеродистые легированные стали.

3. Соединения УЗКС должны обеспечивать хороший и надежный акустический контакт, а также жесткую связь между отдельными звеньями.

4. Для уменьшения потерь в пассивных элементах УЗКС необходимо фланцы крепить через промежуточные элементы (прокладки), изготовленные из материала, волновое сопротивление которого резко отличается от волнового сопротивления материала волновода или инструмента. Для этого использовать различные терморезистивные пластмассы и другие неметаллические материалы.

5. Для обеспечения наибольшей концентрации акустической энергии непосредственно в очаге деформации использовать волноводы из титановых сплавов.

6. УЗКС должна обладать возможностью быстрой замены элементов и регулировки, простотой форм отдельных звеньев системы, простотой настройки системы и т. д.

7. Для поддержания резонансного режима перспективным является применение колебательных систем, реактивная составляющая входного сопротивления которых мало изменяется при выполнении процесса обработки дорном.

5.4. Практическое применение результатов исследований

Внедрение результатов диссертационного исследования осуществлялось в условиях РТЦ «Технология», г. Азов (приложение 1). Объектом внедрения являлась деталь- звездочка, конструкция и размеры которой показаны на рис. 5.5.

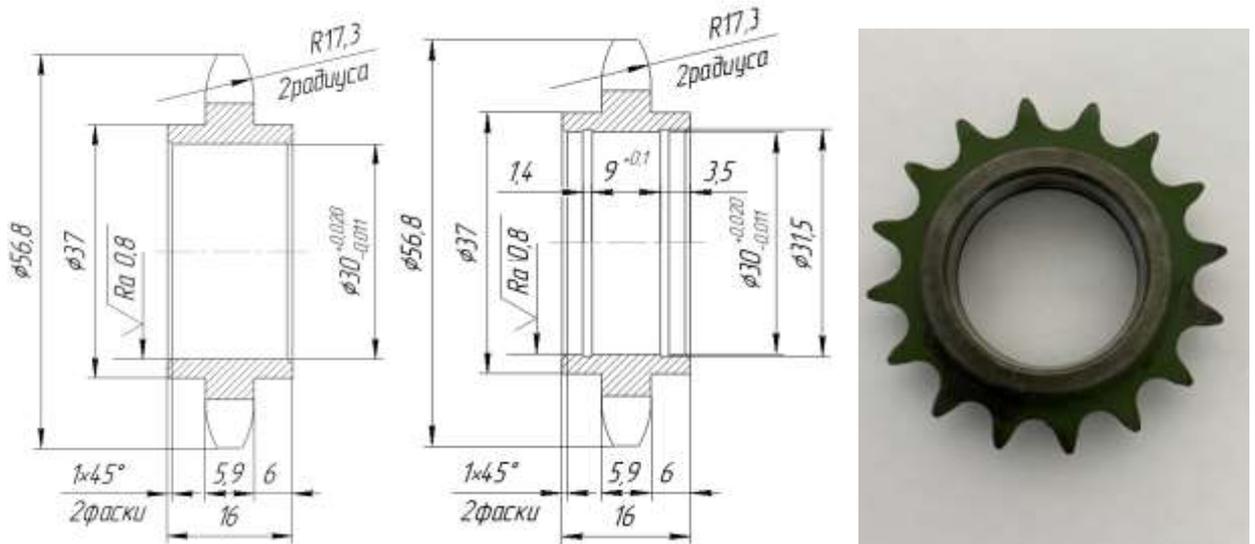


Рис. 5.5. Конструкция и размеры звездочки

Согласно конструкторской документации, точность отверстия должна соответствовать 8 качеству с допуском, равным 31 мкм, а высота неровностей профиля поверхности должна быть обеспечена на уровне $R_z = 3,2$ мкм. Деталь изготавливается из легированной стали 40X. В качестве исходной заготовки использовался круг диаметром 60 мм.

Заданные параметры качества поверхности отверстия достигаются по действующему на предприятии технологическому регламенту:

№	Технологическая операция	Содержание операции	Допуск, мкм	Шероховатость, мкм
1	Сверлильная	Сверлить отверстие диаметром 20 мм	240	$R_z = 50$
2	Сверлильная	Рассверлить отверстие диаметром 30 мм	110	$R_z = 27,2$
3	Расточная	Расточить отверстие в размер	45	$R_z = 12,8$
4	Термообработка	Улучшение 230-260 НВ		$R_z = 14$
5	Шлифование		31,1	$R_z = 3,2$

В соответствии с результатами диссертационного исследования для обеспечения заданных параметров точности и высоты неровностей профиля необходимо, чтобы половина допуска на размер отверстия, установленного ТУ, совместно с высотой неровностей профиля не превышала величину деформированного в процессе калибровки слоя, определяемого по соотношению

$$IT_3 + R_{z \text{ зад.}} \leq s = 0,27IT.$$

Используя это соотношение, определим предельно допустимый допуск на размер исходного отверстия:

$$IT = \frac{31+3,2}{0,27} = 127 \text{ мкм.}$$

Анализ применяемого технологического регламента получения отверстия показал, что данный допуск обеспечивает рассверливание отверстия. Это позволило сделать вывод о возможности применения после операции рассверливания операции калибрования взамен остальных операций, предусмотренных регламентом операций механической обработки. При этом реализация процесса калибрования отверстия и достижения заданной точности может быть осуществлена с натягом, равным

$$i = 0,53IT = 0,53 \times 120 = 64 \text{ мкм.}$$

Для выполнения калибрования заданного отверстия в соответствии со схемой, представленной на рис. 2.3, был изготовлен дорн с наружным диаметром цилиндрической ленточки $30_{-0,01}$, с углом заборного конуса 7° , с направляющей шейкой и цилиндрическим хвостовиком.

Для установки звездочки применялось специальное приспособление, изготовленное по рекомендациям диссертационного исследования.

УЗКС была спроектирована и организована в соответствии с рекомендациями, изложенными в гл. 2. В качестве источника электрических колебаний использовался ультразвуковой генератор УЗГ 2-1,0/22, обеспечивающий электрические колебания частотой 18–22 кГц. Преобразование электрических колебаний в механические осуществлялось с помощью магнитострикционного преобразователя ПМС 1-1, обеспечивающего на выходе

амплитуду ультразвуковых колебаний 1–2 мкм. С целью обеспечения доступа и подвода к детали наиболее предпочтительной амплитуды ультразвуковых колебаний в пределах 4–6 мкм применялся волновод – концентратор, изготовленный в виде конического стержня с геометрическими размерами: диаметр торца концентратора, контактирующего с обрабатываемой деталью, равный 6 мм; диаметр торца концентратора, контактирующего с преобразователем, равный 35 мм; длина концентратора 120 мм.

Расчет силы обработки дорном, проведенный по формуле (2.47) для выбранных условий, показал, что для калибрования отверстия необходима сила на уровне 980 Н, а с учетом ультразвукового воздействия потребуется 850 Н. Для обеспечения такой силы не нужно специальное прессовое оборудование, а вполне успешно может быть применено универсальное оборудование, имеющееся на предприятии.

Калибрование отверстия звездочки с наложением ультразвука по разработанной технологической схеме производилось на универсальном сверлильном станке модели 2Н135 (рис. 5.6). Результаты калибрования отверстия после его рассверливания представлены в табл. 5.4.

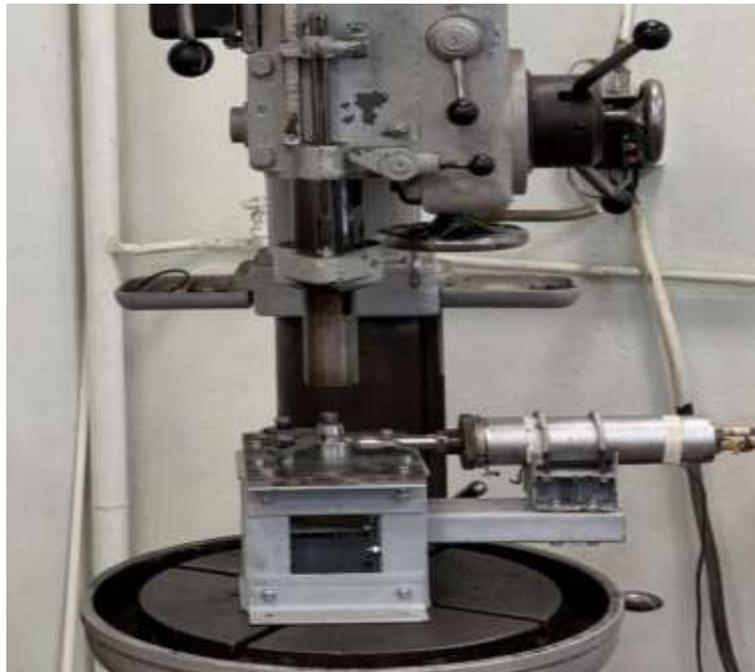


Рис. 5.6. Технологическая система калибрования посадочного отверстия звездочки дорном с наложением на нее УЗК

Результаты калибрования отверстия звездочки с применением УЗК

Параметры качества отверстия	До калибрования (после рассверливания)	После калибрования
Точность отверстия, мкм/ квалитет	110/11	28/7
Шероховатость, R_z мкм/ класс (ГОСТ 2789-71)	6,8/5	0,72/8
Поверхностная твердость	230–260 НВ	212–248 НВ

Результаты проведённых испытаний показали технико-экономическую эффективность предложенного способа калибрования отверстий по следующим показателям:

- замена калиброванием трех технологических переходов;
- повышение параметров качества поверхности отверстия;
- возможность его реализации с помощью универсального оборудования.

5.5. Перспективы дальнейшего использования результатов исследований

Представленные в диссертационной работе результаты являются исходной предпосылкой для проведения дальнейших исследований применения ультразвуковых колебаний для повышения эффективности процесса калибрования отверстий в деталях:

- неравной жесткости, обусловленной сложностью их конструктивного исполнения;
- из композиционных материалов;
- из труднообрабатываемых материалов, таких как нержавеющая сталь, титан и др.;
- из мягких материалов.

Выводы по главе 5

1. Предложенная на основе теоретических и экспериментальных исследований методика с применением САПР ТП позволяет реализовать процесс проектирования рациональных технологических операций и систем калибрования отверстий с применением УЗК, воздействующих на деталь.

2. Представлены виды конструктивного исполнения дорнов для калибрования отверстий различной формы, приведены рекомендуемые значения геометрических параметров рабочей части дорнов, предпочтительные материалы для их изготовления и виды оборудования.

3. В обобщённом виде сформулированы основные рекомендации, направленные на обеспечение эффективной работы ультразвуковых колебательных систем в процессе комбинированного калибрования отверстий.

4. Предложенный способ комбинированного калибрования отверстий с применением УЗК внедрен на реальных деталях, изготавливаемых на предприятии РКТЦ «Технология».

5. Сформулированы направления дальнейших исследований в области калибрования отверстий с применением УЗК путем воздействия их на деталь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится комплекс научно-технических решений задачи, направленной на совершенствование технологии калибрования отверстий дорном. Задача решена на основе наложения ультразвуковых колебаний на деталь, установления закономерностей их влияния на качество поверхности и силу деформирования, разработки методики проектирования операций калибрования и рекомендаций по их практической реализации.

Получены следующие основные выводы, научные и практические результаты:

1. Предложена технологическая система (патент № 2817100) калибрования отверстий дорном с наложением УЗК на деталь, которая, в отличие от технологической системы с наложением УЗК на дорн, обладает рядом технико-экономических преимуществ: автономность акустического блока от технологического оборудования, его компактность, сокращение количества элементов волноводной колебательной системы, обеспечение концентрации акустической энергии непосредственно в очаге деформации, возможность использования малогабаритного и универсального оборудования для осуществления процесса калибрования.

2. Установлено, что наибольший технологический эффект калибрования отверстий дорном в условиях воздействия УЗК на деталь, при котором обеспечивается требуемая точность и шероховатость поверхности, достигается при натягах, не превышающих $2/3$ допуска на размер исходного отверстия, скорости перемещения дорна 0,02–0,05 м/мин и амплитуде УЗК в контактной зоне дорна с деталью 4–6 мкм.

3. Полученная в результате моделирования процесса формирования деформированного поверхностного слоя формула для расчета силы калибрования отверстия позволяет определить степень влияния на него УЗК. Установлено, что сила уменьшается на величину ультразвукового давления в зоне контактного взаимодействия дорна с поверхностью и при амплитуде колебаний в зоне очага

деформации 4–6 мкм обеспечивает снижение силы калибрования в среднем в 1,2 раза.

4. Экспериментально, с применением индукционного метода, подтверждена акустическая модель распространения ультразвуковых волн в детали типа диска, предложенная на основе законов геометрической акустики, согласно которой в условиях установившегося ультразвукового поля в детали формируются по концентричным окружностям кольцевые волновые фронты различной амплитуды, снижающейся от наружной поверхности образца к поверхности отверстия и оказывающие определенное акустическое давление в локальной зоне их действия. На основе этих исследований определены коэффициенты затухания УЗК, которые для материалов исследуемых образцов из сталей 35, 45, 30ХГСА равны 0,0038–0,0044.

5. Доказано, что ультразвуковое воздействие на деталь приводит к снижению её микротвердости материала на величину, соизмеримую с величиной акустического давления в локальной зоне их действия. Установлено, что в месте контакта источника УЗК с наружной цилиндрической поверхностью образца исходная микротвердость снижается в среднем в 1,25 раза, а поверхностная микротвердость отверстия, находящегося от источника УЗК на расстоянии 15–35 мм, в 1,15 раза. Калибрование отверстий дорном при амплитуде УЗК в зоне очага деформации 4–6 мкм также сопровождается снижением микротвердости деформированного поверхностного слоя отверстия в 1,15–1,18 раза.

6. Доказано, что калибрование отверстий в условиях ультразвукового воздействия на деталь позволяет снизить величину высоты неровностей профиля поверхности отверстия в 10 раз по сравнению с исходной поверхностью. В результате проведенного полного факторного эксперимента установлено, что достигаемый эффект обеспечивается главным образом за счет введения в очаг деформации ультразвуковых колебаний через деталь.

7. Разработанный комплекс расчетных зависимостей позволяет с достаточной для практики точностью определить технологические параметры процесса и характеристики качества поверхностного слоя (микротвердость, высота

неровностей профиля) отверстий, модифицированного в процессе калибрования дорном с наложением УЗК на деталь, и является основой методики проектирования операции калибрования отверстий дорном, исходя из условия обеспечения требуемой точности и шероховатости поверхности и выбора средств их технологического оснащения.

8. Внедрение технологии калибрования отверстий дорном с наложением УЗК на деталь для обработки деталей звездочка, изготавливаемых в РТЦ «Технология», показало, что она позволяет обеспечить заданное ТУ качество поверхности отверстий после сверления или лучистового растачивания деталей на универсальном оборудовании с применением небольших сил.

Библиографический список

1. ГОСТ 18296-72. Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения.
2. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.
3. ГОСТ 50.05.05-2018. Ультразвуковой контроль основных материалов (полуфабрикатов).
4. ГОСТ 9450-76. Измерение микромикротвердости вдавливанием алмазных наконечников = Measurements microhardness by diamond instruments indentation: гос. стандарт СССР (утв. Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 09.01.76 г. № 68); введен 1977.01.01; переизд. март 1993. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 25 с.
5. Абрамов О.В. Опыт применения ультразвука в процессах обработки металлов давлением / О.В. Абрамов. – М.: Машиностроение, 1980.
6. Абрамов О.В. Ультразвуковая обработка материалов / О.В. Абрамов, И.Г. Хорбенко, Ш. Швегла; под ред. О.В. Абрамова. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
7. Автоматизация технологии изготовления газотурбинных авиационных двигателей. Часть первая / В.Ф. Безъязычный, В.А. Полетаев, Т.Д. Кожина [и др.]; под ред. В.Ф. Безъязычного и И.В. Крылова. – М.: Машиностроение, 2012. – 560 с.
8. Агапов С.И. Нарезание зубчатых колес с использованием ультразвука: моногр. / С.И. Агапов, Ю.И. Сидякин. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 210. – 148 с.
9. Агапов С.И. Повышение эффективности механической обработки путем применения ультразвука: моногр. / С.И. Агапов, В.В. Головкин. – Самара: Изд-во СНЦ, 2010. – 134 с.
10. Арляпов А.Ю. Обеспечение точности и качества поверхностного слоя глубоких отверстий малого диаметра в толстостенных заготовках дорном твердосплавными прошивками: дис. ...канд. техн. наук. – Томск: ТПУ, 2004. – 161 с.

11. Артемьев В. В. Ультразвук и обработка материалов / В.В. Артемьев, В.В. Клубович, В. В. Рубаник. Минск: Экоперспектива, 2003. – 335 с.
12. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону, 2008. – 694 с.
13. Бабичев А.П. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей (очистка, мойка, удаление облоя и заусенцев, обработка кромок): моногр. / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, Г.А. Прокопец.– Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2010. – 289 с.
14. Бабичев А.П. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, И.А. Бабичев. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2003. – 192 с.
15. Безнедельный А. И. Влияние технологической наследственности на формирование качества поверхностного слоя закаленных сталей при упрочняюще-чистовой обработке ультразвуковым инструментом / А. И. Безнедельный, В. Б. Асанов, В. П. Гилета // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2012. № 4(57). – С. 19-22.
16. Берберов С. А. Исследование процесса калибрования шлицевых отверстий фасонными дорнами: автореф. дис. ...канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1971. – 25 с.
17. Берберов С. А. Повышение качества шлицевых отверстий в термообработанных деталях дорном / С. А. Берберов, Н. И. Берберова, К. С. Кешишьян // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. № 8(128). – С. 10-13.
18. Берберов С.А. Применение фасонных дорнов для калибрования шлицевых отверстий в термообработанных деталях / С.А. Берберов, В.А. Лебедев // Научно-технические технологии в машиностроении. – Брянск. 2017. № 9(75). – С. 38-41.
19. Биргер И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 232 с.

20. Блюменштейн В. Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин / В. Ю. Блюменштейн, В. М. Смелянский. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.
21. Бознак А.О. Управление остаточными напряжениями при обработке дорном отверстий в толстостенных цилиндрах: дис. ...канд. техн. наук: Томск, 2018. – 186 с.
22. Боровин Ю. М. Повышение геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя при финишной ультразвуковой обработке: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2005. – 140 с.
23. Браславский В.М. Технология обработки крупных деталей роликами / В.М. Браславский. – М.: Машиностроение, 1975. – 160 с.
24. Бровер А.В. Упрочнение инструментальных сталей лазерно-акустическим методом / А.В. Бровер, А.Н. Кочетов // СТИН. – 2007. – № 5. – С. 35–39.
25. Бутенко В.И. Электронно-дислокационная теория контактного взаимодействия поверхностей твердых тел / В.И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007. – 208 с.
26. Васильева А.Г. Деформационное упрочнение закаленных конструкционных сталей / А.Г. Васильева.– М.: Машиностроение, 1981. – 231 с.
27. Витенберг Ю. Р. Шероховатость поверхности и методы её измерения / Ю. Р. Витенберг. – М.: Судостроение, 1971. – 96 с.
28. Влияние режимов термической обработки на коэффициент акустических потерь в материале ультразвукового инструмента / В. Ю. Путинцев, А. А. Новиков, Д. А. Негров [и др.] // Омский научный вестник. – 2017, № 2 (152).– С. 28-32.
29. Влияние ультразвуковой обработки на механические свойства металлов, подвергнутых интенсивной пластической деформации / В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко, Дж. Т. Вонг [и др.] // Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus. – 2022. – Vol. 66, No 3. – Pp. 356-364.

30. Влияние ультразвуковых колебаний на процесс старения различных металлических сплавов / В.А. Александров, Б.А. Кудряшов, К.К. Иванов [и др.] // Научные технологии в машиностроении. 2020, № 2. – С. 10-15.
31. Вулых Н. В. Формирование микрогеометрии упрочненного слоя деталей при локальном и охватывающем поверхностно-пластическом деформировании: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2002. – 18 с.
32. Выборнов Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия / Б.И. Выборнов. – 2-е изд.– М.: Металлургия, 1985.– 256 с.
33. Гаранин Г.В. Ультразвуковой стенд контроля физико-механических свойств металлов и сплавов (на примере системы титан-водород): дис. ... канд. техн. наук.– Томск, 2015. –126 с.
34. Гершгал Д.А. Ультразвуковая технологическая аппаратура / Д.А. Гершгал, В.М. Фридман. – М.: Энергия, 1976. – 318 с.
35. Гилета В. П. Напряженное состояние упрочненного слоя после алмазной ультразвуковой обработки / В. П. Гилета, Г.А. Исхакова // Сверхтвердые материалы. –1990. – № 3. – С. 52-56.
36. Горохов В.А. Обработка деталей пластическим деформированием / В.А. Горохов. К.: Техника, 1978. – 192 с.
37. Гринченко И. Г. Упрочнение деталей из жаропрочных и титановых сплавов / И. Г. Гринченко. –М.: Машиностроение, 1971. – 120 с.
38. Гриценко Э.И. Исследование качества поверхности отверстий, обработанных режущим инструментом и твердосплавными деформирующими протяжками: автореф. дис. ...канд. техн. наук. – Харьков, 1974. – 27 с.
39. Дробеударное упрочнение деталей машин / М.М. Матлин, В.О. Мосейко, В.В. Мосейко [и др.]–М.: Машиностроение, 2008. – 230 с.
40. Зайдес С. А. Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования / С.А. Зайдес.– Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2021. – 504 с.
41. Зайдес С.А. Моделирование процессов поверхностного пластического деформирования / С.А. Зайдес, Е.Ю. Кропоткина, А.Р. Лебедев; под ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. – 309 с.

42. Зайдес С.А. Технологическая механика осесимметричного деформирования: моногр. / С.А. Зайдес, А.Н. Исаев. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 432 с.

43. Исаев А.Н. Аналитическое исследование напряжений и деформаций в процессах упругопластической осадки высоких тонкостенных цилиндров, обработанных дорном / А. Н. Исаев, А. Р. Лебедев, С. В. Власкин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – Т. 13, № 4. – С. 155-159.

44. Исаев А.Н. Механико-математическое моделирование формообразующих операций в процессах изготовления изделий из трубчатых заготовок / А.Н. Исаев. – Ростов-на-Дону, 2004. – 271 с.

45. Исследование влияния ультразвуковых колебаний на качество поверхности отверстий при калибровании / Ю.А. Тороп, В.А. Лебедев, М.М. Алиев [и др.] // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. тр. Междунар. науч. симпоз. технологов-машиностроителей. –Ростов-на-Дону. – 2022.– С. 296-300.

46. Источники мощного ультразвука / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1967. – 380 с.

47. Каледин Б.А. Повышение долговечности деталей поверхностным деформированием / Б.А. Каледин, П.А. Чепя. – Минск: Наука и техника, 1974. – 232 с.

48. Калибрование шлицевых отверстий фасонными дорнами / Ю.Г. Проскуряков [и др.] // Вестник машиностроения. – 1971. – № 6. – С. 57-60.

49. Киричек А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. –М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.

50. Киселев Е. С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля: учеб. пособие / Е. С. Киселев.– Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 186 с.

51. Китайгородский Ю.И. Инженерный расчет ультразвуковых колебательных систем / Ю.И. Китайгородский, Д.Ф. Яхимович. –М.: Машиностроение, 1982.
52. Клубович В.В. Ультразвуковая обработка материалов / В.В. Клубович, А.В. Степаненко. –Минск: Наука и техника, 1981.
53. Костецкий Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий.– Киев: Техника, 1976. – 291 с.
54. Кривошея В. В. Влияние угла рабочего конуса деформирующего элемента на процесс деформирующего протягивания цилиндрических отверстий: автореф. дис. ...канд. техн. наук. – Киев, 1987. – 16 с.
55. Кроха В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: справ. / В.А. Кроха. – М.: Машиностроение, 1980. – 246 с.
56. Кукин С. Ф. Изучение влияния предварительной ультразвуковой обработки на результаты нормализации стали 40Х / С. Ф. Кукин, Т. Н. Синиченко // *Металлургия: республик. межведомств. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2011. – Вып. 33, ч. 2.– С. 54-65.
57. Кулаков Ю. М. Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю. М. Кулаков, В. А. Хрульков. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
58. Кулемин Л.В. Затухание ультразвука в железе и сплавах на основе железа при больших амплитудах колебательной деформации / Л.В. Кулемин, В.Я. Мапаепко // *Акустический журнал.*– 1976.–Т.ХХII, вып. № 1. – 53-60 с.
59. Курашкин К.В. Исследование влияния характеристик структуры материала на акустические параметры / К.В. Курашкин, В.В. Мишакин // *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.*–Нижний Новгород.– 2011. – № 2(87). – С. 190-198.
60. Лазарев С. Ю. Свойства поверхности стали 45 с покрытиями из минеральных материалов / С. Ю. Лазарев, Г. А. Головлев // *Металлообработка.*– 2011.– № 5 (65). – 23-28 с.
61. Ландау Л.Д. Механика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.– М.: Гостехиздат, 1954. – 628 с.

62. Лебедев В.А. Дорнование шлицевых отверстий и пути повышения эффективности процесса / В.А. Лебедев, Ю.А. Тороп, О.Е. Барышникова // Прогрессивные технологии и системы машиностроения.– 2020. – № 2 (69). – С. 30-35.
63. Лебедев В.А. Оценка эффективности влияния ультразвуковых колебаний на повышение интенсивности вибрационной отделочной обработки деталей / В.А. Лебедев, И.Л. Вяликов // Научные технологии в машиностроении. –2014. – № 4.
64. Лебедев В.А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования / В.А. Лебедев. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2006.
65. Манаков Ю.А. Исследования влияния конструктивно-технологических факторов на точность калибрования отверстий в деталях часовых механизмов: автореф. дис. ...канд. техн. наук. – М., 1978.–20 с.
66. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов / А.И. Марков.– М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.
67. Маталин А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А. А. Маталин. – Киев: Техника, 1971. – 144 с.
68. Метод ультразвукового упрочнения внутренних цилиндрических поверхностей / В.Ф. Пегашкин, В.В. Евдокимов, Т.М. Гаврилова [и др.] // Боеприпасы. – 2001. – № 4–5. – С. 62–63.
69. Михайлов И.Г. Об абсолютных измерениях ультразвуковых полей в твердых телах / И.Г. Михайлов, В. А. Шутилов //Акустический журнал.– Т. 10. Вып. 1.– С. 98-102.
70. Монченко В. П. Эффективная технология производства полых цилиндров / В. П. Монченко. – М.: Машиностроение, 1980. – 248 с.
71. Монченко В.П. Обработка поверхностей гладких втулок давлением/ В.П. Монченко // Труды ВИСХОМ им. В.П. Горячкина, 1971. – Вып. 8.– С. 134–138.
72. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении /О.В. Абрамов [и др.]; под общ. ред. О.В. Абрамова и В.М. Приходько. –М.: Янус-К, 2006.

73. Нерубай М.С. Повышение эффективности механической обработки труднообрабатываемых материалов путем применения ультразвука: автореф. дис. ...д-ра. техн. наук. – Куйбышев: КПИ, 1989. – 35 с.
74. Нерубай М.С. Ультразвуковая механическая обработка и сборка / М.С. Нерубай, Б.Л. Штриков, В.В. Калашников. – Самара: Кн. изд-во, 1995. – 191 с.
75. Никитюк М.М. Применение ультразвука в технологии машиностроения / М.М. Никитюк. – Киев: "Знание" УССР, 1980.
76. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справ. / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
77. Осипенкова Г.А. Отделочно-упрочняющая обработка с применением ультразвуковых крутильных колебаний / Г.А. Осипенкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2015. – 179 с.
78. Остаточные напряжения и точность деталей, обработанных дорном // Ю.Г. Проскуряков, А.Н. Исаев, Л.В. Попов [и др.] // Вестник машиностроения. – 1973. – № 7. – С. 57-60.
79. Охотин И. С. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах с большими натягами: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2010. – 171 с.
80. Оценка влияния ультразвуковых колебаний на напряженное состояние поверхностного слоя отверстия, обработанного методом калибрования / В.А. Лебедев, Ю.А. Тороп, А.Н. Кочетов [и др.] // Научные технологии в машиностроении. – 2023. – № 5 (143). – С. 33-39.
81. Павлов В.А. Физические основы пластической деформации металлов / В.А. Павлов. – М.: АН СССР, 1962. – 200 с.
82. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным деформированием / Д.Д. Папшев. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
83. Петушко И.В. Оборудование для ультразвуковой обработки: моногр. / И.В. Петушко. – СПб.: Андреев. изд. дом, 2005.

84. Писаренко Г.С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев, 1971. – 375 с.
85. Повышение эффективности процесса обработки дорном шлицевых отверстий в условиях воздействия ультразвукового поля / С.А. Берберов, В.А. Лебедев, А.Н. Кочетов [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – Т. 16, № 9 (189). – С. 391-394.
86. Подураев В.Н. Технология физико-химических методов обработки / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
87. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения: в 2 т. / М.С. Поляк. – М.: Л.В.М.-СКРИПТ; Машиностроение, 1995. – Т.2. – 688 с.
88. Приходько В.М. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / В.М. Приходько; под ред. О.В. Абрамова. – М.: Янус-К, 2006. – 688 с.
89. Проскураков Ю. Г. Обработка отверстий дорном / Ю. Г. Проскураков. – М.: МАШГИЗ, 1961. – 192 с.
90. Проскураков Ю. Г. Объемное обработка отверстий дорном / Ю.Г. Проскураков, В.Н. Романов, А. Н. Исаев. – М.: Машиностроение, 1984. – 223 с.
91. Проскураков Ю.Г. Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов / Ю.Г. Проскураков. – М.: Машиностроение, 1971. – 208 с.
92. Протяжки для обработки отверстий / Д. К. Маргулис, М. М. Тверской, В. Н. Ашихмин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
93. Рахимьянов Х. М. Прогнозирование состояния поверхностного слоя при комбинированном поверхностном упрочнении деталей машин / Х. М. Рахимьянов, Ю. В. Никитин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 10(70). – С. 43-48.
94. Реслер И. Механическое поведение конструкционных материалов / И. Реслер, Х. Хардерс, М. Бекер; пер. с нем. под ред. С. Л. Баженова. – М.: Интеллект, 2011. – 504 с.

95. Родионов Г.А. Влияние ультразвуковых колебаний на изменение механических характеристик поверхностей контакта / Г.А. Родионов, О.М. Батищева, В.А. Папшев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук.– 2013. – Т. 15, № 4(2). – С. 405-409.

96. Розенберг А. М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А. М. Розенберг, О. А. Розенберг. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.

97. Северденко В.П. Обработка металлов давлением с ультразвуком / В.П. Северденко, В.В. Клубович, А.В. Степаненко.– Минск: Наука и техника, 1973. – 288 с.

98. Седов Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. - 4-е изд., исправ. и доп. – М.: Наука, 1984. – Т. 2. –560 с.

99. Селимов Н.Р. Зависимость микрокротвердости металлических поверхностей от силы давления и амплитуды колебаний инструмента при ультразвуковой безабразивной обработке / Н.Р. Селимов, Ю.В. Холопов // Машиностроение, 1987. – № 7. – С. 63-68.

100. Сивцев Н.С. Развитие теории и технологии обработки дорном отверстий в нестационарных условиях трения инструмента с заготовкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ижевск. – 2005. – 36 с.

101. Скворцов В. Ф. Исследование процесса обработки дорном как метода повышения точности и качества поверхности отверстий в термообрабатываемых деталях: дис. ...канд. техн. наук. – Томск, 1980. – 186 с.

102. Скворцов В.Ф. Точность калиброванных дорном деталей после термообработки / В.Ф. Скворцов, М.Г. Гольдшмидт // Технология машиностроения и вопросы прочности. –Томск, 1977. – С. 51-56.

103. Смирнов В.С. Теория обработки металлов давлением / В.С. Смирнов.– М.: Металлургия, 1973. – 496 с.

104. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов / Г.А. Смирнов-Аляев. –Л.: Машиностроение, 1968. – 272 с.

105. Совершенствование упрочняющих технологий высоконагруженных поверхностей деталей нефтегазодобывающего оборудования / М.В. Песин, В.Ф. Макаров, С.А. Мельников [и др.] // Инновационное и цифровое машиностроение: мат. Всерос. науч.-техн. конф. (Уфа, 07–09 апреля 2021 года). – Уфа: УГАТУ, 2021. – С. 71-74.
106. Спиваков В.А. Вопросы интенсификации ультразвуковой обработки / В.А. Спиваков, А.А. Алферов // Машиностроение. –1997. – № 6.
107. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г.Л. Алитан, И.А. Байсупов, Ю.М. Барон [и др.]; под общ. ред. В.А. Волосатова. – Л.: Машиностроение, 1988. – 719 с.
108. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: машиностроение, 1986. –Т. 2. –496 с.
109. Степанова Т. Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин / Т. Ю. Степанова / Иван. гос. хим.-технол. ун-т. –Иваново, 2009. – 64 с.
110. Сулима А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. П. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. –238 с.
111. Суслов А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
112. Суслов А. Г. Справочник технолога / А.Г. Суслов. –М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
113. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
114. Тамаркин М.А. Исследование параметров качества поверхности при обработке в гранулированных рабочих средах / М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко // Механика ударно-волновых процессов в технологических системах: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2012. – С. 136-140.

115. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базаров, А.С. Васильев [и др.]. М.: Изд-во МАИ, 2000. – 360 с.

116. Технология электрических методов обработки: учеб. пособие / В.П. Смоленцев, А.В. Кузовкин, А.И. Болдырев [и др.]. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2002. – 310 с.

117. Толстопятов С.Н. К вопросу затухания высокочастотных колебаний в поликристаллическом твердом теле / С.Н. Толстопятов, Е.В. Голованова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова.– 2016 .–№1.–С. 37-39.

118. Толстопятов С.Н. Экспериментально-теоретическое исследование затухания высокочастотных колебаний в пластично деформируемом образце: автореф. дис. ...канд. техн. наук. – Тула.– 2005. – 20 с.

119. Тороп Ю.А. Калибрование отверстий с применением ультразвуковых колебаний / Ю.А. Тороп // Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов: сб. тр. науч.-техн. конф., посвященной памяти заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, доктора технических наук, профессора А.А. Рыжкина. –2023. –С. 324-329.

120. Тороп Ю.А. Обоснование акустических параметров процесса калибрования отверстий с применением ультразвуковых колебаний / Ю.А. Тороп, В.А. Лебедев // Современное перспективное развитие науки, техники и технологий: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф.– Воронеж.– 2023. –С. 406-411.

121. Тороп Ю.А. Технологический эффект калибрования отверстий в условиях ультразвукового воздействия на деталь / Ю.А. Тороп // Упрочняющие технологии и покрытия. –2023. –Т. 19, № 2 (218).– С. 56-58.

122. Ультразвук и пластичность / В.П. Сербенко [и др.].– Минск: Наука и техника, 1976. – 445 с.

123. Ультразвуковая технология / Б.А. Агранат, В.И. Башкиров, Ю.И. Китайгородский [и др.]; под ред. Б.А. Агранат. – М.: Металлургия, 1974. – 504 с.

124. Ультразвуковые колебательные системы для синтеза полимерных композиционных материалов: моногр. / Д.А. Негров, Е.Н. Еремин, А.А. Новиков [и др.]. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. – 128 с.

125. Управление энергосиловыми параметрами процесса обработки дорном фасонных отверстий путем ультразвуковых колебаний / В.А. Лебедев, Ю.А. Тороп, С.А. Берберов [и др.] // Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий: сб. тр. науч. семинара технологов-машиностроителей. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2021. – С. 498-504.

126. Физика и техника мощного ультразвука. Кн. 2: Мощные УЗ поля / под ред. Л. Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – 266 с.

127. Физико-механические свойства поверхностного слоя после протягивания / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, Э.И. Гриценко [и др.] // Качество поверхностного слоя при протягивании. – Рига: Зинатне, 1976. – С. 3-11.

128. Физико-технологические основы методов обработки / под ред. А. П. Бабичева. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 409 с.

129. Физические основы, технологические процессы и оборудование ультразвуковой обработки материалов / Б.М. Бржозовский [и др.]. – Саратов: Саратовский гос. техн. ун-т, 2006.

130. Хмелев В.Н. Ультразвуковая размерная обработка материалов / В.Н. Хмелев, Р. В. Барсуков, С. Н. Цыганок. – Барнаул, 1999.

131. Шадуро Р.Н. Прогнозирование и управление точности при ультразвуковой обработке дорном отверстий / Р. Н. Шадуро, В. Е. Понкратов, П. А. Шацкий // Вестник Белорус.-Рос. ун-та. – 2006. – № 3. – С. 106–112.

132. Шевцов С.Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах / С.Н. Шевцов. – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ. – 194 с.

133. Шнейдер Ю. Г. Технология финишной обработки давлением: справ. / Ю. Г. Шнейдер. – СПб.: Политехника, 1998. – 414 с.

134. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю.Г. Шнейдер. – СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. – 264 с.

135. Эффективные технологии обработки дорном, протягивания и деформирующе-режущей обработки / С.К. Амбросимов, А.Н. Афонин, А.Р. Ингеманссон [и др.]; под ред. А.В. Киричека. – М.: Спектр, 2011. – 327 с.

136. Якимов М.А. Структура и свойства сталей после ультразвукового упрочнения / М.А. Якимов, Е.В. Баллин, Г.М. Гаврилова // Молодежь и наука: мат. регион. науч.-практ. конф. студентов (16 мая 2007 г., г. Нижний Тагил). В 2 т.– Нижний Тагил: НТИ (фил.) УГТУ-УПИ, 2007. – Т. 1. –С. 47–50.

137. Янченко И.И. Технологические основы обработки точных отверстий дорном: в 2 ч. Ч. 2: Влияние контактно-кинематических условий на качество деталей и соединений / И. И. Янченко, В. В. Тарасов, Н. С. Сивцев. – Ижевск: Изд-во УдНЦ УрО РАН, 2003. – 163 с.

138. Янченко И.И. Технологические основы обработки точных отверстий дорном: в 2 ч. Ч. 1: Теория управления контактно-кинематическими условиями при обработке дорном / И. И. Янченко, В. В. Тарасов, Н. С. Сивцев. – Ижевск: Изд-во ИПМ УрО РАН, 2002. – 138 с.

139. Ярославцев В.М. Ультразвуковая абразивная обработка / В.М. Ярославцев.– М.: МГТУ им. Баумана, 2004.

140. Improving the efficiency of the process of burnishing splined holes under the influence of an ultrasonic field / V.A. Lebedev, Y.A. Torop, O.E. Baryshnikova [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 16. Ser. Dynamics of Technical Systems, DTS 2020.– 2021.– P. 012016.

141. Technological Effect of Hole Calibration in the Conditions of Ultrasonic Exposure to the Part / V.,Lebedev, Y. Torop, O. Baryshnikova // Lecture Notes in Mechanical Engineering.– 2023.–Pp. 553–564.

142. Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н. Методы планирования эксперимента и обработки данных: учеб. пособие / Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников. – Самара: СГТУ, 2016. – 131 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ



Российская Федерация
 ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
 РТЦ «ТЕХНОЛОГИЯ»
 (ООО РТЦ «Технология»)

346780 Ростовская область г. Азов, пер. Маяковского 77 «В»
 тел/факс (863-42)5-86-56;5-86-46 E-mail: rtc-azov@yandex.ru.

В диссертационный совет
 по защите кандидатских и
 докторских диссертаций

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационного исследования
 ТОРОПА ЮРИЯ АЛЕКСЕЕВИЧА на тему «Технологическое обеспечение
 калибрования отверстий дорнованием с наложением ультразвука на деталь»

ООО РТЦ «Технология» подтверждает, что предложенный аспирантом
 ФГОБУ ВО «Донской государственный технический университет» Тороп
 Юрием Алексеевичем, на основе проведённых им исследований по
 технологическому обеспечению калибрования отверстий дорнованием с
 наложением ультразвука на деталь, способ и методика проектирования
 внедрены в технологию обработки зубчатых колес для отделочно -
 упрочняющей обработки отверстий, подвергаемых при изготовлении
 термической обработке.

Способ позволил:

- сократить количество предварительных технологических переходов
 для получения отверстия с требуемой по ТУ точностью и шероховатостью
 поверхности;
- использовать для реализации процесса калибрования отверстий
 универсальные металлорежущие станки.

Директор ООО РТЦ «Технология»

МП



А.В. Русанов

Технические характеристики испытательной машины ИП-500

Наибольшая создаваемая нагрузка	кН 500
Отображение данных испытания	цифровой циферблат
Тип привода и силоизмерителя	электрогидравлический, торсионный
Диапазон измерения основной / дополнительный, кН	50-500/20-200
Погрешность при нагружении, %	± 1
Рабочий ход гидравлического поршня, мм	100
Высота рабочего пространства, включая ход гидравлического поршня, мм	360
Максимальная скорость перемещения гидравлического поршня, мм/мин	240
Расстояние между колоннами, мм	340
Размеры плит сжатия, мм	210x210
Габаритные размеры (ДxШxВ), мм	не более 1160x605x1620
Масса испытательной машины, кг	не более 710
Мощность, кВт	1,5
Электропитание, В/Гц	~380/50

Технические характеристики генератора УЗГ 2-1,0/22

Потребляемая мощность $P_{вх}$, кВт	1,8
Напряжение питания U , В	220
Выходная мощность $P_{вых}$, кВт	1
Рабочая частота f_r , кГц	$22 \pm 1,65$
Схема стабилизации (с автоматической поднастройкой частоты)	АПЧ
Габаритные размеры, мм	300× 550 × 650
Масса M , кг	75
Тип нагрузки	ПМС 1-1
Охлаждение	водяное
Расход воды не менее, л/мин	10
Давление подачи воды, МПа	0,15 – 0,2

Основные технические характеристики ПМС-1-1

Потребляемая мощность, не более	1 кВт
Напряжение питания	220 В
Рабочая частота	22 кГц
Амплитуда смещения торца	10 мкм
Масса, не более	4,5 кг
Габаритные размеры	Ø 72 x 356 мм

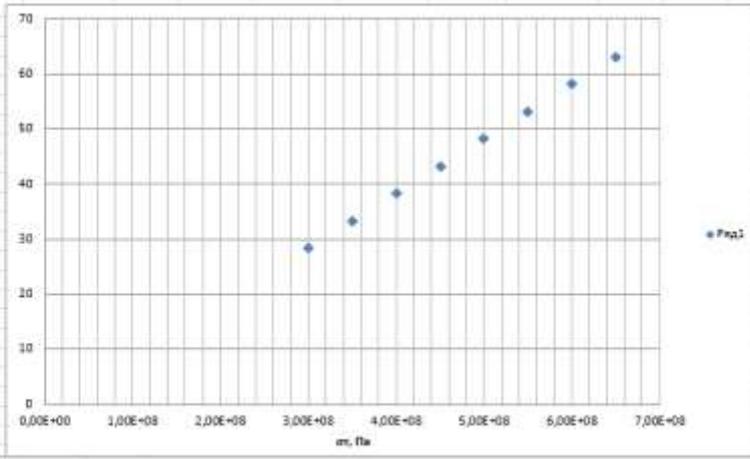
Определение величины удельного давления
в точке контактного взаимодействия дорна с поверхностью
с учетом ультразвукового воздействия на деталь

$$p = \frac{[\beta\sigma_T - 2\rho c\omega A] \left[(D_{\text{amin}} + 0,53IT)^2 - D_{\text{amin}}^2 \right]}{2D_{\text{amin}}^2} l_n \left[\frac{0,53 IT \left(1 + \frac{f_{\text{TP}}}{\text{tg } \alpha} \right)}{(1 - f_{\text{TP}} \text{tg } \alpha) \text{tg } \alpha} \ln \left(1 + \frac{0,53 IT}{D_{\text{amin}}} \right) + 2f_{\text{TP}} \left(l_n + \frac{0,53 IT}{\text{tg } \alpha} \right) + \frac{0,15 IT}{\text{tg } \alpha} (2 \text{tg } \alpha + f_{\text{TP}}) \right]$$

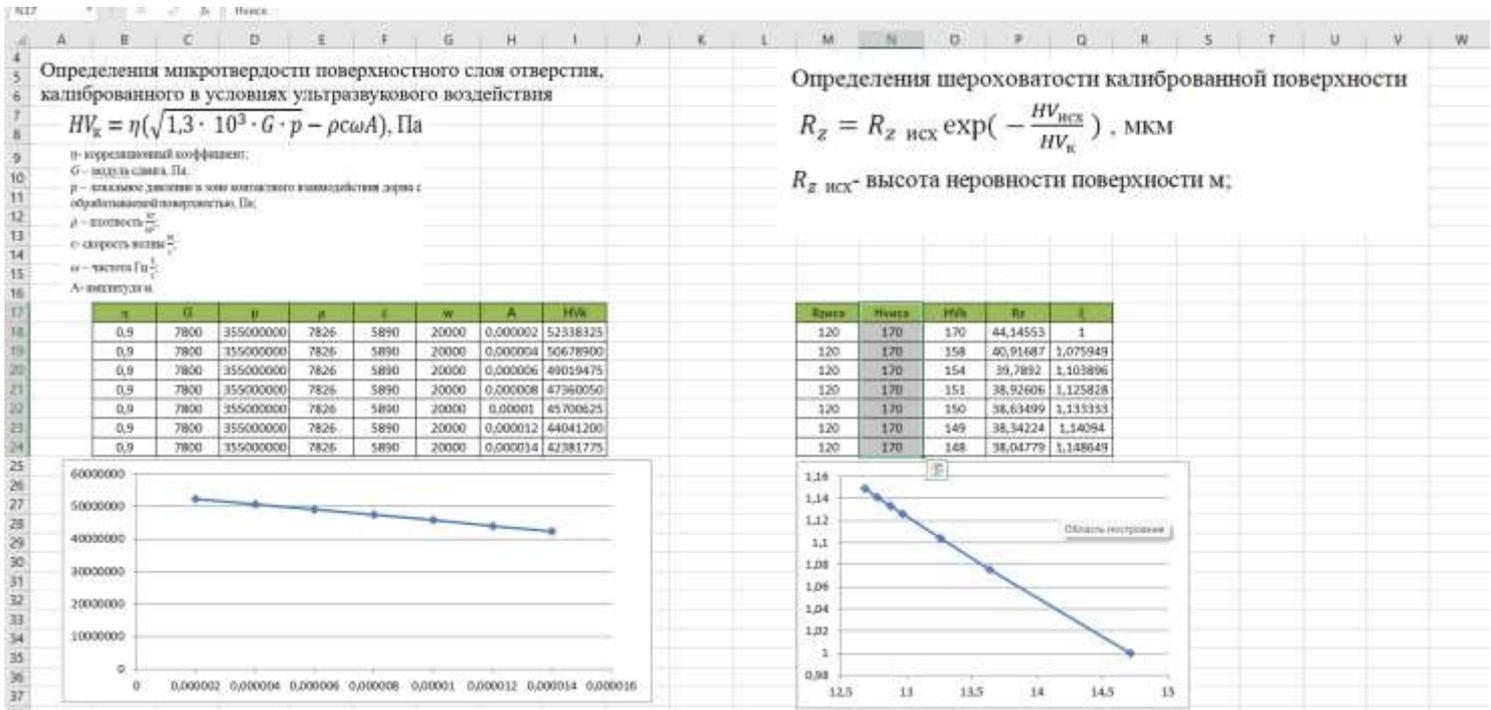
7,2537E-05

№	σ _т	ρ	c	W	A	μ	μ	D _н	IT	h	μ	tgα	ln
	Па	кг/м ³	м/с	1/с	м	м	м	м	м	м	—	—	м
1,1	300000000	7800	5890	18000	0,000006	0,029	0,0288	0,00006	0,002	0,15	0,087	0,095	
1,1	350000000	7800	5890	18000	0,000006	0,029	0,0288	0,00006	0,002	0,15	0,087	0,095	
1,1	400000000	7800	5890	18000	0,000006	0,029	0,0288	0,00006	0,002	0,15	0,087	0,095	
1,1	450000000	7800	5890	18000	0,000006	0,029	0,0288	0,00006	0,002	0,15	0,087	0,095	
1,1	500000000	7800	5890	18000	0,000006	0,029	0,0288	0,00006	0,002	0,15	0,087	0,095	
1,1	550000000	7800	5890	18000	0,000006	0,029	0,0288	0,00006	0,002	0,15	0,087	0,095	
1,1	600000000	7800	5890	18000	0,000006	0,029	0,0288	0,00006	0,002	0,15	0,087	0,095	
1,1	650000000	7800	5890	18000	0,000006	0,029	0,0288	0,00006	0,002	0,15	0,087	0,095	

P	
H	
28,34784	3857
33,30347	3353
38,25909	3849
43,21471	4344
48,17034	4840
53,12596	5342
58,08158	5876
63,0372	6390



Определение микротвердости поверхностного слоя отверстия, калиброванного в условиях ультразвукового воздействия, и определение шероховатости калиброванной поверхности с применением УЗК



Планирование эксперимента и обработка полученных результатов

Планирование эксперимента и обработка данных, полученных с помощью представленной в п. 3.2.4 измерительной аппаратуры, ведется на основе методики оптимального планирования [142].

В случае получения рассматриваемых зависимостей, весьма близких к линейному типу (поверхность отклика имеет малую кривизну), имеется возможность значительно сократить объем экспериментов и расчетов, отказавшись от относительно сложных планов второго порядка, и перейти к планам первого порядка и линеаризованным моделям. При этом модели имеют мультипликативный вид с использованием в качестве сомножителей показательных функций, например

$$E = b_0 \cdot P^{b_1} \cdot V^{b_2}, \quad (1.1)$$

где E – выход;

P, V – соответствующие факторы;

b_0, b_1, b_2 – коэффициенты.

Линеаризация моделей осуществляется логарифмированием выражения (1.1):

$$\lg E = \lg b_0 + b_1 \lg P + b_2 \lg V. \quad (1.2)$$

Следует отметить, что планы второго порядка не удовлетворяют одновременно всем критериям оптимальности, в то время как планы полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа 2^i одновременно ортогональны, симметричны, ротабельны и обладают свойствами нормировки.

Обработка экспериментальных исследований (выхода) полнофакторного эксперимента состоит из ряда этапов.

1. Однородность дисперсии выхода оцениваем по критерию Кохрена [142] неравенством

$$G_P = \frac{[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]_{\max}}{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} < G_T, \quad (1.3)$$

где G_P и G_T – расчетное и табличное значение критерия Кохрена соответственно;

N – число серий экспериментов;

n – число параллельных опытов;

\bar{y} – среднее арифметическое n выборки;

y_i – отдельное значение выхода.

2. Определяем дисперсию воспроизводимости выхода в натуральных значениях переменных:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{N(n-1)}, \quad (1.4)$$

и в логарифмах натуральных значений:

$$S_{\lg y}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (\lg y_i - \lg \bar{y})^2}{N(n-1)}, \quad (1.5)$$

где $f = N(n-1)$ – число степеней свободы.

3. Определяем коэффициенты уравнения регрессии:

$$\left\{ \begin{array}{l} b_0 = \frac{\sum_{j=1}^N (\lg y_i)}{N}, \\ b_i = \frac{\sum_{j=1}^N (\lg y_i) x_i}{N}, \\ b_{1,2} = \frac{\sum_{j=1}^N (\lg y_i) x_1 x_2}{N}. \end{array} \right. \quad (1.6)$$

4. Проверку значимости коэффициентов уравнения регрессии производим критерием Стьюдента по неравенству

$$t_P = \frac{|b_i|}{S_b} > t_T, \quad (1.7)$$

где t_P и t_T – расчетное и табличное значение критерия Стьюдента соответственно для $f = N(n-1)$;

$$S_b^2 = \frac{S_{\lg y}^2}{N \cdot n} \text{ – дисперсия коэффициентов уравнения регрессии;}$$

$f = N \cdot n$ – число степеней свободы.

5. Переход от кодовых к натуральным значениям переменных осуществляется по формуле

$$X_1 = \frac{2(\lg x - \lg x_{\max})}{\lg x_{\max} - \lg x_{\min}} + 1, \quad (1.8)$$

где x – натуральные значения переменных.

Потенцируя полученное выражение, переходим к модели (3.1).

6. Адекватность модели, иными словами то, что предсказываемые моделью результаты будут не менее точны, чем экспериментальные данные, оцениваем критерием Фишера с помощью неравенства

$$F_P = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} < F_T, \quad (1.9)$$

где F_P и F_T – расчетное и табличное значение критерия Фишера соответственно.

Дисперсия адекватности определяется по формуле

$$S_{ad}^2 = \frac{n \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - y_j)^2}{f}, \quad (1.10)$$

где \bar{y}_j – j -е среднее значение выхода;

y_j – j -е расчетное значение выхода;

$f = N - k$ – число степеней свободы;

k – число коэффициентов в уравнении регрессии (после отбрасывания).



Сущность изобретения заключается в том, что устройство для калибровки отверстий поверхностным пластическим деформированием с наложением ультразвуковых колебаний на деталь, характеризующееся содержанием технологического и акустического блоков, при этом в технологическом блоке устроены силовой шток с дорном, рабочий стол для установки детали на нем, при этом рабочий стол снабжен отверстием, большим диаметра дорна, а акустический блок, включает магнитострикционный преобразователь, преобразующий электрические колебания в механические перемещения, с помощью концентратора, установленного перпендикулярно к оси детали в приспособление закрепленное на кронштейне жестко соединенного со станиной рабочего стола, кроме этого находятся ультразвуковой генератор для преобразования электрического тока промышленной частоты в электрические колебания и датчик акустической обратной связи, связанный с устройством автоматической подстройки частоты.