На правах, рукописи

ТОРОП ЮРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КАЛИБРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ДОРНОМ С НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА НА ДЕТАЛЬ

2.5.6. Технология машиностроения2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Ростов-на-Дону - 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донской государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор Лебедев Валерий Александрович Официальные оппоненты: Фатюхин Дмитрий Сергеевич доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология конструкционных материалов» ФГБОУ ВО автомобильно-дорожный «Московский государственный технический университет (МАДИ)» Баринов Сергей Владимирович кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения» Муромского института (филиала) ФГБОУ «Владимирский государственный BO Александра университет имени Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» ФГБОУ ВО «Иркутский национальный Ведущая организация:

университет» Защита диссертации состоится «21» мая 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.277.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» по адресу: 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д.10-Б, учебный корпус №4, ауд. Б101.

исследовательский

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ «Брянский государственный технический университет» и по адресу в сети интернет https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/torop-yuriy-alekseevich.

Отзывы на автореферат высылать по адресу: 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет октября, д. 7, ФГБОУ «Брянский государственный технический университет».

Автореферат разослан «__» ____ 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.277.01 доктор технических наук, доцент

Нагоркин Максим Николаевич

технический

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из эффективных методов отделочноупрочняющей 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 Проскуряков, Розенберг, ученые: Ю.Г. Д.Д. 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 проведённых 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 обусловливающим рост шероховатости, рискам, увеличению дорне, сопротивления деформированию обрабатываемого материала, лля которого требуются большие преодоления 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 технико-экономических существенных 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 универсального оборудования для осуществления И процесса калибрования. Однако неизученность этой схемы сдерживает выработку научно обоснованных зависимостей и рекомендаций по внедрению её в технологическую практику калибрования отверстий.

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

концентратора Разработана методика расчета 4. волновода обеспечивающего ультразвуковой колебательной системы, усиление воздействия УЗК амплитуды на деталь, снижение энергозатрат И 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 ультразвуковой машиностроения, обработки, теории прочности И упругопластической деформации. Экспериментальные исследования разработанной опытно-экспериментальной выполнены на специально методов математической статистики и с установке с применением использованием современных средств измерения НИИ «Вибротехнология», НОЦ «Материалы» ДГТУ. Достоверность результатов решения поставленных задач подтверждается охватом достаточного объема научной литературы, согласованностью результатами теоретических выводов с их экспериментальной проверки, внедрением процесса калибрования для изготовления деталей в условиях РТЦ «Технология» г. Азова.

работы. Результаты диссертационного Апробация 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-нагг; всероссийской научно-технической конференции Дону, 2021–2023 инструментальных «Современные тенденции развития систем металлообрабатывающих комплексов» 2022-2024 ΓГ.; международной научно-технической конференции «Современное перспективное развитие техники и технологий», Воронеж, 2023 г.; всероссийской науки. (национальной) научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники», Ростов-на-Дону, 2023–2024 гг.; XXV Международной конференции студентов, аспирантов молодых научной И 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены технологические основы и пути совершенствования операций обработки отверстий дорном. Показано, что обработка дорном, в основе которой заложен процесс ППД, является наиболее производительным методом обработки отверстий деталей разнообразной Процесс не требует применения специального формы и размеров. технологического оснащения и наиболее востребован для повышения точности отверстий в деталях, подвергаемых термической обработке. Для процесса разработаны конструкции дорнов, реализации определены геометрические параметры рабочих поверхностей, установлены ИХ технологические параметры процесса, обусловливающие механизм ППД, которые представлены в фундаментальных работах Ю.Г. Проскурякова и научных трудах его учеников.

Анализ результатов, проведенных на сегодняшний день исследований процесса обработки отверстий дорном показал, что все они получены в условиях натягов, значительно превышающих величину половины поля допуска на размер исходного отверстия и, как следствие, сопровождающихся формообразующим эффектом. При таком подходе процесс калибрования является существенно зависимым от остаточных напряжений, формируемых в поверхностном слое, и трудно прогнозируемым с точки зрения достижения требуемой точности отверстия. В этой связи правильный выбор величины натяга является одной из ключевых задач, обеспечивающих установление связи параметров качества калиброванной поверхности с её исходными параметрами, обоснование силы калибрования и геометрических размеров дорна.

Другим важным фактором повышения эффективности отделочной и упрочняющей обработки, как свидетельствуют исследования отечественных и зарубежных ученых, обобщенные в работах Ф. Блаха, Е.Г. Коновалова, Б. Лангенекера, Л. Д. Розенберга, А.И. Маркова, В.Д. Мартынова, Е.С. Киселева, В.М Приходько, О.В. Абрамова, И.И. Муханова, В.П. Северденко, Д.С. Фатюхина, С.И. Агапова 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 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 может быть введение ультразвуковых колебаний в очаг деформации через деталь.

Исходя из вышеизложенного, была сформулирована цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена обоснованию технологических параметров и моделированию процесса калибрования отверстий в условиях воздействия ультразвуковых колебаний на деталь. На рис. 1 представлена структурная



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

схема технологической системы с наложением ультразвукового поля на деталь. Предлагаемая состоит схема ИЗ двух блоков: технологического, реализующего процесс калибрования отверстия дорном, и акустического, создающего в материале детали сложное акустическое поле. Калибрование отверстий по предложенной схеме позволяет исключить

введение ультразвукового преобразователя в конструкцию прессового оборудования, сократить количество элементов волноводной колебательной системы И таким образом снизить габариты И материалоемкость оборудования применяемого для реализации процесса калибрования, повысить степень концентрации акустической энергии непосредственно в очаге деформации за счет повышения жесткости волноводной колебательной системы, обеспечить реализацию процесса дорнования с меньшими силами.

Управляющими параметрами технологической системы являются натяг, скорость калибрования и амплитудно-частотные характеристики УЗК. Основным из них, определяющим технологический эффект калибрования отверстия, является натяг, расчетная схема которого представлена на рис. 2, где показано, что величина натяга должна находиться в пределах толщины поверхностного слоя отверстия Δ , сформированного в процессе, предшествующей калиброванию механической и термической обработки:

$$\Delta = \frac{IT}{2} + R_{ZHCX} + \Delta_{\mathrm{T}},\tag{1}$$

где IT – допуск на размер исходного (до калибрования) отверстия;

 R_{zucx} – высота неровностей профиля исходной поверхности; $\Delta_{\rm T}$ – высота нароста, 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, считая $R_{zucx} + \Delta_T \leq$ 0,25IT,рекомендовано величину натяга калибрования принимать на уровне равной $i \approx \frac{2}{2}\Delta$,





$$i = 0,53IT.$$
 (2)

)

Скорость перемещения дорна в процессе калибрования оказывает формируемой существенное влияние на волнистость поверхности Установлено, производительность наиболее И процесса. что 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.

Рассмотрев деформированный поверхностный слой отверстия в виде полого цилиндра с определённой толщиной стенки и высотой, равной длине отверстия, соизмеримой с высотой детали, который сформирован в результате пластической деформации микронеровностей поверхности, что соответствует сути калибрования, и считая, что остаточные деформации очень малы и ими можно пренебречь, получена формула для определения величины радиального удельного давления в точке контактного взаимодействия дорна с поверхностью с учетом ультразвукового воздействия на деталь:

$$p_{a} = \frac{[\beta \sigma_{\rm T} - 2\rho c \omega A] \left[\left(D_{\rm A.max} + 0.27 IT \right)^{2} - D_{\rm A.max}^{2} \right]}{2 D_{\rm A.max}^{2}}, \,\Pi a,$$
(3)

где ρ – плотность среды, кг/м³; c – скорость волны в среде, м/с; ω – частота колебаний; A – амплитуда смещения колеблющихся частиц в волне, м; β – коэффициент Лоде; $\sigma_{\rm T}$ – предел текучести; $D_{\rm d.max}$ – среднестатистический максимальный диаметр дорна; IT – допуск на размер исходного (до калибрования) отверстия, м.

В общем виде величина силы калибрования дорном *Р* представляет собой сумму сил:

$$P = P_c + P_\mu + P_{\mu}, \tag{4}$$

где *P_c* – сила, затрачиваемая на деформирование поверхности контакта дорна с отверстием по всему контуру отверстия, определяемая по формуле

$$P_{c} = p_{a} \frac{0.53 \, IT l_{\rm m} \left(1 + \frac{f_{\rm Tp}}{tg \, \alpha}\right)}{\left(1 - f_{\rm Tp} \, tg \, \alpha\right) tg \, \alpha} \, ln \left(1 + \frac{0.53 \, IT}{D_{0.min}}\right), \, {\rm H}, \tag{5}$$

где p_a – истинное давление при деформации, Па; α – угол наклона заборного конуса дорна, град; $f_{\rm Tp}$ – коэффициент внешнего трения; $D_{0.min}$ – минимальный диаметр исходного отверстия детали, м; $l_{\rm n}$ – длина периметра рабочей части дорна в радиальном сечении, м; IT – допуск на размер исходного (до калибрования) отверстия, м;

*P*_µ- сила, затрачиваемая на преодоление силы трения в направлении перемещения дорна:

$$P_{\mu} = p_a 2 f_{\rm Tp} l_{\rm II} \left(l_{\rm I} + \frac{0.53 \, IT}{tg \, \alpha} \right), \, {\rm H}; \tag{6}$$

 $l_{\rm n}$ – ширина ленточки дорна, м;

*P*_д – сила, необходимая для преодоления потерь, связанных с неравномерностью деформации:

$$P_{\rm A} = p_a \frac{0.15IT l_{\rm n}}{tg \,\alpha} \left(2 \, tg \,\alpha + f_{\rm Tp} \right), \, {\rm H}. \tag{7}$$

На основании формул (1)–(3) установлена зависимость для расчета технологической силы калибрования в условиях ультразвукового воздействия на деталь в виде:

$$P = p_a l_{\Pi} \left[\frac{0.53 \, IT \left(1 + \frac{J_{\text{Tp}}}{tg \, \alpha} \right)}{(1 - f_{\text{Tp}} \, tg \, \alpha) \, tg \, \alpha} \, ln \left(1 + \frac{0.53 \, IT}{D_{o.min}} \right) + 2f_{\text{Tp}} \left(l_{\Pi} + \frac{0.53 \, IT}{tg \, \alpha} \right) + \frac{0.15 IT}{tg \, \alpha} \left(2 \, tg \, \alpha + f_{\text{Tp}} \right) \right], \, \text{H.} \, (8)$$

Из зависимостей (3) и (8) следует, что снижение силы калибрования является результатом воздействия УЗК на деталь (рис. 3). Изменения остальных факторов, определяющих процесс калибрования, приводят к росту силы (рис. 4). Кроме того, предложенная зависимость (8) может являться предпосылкой при выборе технологического оборудования и технических средств ультразвуковой колебательной системы (УЗКС).





Рис. 3. Зависимость силы калибрования от амплитуды ультразвуковых колебаний

Рис. 4. Зависимость силы калибрования от величины натяга

Ультразвуковое воздействие на процесс калибрования отверстий, по предложенной на рис. 1 схеме, осуществляет акустический блок, который состоит из генератора электрических колебаний и ультразвуковой колебательной системы. Для выполнения технологических операций широкое применение получили УЗ-генераторы с весьма лиапазоном малым поднастройки: 18-22 кГц. Функциональными элементами УЗКС являются преобразователь электрических колебаний в упругие и волноводная система для трансформации, преобразования и усиления колебаний. В качестве преобразователя акустического ультразвукового блока, по технико-(простота конструкции, экономическим соображениям надежность, дешевизна), рекомендуется применять симметричный магнитострикционный преобразователь. Для определения амплитуды колебаний на выходе магнитострикционного преобразователя при заданной величине напряжения на входе предлагается использовать соотношение, имеющее вид

$$A_{\Pi} = \frac{\mu M}{2\pi^2 f^2 W(R_{\text{M.H.}} + R_{\text{H.}})} U_0, \, \text{M},$$
(9)

где M – корректирующий коэффициент, учитывающий конструкцию преобразователя; μ – магнитострикционная постоянная; f – заданная частота преобразователя; U_0 – напряжение на входе преобразователя; W – полное число витков обмотки возбуждения; $R_{_{M.H}}$ – сопротивление механических потерь преобразователя; $R_{_{H}}$ - нагрузка на преобразователь.

С целью увеличения амплитуды колебаний, создаваемых ультразвуковым преобразователем, предлагается в УЗКС использовать стержневой концентратор конического типа, обеспечивающий увеличение амплитуды на величину, определяемую по формуле

$$K = N\left(coskl - \frac{N-1}{Nkl}sinkl\right),\tag{10}$$

где K – коэффициент усиления; N – отношение диаметральных линейных размеров торцов концентратора, $N = \frac{D_{\text{TH}}}{D_{\text{TK}}}$; D_{TH} – диаметр торца концентратора, контактирующего с преобразователем; D_{TK} – диаметр торца концентратора, контактирующего с обрабатываемой деталью; l – длина концентратора, кратная длине полуволны; $k = \frac{\omega^2 \rho}{E} = \frac{\omega}{c}$; ω – частота колебаний, c⁻¹; с – скорость продольных волн , м/с.

В соответствии с законами геометрической акустики предложена акустическая модель ультразвукового поля, создаваемого в детали типа диск с отверстием, представленная на рис. 5, при следующих условиях: твёрдое тело изотропно, однородно, упруго, имеет гладкие ограничивающие поверхности, звуковое поле не сопровождается явлениями интерференции и дифракции.

В условиях установившегося ультразвукового поля, в соответствии с принятой геометрической схемой движения ультразвуковых волн, в цилиндрическом образце по концентричным окружностям формируются кольцевые волновые фронты различной амплитуды (рис.6), снижающейся от наружной поверхности образца к поверхности отверстия и оказывающие определенное акустическое давление в локальной зоне их действия.



Рис. 5. Схема хода лучей преломленных волн при ультразвуковом воздействии на деталь – диск с отверстием фронт ультразвуковой волны



Рис. 6. Модель воздействия УЗК на деталь – диск с отверстием: *1* – дорн; *2* – деталь; *3* – фронт ультразвуковой волны

Моделируя ультразвуковое поле, возбуждаемое в цилиндрической детали 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

$$A_1 = A_{\kappa} exp\left(-\delta_{\underline{A}} \frac{D-d}{2}\right), \,\mathrm{M},\tag{11}$$

где A_{κ} - амплитуда волны, возбуждаемой концентратором в точке его контакта с деталью, $A_{\kappa} = KA_{\pi}$; δ_{Λ} – коэффициент затухания волны при прохождении через деталь с наружным габаритным размером D и диметром отверстия, соответствующим диаметру дорна d.

Анализ многочисленных исследований показал, что под воздействием УЗК происходит изменение механических свойств материалов, обусловленное протеканием в них физических явлений различной природы, микросубструктурных преобразований. Используя в качестве комплексного показателя механических свойств материала его микротвердость, предложено выражение для определения микротвердости поверхностного слоя отверстия, калиброванного в условиях ультразвукового воздействия на деталь, в виде

$$HV_{\kappa} = \eta(\sqrt{1.3 \cdot 10^3 \cdot G \cdot p} - \rho c \omega A), \Pi a, \qquad (12)$$

где η – корректирующий коэффициент, учитывающий наследственные структурно-фазовые отклонения обрабатываемого материала на предшествующих калибровке операциях механической обработки; *G* – модуль сдвига, Па.

На основе допущения, что изменение геометрических параметров поверхности в процессе ППД носит экспоненциальный характер, получена следующая расчетная зависимость для определения высоты неровностей профиля поверхности, сформированной в процессе калибрования при воздействии УЗК на деталь:

$$R_z = R_{Z \text{ }_{\text{HCX}}} \exp(-\frac{HV_{\text{HCX}}}{HV_{\text{K}}}), \text{ M}, \qquad (13)$$

где HV_{ucx} – исходная микротвердость поверхности отверстия, Па; HV_{κ} – микротвердость поверхностного слоя отверстия, калиброванного в условиях ультразвукового воздействия на деталь.

В третьей главе приведены технические средства экспериментальной проверки результатов теоретических исследований и установленных при этом



Рис. 7. Специальное приспособление для установки образцов в сборе с источником ультразвуковых колебаний

расчетных зависимостей И закономерностей процесса калибрования отверстий с наложением УЗК на деталь. Исследования проводились на экспериментальном комплексе (рис. 7), обеспечивающем реализацию технологической схемы с применением: цилиндрических дорнов, стальных образцов типа диск с отверстием и разным наружным диаметром; современных средств контроля качества поверхностного слоя (профилометр с цифровым отсчетом MitutoyoSurftest SJ-

210, микротвердомер ПМТ-3М, микроскоп ЛабоМет-И). Изменения амплитуды УЗК колебаний в детали оценивались с помощью индукционного метода в конкретных, предусмотренных планом эксперимента, точках образцов по величине изменений амплитуды напряжений, наводимой в измерительной электромагнитной головке ЭДС, в мВ.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований. Установлено, что отклонение величин амплитуды ЭДС, определяющее амплитуду выходного сигнала УЗК в исследуемых точках, расположенных на наружной цилиндрической поверхности образцов и на поверхности отверстия, не превышает 10 %, что свидетельствует о приемлемости предложенной акустической модели ультразвукового поля, создаваемого в детали - диск с отверстием (рис. 8)





Рис. 8. Отклонения величины выходного сигнала УЗК в точках, расположенных на наружной и внутренней поверхности образцов

Рис. 9. Изменение амплитуды ультразвукового сигнала при удалении от точки ультразвукового воздействия

По мере удаления от источника УЗК, амплитуда напряжения ЭДС постепенно убывает в радиальном направлении к оси образца (рис. 9). На

основе этих исследований определены коэффициенты затухания δ_{ср} для материалов исследуемых образцов (таблица).

Материал	Сталь 35	Сталь 45	Сталь30ХГСА	Сталь 45 (зак)
$\delta_{ m cp}$	0,0044	0,0038	0,0042	0,0035

Коэффициенты затухания УЗК

Как следует из таблицы значения коэффициента затухания 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, закалка – к снижению. Эти значения коэффициента затухания ультразвуковых волн удовлетворительно согласуются с аналогичными исследованиями и могут быть использованы при проектировании операций калибрования отверстий в условиях воздействия УЗК на деталь.

Доказано, ультразвуковое что воздействие обеспечивает на деталь снижение силы калибрования в среднем в 1,2 раза при амплитуде колебаний в зоне очага деформации 4-6 мкм (рис. 10). Сравнительный анализ расчетных И экспериментальных значений позволил сделать вывод о корректности применения зависимости (8) для определения силы калибрования отверстий.

Рис. 10. Влияние УЗК на силу при калибровании отверстий

(A = 6 мкм; ω = 20 кГц): 1 – без УЗК; 2 – с УЗК

Воздействие УЗК на деталь приводит к снижению исходной микротвердости

материала образцов, что является следствием изменения механических свойств в сторону уменьшения, обусловленных протеканием релаксационных процессов. Степень снижения в локальной точке детали уменьшается по мере удаления её от источника УЗК. Как показали исследования, на наружной находящейся непосредственно цилиндрической поверхности, под воздействием УЗК, микротвердость снизилась в 1,25 раза, а на поверхности 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. Эти исследования позволили экспериментально подтвердить зависимость для определения микротвердости поверхностного слоя отверстия (12), из которой следует, что ультразвуковое воздействие на деталь снижает её исходную микротвердость на величину, соизмеримую с величиной ультразвукового давления в зоне контактного взаимодействия дорна с обрабатываемой поверхностью.



Рис. 11. Изменение среднеарифметической высоты микропрофиля поверхности отверстий в зависимости от условий калибрования: 1– исходная шероховатость поверхности; 2 – калибрование; 3 – калибрование с воздействием УЗК на дорн; 4 – калибрование с воздействием УЗК на деталь

Установлено, что калибрование отверстий в условиях ультразвукового воздействия на деталь позволяет в 10 раз уменьшить величину высоты неровностей профиля отклонения поверхности отверстия по сравнению с поверхностью (рис. исходной 11). Расхождение экспериментальных И расчетных значений составляет 9-12 %, свидетельствует что 0 приемлемости зависимости (13) для оценки шероховатости поверхности отверстий.

О преобладающей степени влияния УЗК на улучшение шероховатости поверхности

свидетельствует полученная экспериментальная полиномиальная модель формула (14).

$$Rz = 6,399 \cdot 10^3 \cdot HV_{\mu cx}^{-3,151} \cdot A^{-6,599+2,673 \cdot \ln(HV_{\mu cx})}, \text{ MKM.}$$
(14)



Рис. 12. Влияние исходной твердости и амплитуды УЗК на изменение шероховатости поверхности калиброванного отверстия в условиях воздействия УЗК на деталь

Из полученной модели следует, что достигаемый эффект обеспечивается главным образом за счет введения в очаг деформации ультразвуковых колебаний через деталь. Сравнительный анализ схем введения ультразвуковых колебаний в очаг деформации при калибровании отверстий (рис. 12) показал, что введение ультразвуковых колебаний через деталь, по сравнению с введением ультразвуковых колебаний через инструмент, наряду с

другими преимуществами улучшает геометрические параметры качества поверхности отверстий в 3,2 раза. Таким образом, доказана эффективность применимости предложенной технологической схемы воздействия на деталь ультразвуковых колебаний при реализации процесса калибрования отверстий.

В пятой главе предложена методика проектирования технологических операций калибрования отверстий дорном с применением УЗК, разработана изолиний, позволяющая провести прогнозирование диаграмма микротвердости, высоты неровностей профиля поверхности калибрования с применением УЗК на деталь и его оптимизацию по критерию минимизации приведённых Представлены инструментального затрат. средства И ультразвукового обеспечения процесса калибрования отверстий. Приведены результаты практической реализации предложенного способа калибрования отверстий в условиях РТЦ «Технология» (г. Азов).

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 универсального И 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 наружной с 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 сопровождается снижением 4–6 мкм также 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 получистового растачивания деталей на универсальном оборудовании с применением небольших сил.

ПОСОДЕРЖАНИЮДИССЕРТАЦИИОПУБЛИКОВАНО15 ПЕЧАТНЫХ РАБОТ:

Публикации в научных изданиях,

рекомендованных ВАК РФ, и в системе Scopus:

1. Оценка влияния ультразвуковых колебаний на напряженное состояние поверхностного слоя отверстия, обработанного методом калибрования / В.А. Лебедев, Ю.А. Тороп, А.Н. Кочетов [и др.] // Наукоемкие технологии в машиностроении. –2023. –№ 5 (143). – С. 33-39.

2. Повышение эффективности процесса дорнования 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.

3. 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.

4. 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.

5. Technological Effect of Hole Calibration in the Conditions of Ultrasonic Exposure to the Part / V.A. Lebedev, Y.A. Torop, O.E. Baryshnikova [et al.] // Lecture Notes in Mechanical, 2023. –Pp. 553–564.

6. Патент на изобретение №2817100 Российская Федерация. Устройство для калибрования отверстий поверхностным пластическим деформированием с наложением ультразвуковых колебаний на деталь / В.А. Лебедев, Ю.А. Тороп, Н.С. Коваль, М.М. Алиев, А.Н. Кочетов; опубл. 9.04.2024.

Публикации в других изданиях:

7. Анализ энергосиловых параметров процесса дорнования фасонных отверстий / Ю.А. Тороп, В.А. Лебедев, Н.С. Коваль [и др.] // Актуальные проблемы науки и техники: мат. Всерос. (национальной) науч.-практ. конф. – Ростов-на-Дону. – 2022. –С. 464-465.

8. 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. симпозиума технологов-машиностроителей. –Ростовна-Дону: ДГТУ, 2022. –С. 296-300.

9. 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: сб. тр. ДонНТУ. – 2020. –№ 2 (69). –С. 30-35.

10. 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. ДГТУ. 2023. С. 324-329.

11. 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.

12. Тороп Ю.А. Оценка влияния ультразвукового воздействия на эффективность процесса калибрования отверстий ППД / Ю.А. Тороп //

Актуальные проблемы науки и техники. 2023: мат. Всерос. (национальной) науч.-практ. конф. –Ростов-на-Дону. – 2023. –С. 1002-1003.

13. Тороп Ю.А. Повышение эффективности процесса дорнования отверстий путем наложения на деталь ультразвуковых колебаний / Ю.А. Тороп, В.А. Лебедев, Н.С. Коваль // Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов: сб. тр. науч.-техн. конф. –Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2022. – С. 303-309.

14. Тороп Ю.А. Технологическая схема дорнования отверстий с применением ультразвуковых колебаний / Ю.А. Тороп, С.А. Берберов, А.Н. Кочетов // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей. –Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2020. –С. 519-521.

15. Управление энергосиловыми параметрами процесса дорнования 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.

Подписано в печать 12.03.2025. Объем 1,0 усл. печ. л. Формат 60х84/16. Заказ № ____. Тираж 120 экз.

Отпечатано в издательском центре ДГТУ Адрес университета и полиграфического предприятия: 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1.