

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

На правах рукописи



Третьяков Андрей Алексеевич

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Специальность: 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Игнатьев А.Г.

Челябинск – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1 Проблема остаточных напряжений в восстановленных деталях.....	10
1.2 Применение контактного взаимодействия для измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях.....	15
1.3 Практическое применение задачи о вдавливании конического индентора	23
1.4 Цель и задачи исследования	30
2 АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ С ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ ПОВЕРХНОСТИ ВОССТАНОВЛЕННОЙ ДЕТАЛИ ВОКРУГ ОТПЕЧАТКА КОНИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА	32
2.1 Постановка задачи и выбор метода исследования	32
2.2 Напряженно-деформированное состояние полупространства при вдавли- вании конического индентора	33
2.3 Анализ деформированного состояния поверхности контртела методом конечных элементов	36
2.3.1 Исходные данные	36
2.3.2 Конечно-элементная модель	37
2.3.3 Программа исследования, методика получения и обработки данных	41
2.4 Нормальные перемещения поверхности вокруг отпечатка	43
2.4.1 Формирование наплыва вокруг отпечатка	43
2.4.2 Влияние усилия вдавливания индентора на геометрические харак- теристики наплыва	46
2.4.3 Влияние механических свойств материала детали на диаметр отпе- чатка	48
2.4.4 Влияние механических свойств материала детали на нормальные перемещения в наплыве.....	50

2.4.5	Влияние начальных (остаточных) напряжений на распределение нормальных перемещений в наплыве	52
2.5	Выводы	58
3	МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ВОКРУГ ОТПЕЧАТКА КОНИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА И ИХ ВЗАИМОСВЯЗИ С ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ	59
3.1	Принципиальные основы электронной спекл-интерферометрии	60
3.2	Оптико-электронная установка для измерения нормальных перемещений поверхности с использованием электронной спекл-интерферометрии... ..	63
3.3	Методика регистрации нормальных перемещений поверхности с использованием оптико-электронной установки	66
3.4	Методика создания отпечатка конического индентора	67
3.5	Методика получения распределения нормальных перемещений	68
3.6	Методика обработки экспериментальных данных	69
3.6.1	Измерение диаметра отпечатка	70
3.6.2	Определение нормальных перемещений	71
3.6.3	Статистическая обработка результатов	71
4	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ВОКРУГ ОТПЕЧАТКА КОНИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА И ИХ ВЗАИМОСВЯЗИ С ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ	73
4.1	Программа исследований	73
4.2	Влияние усилия вдавливания индентора и свойств материала на диаметр отпечатка	74
4.3	Влияние диаметра отпечатка на перемещения в наплыве	77
4.4	Влияние остаточных напряжений на перемещения в наплыве	82
4.5	Выводы	88
5	МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ВОССТАНОВЛЕННЫХ ДЕТАЛЯХ, ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВНЕДРЕНИЕ	91

5.1	Метод измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях	91
5.2	Анализ чувствительности метода	94
5.3	Анализ погрешности метода	95
5.4	Практические результаты и внедрение	97
5.4.1	Исследование остаточных напряжений при электроконтактной приварке металлической ленты	98
5.4.2	Исследование остаточных напряжений при электроконтактной приварке порошковых материалов	100
5.4.3	Исследование остаточных напряжений при электроконтактной приварке наплавочной проволоки	103
5.4.4	Исследование остаточных напряжений при электроконтактной приварке металлической сетки	107
5.4.5	Исследование влияния остаточных напряжений на долговечность по критерию усталостной прочности	111
5.4.6	Анализ результатов исследований	114
5.5	Эффективность применения конического индентора при измерении поверхностных остаточных напряжений в восстановленных деталях	116
5.6	Экономическая эффективность внедрения метода измерения остаточных напряжений	120
5.7	Выводы	122
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	125
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	127
	ПРИЛОЖЕНИЯ	145

ВВЕДЕНИЕ

Остаточные напряжения в деталях машин могут возникать как следствие разнообразных явлений, обусловленных тем или иным технологическим процессом. Задача определения остаточных напряжений особенно актуальна при разработке и совершенствовании технологий восстановления деталей машин. Восстановление деталей позволяет повторно и неоднократно использовать до 70% изношенных деталей. При этом себестоимость восстановления обычно невысока, не превышает 30% стоимости новых деталей [33, 47, 97, 136, 160]. Большая часть применяемых способов восстановления предполагает массоперенос с использованием тепловых процессов и сопровождается изменением структуры, фазового и химического состава поверхностного слоя, что в значительной степени осложняет процесс измерения остаточных напряжений.

Современные технологии восстановления должны обеспечивать не только восстановление геометрических параметров детали, но и получение повышенных свойств покрытия: прочностных, триботехнических характеристик, износостойкости, коррозионной стойкости, усталостной прочности [10]. В результате ресурс восстановленных деталей должен составлять 80-100% от ресурса новой детали, а при использовании упрочняющих технологий – до 120-150% [34]. Однако зачастую действительный ресурс восстановленных деталей оказывается значительно ниже ожидаемого. Одной из существенных причин этого является образование неблагоприятных технологических остаточных напряжений.

Существенный вклад в развитие науки об остаточных напряжениях и методах их измерения внесли О.А. Бакши, И.А. Биргер, В.А. Винокуров, Я.Д. Вишняков, В.А. Деев, Л.И. Дехтярь, Н.В. Калакуцкий, Б.С. Касаткин, Н.А. Махутов, О.Н. Михайлов, Г.А. Николаев, Н.О. Окерблом, Н.Н. Прохоров и др. Решению проблемы измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях посвящены труды В.А. Деева, Л.И. Дехтяря, Д.А. Игнаткова, А.Г. Игнатьева.

Остаточные напряжения относятся к механо-физико-химическим характеристикам поверхностного слоя и наравне с фазовым составом, химическим соста-

вом, механическими свойствами определяют его несущую способность. Имеется значительный объем данных об их влиянии на прочность, работоспособность, долговечность деталей, которое может быть как отрицательным, так и положительным [18, 31, 94, 113, 135]. Негативное влияние оказывают растягивающие поверхностные остаточные напряжения. При эксплуатации деталей они приводят к снижению усталостной прочности на 35-50% по сравнению с новыми. В то же время, сжимающие остаточные напряжения способствуют повышению усталостной прочности. Поэтому создание благоприятного напряженного состояния поверхностного слоя служит значительным потенциалом повышения долговечности восстановленных деталей [10, 11, 18, 30, 31, 85, 87 и др.].

Однако анализ современной практики восстановления деталей показывает, что этот фактор (остаточные напряжения) зачастую не учитывается или в недостаточной степени учитывается при разработке и совершенствовании технологий. На зачаточном уровне находится и внедрение технологий управления остаточными напряжениями при восстановлении деталей. В первую очередь это связано с недостаточным развитием методов и технических средств измерения остаточных напряжений. Ввиду особенностей образования и существования технологических остаточных напряжений фактически только их натурное измерение позволяет получить информацию, требуемую для совершенствования технологий восстановления с целью повышения долговечности деталей.

Таким образом, одной из наиболее значимых задач в проблеме обеспечения надежности и качества восстановленных деталей является измерение остаточных напряжений. В этом аспекте актуальным является решение задачи разработки методов измерения остаточных напряжений, позволяющих оперативно получать необходимый объем данных. Решению этой задачи посвящена настоящая диссертационная работа, в которой разработан новый метод определения поверхностных остаточных напряжений в восстановленных деталях.

Цель работы: разработка и применение метода определения поверхностных остаточных напряжений для оценки технического состояния деталей машин.

Объект исследования: деформированное состояние поверхности исследуемой детали в локальной области, формирующееся под влиянием остаточных напряжений, в результате упругопластического вдавливания индентора в поверхность.

Предмет исследования: взаимосвязь поверхностных остаточных напряжений и параметров деформированного состояния поверхности восстановленной детали.

Научная новизна.

1. Впервые разработана математическая модель, описывающая зависимость параметров распределения нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка конического индентора от усилия вдавливания, механических свойств материала поверхностного слоя детали и поверхностных остаточных напряжений.

2. Установлено, что качественные и количественные характеристики распределения нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка при вдавливании конического индентора в поверхность детали однозначно связаны с поверхностными остаточными напряжениями.

Практическая значимость результатов исследования.

Практическая значимость результатов исследования заключается:

– в разработке нового условно неразрушающего метода определения остаточных напряжений, позволяющего оперативно получать информацию, необходимую при совершенствовании технологий восстановления с целью повышения долговечности восстановленных деталей, отличающегося высокой чувствительностью, точностью и информативностью измерений, простотой применения;

– в обеспечении возможности экспресс-измерений поверхностных остаточных напряжений в восстановленных деталях и применении полученной в ходе измерений информации в целях оценки технического состояния деталей машин при совершенствовании и разработке технологий восстановления;

– в получении новых данных о поверхностных остаточных напряжениях в деталях машин, восстановленных электроконтактной приваркой присадочных материалов. Показано, что использование данных об остаточных напряжениях поз-

волило усовершенствовать технологию восстановления валов электроконтактной приваркой присадочных материалов и повысить их долговечность на 18...30% по отношению к новой детали.

Работа выполнена в рамках договоров о совместной деятельности в научно-исследовательской сфере с Башкирским государственным аграрным университетом в 2013-2017 гг.

Научные и практические результаты диссертационной работы использованы в опытно-конструкторских и технологических разработках:

– Башкирским государственным аграрным университетом в опытно-технологических работах при разработке и исследовании технологий восстановления деталей;

– ПКФ «Ресурс» (Республика Башкортостан) при разработке ресурсосберегающей технологии восстановления плунжера гомогенизатора молока.

Метод и технические средства измерения поверхностных остаточных напряжений используются в научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработках кафедры «Прикладная механика» ЮУрГАУ.

Практическая значимость и реализация результатов исследования подтверждена актами внедрения результатов.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований докладывались на научных конференциях:

– «Достижения науки – агропромышленному производству» (г. Челябинск, ЧГАА, ЮУрГАУ, 2013-2017 гг.),

- «Ремонт. Восстановление. Реновация» (г. Уфа, БашГАУ, 2014 г.),

- «Сварка. Реновация. Триботехника» (г. Нижний Тагил, 2015 г.),

- International Conference on Industrial Engineering ICIE-2015 (Chelyabinsk, 2015),

- «Научные проблемы технического сервиса сельскохозяйственных машин» (г. Москва, ГОСНИТИ, 2015 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 28 научные работы, из них 7 в журналах, рекомендованных ВАК, 1 в издании, входящем в базу данных Scopus, получен 1 патент на изобретение.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель, описывающая взаимосвязь перемещений поверхности восстановленной детали вокруг отпечатка конического индентора с параметрами вдавливания, свойствами материала контртела и поверхностными остаточными напряжениями.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния параметров вдавливания индентора, свойств материала контртела и поверхностных остаточных напряжений на перемещения вокруг отпечатка конического индентора.

3. Метод измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях с использованием конического индентора.

4. Результаты практического применения метода измерения остаточных напряжений в деталях, восстановленных с использованием различных технологий и технико-экономическая оценка эффективности внедрения метода.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Проблема остаточных напряжений в восстановленных деталях

При обслуживании и ремонте машин и агрегатов до 70% расходов приходится на закупку новых деталей взамен изношенных до предела. Около 85% заменяемых деталей имеют предельный износ, который не превышает 0,3 мм. Большая часть из этих деталей сохраняет более 60% остаточного ресурса. Примерно 20% деталей подлежат изъятию из рабочего процесса и окончательной отбраковке, а оставшиеся могут быть восстановлены. При этом себестоимость ремонта составляет 15...70% от затрат на изготовление [26, 34, 47-48, 97, 106].

Труды таких ученых, как Н.В.Авдеев, Ф.Х.Бурумкулов, Е.Л.Воловик, Л.С.Ермолов, В.М.Кряжков, В.В.Курчаткин, П.П.Лезин, В.М.Михлин, В.П.Лялякин, А.С.Проников, А.В.Поляченко, А.Э.Северный, А.И.Сидоров, И.Е.Ульман, В.И.Черноиванов, являются ключевыми в вопросе решения проблем обеспечения надежности, восстановления и технической диагностики деталей.

Долговечность восстановленных деталей машин определяется несущей способностью поверхностного слоя [26, 44, 87, 111, 112, 122, 124, 127]. При эксплуатации детали наибольшему воздействию подвергается поверхностный слой, и в основном следствием этого является его износ и ухудшение служебных свойств. При изготовлении, эксплуатации и восстановлении на поверхностях деталей машин появляются неровности и микронеровности. В поверхностном слое металла происходит изменение структуры, фазового и химического состава, а так же образуются остаточные напряжения.

Остаточными напряжениями являются механические напряжения, которые сохраняются и уравниваются внутри твердого тела после устранения причин их возникновения. Основные причины появления макронапряжений следующие: неоднородность пластической деформации и локального нагрева поверхностного слоя, а так же разность объемов структур, возникающих при структурных превращениях. Причинами возникновения микронапряжений, местных

остаточных напряжений, рассматриваемых в микрizonaх, являются фазовые превращения, колебания температуры, анизотропия механических свойств отдельных зерен материала, границ зерен и при пластической деформации распад зерен на блоки [30, 167].

Основополагающими и внесшими значительный вклад в развитие науки об остаточных напряжениях и способах их измерения являются труды О.А.Бакши, И.А.Биргера, В.А.Винокурова, Я.Д.Вишнякова, Н.Н.Давиденкова, В.А.Деева, Л.И.Дехтяря, А.Г.Григорьянца, Д.А.Игнатъкова, Н.В.Калакуцкого, В.А.Кархина, Б.С.Касаткина, Л.А.Копельмана, П.И.Кудрявцева, Н.А.Махутова, О.Н.Михайлова, Г.А.Николаева, Н.О.Окерблома, Е.О.Патона, Н.Н.Прохорова, В.М.Сагалевича, W.Cheng, M.T.Flaman, M.Moore, A.Niku-Lari и др. отечественных и зарубежных ученых.

Основными характеристиками, которые определяют долговечность восстановленных деталей, являются износостойкость, коррозионная стойкость и усталостная прочность [51, 93, 127, 137, 140-142].

Уровень и характер влияния остаточных напряжений в восстановленных деталях на износостойкость обуславливается условиями контакта деталей: упругий, упругопластический или пластический. В работах [4, 31] обнаружено, что при упругом контакте на улучшение износостойкости влияют сжимающие остаточные напряжения, а на снижение – растягивающие. Исследования других авторов [125] также обращают внимание, что при анализе износостойкости необходимо учитывать остаточные напряжения.

Растягивающие остаточные напряжения увеличивают скорость химической и электрохимической коррозии, хотя их воздействие значительно меньше, чем влияние шероховатости поверхности, о чем свидетельствуют данные [31]. При коррозионном растрескивании пороговый уровень определяется величиной остаточных напряжений и зависит от типа коррозионной среды, материала поверхности детали и режима работы детали [30].

Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность при циклической нагрузке зависит от концентрации напряжений, коэффициента

симметрии цикла и уровня рабочих напряжений [26, 30-31, 95, 178-180, 230]. В основном повышению предела выносливости способствуют сжимающие остаточные напряжения, а снижению – растягивающие. При симметричном цикле в условиях многоциклового усталости отмечается наибольшее негативное воздействие растягивающих остаточных напряжений. В сравнении с ненапряженным эталоном происходит понижение уровня выносливости на 35...50% [30]. Данные многочисленных экспериментальных исследований показывают, что долговечность восстановленных валов и осей в целом составляет 30...70% от долговечности новых деталей. При этом известно, что до 40% снижения долговечности связано с влиянием возникающих остаточных напряжений [130].

В таблице 1 приведены обобщенные данные из научных источников о величинах остаточных напряжений в поверхностном слое восстановленных деталей, с применением основных способов и технологий.

При таких способах восстановления, как электродуговая наплавка и электроконтактная приварка ленты, имеет место концентрация тепловложения, в результате чего остаточные напряжения, возникающие в поверхностном слое, растягивающие и нередко достигают предела текучести материала. При электроискровом наращивании величина растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое зависит от технологических режимов и свойств присадочного материала. Восстановление деталей электродуговой металлизацией сопровождается появлением сравнительно меньших растягивающих остаточных напряжений, поскольку тепловложение и градиент температуры в поверхностном слое относительно незначительны. При плазменном напылении определяющее влияние на максимальные растягивающие остаточные напряжения в поверхностном слое оказывают температурный режим и присадочный материал [9].

Таблица 1.1 – Остаточные напряжения при различных способах восстановления и их влияние на усталостную прочность деталей

Способ восстановления	Остаточные напряжения	Снижение усталостной прочности
Вибродуговая наплавка	растягивающие, близки к σ_T	на 40...70%
Наплавка под флюсом и в среде защитных газов	растягивающие, близки к σ_T	до 50%
Электроконтактная приварка	растягивающие, (0,5...1,0) σ_T	на 20...30%
Электроискровое наращивание	растягивающие, (0,2...1,0) σ_T	на 12...40%
Электродуговая металлизация	растягивающие, (0,3...0,5) σ_T	–
Плазменная наплавка	растягивающие, (0,5...1,0) σ_T	на 15...25%

Примечание: σ_T – предел текучести материала.

Приведенные данные показывают, что при использовании всех распространенных способов восстановления деталей, как правило, в поверхностном слое появляются растягивающие остаточные напряжения, значительные по величине. Их действие служит одним из факторов понижения эксплуатационных характеристик поверхностного слоя и, в конечном итоге, долговечности восстановленных деталей.

Формирование выгодных напряжений в поверхностном слое является значительным резервом повышения долговечности деталей [4, 11, 30-31, 49, 52, 61, 80, 94, 122, 124, 136]. Для этого требуется:

- 1) получение достоверной информации об остаточных напряжениях;
- 2) использование этих данных при назначении рациональных режимов восстановления, обеспечивающих создание в поверхностном слое благоприятного напряженного состояния.

Достичь при восстановлении уровня долговечности новой детали исключительно за счет создания поверхностных сжимающих остаточных напряжений при прочих равных условиях вполне реально, а в совокупности с

иными технологическими решениями возможно получение повышенных в сравнении с исходной деталью характеристик [9, 31, 78, 94, 110, 128, 129, 131, 135].

Для объективной оценки долговечности детали необходимы данные о ее геометрических параметрах, структурном и напряженном состоянии материала. Получение полного объема данных о первых двух факторах достигается применением существующих методов. Однако задача получения информации о напряженном состоянии поверхностного слоя детали не имеет достаточного развития. Проблема состоит в необходимости определения истинных напряжений и их распределений по элементам конструкций, которые формируются при наложении полей рабочих (эксплуатационных) и технологических остаточных, возникших в процессе изготовления или восстановления изделия. Сложность ситуации состоит в том, что технологические остаточные напряжения самоуравновешены по объему конструкции или восстановленной детали и не проявляют себя внешне. К тому же, как показывают многочисленные исследования, величина и распределение остаточных напряжений зависят не только от способа, но и от технологического режима нанесения покрытия [63].

Итак, для обеспечения долговечности восстановленных деталей на уровне не ниже новых необходимо, кроме всего прочего, получение достоверной информации о наведенных поверхностных остаточных напряжениях. С учетом этих данных возможен выбор мероприятий по созданию в детали благоприятного напряженного состояния путем назначения рациональных режимов восстановления, а при необходимости, технологических приемов управления остаточными напряжениями.

Для решения практических задач широкое развитие и применение получили экспериментальные методы определения остаточных напряжений [8, 30-31, 38, 85, 115, 116, 169, 172, 177, 207, 224, 239]. В развитие этой отрасли знаний основной вклад внесли ученые А.А.Антонов, И.А.Биргер, В.А.Винокуров, А.Г.Игнатъев, Л.М.Лобанов, О.Н.Михайлов, Г.А.Николаев, В.А.Пивторак и другие. В настоящее время накоплен большой объем информации и каждый из опытных способов

измерения остаточных напряжений применяется в своей определенной области, в которой он в наибольшей степени результативен.

1.2 Применение контактного взаимодействия для измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях

Возможности применения того или иного метода измерения остаточных напряжений определяются особенностями восстановленных деталей [65]:

— в большинстве случаев деталь имеет цилиндрическую форму поверхности;

— механические свойства поверхностного слоя и основного металла различаются;

— наблюдается существенная механическая и структурная неоднородность в направлении глубины детали;

— толщина поверхностного слоя не превышает 1,5 мм, а у большинства восстановленных деталей - 0,2...0,5 мм;

— в поверхностном слое возникает плоское напряженное состояние;

— в поверхностном слое обычно возникают растягивающие остаточные напряжения;

— распределение остаточных напряжений по поверхности детали при использовании большинства технологий восстановления неравномерное.

С учетом указанных особенностей восстановленных деталей перспективным для определения остаточных напряжений является использование контактных задач [65, 82, 208].

Механика контактного взаимодействия является одним из актуальных разделов механики деформированного твердого тела. Основные прикладные исследования в области контактного взаимодействия относятся к проблемам трения, износа, разрушения элементов при контакте, определения твердости и механических свойств материалов. Основателями механики контактного взаимодействия считают Г.Герца, Дж.Бринелля, Е.Мейера, Ф.Кика, П.Людвика,

С.Роквелла, Р.Смита, Г.Е.Сандленда. и др. Неоспоримый вклад в развитие и совершенствование этой отрасли науки внесен известными отечественными и зарубежными учеными В.М.Александровым, В.П.Алехиным, С.Е.Беляевым, Л.Н.Бескопыльным, С.И.Булычевым, Ф.Ф.Витманом, Л.А.Галиным, Д.С.Гогоберидзе, В.К.Григоровичем, А.А.Гудковым, Н.Н.Давиденковым, Г.Д.Дель, М.С.Дрозд, Г.П.Зайцевым, Б.С.Иоффе, А.Ю.Ишлинским, И.Г.Кадомцевым, В.И.Малый, М.П.Марковец, В.Э.Наумовым, А.П.Осипенко, М.Г.Селезевым, Ю.И.Славским, А.А.Спектор, В.А.Степановым, М.М.Хрущевым, J.R.Barber, D.C.Dugdale, G.Gladwell, L.E.Goodman, J.A.Greenwood, J.J.Kalker, S.Hardy, R.Hill, K.Johnson, F.J.Lockett, V.E.Lysaght, H.O'Neill, R.T.Shield, D.Tabor, S.R.Williams и др.

Результаты исследований характера протекания и закономерностей деформирования материала при внедрении в него различных инденторов представлены в [40, 173]. Основные практические приложения этих исследований — определение твердости и механических свойств материала. Для решения поставленных целей изучаются зарождение пластического течения, распределения контактных усилий и напряжений, распределения напряжений в области контакта, геометрические параметры контакта.

В области измерения остаточных напряжений применение контактного взаимодействия является новым и перспективным направлением. Принципиальная основа подхода состоит в том, что остаточные напряжения вызывают изменение напряженно-деформированного состояния при вдавливании индентора в поверхность детали по сравнению с «эталонным» (при вдавливании в заведомо ненапряженную деталь). Измерение каким-либо способом этого различия позволяет получить данные об остаточных напряжениях в поверхностном слое детали.

Прямой практической реализацией этого подхода является метод определения остаточных напряжений по твердости [90, 123, 175, 176, 178, 181, 182, 184, 221]. Для измерения остаточных напряжений предварительно для материала детали определяют зависимость между интенсивностью напряжений и

твёрдостью. В практических измерениях используется сравнение с эталонным образцом, изготовленным из материала детали. Метод относится к числу оценочных методов. Он имеет невысокую чувствительность: изменение диаметра отпечатка на уровне предела текучести материала составляет 5–8%, что соизмеримо с погрешностью измерения диаметра отпечатка стандартными измерительными устройствами. Кроме того, результатом измерения является величина интенсивности напряжений, а для определения компонент тензора напряжений используется математический аппарат теории пластичности [31, 65].

Современные реализации предполагают, например, использование пирамидального индентора, вдавливаемого в поверхность детали при ортогональной ориентации диагоналей отпечатка относительно направления действия остаточных напряжений до образования отпечатка твёрдости с развивающимися от его вершин хрупкими трещинами [118, 120]. Расчет величины остаточных напряжений выполняют по данным о геометрических параметрах трещин и отпечатка с учетом действительных размеров зерна материала покрытия. В другом способе, представленном в работе [88], применяется индентор Кнупа, имеющий основание в виде ромба. Индентор статически вдавливают в покрытие детали, фиксируют усилие внедрения и после разгрузки замеряют геометрические параметры отпечатка. Используя полученные данные, определяют остаточные напряжения.

Основные недостатки способов определения остаточных напряжений с применением пирамидальных инденторов - это низкие точность и чувствительность, трудоемкость измерений, потребность в ориентации диагоналей индентора, относительно незначительное влияние остаточных напряжений на твёрдость.

В работе [235] предложено применять шаровой индентор и в качестве исходной информации использовать данные о деформированном состоянии поверхности в окрестности отпечатка. Экспериментальным путем установлен характер взаимосвязи между распределением перемещений в окрестности отпечатка и остаточными напряжениями.

Развитие этой идея получила в трудах М. Bijak-Zochowski [178-180]. Им предложена оригинальная методика, заключающаяся в регистрации распределения нормальных перемещений поверхности вокруг отпечатка и определении остаточных напряжений по соотношению перемещений на осях симметрии распределения с использованием номограмм. На примере нескольких материалов получены соотношения между экспериментальными данными и искомыми величинами, имеющие частный характер. Для регистрации перемещений использован экзотический метод оптической интерференции в газовой среде. По условиям эксперимента обеспечивалась неизменность диаметра индентора и постоянство диаметра отпечатка. Дальнейшего развития идея использования упругопластического контактного взаимодействия для измерения остаточных напряжений в плане построения математической модели процесса, учета влияния различных факторов не получила.

Дальнейшее развитие идея измерения остаточных напряжений с использованием упругопластического контактного взаимодействия получила в работах А.Г. Игнатьева с соавторами [2, 49, 65-79]. В результате разработан метод определения поверхностных остаточных напряжений, пригодный к натурным измерениям. На основании анализа качественных характеристик разработанного метода доказана его принадлежность к группе условно неразрушающих методов измерения.

Основы метода следующие. Остаточные напряжения в поверхностном слое восстановленной детали измеряют косвенным путем на основании данных о распределении и величинах нормальных деформационных перемещений в наплыве вокруг отпечатка, возникающего при упругопластическом вдавливании в поверхность детали шарового индентора. Результатом измерений являются величины компонент тензора главных остаточных напряжений в точке поверхности, совпадающей с центром отпечатка. В исходной информации используются величины нормальных перемещений в контрольных точках на осях симметрии распределения перемещений. Регистрацию исходных данных

проводят с использованием метода измерения на основе электронной спекл-интерферометрии [79].

На поверхности исследуемой детали при упругопластическом контактном взаимодействии после завершения цикла нагрузки образуется зона выпучивания вокруг остаточного отпечатка (рисунок 1.1).

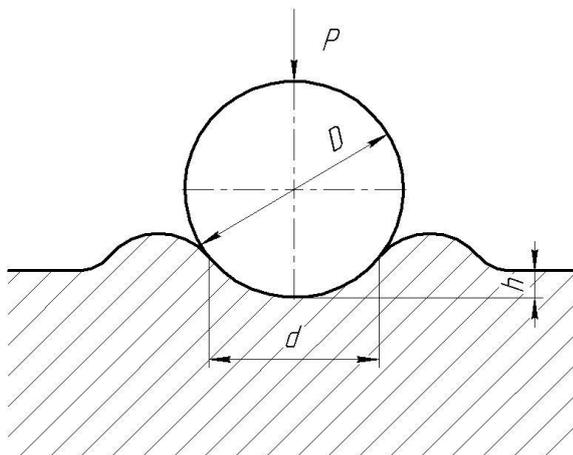


Рисунок 1.1 – Вдавливание сферического индентора и образование наплыва

Основанием для образования наплыва являются развитие ядра пластичности с гидростатическим сжатием и пластические перемещения под индентором, что обуславливает выдавливание материала в периферийные области контакта. Большое количество исследований, обобщенных в работе [40], показывают, что наплыв формируется главным образом в процессе вдавливания индентора, но полностью его профиль устанавливается после снятия нагрузки и является следствием упругого восстановления материала и обратных пластических деформаций. Высота наплыва зависит от прочностных и пластических свойств металла [40, 82].

В процессе вдавливания индентора наплыв формируется независимо от того, есть в поверхностном слое детали остаточные напряжения или их нет. Но при наличии в детали остаточных напряжений их величины и знаки влияют на геометрические параметры наплыва [82]: происходит изменение распределения нормальных перемещений поверхности детали в сравнении с профилем наплыва при вдавливании индентора в ненапряженную поверхность.

Подробный анализ механизма формирования наплыва при вдавливании шарового индентора в плоскую поверхность контртела приведен в работе [82]. Основные результаты исследования следующие.

Распределение нормальных перемещений вокруг отпечатка описывается следующими геометрическими параметрами: диаметр отпечатка, величина максимального перемещения в наплыве (высота наплыва), радиус положения точек с максимальными перемещениями (радиус наплыва).

При вдавливании индентора в поверхность детали геометрические параметры наплыва формируются под влиянием усилия вдавливания индентора, диаметра индентора и механических свойств материала детали.

Диаметр отпечатка зависит от предела текучести материала контртела σ_T и усилия вдавливания индентора F :

$$d = d_{0Fy} \left(\frac{\sigma_{Ty}}{\sigma_T} \right)^{0,3} \cdot \left(\frac{F}{F_y} \right)^{0,43}, \quad (1.1)$$

где $\sigma_{Ty} = 1$ МПа – предел текучести условного материала, для которого при усилии вдавливания индентора $F_y = 1$ Н диаметр отпечатка равен $d_{0Fy} = 0,29$ мм.

Связь между высотой наплыва W_{max} и диаметром отпечатка d нелинейная, описывается степенной функцией вида

$$W_{max}(d) = W_{0d} \cdot \left(\frac{d}{d_0} \right)^{n_w}, \quad (1.2)$$

где W_{0d} – условное максимальное перемещение (мм), возникающее при диаметре отпечатка $d_0 = 1$ мм.

Значение показателя степени n_w зависит от механических свойств материала.

Под влиянием остаточных напряжений возникают качественные и количественные изменения в распределении перемещений в наплыве вокруг отпечатка по сравнению с «эталонным» распределением перемещений при вдавливании индентора в ненапряженную деталь. Обязательными условиями являются равенство диаметров отпечатков на детали с остаточными

напряжениями и ненапряженной детали и равенство механических свойств этих деталей.

Установлено, что полученные закономерности влияния остаточных напряжений на качественные и количественные характеристики распределения перемещений в наплыве являются общими для широкого спектра металлических материалов, применяемых для изготовления деталей и оборудования.

Получена количественная взаимосвязь между нормальными перемещениями поверхности в контрольных точках наплыва и остаточными напряжениями в поверхностном слое восстановленной детали:

$$\frac{\sigma_{x,y}^{\text{ост}}}{\sigma_T} = \frac{3}{2} \ln \left(1 - \frac{\Delta W^{(y,x)}}{2W_{\text{max}}} \right), \quad (1.3)$$

где оси x и y направлены вдоль осей симметрии распределения перемещений; σ_T – предел текучести материала поверхностного слоя детали; W_{max} – величина нормального перемещения в контрольной точке для материала поверхностного слоя детали без остаточных напряжений (определяется по диаграмме вдавливания « $W_{\text{max}} - d$ » для материала покрытия); ΔW – изменение величины нормального перемещения в контрольной точке относительно базового,

$$\Delta W^{(x,y)} = W_{\sigma}^{(x,y)} - W_{\text{max}}. \quad (1.4)$$

Для регистрации перемещений в наплыве использованы оптические системы метода электронной спекл-интерферометрии, обладающие избирательной и максимальной чувствительностью к измеряемым компонентам перемещений и обеспечивающие регистрацию данных в локальных областях поверхности детали [66, 79].

Анализ технологии измерения остаточных напряжений представленным методом позволил выявить ряд недостатков, ограничивающих его применение на восстановленных деталях и возможность реализации в виде компактного измерительного оборудования.

Во-первых, существенным недостатком метода является ограничение по твердости поверхности контртела. Расчетная модель метода предполагает, что

индентор по сравнению с материалом тела считается недеформируемым. В соответствии с ГОСТ 8398-89 в качестве индентора в методе используется закаленный металлический шар с твердостью поверхности 62-64 HRC, а диапазон измерения твердости по Бринеллю составляет до 450 HB, что соответствует 45-46 HRC. С другой стороны, при восстановлении деталей стремятся не только обеспечить требуемые геометрические параметры, но и получить повышенные эксплуатационные характеристики поверхностного слоя – твердость, прочность, износостойкость и др. По литературным данным, при восстановлении деталей типа «вал» необходимо обеспечивать твердость металлопокрытия в пределах 50-55 HRC [109, 156].

Во-вторых, в соответствии с требованиями метода необходимо на поверхности детали создавать отпечаток диаметром 0,9...1,5 мм. При этом обеспечивается достаточная чувствительность $0,1\sigma_T$. Однако в ряде задач, в частности, при мониторинге остаточных напряжений или при натуральных измерениях на эксплуатирующихся конструкциях, указанный размер вносимого дефекта расценивается как недопустимый.

В-третьих, в соответствии с описанием метода, диаметр отпечатка является базой усреднения результатов по поверхности детали. В ряде случаев, например, при измерении остаточных напряжений в зонах значительных градиентов их изменения, это может привести к появлению значительной погрешности измерений.

В-четвертых, создание отпечатка диаметром 0,9...1,5 мм требует приложения значительного усилия при вдавливании индентора. Например, при вдавливании индентора диаметром 10 мм (рекомендуемого по методу) в поверхность детали из стали 45 требуется усилие 870...2700 Н, а из стали 12Х18Н10Т – 550...1850 Н. Потребность в таких усилиях при вдавливании существенно ограничивает возможность реализации метода в виде компактного измерительного оборудования.

Приведенный анализ позволяет заключить следующее. Использование упругопластического контактного взаимодействия является перспективным

подходом в решении задачи измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях. Существующие современные разработки обеспечивают решение задачи, однако имеют значимые недостатки, ограничивающие их применение и возможность приборной реализации. В связи с этим необходимо дальнейшее развитие методических вариантов подхода в направлении минимизации выявленных недостатков. Одним из перспективных вариантов в этом аспекте является применение конического индентора.

1.3 Практическое применение задачи о вдавливании конического индентора

При упругопластическом взаимодействии конического индентора с контртелом в контакте выделяют 3 зоны: гидростатическое ядро, пластическая зона и упругое пространство (рисунок 1.2) [186, 202].

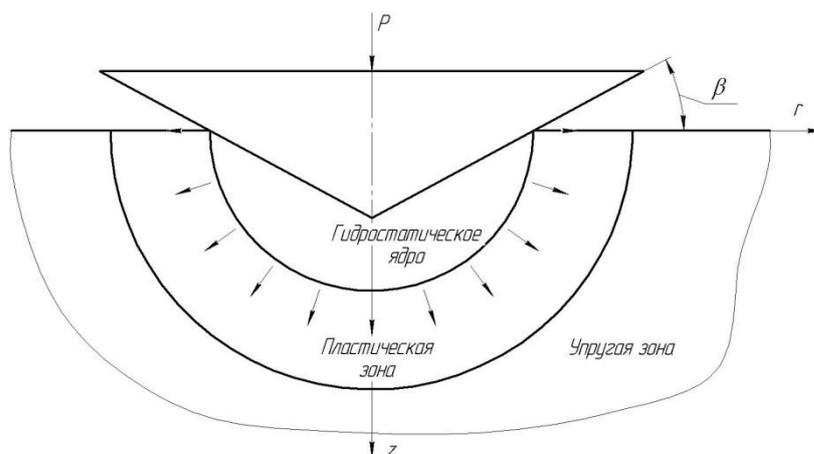


Рисунок 1.2 – Схема контакта конуса с контртелом

Модель формирования наплыва представлена на рисунке 1.3. В работе рассмотрен случай идеального упругопластического контакта конуса с поверхностью исследуемого тела. В основу исследования положена гипотеза, что вытесняемое индентором количество материала соизмерно объему потерь от упругой деформации и, в конечном итоге, определяет высоту наплыва или прогиба.

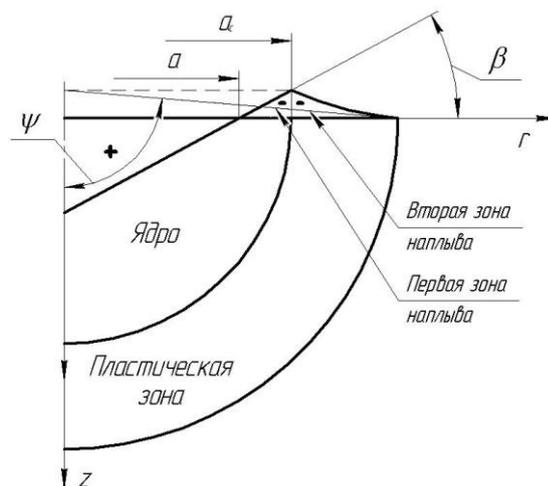


Рисунок 1.3 – Схема образования напльва

В научной и инженерной практике с использованием вдавливания конического индентора решаются следующие задачи, имеющие прикладное значение:

- определение механических свойств материалов по измерению твёрдости [14-16, 126, 158, 162, 170, 174, 185, 188-190, 201, 241];
- определение контактных усилий при статическом и динамическом взаимодействии [13, 19-22, 84, 92, 201, 203, 226];
- исследование распределений перемещений, деформаций, напряжений [12, 17, 39, 186, 190, 194, 222, 223, 238, 241];
- определение сопротивления деформации [133, 197, 229];
- определение диаграммы деформационного упрочнения поверхностного слоя металлических материалов [24, 25, 89, 92, 134, 173, 186, 188, 193];
- исследование распределения плотности в окрестности индентора в зависимости от свойств пористого тела и условий трения между индентором и пористым телом [164];
- определение диаграммы «сила-глубина» [175, 183, 184, 185, 187, 190, 191, 194, 195, 200, 227, 240, 241];
- определение модуля деформации [119, 220];
- определение перемещения, скорости и ускорения индентора при ударном взаимодействии [19-20];
- определение площади контакта [238];

- изучение характера образования трещин [242].

Рассмотрим основные работы, относящиеся к задаче исследования напряженно-деформированного состояния упругопластического тела при контакте с жестким конусом.

Определение механических свойств материалов по измерению твердости.

Исследованию взаимосвязи между твёрдостью и характеристиками прочности материалов посвящены труды учёных Н. Н. Давиденкова, М. П. Марковца и др. [15, 38, 100]. Предложены способы измерения предела текучести по величине твёрдости при внедрении индентора. Взаимосвязь найдена, к примеру, для высокохромистых нержавеющей сталей с различными режимами термообработки. Погрешность измерений при использовании алмазного конического индентора составляет 0,9%. Были исследованы взаимосвязи между твёрдостью и другими характеристиками, находимыми при растяжении, такими как относительное сужение, временное сопротивление и реальное сопротивление разрушению.

Значимость способа определения механических свойств по твердости заключаются в простоте осуществления, доступности, наличии значительного резерва для развития. Основное преимущество способов оценки по твердости в возможности без разрушения и вывода из строя, не вырезая образцов из готовых изделий, сравнительно быстро получать информацию о механических свойствах материала детали. Вследствие этого эти способы стали называть безобразцовыми методами контроля механических свойств по значениям твердости.

Автоматизация и использование ЭВМ в методах безобразцового контроля с фиксацией диаграмм вдавливания значительно ускоряет и облегчает процесс проверок, что дает возможность отнести этот метод к способам экспресс-контроля.

Способы измерения твердости приобретают особое значение для проверки восстановленных деталей, так как в силу их особенности наблюдается серьезная неоднородность по механическим свойствам.

Определение контактных усилий при статическом и динамическом взаимодействии.

В работе [84] предложена феноменологическая модель для нахождения отношения локального смятия от контактного усилия при взаимодействии упругопластических тел: конуса и плоской поверхности. Основываясь на ряде предположений, начальная задача о сжатии упругопластических тел сведена к сочетанию упругой и жесткопластической задач. Выведенная зависимость принимает во внимание изменение свободной поверхности тел в результате течения материала и неплохо соответствует экспериментальным данным [13]. Полагаясь на эту модель, в работах [20, 22] исследовалось соударение сферической оболочки с массивным коническим телом.

Была предложена методика, сформированная из метода Кольского, с целью оценки сопротивления материалов динамическому воздействию и нахождения динамической твердости.

Исследование распределений перемещений, деформаций и напряжений.

В работе [12] представлены результаты численного моделирования экспериментов по нахождению сопротивления разрушению хрупких материалов, которые проводятся на мезомасштабном размерном уровне, способом скалывания кромок образцов. Найдено решение статической пространственной нелинейной контактной задачи о взаимодействии индентора Роквелла с деформируемым твёрдым телом. Основываясь на анализе изменения формы полей напряжений, деформаций и перемещений (рисунок 1.4, 1.5) выявлено, что корректные данные моделирования возможно получать в области влияния краевого эффекта. Определены параметры зон, испытания в которых являются достоверными.

В работах [17, 39, 186] исследовано поведение поверхности упругопластического тела при моделировании внедрения в него конуса. При решении контактной задачи получают информацию по полям смещений и напряжений (рисунок 1.4) в зависимости от механических свойств материала.

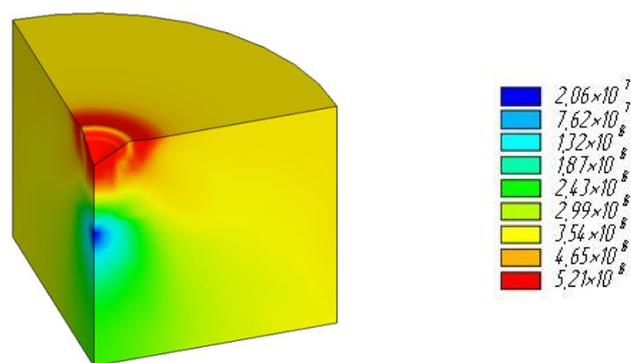


Рисунок 1.4 – Поля эквивалентных напряжений в упругопластической области (Па)

Представлены поля эквивалентных напряжений по критерию Мизеса для величины начальных напряжений $1,25\sigma_T$. На рисунке наблюдается зона разгрузки на глубине равной примерно двум радиусам отпечатка. Данное напряженно-деформированное состояние отличается невысоким уровнем тангенциальных напряжений и близостью к гидростатическому сжатию.

В работах [186, 194] решена контактная задача взаимодействия индентора Берковича с упругопластическим полупространством для разнообразных материалов: меди, нержавеющей стали, алюминия и др. Распределение полей напряжений по критерию Мизеса для меди во время и после снятия усилия воздействия на конус представлены на рисунке 1.5.

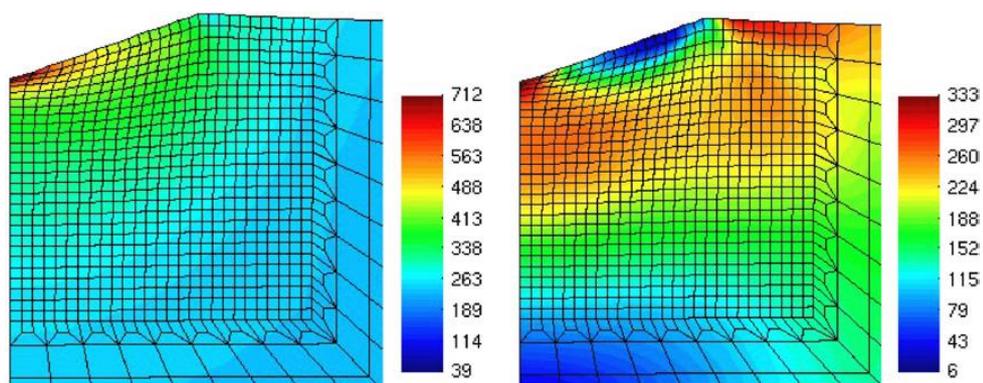


Рисунок 1.5 – Поля напряжений по Мизесу: максимальная нагрузка (слева), после снятия нагрузки (справа), (МПа)

В работах приведены всесторонние исследования полей деформаций и напряжений, которые возникают под действием конических инденторов с

различной геометрией для различных материалов. Так же представлены численное моделирование и практическая верификация микроиндентирования на примере трех упругопластических материалов с различными величинами предела текучести (медь, нержавеющая сталь и алюминий) с применением двух наконечников (сферического и Берковича). Нагрузка и глубина отпечатков для всех моделей соответствуют экспериментальным, которые были получены ранее при анализе реальных механических свойств в испытаниях на растяжение. Хотя геометрия индентора, как известно, оказывает сильное влияние на нагрузку, глубину и диапазон пластических деформаций, материалов участвующих в тесте, этот эффект не был четко отмечен ни на максимальной величине напряжений по критерию Мизеса, ни на минимальном (сжатие) значении гидростатического напряжения во время нагрузки и разгрузки.

Определение диаграммы деформационного упрочнения поверхностного слоя металлических материалов и диаграммы «сила-глубина».

В работах Д.А. Коновалова, М. Futakawa, D.J. Celentano, I.S. Choi и др. [90-91, 184, 191, 194] описан способ, заключающийся во внедрении в поверхность детали конического индентора, и в отличие от классического определения значения твердости по отпечатку, в нем применяют диаграмму вдавливания, показывающую взаимосвязь усилия воздействия на индентор от глубины внедрения (рисунок 1.6).

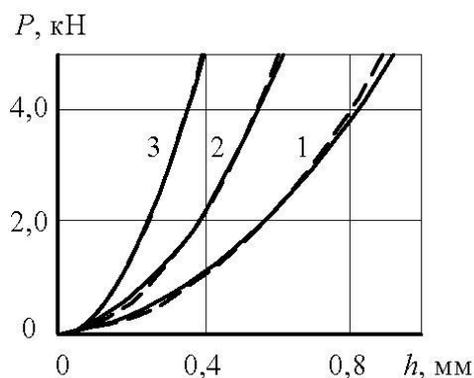


Рисунок 1.6 – Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (пунктирные линии) кривые вдавливания для Стали 3: 1 – $\alpha = 94^\circ$, 2 – $\alpha = 120^\circ$, 3 – $\alpha = 143^\circ$.

На рисунке 1.7 представлены кривые упрочнения, полученные в соответствии с методикой и экспериментальным путем. Кривые находятся довольно близко друг к другу до значения деформации $\Lambda = 0,8$. Это можно объяснить тем, что максимальная средняя величина деформации под индентором не превышает данного значения.

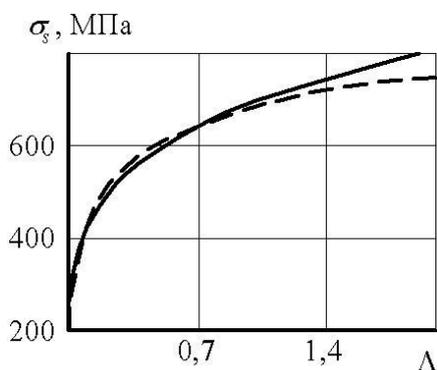


Рисунок 1.7 – Экспериментальные (пунктирные линии) и аппроксимированные (сплошные линии) кривые упрочнения для Стали 3

Таким образом, разработанный способ может быть использован для построения кривых упрочнения металлов, предел текучести которых ярко выражен, для величины степени деформации Λ до 0,8.

Приведенный анализ позволяет заключить, что задача о вдавливании конического индентора достаточно подробно развита в теоретическом и практическом плане и перспективна в решении проблемы измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях.

1.4 Цель и задачи исследования

На сегодняшний момент накоплено немало информации о механизмах образования остаточных напряжений, величинах и распределениях остаточных напряжений в деталях, влиянии остаточных напряжений на долговечность восстановленных деталей, способах получения данных об остаточных напряжениях. В целом, проблема измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях имеет решение в виде метода, основанного на вдавливании сферического индентора. Однако ввиду указанных выше недостатков метод требует дальнейшего развития и совершенствования. Интерес представляет использование для измерения остаточных напряжений конического индентора. Для решения задачи определения остаточных напряжений с использованием конического индентора требуется разработка самостоятельной математической модели и методики измерения с учетом современных требований по производительности измерений, информативности, минимизации воздействия, универсальности и пригодности к экспресс-контролю.

В связи с этим целью работы является разработка и применение метода определения поверхностных остаточных напряжений для оценки технического состояния деталей машин.

Для достижения поставленной цели предлагается решить следующие задачи исследования.

1. На основе анализа современного состояния методов измерения остаточных напряжений выявить методы, пригодные к измерению остаточных напряжений в восстановленных деталях, и сформулировать направления их развития и совершенствования.

2. Разработать численные модели для расчета геометрических параметров отпечатка при упругопластическом контактном взаимодействии конического индентора и контртела.

3. Провести экспериментальную проверку основных положений математической модели и доказать предсказанные моделью качественные и

количественные показатели взаимосвязи параметров распределения нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка конического индентора и поверхностных остаточных напряжений в восстановленной детали.

4. На основе упругопластического вдавливания конического индентора и оптической регистрации деформированного состояния поверхности вокруг отпечатка разработать метод измерения остаточных напряжений в деталях;

5. Провести апробацию и оценить эффективность применения метода для повышения долговечности восстановленных деталей.

2 АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ С ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ ПОВЕРХНОСТИ ВОССТАНОВЛЕННОЙ ДЕТАЛИ ВОКРУГ ОТПЕЧАТКА КОНИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА

2.1 Постановка задачи и выбор метода исследования

На основе результатов анализа современного состояния проблемы остаточных напряжений в деталях, подвергнутых восстановлению, для разработки способа определения остаточных напряжений используем задачу о вдавливании жесткого конуса в упругопластическое тело. Остаточные напряжения будем определять, используя количественные данные о деформациях поверхности вокруг отпечатка индентора. Результатом измерения являются компоненты тензора главных остаточных напряжений в точке на поверхности детали, т.е. значения и направления двух компонент главных остаточных напряжений и положение главных осей напряжений [5, 6, 18].

Для получения исходных данных используем оптический метод регистрации – электронную спекл-интерферометрию. Этот метод дает возможность получать данные о распределении перемещений на поверхности детали. Основываясь на работах [1, 5, 8, 46, 82, 99], для измерения поверхностных остаточных напряжений вполне достаточно получения данных о нормальной компоненте вектора перемещения.

Целью теоретического исследования является выявление количественной зависимости величины поверхностных остаточных напряжений в восстановленной детали от вертикальных перемещений точек поверхности в наплыве в окрестностях отпечатка после воздействия коническим индентором.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1) исследовать формирование наплыва вокруг отпечатка при вдавливании конического индентора в поверхность образца, свободного от остаточных напряжений:

а) изучить механизм формирования наплыва и установить закономерности распределения перемещений;

б) определить основные параметры, характеризующие геометрию наплыва, и получить их количественное описание;

в) выделить основные факторы, влияющие на геометрию наплыва, и получить количественное описание их влияния;

2) исследовать формирование наплыва вокруг отпечатка при вдавливании конического индентора в поверхность образца с остаточными напряжениями:

а) определить механизм влияния остаточных напряжений на перемещения в наплыве;

б) выделить информативную составляющую распределения нормальных перемещений, которая связана с остаточными напряжениями;

в) определить количественно зависимость информативной составляющей распределения нормальных перемещений от остаточных напряжений.

Результат решения перечисленных задач определит математическую модель формирования наплыва в окрестностях точки действия усилия при внедрении в поверхность детали конического индентора, учитывающую набор факторов, которые оказывают влияние на геометрические характеристики профиля наплыва, а также будут выведены уравнения для нахождения компонент тензора поверхностных остаточных напряжений, используя значение величины нормальных перемещений.

Для решения упругопластической контактной задачи наиболее целесообразно использовать метод конечных элементов [24, 28, 40, 82, 89, 90, 95, 132, 142, 182, 199, 212, 213].

2.2 Напряженно-деформированное состояние полупространства при вдавливании конического индентора

При рассмотрении задачи вдавливания индентора в полупространство используем цилиндрическую систему координат (рисунок 2.1). Ось z направлена по

нормали к поверхности контртела, а оси r и θ принадлежат плоскости касательной к поверхности контртела в точке начала системы координат, которая находится в месте исходного контакта перед нагружением индентора [58, 61-62, 186, 204, 210, 211, 213, 233].

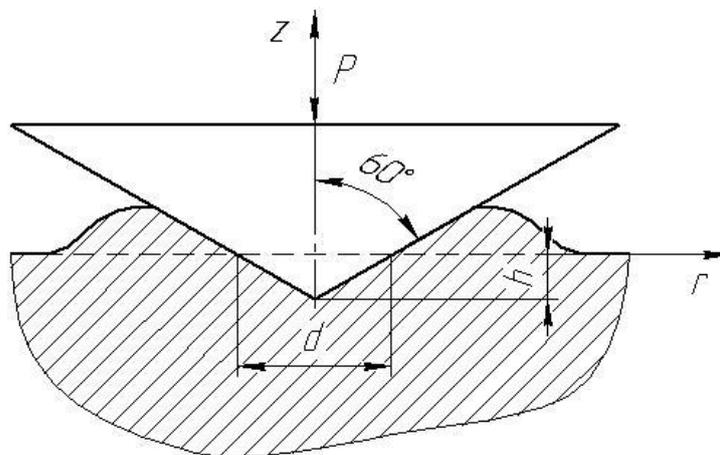


Рисунок 2.1 – Расположение системы координат

При вдавливании жесткого конуса на начальной стадии нагружения возникают упругие деформации. В качестве первого приближения можно принять решение задачи о сосредоточенной силе, действующей на плоскость, ограничивающую полупространство (рисунок 2.2) [40].

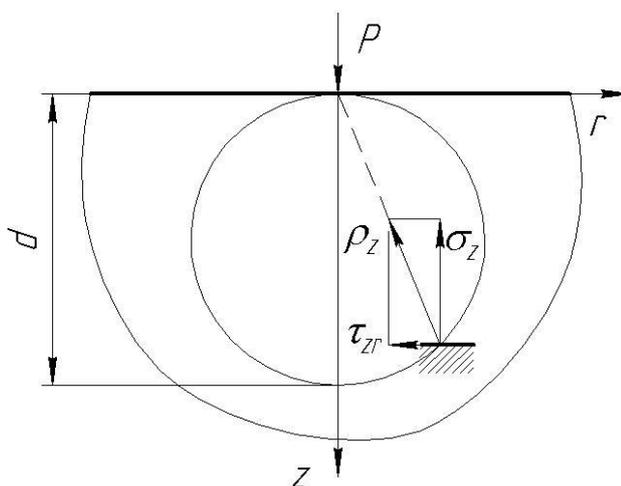


Рисунок 2.2 – Задача о сосредоточенной силе, действующей на плоскость

Основные уравнения для расчета напряжений в произвольной точке полупространства [40].

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi} \left((1-2\mu) \left(\frac{1}{r^2} - \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-1/2} \right) - 3r^2 z (r^2 + z^2)^{-5/2} \right), \quad (2.1)$$

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} z^3 (r^2 + z^2)^{-5/2}, \quad (2.2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P}{2\pi} \left((1-2\mu) \left(-\frac{1}{r^2} - \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-1/2} \right) + z (r^2 + z^2)^{-3/2} \right), \quad (2.3)$$

$$\tau_{rz} = -\frac{3P}{2\pi} r z^2 (r^2 + z^2)^{-5/2}, \quad (2.4)$$

Перемещения произвольной точки полубесконечного тела от действия сосредоточенной силы P

$$u = \frac{(1-2\mu) \cdot (1+\mu)P}{2\pi E r} \left(z (r^2 + z^2)^{-1/2} - 1 + \frac{1}{1-2\mu} r^2 z (r^2 + z^2)^{-3/2} \right), \quad (2.5)$$

$$w = \frac{P}{2\pi E} \left[(1+\mu) z^2 (r^2 + z^2)^{-3/2} + 2(1-\mu^2) (r^2 + z^2)^{-1/2} \right], \quad (2.6)$$

На граничной плоскости при $z = 0$ нормальные перемещения

$$w|_{z=0} = \frac{P(1-\mu^2)}{2\pi E r}, \quad (2.7)$$

Решение показывает, что в упругой области нормальные перемещения на поверхности в направлении оси r изменяются по гиперболическому закону. При $r \rightarrow 0$ нормальные перемещения устремляются к бесконечности.

Уточненные решения упругой задачи в интегральных уравнениях даны в работах [3, 27, 105].

Решение задачи о вдавливании конуса в пластической постановке методом линий скольжения представлено в [86].

Для анализа внедрения конуса в упругопластическом режиме в [40] представлена модель с полусферическим ядром. В соответствии с моделью внутри ядра возникает гидростатическое напряженное состояние, вне ядра напряжения соответствуют задаче о сферической полости в теле, нагруженной внутренним давлением.

2.3 Анализ деформированного состояния поверхности контртела методом конечных элементов

2.3.1 Исходные данные

Свойства исследуемой детали:

- форма поверхности – плоская;
- материал – упругопластический, упрочняющийся;
- модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$;
- диаграмма деформирования материала – упрощенная (билинейная).

Свойства индентора:

- тип – конический;
- угол в вершине - 120° ;
- материал – идеально упругий.

Входные варьируемые параметры:

- усилие воздействия на индентор F ;
- механические свойства материала контртела – параметры диаграммы деформирования, которые задаются пределом текучести σ_T и модулем упрочнения E_T материала;

- остаточные напряжения $\sigma_x^{\text{ост}}$ и $\sigma_y^{\text{ост}}$.

Диапазон изменения варьируемых параметров:

- усилие вдавливания – $0 \dots 800$ Н;
- предел текучести материала – $250 \dots 1000$ МПа;
- модуль упрочнения материала – $5000 \dots 15000$ МПа;
- остаточные напряжения – от $-\sigma_T$ до $+\sigma_T$.

Выходные параметры:

- распределение нормальных перемещений поверхности контртела $W(r)$;
- диаметр отпечатка индентора d .

Описание цикла нагружения:

В начальный момент времени (при $t_0 = 0$) конус контактирует с поверхностью по площадке радиусом $r_c \rightarrow 0$, нагрузка $F = 0$. В течение промежутка времени (t_0, t_1) нагрузка равномерно возрастает до значения F_{max} . Затем следует выдержка до момента времени t_2 и равномерная разгрузка (рисунок 2.3). Трение в контакте равно 0.

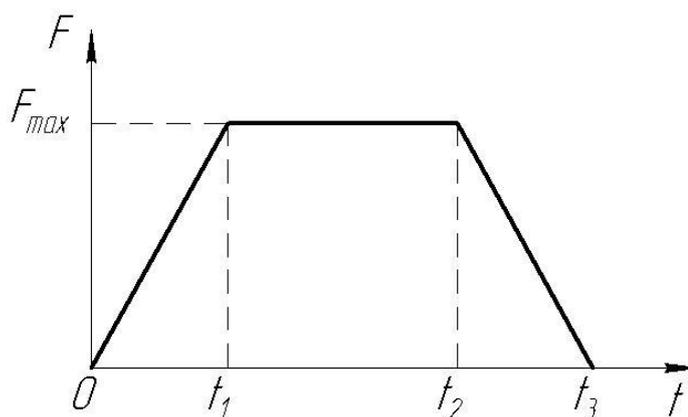


Рисунок 2.3 – Цикла нагружения модели

2.3.2 Конечно-элементная модель

Цилиндрическая система координат позволяет применить упрощенную осесимметричную постановку при моделировании внедрения жесткого конуса в упругопластический материал. Расчетная схема и деление расчетной модели на конечные элементы показаны на рисунке 2.4 [52, 52-64, 144-153, 186, 204, 210, 234].

В процессе моделирования были применены структурные и контактные элементы. Материал зоны №1 изотропный, упругий. В зоне №2, где имеет место упругопластическое течение, материал упругопластический с билинейной диаграммой деформирования.

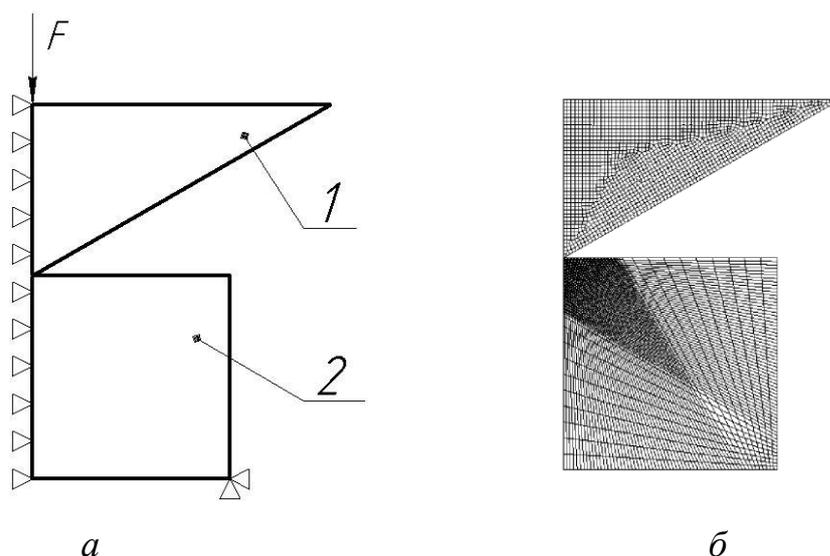


Рисунок 2.4 – Расчетная схема (а) и конечно-элементная сетка (б)

Важный параметр, который отвечает за достоверность и адекватность данных, получаемых расчетным путем, а также за точность отрисовки распределения полей напряжений и деформаций, - это величина конечного элемента. Выявить оптимальную форму и густоту конечно-элементной сетки в зоне появления наплыва вокруг индентора позволила серия предварительных расчетов, которая показала влияние величины элемента на геометрию профиля наплыва, на длительность расчета и частоту появления ошибок во время расчета. Критерием достаточности уменьшения размера элемента была сходимость формы профиля. При крупной сетке получалась ломаная линия профиля, в некоторых случаях вызывая ошибки и прекращение расчета. При подборе минимального размера элемента сетки найдено значение, при котором соотношение «время расчета – сходимость профиля» получалось наилучшим. Редкая сетка подойдет для мест, в которых не требуется высокая точность – вдали от зоны контакта. При расчетах наименьший использованный размер элемента 0,02 мм.

Конструкционные стали с билинейной диаграммой деформирования позволяют применить две модели пластичности – изотропное и кинематическое упрочнение. На основании рекомендаций работ [40, 125, 206, 210, 217-219] в расчетах использована модель кинематического упрочнения.

При проверке контактного алгоритма методом конечных элементов сосредоточенная сила была смоделирована конусом с острым углом при вершине

во избежание высоких напряжений в точке контакта. Величина силы, действующей на конус, была подобрана экспериментальным путем, чтобы исключить появление пластических деформаций. Сравнение теоретического и численного решений – распределения напряжений $\sigma_r(r)$ и $\sigma_\theta(r)$ на поверхности полупространства (при $z = 0$) и $\sigma_z(z)$ на оси действия силы (при $r = 0$) - представлено на рисунке 2.5.

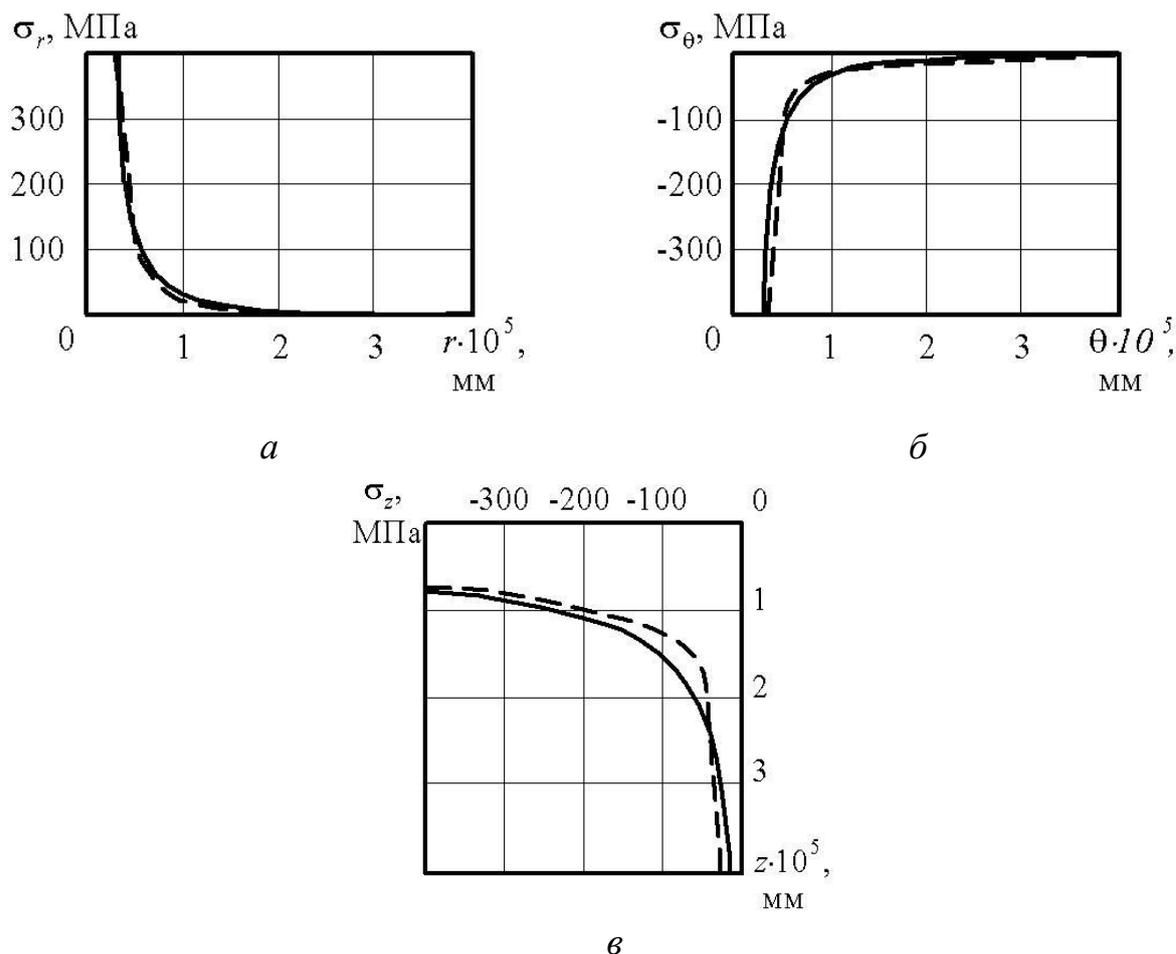


Рисунок 2.5 – Верификация контактного алгоритма:

a – напряжения σ_r , *б* – напряжения σ_θ , *в* – напряжения σ_z ; сплошная линия – теоретическое решение, прерывистая линия – решение МКЭ

Качественное и количественное соответствие численного решения теоретическому дало возможность сделать заключение об адекватности контактного алгоритма и пригодности его для данной задачи. Проверка и подтверждение корректности разработанной численной модели проведена при качественном сопоставлении данных, получаемых расчетным путем,

(распределений напряжений) с результатами расчетов в работах [86, 125, 186, 206, 215].

Для определения возможности использования в расчетах упрощенной билинейной диаграммы деформирования материала контртела вместо степенной проведена серия дополнительных расчетов. Сравнение геометрии наплыва вокруг отпечатка в соответствии с данными расчетов показано на рисунке 2.6.

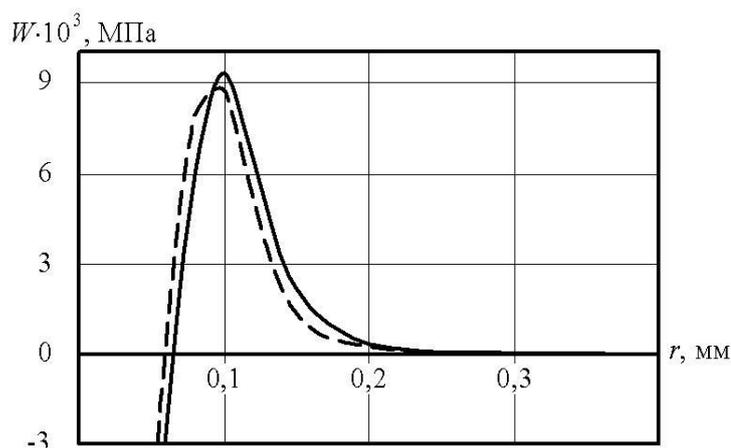


Рисунок 2.6 – Профили наплыва при использовании степенной и билинейной диаграммы деформирования; сплошная линия – билинейная диаграмма деформирования, прерывистая линия – степенная

Результаты сравнения показали, что различие результатов по перемещениям в наплыве при использовании разных моделей диаграммы деформирования незначительно. Билинейная диаграмма деформирования материала контртела принята для дальнейших расчетов как основная, ввиду простоты её присвоения к материалу модели в расчетных программах.

Опираясь на чувствительность данного способа измерения и упругопластическую постановку задачи, а так же на тип индентора экспериментально был выбран диапазон значений усилия воздействия на индентор F , и как следствие диапазон изменения диаметра отпечатка d .

Для исследований были выбраны основные конструкционные материалы, которые используются в сельскохозяйственном машиностроении. Варьируемость механических свойств учитывает диапазон упрочнения поверхности детали при восстановлении [49].

Для проверки влияния трения в контакте проведены дополнительные расчеты для нескольких материалов с учетом и без учета трения (с коэффициентами трения 0 и 0,2). На рисунке 2.7 показаны сравнительные графики зависимостей основных выходных параметров $d(F)$ и $W_{\max}(d)$ для вариантов расчета.

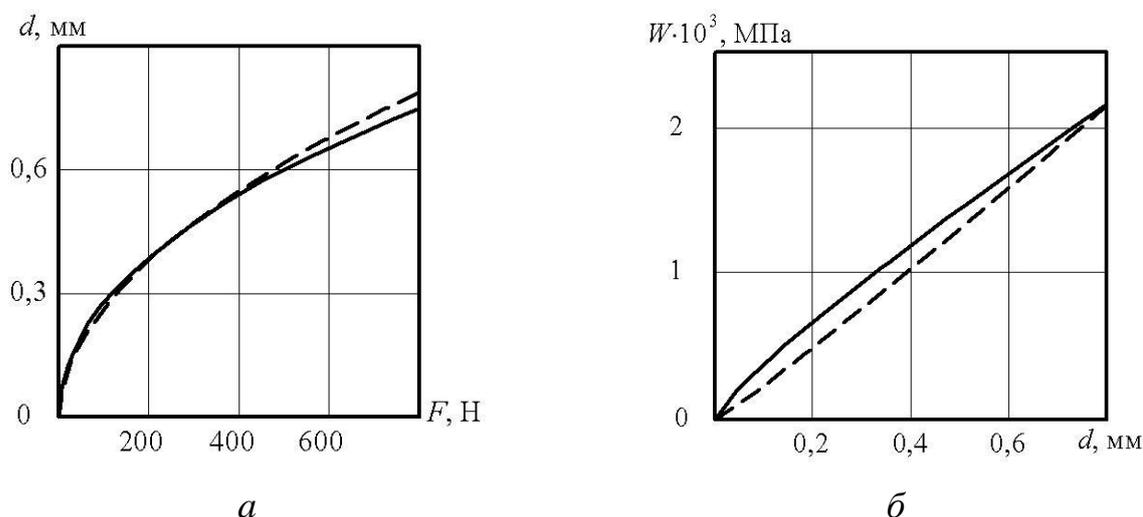


Рисунок 2.7 – Зависимость: *а* – диаметра отпечатка d от усилия вдавливания индентора F ; *б* – высоты наплыва W_{\max} от диаметра отпечатка d ; сплошная линия – без трения, прерывистая линия – коэффициент трения 0,2

Анализ показал, что различие результатов расчетов с трением и без трения не превышает 10%, а значит, при расчетах допустимо использовать конечно-элементную модель без трения.

2.3.3 Программа исследования, методика получения и обработки данных

В соответствии с программой исследования (рисунок 2.8) результатом является представленная в математической форме взаимосвязь между остаточными напряжениями и нормальными перемещениями в наплыве, учитывающее влияние варьируемых параметров, изменяющихся в принятых диапазонах.

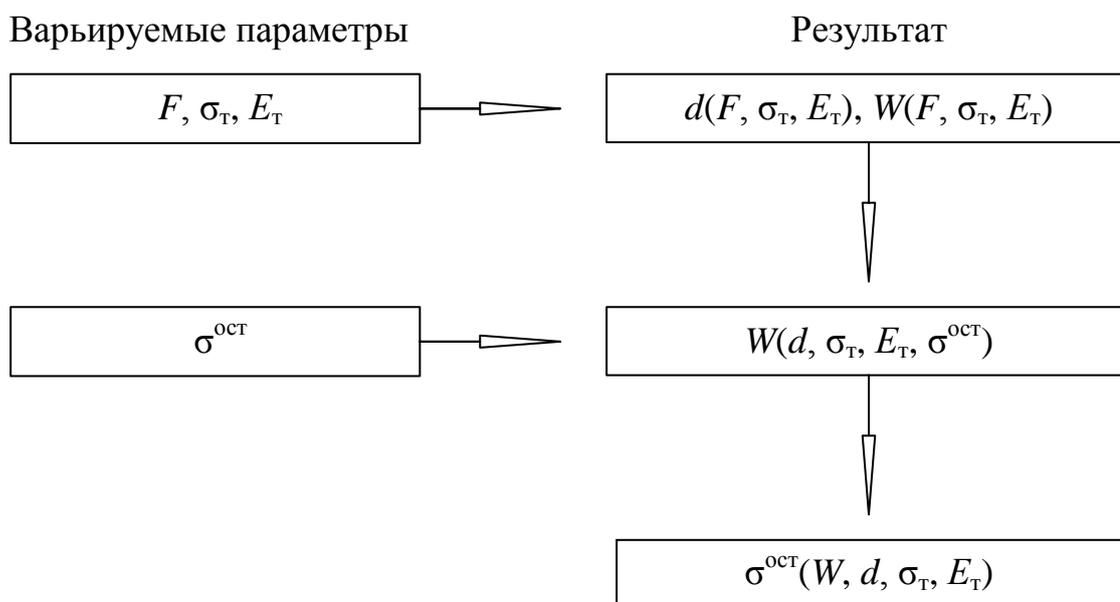


Рисунок 2.8 – Программа исследования

Перечень рассмотренных механических свойств при исследовании геометрических параметров профиля наплыва вокруг отпечатка индентора для контртела при отсутствии остаточных напряжений приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Механические свойства

Предел текучести σ_T , МПа	Модуль упрочнения E_T , МПа			
	$0,5 \cdot 10^4$	$0,8 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$
250	●	●	●	●
400	●	●	●	●
800	●	●	●	●
1000	●	●	●	●

Проведена серия расчетов с различными величинами усилия воздействия на индентор F для каждого сочетания механических свойств (σ_T и E_T). По результатам каждого расчета определяли диаметр отпечатка d и величину максимального нормального перемещения в наплыве W_{\max} . Определяли зависимости $d(F)$, $W_{\max}(d)$, $W_{\max}(F)$, основываясь на полученных результатах с применением регрессионного анализа. Из полученных зависимостей выведены зависимости $d(F, \sigma_T, E_T)$, $W_{\max}(d, \sigma_T, E_T)$, $W_{\max}(F, \sigma_T, E_T)$. В последующем эти зависимости были представлены в относительном виде $d_2/d_1 = f(\sigma_{T1}, \sigma_{T2}, E_{T1}, E_{T2})$,

$W_{\max 2}/W_{\max 1} = f(\sigma_{T1}, \sigma_{T2}, E_{T1}, E_{T2})$. Информацию для основного материала с индексом 1 получаем экспериментально, и тогда, по отношению к ней, представленные выражения позволят получить данные об изменении параметров d и W_{\max} для исследуемого материала с индексом 2 [49]. Данный подход позволяет получить более достоверный результат, по сравнению со способом прямого определения параметров, основанном на приближенных зависимостях.

Влияние остаточных напряжений на нормальные перемещения поверхности в окрестности отпечатка индентора исследовано на нескольких произвольно выбранных материалах. Для каждого из них при постоянном усилии вдавливания индентора выполнены серии расчетов с различными значениями остаточных напряжений, диапазон которых ограничен пределом текучести материала исследуемой детали [148].

2.4 Нормальные перемещения поверхности вокруг отпечатка

2.4.1 Формирование наплыва вокруг отпечатка

При нагружении контртела коническим индентором, нормальные перемещения вокруг контакта начинают образовывать наплыв, окончательное формирование которого происходит при завершении цикла нагружения, во время снятия нагрузки (рисунок 2.9).

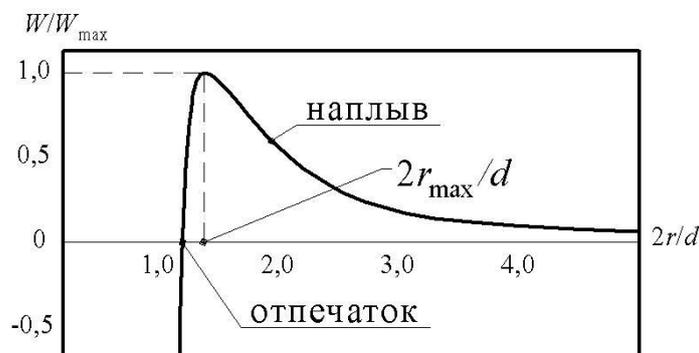


Рисунок 2.9 – Профиль и основные геометрические параметры наплыва

После завершения цикла воздействия усилия на индентор максимальное нормальное перемещение W_{\max} в наплыве находится на расстоянии r_{\max} от оси z .

Термин «радиус наплыва» будем использовать в дальнейшем для обозначения этого характерного расстояния.

Для определения функции профиля отпечатка использовали программное обеспечение, предназначенное для анализа научных и статистических данных. Так как интерес в исследовании наплыва представляет область $r \geq r_{\max}$, принимаем $r > 0,95r_{\max}$. По результатам регрессионного анализа [111] наилучшую сходимость и наибольшее соответствие расчетным данным дает аппроксимация с использованием четырех-параметрической функции вида.

$$W(r) = a \left[\frac{c}{\left(1 + \left(\frac{x - x_0}{b}\right)^2\right)} + (1 - c)e^{-0,5\left(\frac{x - x_0}{b}\right)^2} \right], \quad (2.8)$$

Сопоставление результатов расчетов и аппроксимации для одного из материалов и пяти различных значений усилия вдавливания представлены на рисунке 2.10.

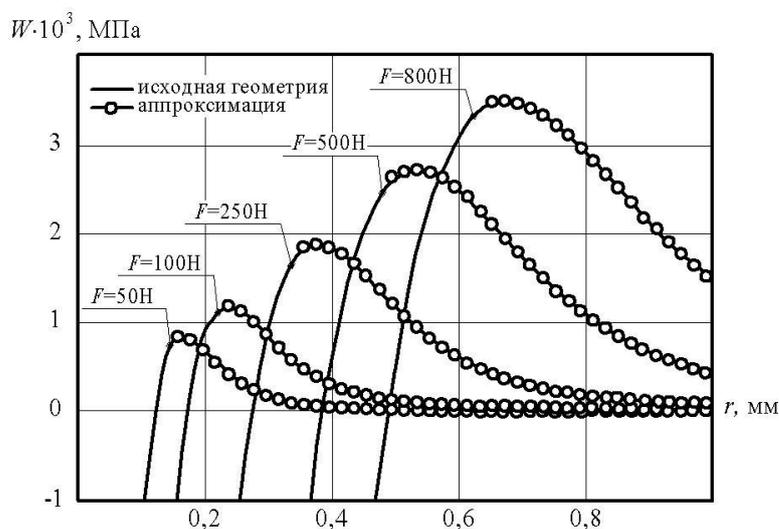


Рисунок 2.10 – Сравнение результатов расчетов и аппроксимации

Анализ распределений перемещений показал, что параметры a и b в выражении (2.8) зависят от свойств материала, параметр x_0 при постоянных пределах текучести материала у величине усилия вдавливания зависит от модулях упрочнения, а параметр c равен 1. Графики изменения параметров аппроксимации профиля относительно свойств материала представлены на рисунке 2.11.

Обобщая результаты для исследованных материалов (таблица 2.1), закономерности распределения нормальных перемещений вокруг отпечатка следующие:

1) распределение перемещений можно описать, используя три геометрических параметра – радиус отпечатка $r_{отп}$, радиус наплыва r_{max} и высота наплыва W_{max} ;

2) изменение перемещений в периферийной области наплыва носит экспоненциальный характер;

3) геометрию наплыва при вдавливании конического индентора в поверхность упругопластического тела на участке $r > 0,95r_{max}$ качественно описывается четырех-параметрической функцией вида (2.7) [109, 110].

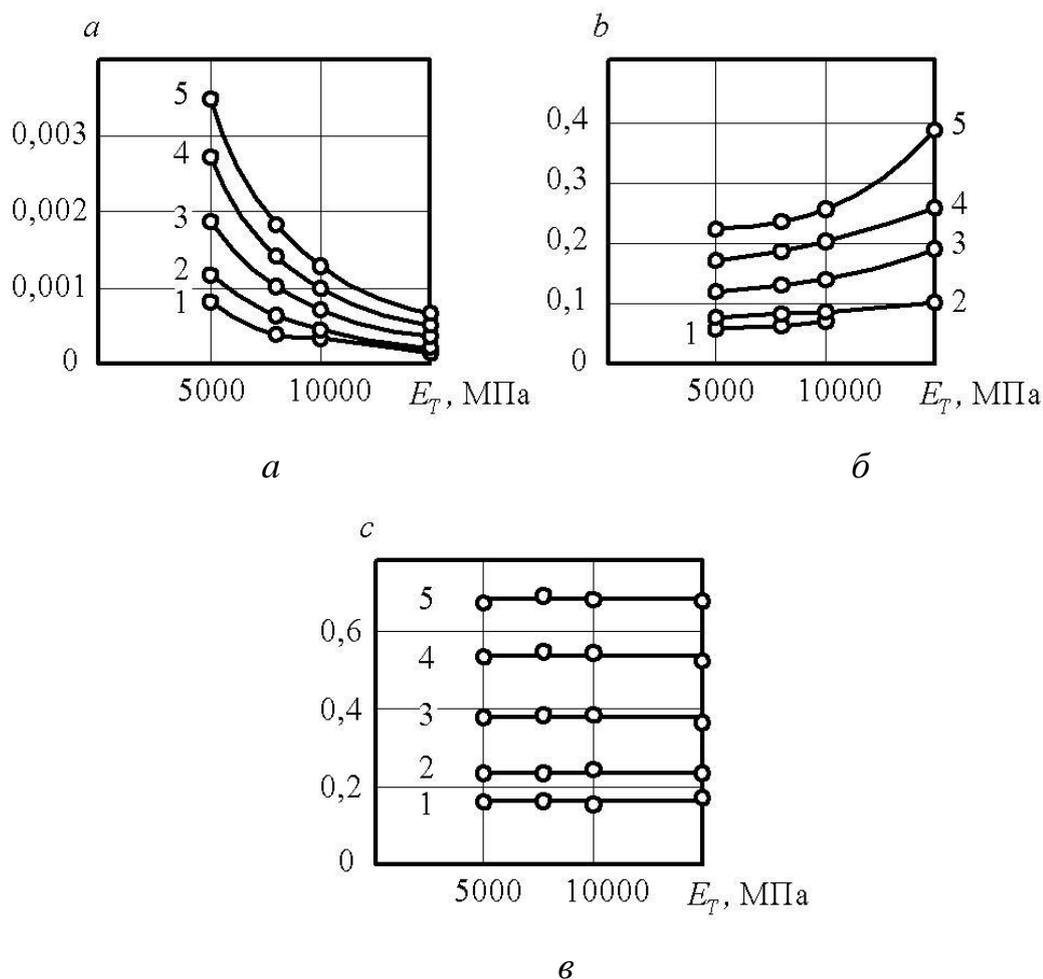
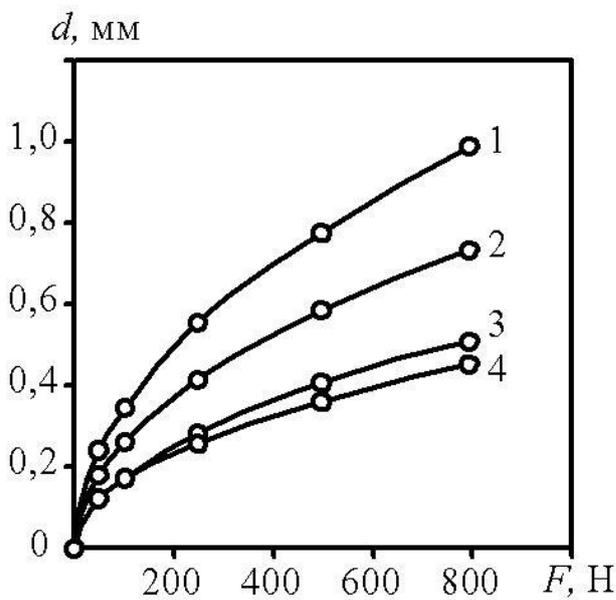


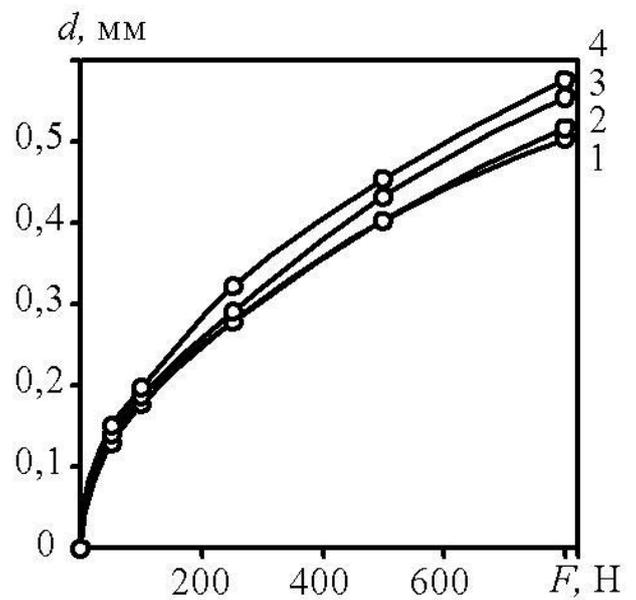
Рисунок 2.11 – а) Изменение параметра a при $\sigma_T = 250$ МПа; б) изменение параметра b при $\sigma_T = 400$ МПа; в) изменение параметра x_0 при $\sigma_T = 250$ МПа; 1 – $F = 50$ Н, 2 – $F = 100$ Н, 3 – $F = 250$ Н, 4 – $F = 500$ Н, 5 – $F = 800$ Н

2.4.2 Влияние усилия вдавливания индентора на геометрические характеристики напльва

Для данного материала увеличение усилия вдавливания индентора F вызывает увеличение диаметра отпечатка d (рис. 2.12) и соответствующее увеличение максимального нормального перемещения в напльве W_{\max} (рис. 2.13). Отсюда, увеличение диаметра отпечатка приводит к возрастанию перемещения W_{\max} (рис. 2.14).

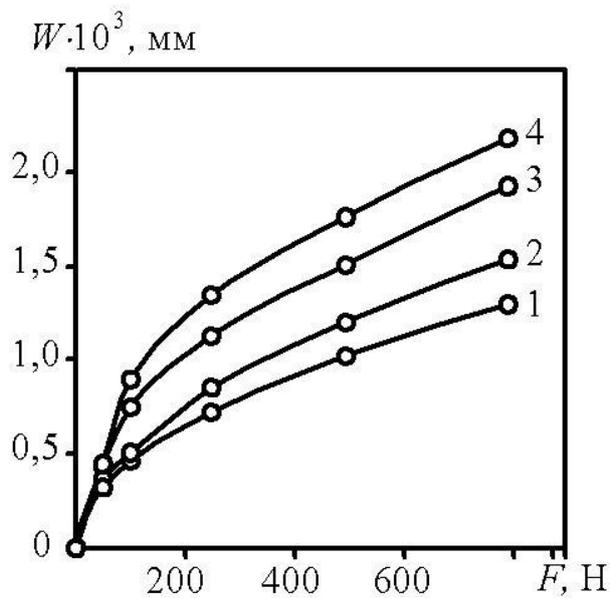


$E_T = 5 \cdot 10^3$ МПа, 1 – $\sigma_T = 250$ МПа,
 2 – $\sigma_T = 400$ МПа, 3 – $\sigma_T = 800$ МПа,
 4 – $\sigma_T = 1000$ МПа,

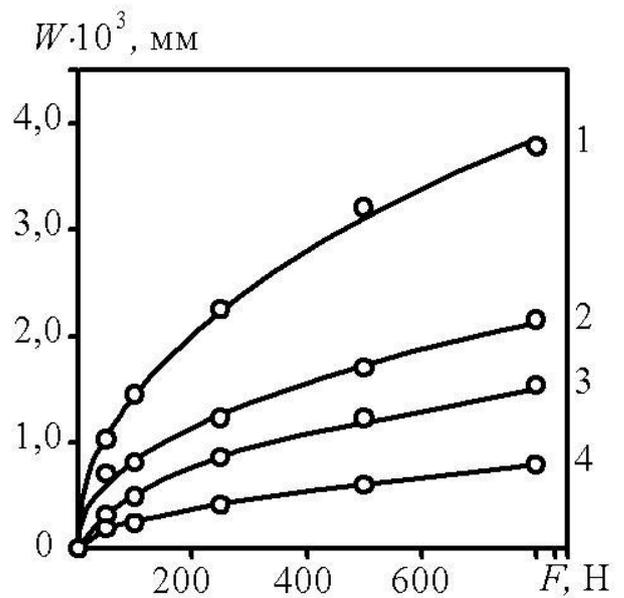


$\sigma_T = 800$ МПа, 1 – $E_T = 0,5 \cdot 10^4$ МПа,
 2 – $E_T = 0,8 \cdot 10^4$ МПа, 3 – $E_T = 1 \cdot 10^4$
 МПа, 4 – $E_T = 1,5 \cdot 10^4$ МПа

Рисунок 2.12 – Влияние усилия вдавливания индентора на диаметр отпечатка

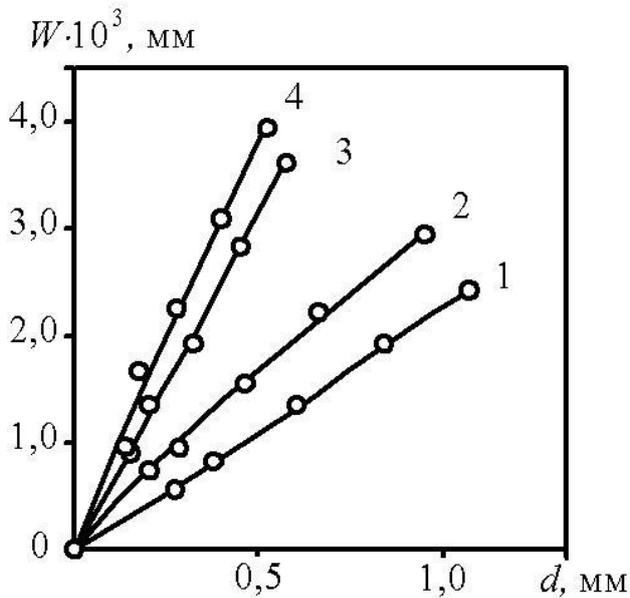


$E_T = 1 \cdot 10^4$ МПа, 1 – $\sigma_T = 250$ МПа,
2 – $\sigma_T = 400$ МПа, 3 – $\sigma_T = 800$ МПа,
4 – $\sigma_T = 1000$ МПа

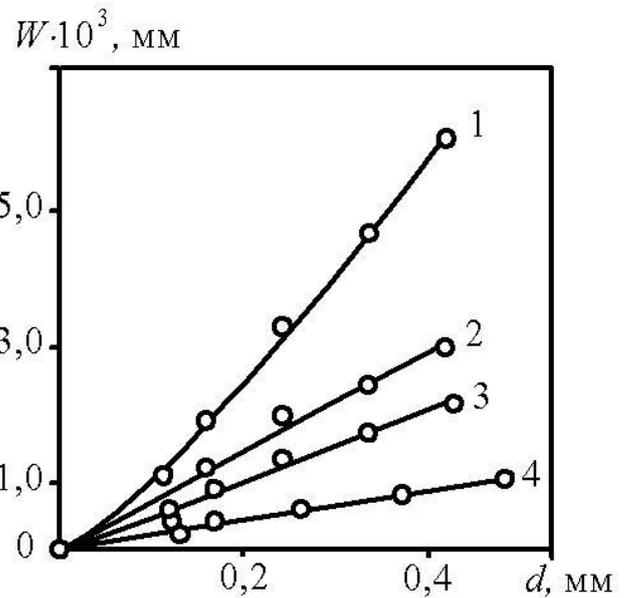


$\sigma_T = 400$ МПа, 1 – $E_T = 0,5 \cdot 10^4$ МПа,
2 – $E_T = 0,8 \cdot 10^4$ МПа, 3 – $E_T = 1 \cdot 10^4$
МПа, 4 – $E_T = 1,5 \cdot 10^4$ МПа

Рисунок 2.13 – Влияние усилия вдавливания индентора
на максимальное перемещение в наплыве



$E_T = 1,5 \cdot 10^4$ МПа, 1 – $\sigma_T = 250$ МПа,
2 – $\sigma_T = 400$ МПа, 3 – $\sigma_T = 800$ МПа,
4 – $\sigma_T = 1000$ МПа



$\sigma_T = 1000$ МПа, 1 – $E_T = 0,5 \cdot 10^4$ МПа,
2 – $E_T = 0,8 \cdot 10^4$ МПа, 3 – $E_T = 1 \cdot 10^4$
МПа, 4 – $E_T = 1,5 \cdot 10^4$ МПа

Рисунок 2.14 – Влияние диаметра отпечатка на максимальное
перемещение в наплыве

2.4.3 Влияние механических свойств материала детали на диаметр отпечатка

По результатам расчетов, общими закономерностями влияния свойств материала (предела текучести σ_T и модуля упрочнения E_T) на диаметр отпечатка являются [72].

Зависимость диаметра отпечатка d от усилия вдавливания F описывается следующим регрессионным уравнением

$$d(F) = d_{0F} \cdot \left(\frac{F}{F_0} \right)^{n_d}, \quad (2.9)$$

где d_{0F} – условный диаметр отпечатка (мм), полученный при величине усилия вдавливания $F_0 = 1$ Н.

Погрешность определения диаметра отпечатка по выражению (2.9) относительно результатов расчетов не превышает 1,5%.

Величина показателя степени n_d в уравнении (2.9) не зависит от механических свойств материала.

Величина условного диаметра d_{0F} зависит от механических свойств материала (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Значения коэффициентов уравнения регрессии (2.9) при различных механических свойствах материала контртела

Предел текучести σ_T , МПа	$d(F)$, мм							
	Модуль упрочнения E_T , МПа							
	$0,5 \cdot 10^4$		$0,8 \cdot 10^4$		$1,0 \cdot 10^4$		$1,5 \cdot 10^4$	
	d_{0F}	n_d	d_{0F}	n_d	d_{0F}	n_d	d_{0F}	n_d
250	0,06365	0,4	0,06606	0,4	0,06711	0,4	0,06974	0,4
400	0,04787	0,4	0,05065	0,4	0,05195	0,4	0,05799	0,4
800	0,03238	0,4	0,03333	0,4	0,03465	0,4	0,03738	0,4
1000	0,02977	0,4	0,03005	0,4	0,03061	0,4	0,0331	0,4

По аналогии с [82] выражение (2.9) будем использовать как **первую диаграмму вдавливания « $d-F$ »**.

Относительное изменение условного диаметра отпечатка d_{0F} зависит от соотношений механических свойств материалов 1 и 2 и имеет вид

$$\frac{d_{0F2}}{d_{0F1}} = \left(\frac{\sigma_{T1}}{\sigma_{T2}} \right)^{5/9} \cdot \left(\frac{E_{T1}}{E_{T2}} \right)^{1/8}. \quad (2.10)$$

Примем в качестве материала 1 условный материал с пределом текучести $\sigma_{Ty} = 1$ МПа и модулем упрочнения $E_{Ty} = 1$ МПа. Для этого материала при усилии воздействия на индентор $F_y = 1$ Н получена величина условного диаметра отпечатка $d_{0Fy} = 3,23$ мм. Тогда диаметр отпечатка для искомого материала определится как

$$d = d_{0Fy} \left(\frac{\sigma_{Ty}}{\sigma_T} \right)^{5/9} \cdot \left(\frac{E_{Ty}}{E_T} \right)^{1/8} \cdot \left(\frac{F}{F_y} \right)^{4/9}. \quad (2.11)$$

Выражения (2.9), (2.10) и (2.11) представляют собой математическую модель, описывающую закономерности изменения диаметра отпечатка индентора в зависимости от параметров нагружения индентора и механических свойств материала контртела. Погрешность определения диаметра отпечатка при известных механических свойствах материала и усилии вдавливания индентора не превышает 2%.

Перестраивая уравнения (2.10) и (2.11), получим выражения для определения модуля упрочнения материала контртела. Интерес в этих выражениях состоит в том, что, как показано в работах [82, 100, 110], предел текучести материала можно определить по диаметру отпечатка при вдавливании шарового индентора. Определив с использованием конического индентора модуль упрочнения, получаем полный в рамках модели набор свойств материала контртела, необходимых для решения задачи измерения остаточных напряжений.

Отношение диаметров отпечатков и пределов текучести материалов 1 и 2 при вдавливании конического индентора с углом 120° с одинаковым усилием и с разными механическими свойствами позволяют найти отношение модулей упрочнения:

$$\frac{E_{T1}}{E_{T2}} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{8,16} \cdot \left(\frac{\sigma_{T2}}{\sigma_{T1}} \right)^{4,48}, \quad (2.12)$$

Известный диаметр отпечатка, усилие вдавливания и при наличии данных о пределе текучести материала дают возможность определить модуль упрочнения этого материала:

$$E_T = E_{Ty} \left(\frac{d_{0Fy}}{d} \right)^{8,16} \cdot \left(\frac{\sigma_{Ty}}{\sigma_T} \right)^{4,48} \cdot \left(\frac{F}{F_y} \right)^{3,2}, \quad (2.13)$$

Использование уравнения (2.13) возможно при произвольном усилии вдавливания индентора. Основываясь на анализе расчетных данных, погрешность при определении модуля упрочнения не превышает 10%.

2.4.4 Влияние механических свойств материала детали на нормальные перемещения в наплыве

Нормальные перемещения W в наплыве вокруг отпечатка зависят от механических свойств материала детали (предела текучести материала σ_T , МПа и модуля упрочнения E_T , МПа) и усилия вдавливания индентора F , Н. Как показано выше, для конкретного материала (набора механических свойств) диаметр отпечатка d однозначно связан с усилием вдавливания индентора. В связи с этим предпочтительным с практической точки зрения является получить зависимость нормальных перемещений в наплыве от диаметра отпечатка индентора.

Зависимость максимальных перемещений в наплыве W_{\max} от диаметра отпечатка описывается следующим регрессионным уравнением

$$W_{\max}(d) = W_{0d} \cdot \left(\frac{d}{d_0} \right)^{n_w}, \quad (2.14)$$

где W_{0d} – условное максимальное перемещение (мм), возникающее при диаметре отпечатка $d_0 = 1$ мм.

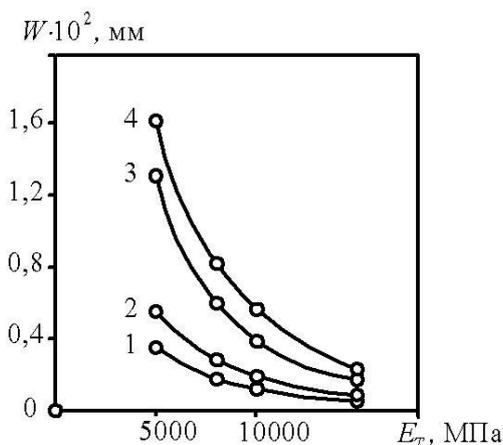
Погрешность определения максимального перемещения по выражению (2.14) не превышает 3% относительно результатов расчета.

Величина условного максимального перемещения W_{0d} и показателя степени n_w зависит от механических свойств материала (таблица 2.3) [144, 148]. По аналогии с [80] выражение (2.14), будем использовать как **вторую диаграмму вдавливания** « $W_{max}-d$ ».

Таблица 2.3 – Значения коэффициентов уравнения регрессии (2.13) при разных механических свойствах материала контртела

Предел текучести σ_T , МПа	$W_{max}(d)$, мм							
	Модуль упругости E_T , МПа							
	$0,5 \cdot 10^4$		$0,8 \cdot 10^4$		$1,0 \cdot 10^4$		$1,5 \cdot 10^4$	
	W_{0d}	n_w	W_{0d}	n_w	W_{0d}	n_w	W_{0d}	n_w
250	0,003508	1	0,001781	1	0,001259	1	0,0006088	1
400	0,005353	1	0,002793	1	0,001919	1	0,000868	1
800	0,01132	1	0,005553	1	0,003679	1	0,001705	1
1000	0,01292	1	0,006772	1	0,004737	1	0,002139	1

Изменение условного перемещения W_{0d} и показателя степени n_w в зависимости от предела текучести и модуля упругости показано на рисунке 2.15 [144].



1 – $\sigma_T = 250$ МПа; 2 – $\sigma_T = 400$ МПа; 3 – $\sigma_T = 800$ МПа; 4 – $\sigma_T = 1000$ МПа

Рисунок 2.15 – Зависимость условного перемещения W_{0d} от механических свойств материала

Показатель степени n_w во всем диапазоне механических свойств материала контртела изменяется незначительно, с допустимой погрешностью его можно принять равным 1. С учетом этого параметр диаграммы W_{0d} зависит от механических свойств материала контртела в относительном

$$\frac{W_{0d2}}{W_{0d1}} = \frac{\sigma_{T2}}{\sigma_{T1}} \cdot \left(\frac{E_{T1}}{E_{T2}} \right)^{3/2}, \quad (2.15)$$

и абсолютном виде

$$W_{0d} = 4,75 \frac{\sigma_T}{E_T^{3/2}}. \quad (2.16)$$

Выражения (2.14), (2.15) и (2.16) формируют математическую модель, описывающую закономерности изменения геометрических параметров наплыва вокруг отпечатка индентора в зависимости от параметров нагружения индентора и механических свойств материала контртела.

2.4.5 Влияние начальных (остаточных) напряжений на распределение нормальных перемещений в наплыве

Для получения данных о влиянии остаточных напряжений на нормальные перемещения в наплыве необходимо создать в модели осевые растягивающие и сжимающие напряжения разной величины и разного знака до начала вдавливания индентора [186]. С этой целью задача рассмотрена в трехмерной постановке. Для обеспечения корреляции результатов, полученных выше с использованием осесимметричной модели и с использованием трехмерной модели, расчетная схема остается такой же (см. рисунок 2.4, а), разбиение на конечные элементы максимально соответствует двумерной задаче (рисунок 2.16).

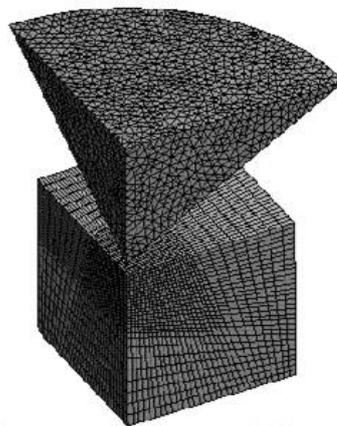


Рисунок 2.16 – Конечно-элементная сетка

Начальные напряжения в модели можно задавать различными способами. С целью выбора наиболее корректного варианта проведена серия расчетов, в которых начальные напряжения были заданы при помощи давления и температуры. Результаты показаны на рисунке 2.17.

Анализ полученных данных показывает, что результаты различаются незначительно, в пределах 5-7%, а время расчета при задании начальных напряжений с помощью температуры в три раза превышает время расчета при задании с помощью давления, что очень существенно. В связи с этим дальнейшие расчеты проводились при моделировании начальных напряжений с помощью давления.

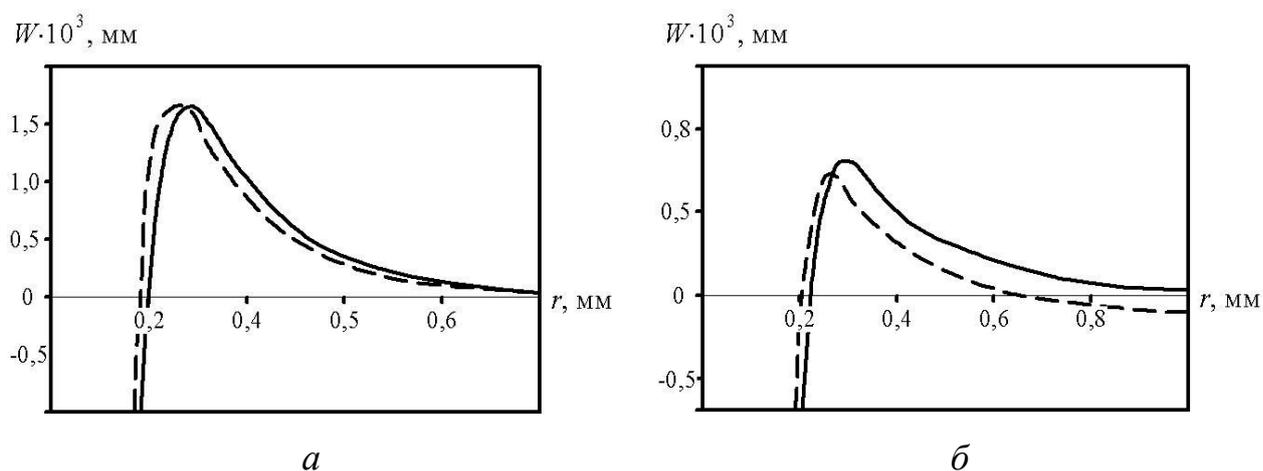


Рисунок 2.17 – *а* – Сжимающие начальные напряжения $0,95\sigma_T$ (пассивная ось),
б – Растягивающие начальные напряжения $0,475\sigma_T$ (активная ось);
 сплошная линия – давление, прерывистая линия – температура

Как показывают результаты расчетов, начальные (остаточные) напряжения оказывают значительное влияние на геометрические параметры наплыва вокруг отпечатка (рисунок 2.18). Сжимающие остаточные напряжения являются причиной увеличения высоты наплыва W_{\max} , возрастание сжимающих напряжений соответственно увеличивает максимальное перемещение в наплыве. При этом положение точек с максимальными перемещениями r_{\max} (радиус наплыва) изменяется незначительно. Растягивающие остаточные напряжения, напротив, становятся причиной уменьшения максимального перемещения W_{\max} в

наплыве. При росте растягивающих начальных напряжений профиль наплыва становится все более пологим, выпучивание уменьшается. При приближении растягивающих остаточных напряжений к значению предела текучести материала перемещения в наплыве меняются на отрицательные, выпучивание сменяется утяжиной. Такая качественная зависимость формы наплыва от величины и знака начальных напряжений в материале контртела коррелирует с закономерностями, полученными в работе [186] при вдавливании конического индентора, а так же с данными в работах [54, 82] при вдавливании шарового индентора.

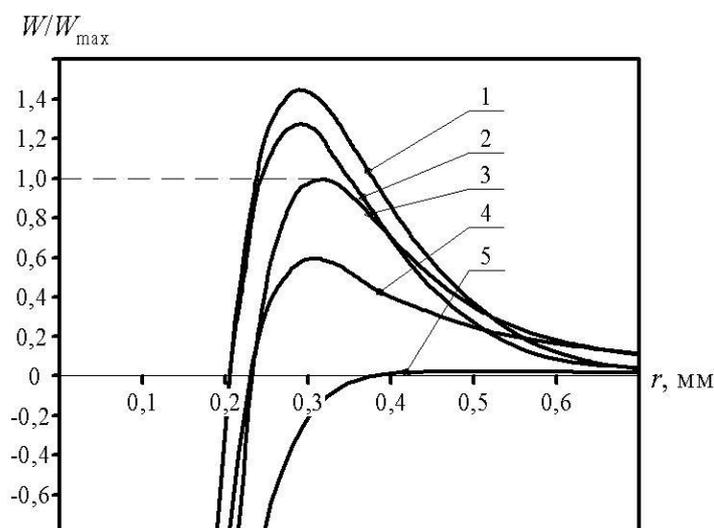


Рисунок 2.18 – Влияние остаточных напряжений в контртеле на распределение нормальных перемещений в наплыве:

$$1 - \sigma^{\text{ост}} = -0,95\sigma_T; 2 - \sigma^{\text{ост}} = -0,475\sigma_T; 3 - \sigma^{\text{ост}} = 0;$$

$$4 - \sigma^{\text{ост}} = +0,475\sigma_T; 5 - \sigma^{\text{ост}} = +0,95\sigma_T$$

С целью количественного представления зависимости перемещения W от величины остаточных напряжений использовано относительное изменение $\Delta W/W_{\text{max}} = (W - W_{\text{max}})/W_{\text{max}}$, выражение в котором показана взаимосвязь и остаточных напряжений и изменений перемещений независимо от свойств материала детали (рисунок 2.19). Зависимость относительного изменения перемещения от величины остаточных напряжений имеет вид

$$\frac{\Delta W}{W_{\text{max}}} = 1 - e^{\frac{9\sigma^{\text{ост}}}{7\sigma_T}} \quad (2.17)$$

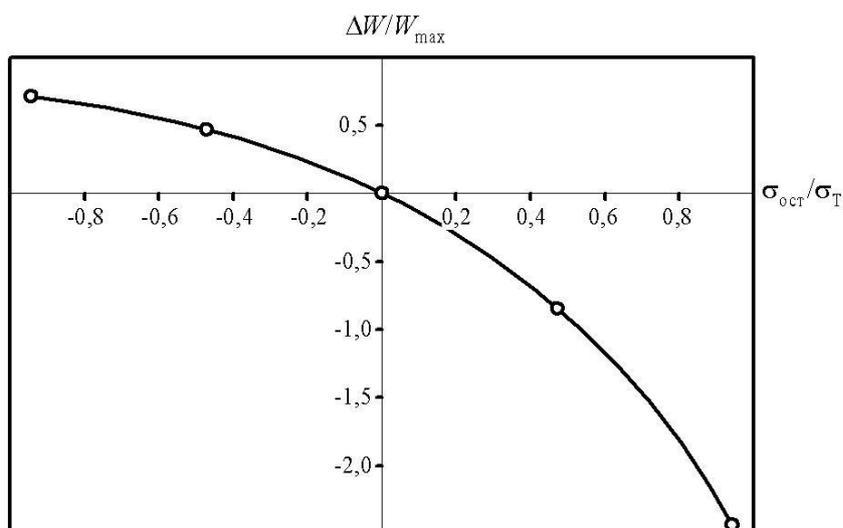


Рисунок 2.19 – Зависимость разности перемещений ΔW от остаточных напряжений в детали

Для наглядной иллюстрации влияния остаточных напряжений на рисунке 2.20 показан один из вариантов поверхности наплыва для случая действия остаточных напряжений разного знака.

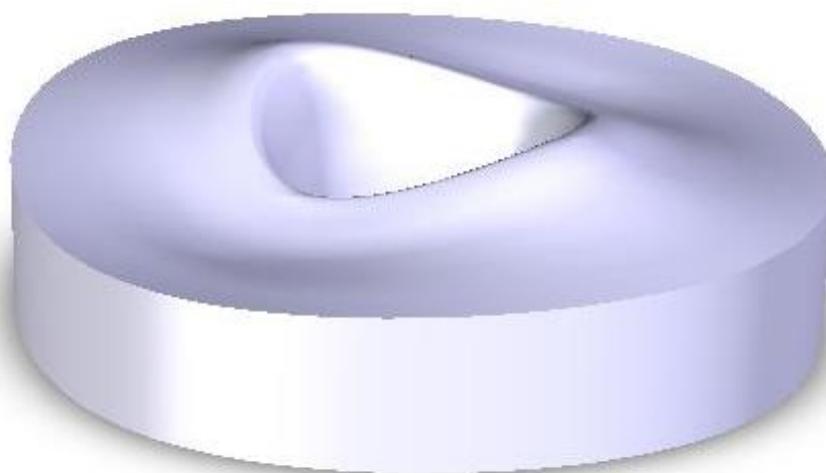


Рисунок 2.20 – Образование «седла» в наплыве отпечатка при действии сжимающих и растягивающих остаточных напряжений

На рисунке 2.21 представлены расчетные распределения нормальных перемещений в линиях уровня для пяти вариантов действующих одноосных остаточных напряжений.

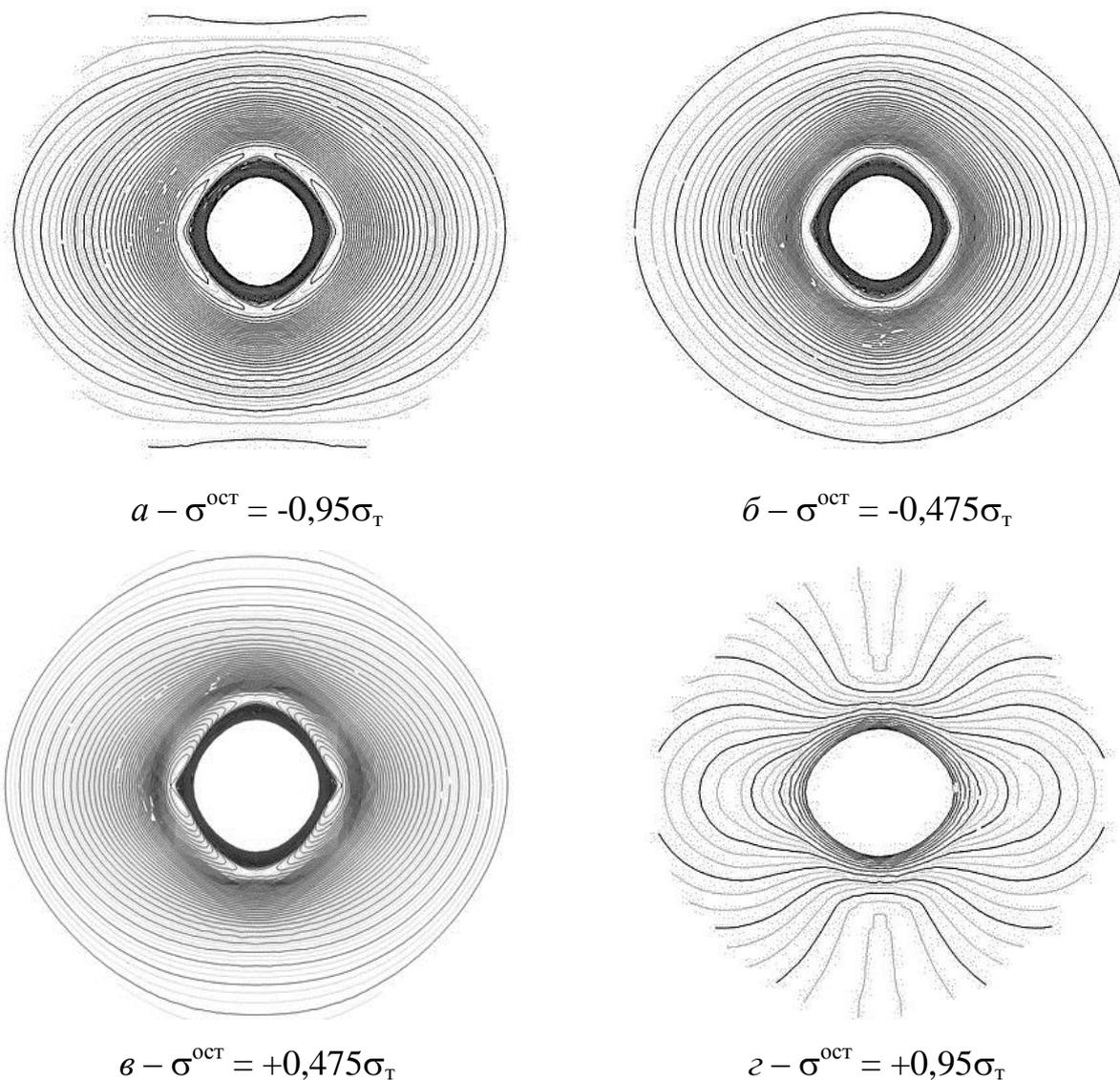


Рисунок 2.21 – Линии уровня нормальных перемещений вокруг отпечатка для различных остаточных напряжений.

Анализируя закономерности распределения нормальных перемещений и уравнение (2.17), можно заключить, что относительное изменение величины перемещения на неизменном расстоянии от центра отпечатка обусловлено только остаточными напряжениями. Уравнение учитывает все возможные варианты – различные диаметры отпечатков (посредством перемещения W_{\max}), величины и знаки остаточных напряжений. Перемещения W_{\max} , в свою очередь, зависят от механических свойств материала (посредством коэффициента W_{0d} диаграммы вдавливания). Поэтому уравнение (2.17) можно считать общим для всего диапазона рассмотренных материалов. Погрешность получения данных с

использованием уравнения (2.17) относительно расчетных данных не превышает по абсолютному значению 10%.

2.5 Выводы

1. Теоретически доказана возможность применения упругопластического вдавливания конического индентора для определения остаточных напряжений в восстановленных деталях машин.

2. Распределение нормальных перемещений в окрестностях отпечатка конического индентора характеризует набор геометрических параметров – диаметр отпечатка, величина максимального нормального перемещения (высота наплыва), радиус положения точек с максимальными перемещениями (радиус наплыва).

3. Геометрические параметры наплыва вокруг отпечатка конического индентора зависят от усилия вдавливания и механических свойств материала детали.

4. Математическая модель (выражения (2.9), (2.10) и (2.11)) описывает закономерности изменения диаметра отпечатка индентора в зависимости от параметров нагружения индентора и механических свойств материала контртела. Уравнения математической модели позволяют определять диаметр отпечатка с использованием информации о механических свойствах материала и усилия воздействия на индентор с не превышающей 2% погрешностью.

5. Математическая модель (выражения (2.14), (2.15) и (2.16)) описывает закономерности изменения геометрических параметров наплыва вокруг отпечатка индентора в зависимости от параметров нагружения индентора и механических свойств материала контртела. Уравнения математической модели позволяют определить максимальное перемещение в наплыве (высоту наплыва) с использованием информации о механических свойствах материала и усилия воздействия на индентор с не превышающей 3% погрешностью.

6. Остаточные напряжения в детали вызывают качественные и количественные изменения в распределении перемещений в наплыве вокруг отпечатка, происходящие на базе распределения перемещений для ненапряженной детали. В соответствии с выражением (2.17) остаточные напряжения имеют связь с относительными изменениями перемещений в точках на расстоянии радиуса наплыва для ненапряженного материала.

3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ВОКРУГ ОТПЕЧАТКА КОНИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА И ИХ ВЗАИМОСВЯЗИ С ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

Механический метод измерения остаточных напряжений включает в себя способ воздействия на объект и способ регистрации возмущенного деформированного состояния этого объекта или его части. Способ воздействия представляет собой такой вид воздействия на объект, при котором происходит перераспределение остаточных напряжений, вызывающее появление деформаций всего объекта или его части. Способ регистрации обеспечивает измерение и обработку реакции объекта на воздействие. Вид и варианты обработки получаемой информации определяют выбор способа регистрации.

Вдавливание конического индентора представляет собой локальное точечное воздействие на поверхность объекта. Область возмущенного деформированного состояния поверхности имеет существенно малые размеры, незначительно превышающие площадь зоны воздействия. На поверхности создается отпечаток инструмента диаметром $d = 0,4 \dots 1,0$ мм, размер возмущенной зоны $3 \dots 5d$. При этом в зоне выпучивания поверхности вокруг отпечатка возникают значительные градиенты изменения нормальных перемещений. В связи с этим, в рассматриваемой задаче наиболее целесообразно применение оптических методов измерения, обладающих высокой чувствительностью к измеряемым величинам и позволяющих получать информацию в виде распределений измеряемых величин [7, 23, 35-36, 209, 214, 228]. Из числа оптических методов в настоящее время наиболее интенсивно развивается и применяется в задачах исследования деформированного состояния метод электронной спекл-интерферометрии (ЭСИ).

3.1 Принципиальные основы электронной спекл-интерферометрии

Спекл-интерферометрия – это метод измерения перемещений поверхности объекта, использующий интерференцию спекл-структур оптических полей. Спекл-структура (англ. speckle – пятно) – это случайная интерференционная картина, возникающая при освещении поверхности объекта излучением от когерентного источника и представляющая собой пространственное распределение интенсивности света. Спекл-структура однозначно связана с конкретной поверхностью объекта, а деформирование этой поверхности вызывает изменения в спекл-структуре. Эффект интерференции опорной волны и спекл-структуры позволяет определять перемещения точек данной поверхности. [29].

Особенность ЭСИ состоит в регистрации спекл-структур с использованием цифровой камеры и их обработке в цифровой форме. Применение цифровых технологий в спекл-интерферометрии создает условия для более удобной обработки информации, предоставляет возможность регулировок и автоматизирования всего процесса при создании и обработке интерферограмм. [7].

ЭСИ сочетает в себе достоинства голографической и спекл-интерферометрии – чувствительность, бесконтактность измерений, информационность – с оперативностью компьютерного ввода и обработки информации. Процесс электронной регистрации и обработки спеклограмм требует существенно меньших временных затрат, существенно снижены требования помехозащищенности оптической установки, исключается операция фотографической обработки носителя. Современный уровень развития цифровых регистрирующих систем открывает возможности для разработки высококомобильных приборов, пригодных к проведению измерений на реальных объектах в условиях эксплуатации [7, 46, 65, 88, 209, 232].

Принципиальная схема ЭСИ (рисунок 3.1) включает в себя оптическую и электронную части. Оптическую часть образует спекл-интерферометр с электронной регистрацией цифровой камерой. В оптической части генерируется спеклограмма – поле спекл-структуры, связанное с поверхностью объекта. Электрон-

ную часть образует компьютер с программным обеспечением, выполняющий генерирование интерференционных полос и их анализ [65, 170].

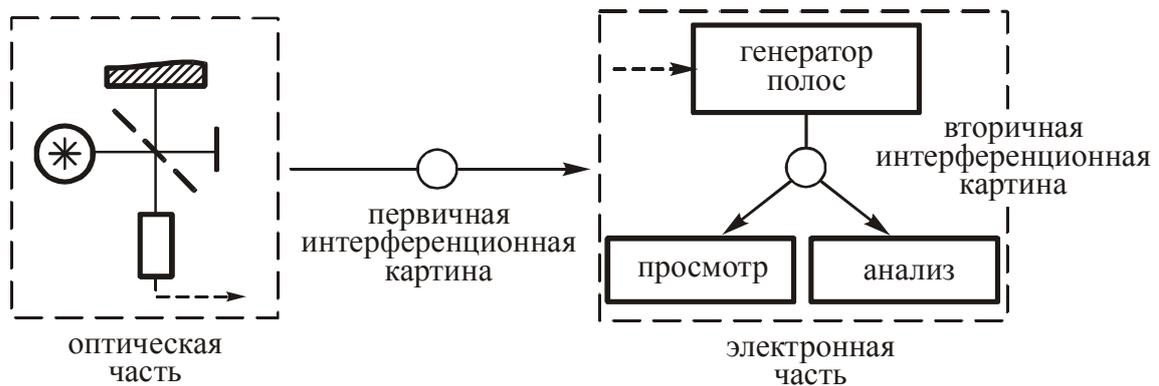


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема ЭСИ

Технология регистрации данных методом ЭСИ включает 1) запись двух первичных спеклограмм до и после деформирования поверхности объекта, 2) обработку первичных спеклограмм, 3) получение распределения интерференционных полос путем сравнения первичных спеклограмм, 4) заключительную обработку распределения интерференционных полос. В качестве регистрирующей среды используются цифровые камеры с ПЗС-матрицей, обеспечивающей разрешающую способность более 50 лин/мм. Наиболее часто в ЭСИ при определении нормальных перемещений используется схема интерферометра Майкельсона (рисунок 3.2) [64, 209, 230].

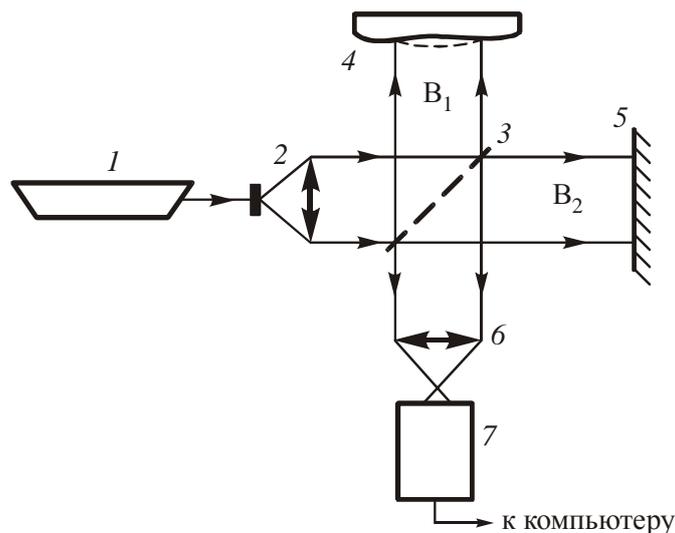


Рисунок 3.2 – Оптическая схема электронного спекл-интерферометра:
 1 – лазер; 2 – коллиматор; 3 – делитель (полупрозрачное зеркало);
 4 – объект, 5 – зеркало; 6 – объектив; 7 – цифровой фотодетектор
 (регистрирующая среда)

Излучение от лазера 1 проходит через коллиматор 2, создающий плоский волновой фронт. Делитель 3 распределяет излучение по ветвям интерферометра; ветвь В₁ - это объектный волновой фронт, ветвь В₂ – опорный волновой фронт [29]. После отражения от поверхности объекта 4 и зеркала 5 волновые фронты совмещаются на фотодетекторе 7. Объектив 6 используется для фокусировки изображения поверхности объекта в плоскости фотодетектора.

При помощи сложения когерентного фона и спекл-поля, отраженного от диффузной поверхности объекта, определяют нормальные перемещения. Результирующая интенсивность при совпадении направлений опорного и объектного волновых фронтов в точке изображения до деформации будет [29, 165, 192]

$$I_1 = I_s + I_o + 2\sqrt{I_s I_o} \cos(\varphi_o - \varphi_s), \quad (3.1)$$

где I_s, I_o – интенсивность спекл-поля и когерентного фона в точке наблюдения, φ_s, φ_o – фаза спекл-поля и когерентного фона в точке наблюдения.

Изменения фазы спекл-поля при деформации объекта обуславливает изменение интенсивности в точке:

$$I_2 = I_s + I_o + 2\sqrt{I_s I_o} \cos(\varphi_o - \varphi_s + \Delta\varphi), \quad (3.2)$$

где $\Delta\varphi$ – дополнительная разность фаз, вызванная деформацией.

При вычитании сигналов, которые соответствуют состояниям объекта до и после деформации, образуются полосы корреляции:

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 &= 2\sqrt{I_s I_o} |\cos(\varphi_o - \varphi_s) - \cos(\varphi_o - \varphi_s + \Delta\varphi)| = \\ &= 4\sqrt{I_s I_o} |\sin[(\varphi_o - \varphi_s) + \Delta\varphi/2] \sin(\Delta\varphi/2)|. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Компонента $\sin[(\varphi_o - \varphi_s) + \Delta\varphi/2]$ описывает высокочастотный спекл-шум, а $\sin(\Delta\varphi/2)$ модулирует спекл-структуру.

Связь между вектором смещения $\bar{g} = (U, V, W)$ и разностью фаз $\Delta\varphi$ в общем случае имеет вид

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (\bar{k}_o - \bar{k}_H) \cdot \bar{g}, \quad (3.4)$$

где λ – длина волны излучения, k_o, k_H – направления векторов освещения и наблюдения объекта.

Если векторы освещения и наблюдения направлены по нормали к поверхности, то

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}W, \quad (3.5)$$

т.е. разность фаз $\Delta\varphi$ зависит только от нормальной компоненты вектора перемещения W .

Через наблюдаемую точку на интерферограмме проходит темная полоса, если максимальна, т.е. разность фаз кратна $2N\pi$. Светлая полоса наблюдается при разности фаз $(2N+1)\pi$, когда корреляция интенсивностей становится равна нулю. Яркость спекла меняется в $2N$ раз, в ходе перемещения точки поверхности по нормали на величину W

$$N = \frac{2W}{\lambda}. \quad (3.6)$$

Таким образом, при сравнении двух первичных интерференционных картин, записанных до и после деформирования поверхности объекта, полосы на результирующей интерференционной картине интерпретируются как полосы равных нормальных перемещений. Перемещение в произвольной точке поверхности можно найти, используя выражение

$$W = \frac{N\lambda}{2}, \quad (3.7)$$

где λ – длина волны излучения, N – номер интерференционной полосы, которая проходит через рассматриваемую точку поверхности.

3.2 Оптико-электронная установка для измерения нормальных перемещений поверхности с использованием электронной спекл-интерферометрии

При определении нормальных перемещений поверхности с использованием ЭСИ использована лабораторная измерительная оптико-электронная установка [45, 79]. Принципиальная схема установки показана на рисунке 3.3.

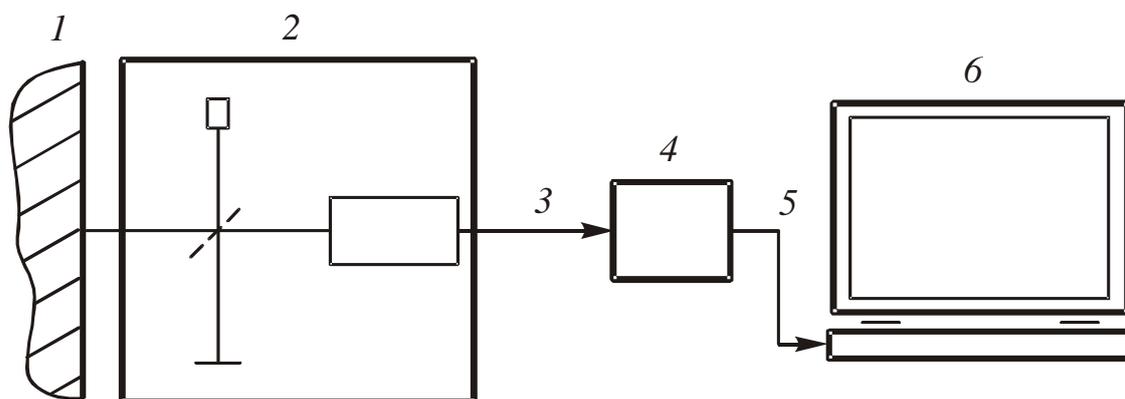


Рисунок 3.3 – Схема установки для измерения нормальных перемещений на основе ЭСИ:

1 – исследуемая деталь; 2 – блок интерферометра; 3, 5 – интерфейсные кабели; 4 – устройство захвата изображения; 6 – персональный компьютер

На жестком основании, которое обеспечивает виброизоляцию и исключает взаимные смещения, располагается исследуемая деталь 1 и блок интерферометра 2. Интерфейсный кабель 3 соединяет блок интерферометра с устройством захвата изображения 4. Интерфейсным кабелем 5 устройство захвата 4 подключено к компьютеру 6.

Общий вид установки показан на рисунке 3.4. Элементы установки смонтированы на стандартном голографическом оборудовании УИГ-22К.

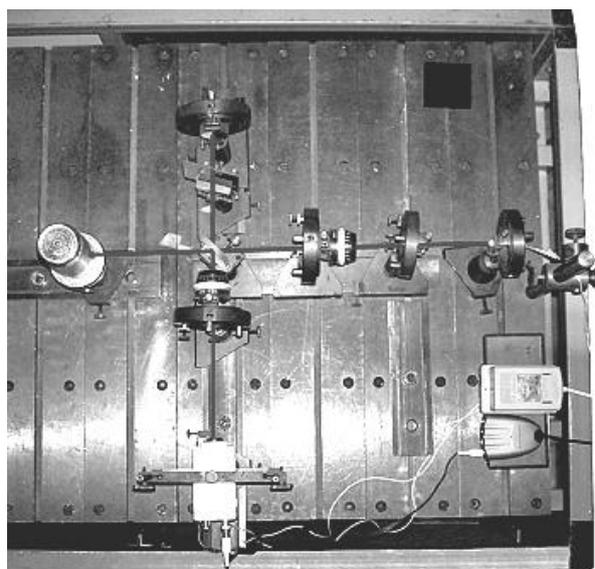
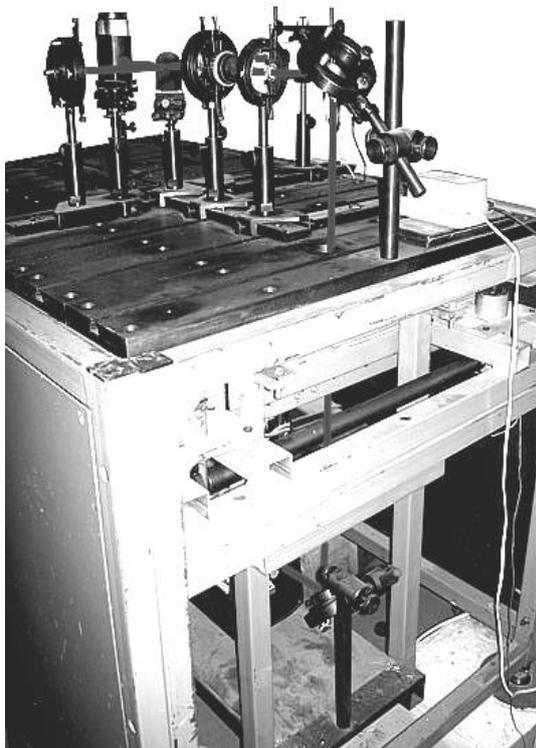


Рисунок 3.4 – Оптико-электронная установка для измерения нормальных перемещений вокруг отпечатка

Оптическая система блока интерферометра показана на рисунке 3.5.

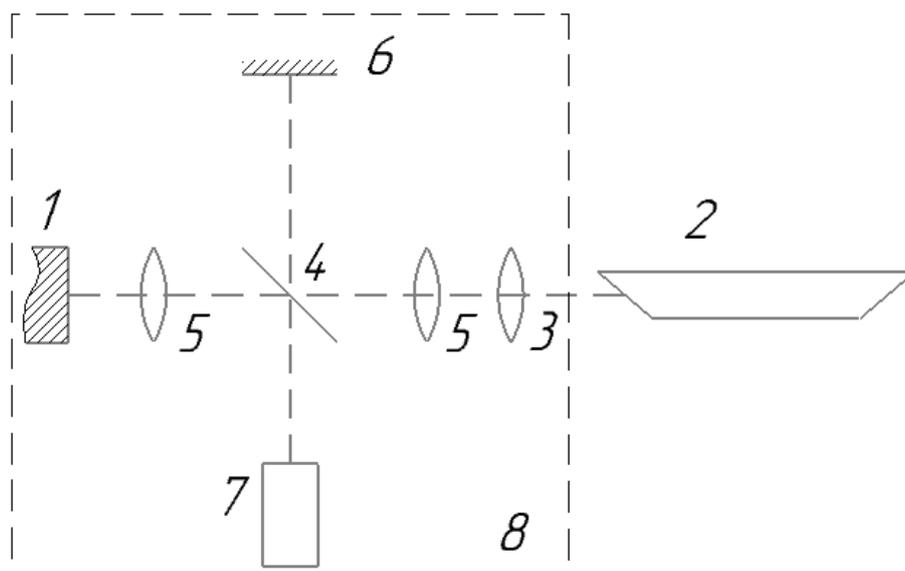


Рисунок 3.5 – Оптическая схема блока интерферометра:

1 – деталь; 2 – лазер; 3 – коллиматор;
4 – делитель (полупрозрачное зеркало); 5 – линза; 6 – зеркало;
7 – цифровой фотодетектор; 8 – основание.

Она включает источник излучения 2, оптические элементы: коллиматор 3, делитель излучения 4, зеркало 6 и объектив 5, а также видеокамеру 7.

Источником излучения служит лазерный диод с характеристиками: мощность излучения – 25 мВт, режим излучения – непрерывный, длина волны излучения $\lambda = 0,69 \cdot 10^{-3}$ мм.

Используется в качестве регистрирующей среды высокоразрешающая высокочувствительная цифровая видеокамера с характеристиками: размер светочувствительной матрицы – 1/3"; разрешение матрицы – 795×596; разрешающая способность – 600 TV линий; напряжение источника питания 12 В; габариты – 110×57×52 мм. Разрешающая способность камеры обеспечивается светочувствительной матрицей порядка 100 лин/мм.

Блок интерферометра работает следующим образом. Излучение от лазера 2 поступает на коллиматор 3, который формирует плоский волновой фронт. Делитель 4 формирует опорный и объектный волновые фронты, которые после

отражения от исследуемой поверхности детали 1 и зеркала 6 соединяются в плоскости наблюдения на матрице видеокамеры 7.

Передача сигнала видеокамеры на компьютер осуществляется с помощью устройства Dazzle DVC 90, которое выполняет в реальном времени передачу на компьютер через USB порт и оцифровку аналогового сигнала с видеокамеры. Работу устройства поддерживает программное обеспечение Pinnacle Studio V.9, с помощью которого осуществляется захват кадра с разрешением 795×596 пикселей. Захваченные кадры записываются на жесткий диск компьютера.

Оптическая схема установки обеспечивает регистрацию распределений нормальных перемещений на локальном участке поверхности образца, размеры которого соразмерны диаметру отпечатка - 4,5×3,5 мм. На монитора компьютера при разрешении 1024×768 пикселей эта зона отображается с 50-кратным увеличением. Такой коэффициент масштабирования позволяет увеличить точность определения местоположения интерференционных полос и диаметра отпечатка до 0,01 мм.

3.3 Методика регистрации нормальных перемещений поверхности с использованием оптико-электронной установки

Методика регистрации информации с использованием оптико-электронной установки включает следующий набор действий [54, 64]:

- 1) подготовка поверхности детали, размещение детали в блоке интерферометра, настройка интерферометра;
- 2) регистрация первой интерференционной картины (первая экспозиция);
- 3) вдавливание конического индентора;
- 4) регистрация второй интерференционной картины (вторая экспозиция).

При подготовке поверхности рабочей области детали к измерениям выполняется ее зачистка до металлического блеска с использованием абразивного инструмента. Цель такой подготовки – повышение отражающей способности исследуемого участка поверхности детали.

Деталь помещается в узел крепления, который представляет собой трехшаровую опору. Опора сконструирована так, чтобы была возможность извлечения детали из оптической системы между измерениями с целью вдавливания индентора и вернуть ее на место с высокой точностью.

При настройке интерферометра обеспечивается фокусировка изображения в плоскости детектора и равномерность освещения исследуемой области поверхности детали.

При регистрации первой интерференционной картины записывается рассеянное исследуемой зоной детали световое поле, которое соответствует начальному состоянию поверхности (до вдавливания).

Для вдавливания конического индентора деталь извлекается из оптической системы, а затем возвращается на прежнее место.

При регистрации второй интерференционной картины записывается рассеянное исследуемой зоной детали световое поле, которое соответствует деформированному состоянию поверхности (после вдавливания).

Захват и передача компьютеру изображения исследуемой области поверхности происходит в режиме реального времени, поэтому процедура регистрации интерференционных картин состоит в захвате и сохранении кадра. В результате на жестком диске компьютера записаны два изображения, соответствующие состояниям участка поверхности детали до и после вдавливания индентора.

3.4 Методика создания отпечатка конического индентора

Для создания отпечатка в исследуемой зоне поверхности детали применяется стандартный конический индентор с углом в вершине 120° , используемый при измерении твердости по Роквеллу [37]. Усилие вдавливания индентора используем такое, при котором диаметр отпечатка находится в диапазоне 0,4...0,9 мм.

Для вдавливания индентора используется стандартный твердомер типа ТШ. Для задания требуемого усилия вдавливания используются тарированные грузы,

входящие в комплект твердомера.

Цикл вдавливания включает три стадии: возрастание нагрузки до требуемой, выдержка и снятие, что обеспечивает условия квазистатического нагружения. Направление усилия вдавливания индентора должно быть строго перпендикулярным к поверхности детали.

3.5 Методика получения распределения нормальных перемещений

Процесс получения исходных данных – распределения нормальных перемещений поверхности в виде картины интерференционных полос, являющихся линиями уровня перемещений, – реализуется с применением программного обеспечения, которое предназначено для обработки растровой графики [54, 64].

Для получения системы интерференционных полос нормальных перемещений 1) совмещают изображения, записанные при первой и второй экспозициях; 2) вычисляют различие изображений; 3) обрабатывают полученное разностное изображение, используя процедуры снижения шума, повышения контрастности и др.

На первом этапе выполняется операция наложения кадров послойно друг на друга, при этом кадры должны иметь идентичные геометрические размеры и быть исполнены в одинаковой цветовой дискретизации. В результате создается новое изображение, состоящее из двух слоев, которые соединены друг с другом по принципу «пиксель в пиксель».

Второй этап заключается в получении разностной картины из созданного изображения. В совпадающих пикселях определяется различие кодов цветов, что формирует цифровую интерферограмму. На картине появляется темная полоса в местах максимальной корреляции интенсивностей, где разностный сигнал равен нулю и остался неизменным контраст спеклов между двумя экспозициями. Участки с измененным контрастом спеклов проявятся в виде светлых полос.

Третий этап имеет цель повышения качества разностной картины, что обеспечивает удобство ее последующей обработки.

На рисунке 3.6 приведен пример получения интерференционной картины распределения нормальных перемещений при вдавливании конического индентора в поверхность детали [232].

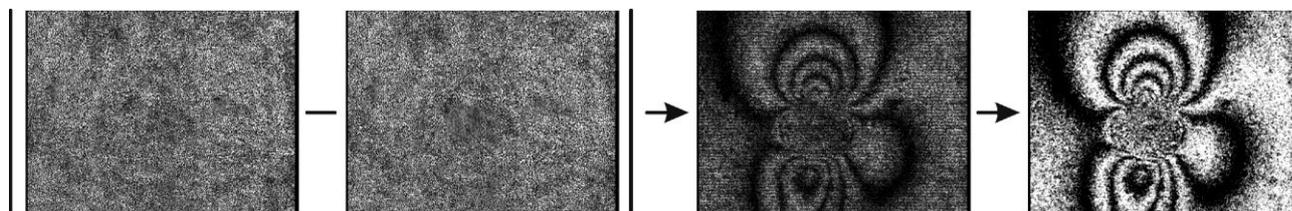


Рисунок 3.6 – Формирование и обработка интерференционной картины при регистрации нормальных перемещений с использованием оптико-электронной установки

Полосы на интерферограмме являются линиями равных нормальных перемещений поверхности. Цена полосы при расшифровке интерферограммы равна половине длины волны используемого лазера, т.е. $0,345 \cdot 10^{-3}$ мм.

3.6 Методика обработки экспериментальных данных

Для определения остаточных напряжений в соответствии с математической моделью, представленной в главе 2, используются два вида экспериментальной информации: диаметр отпечатка и нормальные перемещения в наплыве.

На рисунке 3.7 изображены примеры регистрируемой информации.

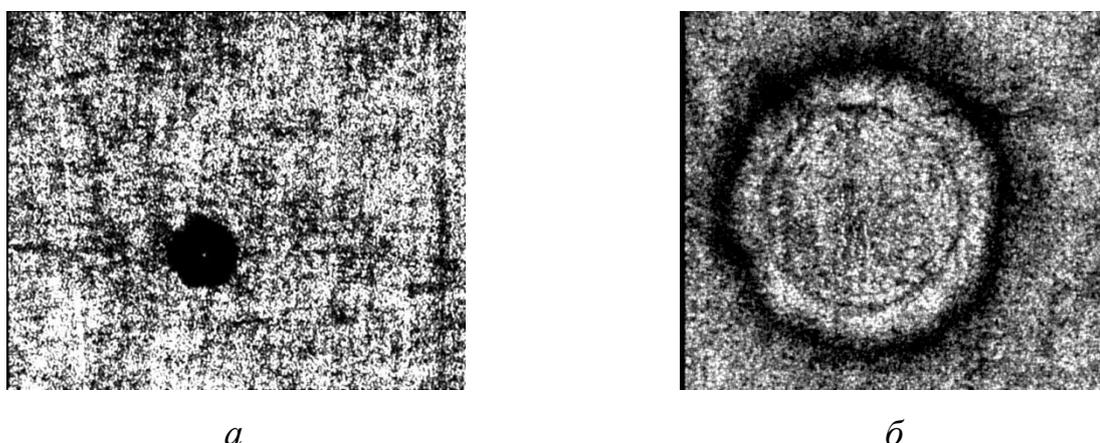


Рисунок 3.7 – Виды регистрируемой информации:
a – отпечаток индентора, *б* – интерферограмма нормальных перемещений

3.6.1 Измерение диаметра отпечатка

Для измерения диаметра отпечатка можно использовать микроскоп МПБ, входящий в комплект прибора для измерения твердости. Микроскоп обеспечивает проведение измерений при 20-кратном увеличении с точностью до 0,05 мм.

Более предпочтительным для повышения точности является измерение диаметра отпечатка фотографическим способом. Для этого с использованием оптической системы измерительной установки получают цифровое фотографическое изображение отпечатка при освещении поверхности образца белым светом (рисунок 3.7, а). Диаметр отпечатка измеряют по его изображению на мониторе компьютера. Точность измерения с учетом масштаба изображения ($\times 50$) составляет 0,01 мм.

Методика измерения диаметра по этому способу:

- вместо лазера в оптической системе интерферометра размещается источник белого света;
- перекрывается опорная ветвь;
- изображение исследуемой области поверхности записывается и наблюдается на экране монитора компьютера;
- измеряется диаметр отпечатка с учетом масштаба изображения.

При освещении поверхности белым светом на изображении отсутствует спекл-шум. За счет этого более точно определяют границы отпечатка и, следовательно, повышается точности измерения диаметра отпечатка.

При вдавливании индентора в плоскую или квазиплоскую поверхность детали проекция отпечатка имеет форму окружности. Диаметр отпечатка измеряется по двум произвольно выбранным ортогональным осям, а полученные данные усредняются. При вдавливании в деталь с цилиндрической поверхностью отпечаток имеет форму эллипса. В этом случае определяют условный диаметр отпечатка [42]

$$d_{\text{усл}} = \sqrt{d_x \cdot d_y}, \quad (3.8)$$

где d_x и d_y – измеренные диаметры отпечатка на главных осях эллипса.

3.6.2 Определение нормальных перемещений

Второй блок получаемых экспериментальных данных представляют собой распределение интерференционных полос нормальных перемещений (рисунок 3.7, б). Обработка данных заключается в вычислении нормальных перемещений в определенных точках на выбранных осях распределения интерференционных полос.

Для этого:

1) фиксируют направления осей симметрии распределения интерференционных полос;

2) определяют положение контрольных точек – на осях симметрии на расстоянии 1,33 радиуса от центра отпечатка;

3) определяют номера полос, проходящих через контрольные точки, учитывая их знак. Для этого последовательно нумеруют светлые полосы от периферии наплыва к центру, имея в виду, что там располагается полоса нулевого порядка;

4) вычисляют средние значения числа полос, в контрольных точках, лежащих на оси симметрии на противоположных сторонах отпечатка;

5) по уравнению (3.7) вычисляют средние значения нормальных перемещений для каждой их осей симметрии интерференционной картины.

3.6.3 Статистическая обработка результатов

Статистическая обработка наборов экспериментальных данных проводилась согласно требованиям математических методов обработки наблюдений [108, 138, 166].

Наиболее вероятное значение из набора дискретных случайных величин при равноточных измерениях находили, как среднее арифметическое:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^n y_k}{n}, \quad (3.9)$$

где y_k – значение случайной величины при k -м измерении, n – число измерений.

Оценка разброса значений выполнялась с использованием среднего квадратичного отклонения

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2}{n-1}}. \quad (3.10)$$

Уточнение выборки проводилось с определением ошибки отдельных измерений

$$\varepsilon_k = y_k - \bar{y} \quad (3.11)$$

и использованием правила 3σ .

При постановке экспериментов с целью получения функций отклика $y = f(x)$, где x – независимая переменная, применялся математический аппарат регрессионного анализа. Для описания результатов измерений использовали наиболее близко подходящие элементарные функции – линейную, логарифмическую, степенную. При определении коэффициентов регрессии применяли метод наименьших квадратов [138, 166].

Степень точности уравнений регрессии оценивали с помощью коэффициента ковариации

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}, \quad (3.12)$$

где \hat{y}_k – величина отклика, предсказанная регрессионным уравнением.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ВОКРУГ ОТПЕЧАТКА КОНИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА И ИХ ВЗАИМОСВЯЗИ С ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

4.1 Программа исследований

В соответствии с результатами численного анализа задачи о вдавливании конического индентора в поверхность контртела распределение нормальных перемещений вокруг отпечатка можно описать следующими геометрическими параметрами:

- диаметром отпечатка;
- высотой наплыва, т.е. величиной максимальных перемещений W_{\max} ;
- радиусом наплыва, т.е. координатой от оси контакта до точки, определяющей высоту наплыва.

Факторы, оказывающие влияние на распределение перемещений в наплыве:

- усилие вдавливания индентора;
- механические свойства материала контртела;
- остаточные напряжения в поверхностном слое контртела.

Целью экспериментального исследования является проверка основных положений математических моделей.

Задачи экспериментального исследования:

- 1) подтверждение качественных и количественных закономерностей распределения перемещений в окрестности отпечатка конического индентора;
- 2) подтверждение закономерностей влияния на распределение перемещений наплыве усилия воздействия на индентор и механических свойств материала контртела;
- 3) подтверждение закономерностей влияния на распределение перемещений наплыве остаточных напряжений в поверхностном слое контртела.

Программа исследования представлена на рисунке 4.1.

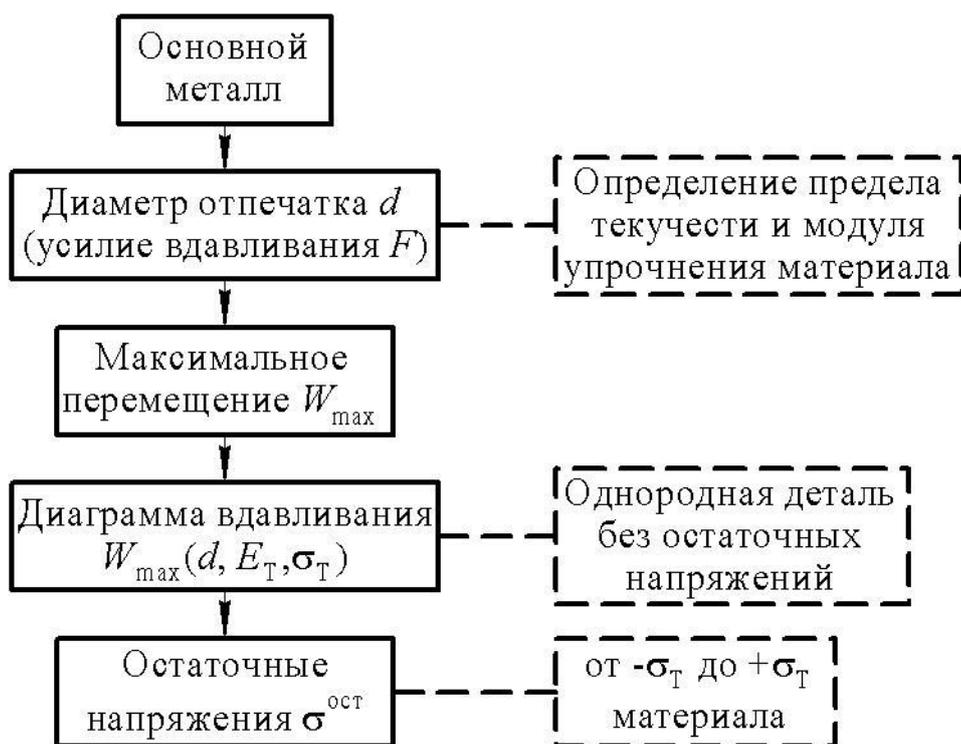


Рисунок 4.1 – Программа исследований

Первая часть исследования нацелена на изучение влияния усилия воздействия на конический индентор и механических свойств материала контртела на диаметр отпечатка, распределение перемещений и максимальное перемещение в наплыве вокруг отпечатка для детали без остаточных напряжений. Во второй части, основываясь на результатах первой, исследуется влияние остаточных напряжений на распределение перемещений в наплыве вокруг отпечатка. Задачи решались в порядке их следования с учетом требований идентичности методики исследований [53, 54].

Экспериментальные исследования проведены на плоских образцах из разных марок сталей: 40Х, 45, 30ХГСА, 12Х18Н10Т. Приведем результаты исследований на примере стали 40Х.

4.2 Влияние усилия вдавливания индентора и свойств материала на диаметр отпечатка

Согласно регрессионной модели, которая представлена выражениями (2.8) - (2.10), погрешность взаимосвязи усилия вдавливания F и диаметра отпечатка d не

превышает 2% и описывается зависимостью

$$d(F) = d_{0F} \cdot \left(\frac{F}{F_0} \right)^{0,4}, \quad (4.1)$$

где d_{0F} – условный диаметр отпечатка (мм), возникающий при вдавливании индентора с усилием $F_0 = 1$ Н.

Результаты экспериментального исследования влияния усилия вдавливания на диаметр отпечатка приведены в табл. 4.1 и на рис. 4.2 [54].

Таблица 4.1 – Влияние усилия вдавливания индентора на диаметр отпечатка

Усилие вдавливания F , Н	Измеренный диаметр отпечатка d , мм	Результат аппроксимации по (4.1) $d_{\text{аппр}}$, мм	Погрешность, %
250	0,44	0,46	5,3
250	0,46	0,46	1,0
250	0,42	0,46	9,6
250	0,46	0,46	1,0
588,4	0,66	0,65	0,8
588,4	0,59	0,65	9,9
588,4	0,61	0,65	6,8
588,4	0,63	0,65	3,8
838,4	0,75	0,75	0,6
838,4	0,73	0,75	3,2
838,4	0,69	0,75	8,5
1078,7	0,85	0,83	1,9
1078,7	0,84	0,83	0,7
1078,7	0,84	0,83	0,7
1088,4	0,83	0,84	0,9
1088,4	0,83	0,84	0,9
1088,4	0,83	0,84	0,9
1471,3	0,97	0,94	2,7
1471,3	0,99	0,94	4,8
1471,3	1	0,94	5,9
1471,3	0,99	0,94	4,8

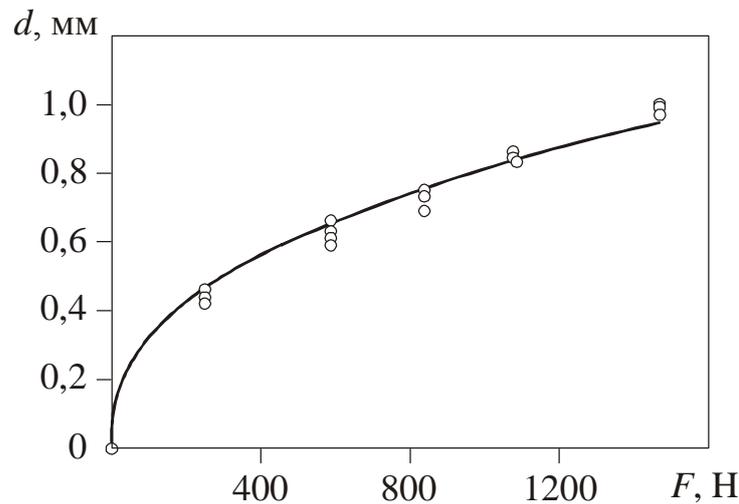


Рисунок 4.2 – Влияние усилия вдавливания индентора на диаметр отпечатка

По данным измерений получено уравнение регрессии, описывающее экспериментальные данные с коэффициентом ковариации $R^2 = 0,981$:

$$d(F) = 5,046 \cdot 10^{-2} \cdot F^{0,4}. \quad (4.2)$$

Восстановим значение коэффициента d_{0F} уравнения регрессии, используя данные о механических свойствах материала. На основании результатов расчетов, приведенных в главе 2,

$$\frac{d_{0F}}{d_{0Fy}} = \left(\frac{\sigma_{Ty}}{\sigma_T} \right)^{5/9} \cdot \left(\frac{E_{Ty}}{E_T} \right)^{1/8}, \quad (4.3)$$

где индекс «у» имеет отношение к условному материалу, у которого, согласно регрессионной модели, $\sigma_{Ty} = 1$ МПа, $E_{Ty} = 1$ МПа, $d_{0Fy} = 3,23$ мм.

В соответствии со справочными данными [101] в зависимости от состояния поставки и режима термообработки предел текучести стали 40X $\sigma_T = 245 \dots 490$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 470 \dots 655$ МПа. Модуль упрочнения, используемый в регрессионной модели, вычислен по методике, представленной в [102]: $E_T = 9600 \dots 12400$ МПа. С целью уточнения данных механические свойства материала образцов определены экспериментально с использованием методик, представленных в [103, 158]: $\sigma_T = 266 \pm 20$ МПа, $E_T = 4500 \pm 500$ МПа. Считаем, что значительное отличие величины модуля упрочнения от полученного по справочным данным связано с особенностями свойств поверхностного слоя

образца.

С учетом данных измерения механических свойств материала получено значение коэффициента $d_{0F} = 5,074 \cdot 10^{-2}$ (мм). Тогда связь между усилием вдавливания индентора и диаметром отпечатка для стали 40Х имеет вид

$$d(F) = 5,074 \cdot 10^{-2} \cdot F^{0,4}. \quad (4.4)$$

Отклонение полученной по механическим свойствам диаграммы вдавливания « $d - F$ » (4.2) от экспериментальной (4.1) составляет 6%, что позволяет заключить об адекватности математической модели, описывающей зависимость диаметра отпечатка от усилия вдавливания индентора и механических свойств материала контртела.

4.3 Влияние диаметра отпечатка на перемещения в наплыве

В соответствии с результатами теоретических исследований, изложенных в главе 2, влияние диаметра отпечатка на максимальные перемещения в наплыве (высоту наплыва) описывается зависимостью вида

$$W_{\max}(d) = W_{0d} \cdot \left(\frac{d}{d_0} \right)^{n_w}, \quad (4.5)$$

где W_{0d} – условное максимальное перемещение (мм), возникающее при создании отпечатка диаметром $d_0 = 1$ мм.

Величина условного перемещения W_{0d} зависит от механических свойств материала контртела в относительном

$$\frac{W_{0d2}}{W_{0d1}} = \frac{\sigma_{T2}}{\sigma_{T1}} \cdot \left(\frac{E_{T1}}{E_{T2}} \right)^{3/2}, \quad (R^2 = 0,983) \quad (4.6)$$

и абсолютном виде

$$W_{0d} = 4,75 \frac{\sigma_T}{E_T^{3/2}}, \quad (R^2 = 0,994), \quad (4.7)$$

а показатель степени $n_w = 1$.

Используя данные о механических свойствах стали 40Х (предел текучести

σ_T и модуль упругости E_T) условное перемещений $W_{0d} = 5,37 \cdot 10^{-3}$ мм, сама зависимость между максимальным перемещением и диаметром отпечатка имеет вид [54]

$$W_{\max}(d) = 5,37 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d}{d_0}. \quad (4.8)$$

Экспериментальные исследования показывают, что при вдавливании конического индентора значительную часть поверхности напльва охватывает зона пластических деформаций (см. рис. 3.7, б), радиус которой, по данным расчетов [148], составляет 2...2,5 радиуса отпечатка (рисунок 4.3). Максимальное перемещение в напльве наблюдается внутри этой зоны, поэтому при определении максимального перемещения по интерферограмме нормальных перемещений возникают затруднения, связанные с визуализацией интерференционных полос. В связи с этим разработана частная методика определения величины максимального перемещения с использованием данных о перемещениях на периферии напльва в пределах зоны упругих деформаций [54]. Суть методики иллюстрирует рисунок 4.4.

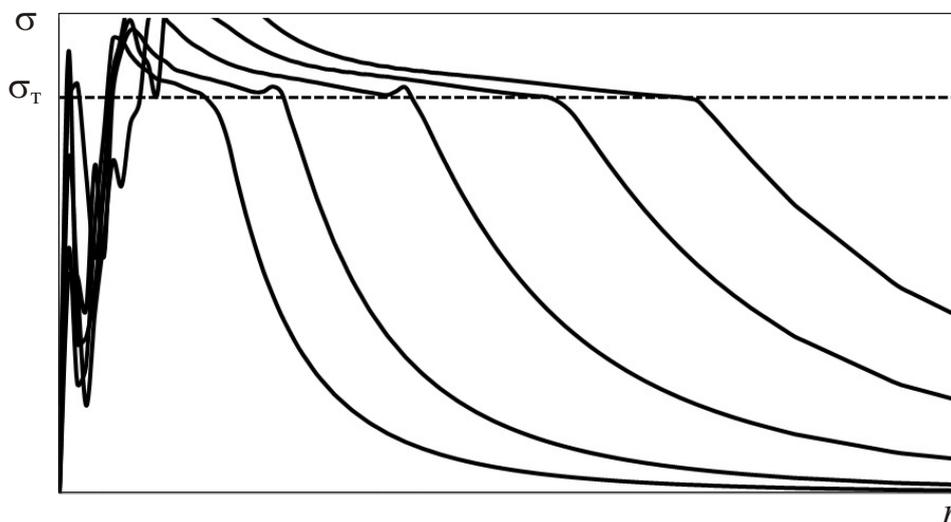


Рисунок 4.3 – Влияние усилия вдавливания индентора на распределение эквивалентных напряжений на поверхности контртела

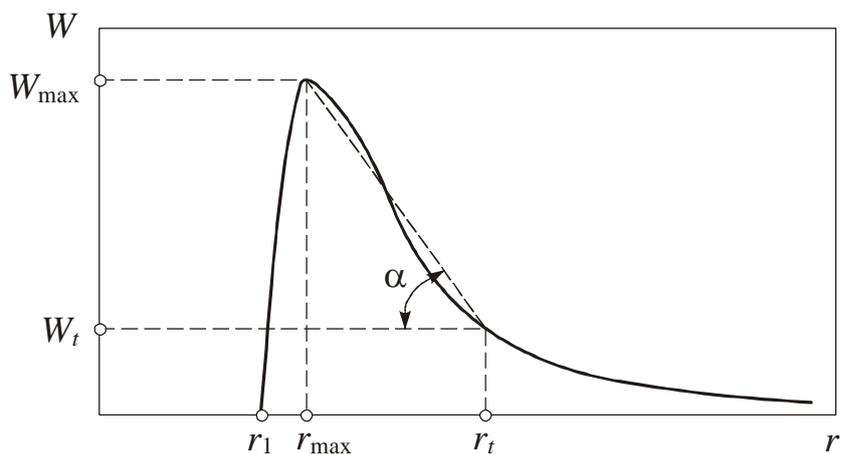


Рисунок 4.4 – Схема определения высоты наплыва

На распределении интерференционных полос фиксируется координата (радиус) границы зоны пластических деформаций r_t и определяется величина нормального перемещения W_t на этой координате. Принимается, что этой границе соответствует последняя видимая полоса, следуя от периферии наплыва к центру отпечатка. С использованием линейной аппроксимации профиля наплыва в ниспадающей ветви угол наклона α на рисунке 4 определяется как

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{W_{\max} - W_t}{r_t - r_{\max}}. \quad (4.9)$$

Таким образом, для определения величины максимального перемещения W_{\max} необходимо дополнительно определить радиус наплыва r_{\max} и угол α . Согласно данным работы [148] и по результатам дополнительных расчетов методом конечных элементов с использованием описанной в главе 2 модели для всех рассмотренных материалов (сочетаний σ_T и E_T) радиус наплыва зависит только от радиуса отпечатка r_1 :

$$r_{\max} = 1,33r_1. \quad (4.10)$$

Как показали расчеты [54, 144], угол наклона α не зависит от усилия вдавливания индентора, но на его величину влияют механические свойства материала контртела. В таблице 4.2 приведены результаты определения $\operatorname{tg}\alpha$.

Таблица 4.2 – Влияние механических свойств на величину $\text{tg}\alpha$

Предел текучести σ_T , МПа	Модуль упрочнения E_T , МПа			
	5000	8000	10000	15000
250	0,0040796	0,00253	0,0018716	0,0009623
400	0,0063094	0,00383	0,00290436	0,0013185
800	0,0146295	0,00789	0,00515598	0,0022458
1000	0,0167882	0,0107	0,00705555	0,003701

Получены регрессионные уравнения, описывающие зависимость величины $\text{tg}\alpha$ от механических свойств материала контртела в относительном

$$\frac{\text{tg}\alpha_2}{\text{tg}\alpha_1} = \frac{\sigma_{T2}}{\sigma_{T1}} \cdot \left(\frac{E_{T1}}{E_{T2}} \right)^{1,4}, (R^2 = 0,973) \quad (4.11)$$

и абсолютном виде

$$\text{tg}\alpha = 2,67 \frac{\sigma_T}{E_T^{1,4}}, (R^2 = 0,983). \quad (4.12)$$

Для стали 40X, исходя из данных о механических свойствах, $\text{tg}\alpha = 0,005456$.

Из выражения (4.9) следует, что величина максимального перемещения в наплыве

$$W_{\max} = (r_t - r_{\max})\text{tg}\alpha + W_t. \quad (4.13)$$

Это выражение следует использовать при обработке экспериментальных данных для определения величины максимального перемещения в наплыве.

Приведем пример применения методики. На интерферограмме, представленной на рис. 3.10,б, диаметр отпечатка $d = 0,44$ мм, радиус границы зоны пластических деформаций $r_t = 0,67$ мм, радиус наплыва $r_{\max} = 0,3$ мм, $W_t = 0,633 \cdot 10^{-3}$ мм. Используя выражение (4.13), $W_{\max} = 2,56 \cdot 10^{-3}$ мм. Для сравнения, величина максимального перемещения, полученная по выражению (4.3), составляет $W_{\max}^{\text{расч}} = 2,36 \cdot 10^{-3}$ мм.

Результаты экспериментального исследования влияния диаметра отпечатка на величину максимального перемещения в наплыве приведены в таблице 4.3 и на рисунке 4.5.

Таблица 4.3 – Влияние диаметра отпечатка на максимальное перемещение в наплыве

Диаметр отпечатка d , мм	Экспериментальное значение перемещения $W_{\max}^{\text{эксп}} \cdot 10^3$, мм	Расчетное значение перемещения $W_{\max}^{\text{расч}} \cdot 10^3$, мм	Погрешность, %
0	0	0	–
0,42	1,82	2,26	19,4
0,44	2,56	2,36	8,5
0,46	2,24	2,47	9,2
0,48	2,60	2,58	1,0
0,61	3,21	3,28	2,1
0,66	3,52	3,54	0,8
0,68	4,10	3,65	12,4
0,73	4,11	3,92	4,9
0,75	3,85	4,03	4,5
0,77	4,43	4,13	7,1
0,82	4,75	4,40	7,9
0,83	4,67	4,46	4,9
0,83	4,21	4,46	5,5
0,83	4,68	4,46	5,1
0,84	4,99	4,51	10,6
0,84	4,87	4,51	8,0
0,86	4,51	4,62	2,3
0,97	5,33	5,21	2,4
0,99	5,47	5,32	2,9
0,99	5,96	5,32	12,2
1	5,72	5,37	6,6

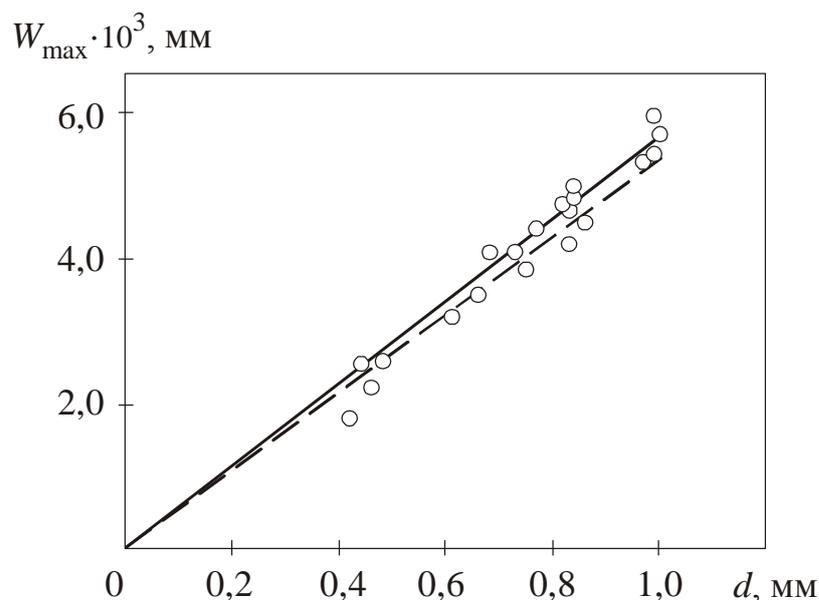


Рисунок 4.5 – Зависимость максимального перемещения в наплыве от диаметра отпечатка для стали 40X:
сплошная линия – экспериментальные данные, прерывистая линия – по выражению (4.8)

По данным экспериментальных исследований, регрессионная зависимость, описывающая влияние диаметра отпечатка на максимальное перемещение в наплыве, имеет вид

$$W_{\max}(d) = 5,65 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d}{d_0}, (R^2 = 0,965). \quad (4.14)$$

Отклонение экспериментальных значений от расчетных по выражению (4.8) в среднем составляет 7%, что позволяет заключить об адекватности математической модели, описывающей зависимость максимального перемещения в наплыве от диаметра отпечатка и механических свойств материала контртела. Качественные и количественные результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, соответствуют данным теоретического анализа.

4.4 Влияние остаточных напряжений на перемещения в наплыве

Согласно результатам численного анализа задачи, приведенным в главе 2, основные отличительные показатели влияния остаточных напряжений на

распределение нормальных перемещений в наплыве при вдавливании конического индентора следующие [53]:

- распределение перемещений изменяется в сравнении с профилем наплыва для ненапряженного материала;

- на изменения в распределении перемещений влияют величины и знаки остаточных напряжений;

- изменения в распределении перемещений однозначно количественно связаны с величинами остаточных напряжений;

- влияние компонент тензора остаточных напряжений на распределение нормальных перемещений подчиняется принципу суперпозиции.

Изменения в распределении нормальных перемещений поверхности вокруг отпечатка индентора отмечаются на фоне распределения перемещений для ненапряженного материала, которые используются в качестве опорного состояния для всех возможных новых, что доказано в ходе теоретического анализа.

Исследование влияния остаточных напряжений на распределение нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка конического индентора проводили, создавая в образцах одноосное напряженное состояние путем приложения внешней растягивающей и сжимающей нагрузки на тарированном нагружающем устройстве. Кроме того, контроль напряжений осуществляли тензометрическими датчиками.

Примеры распределений интерференционных полос показаны на рисунке 4.6. Показанные распределения получены при внедрении конуса до одинакового диаметра отпечатка для ненапряженного образца (*a*), при действии одноосного растягивающего (*б*) и одноосного сжимающего (*в*) напряжения.

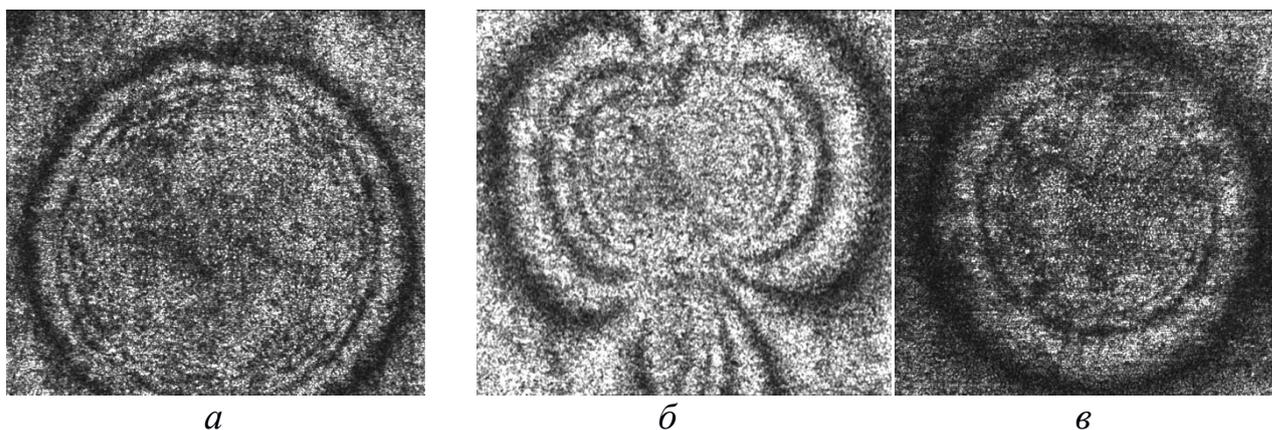


Рис.унок 4.6 – Распределение интерференционных полос при одноосном остаточном напряженном состоянии:

$$a - \sigma_x^{\text{ост}} = 0, \sigma_y^{\text{ост}} = 0; \text{ б} - \sigma_x^{\text{ост}} > 0, \sigma_y^{\text{ост}} = 0; \text{ в} - \sigma_x^{\text{ост}} < 0, \sigma_y^{\text{ост}} = 0$$

Приведенные примеры картин полос подтверждают, что под влиянием остаточных напряжений изменяется характер распределения нормальных перемещений. На распределениях полос появляются взаимно перпендикулярные оси симметрии, совпадающие с главными осями напряжений.

При восстановлении количественной связи нормальных перемещений в наплыве (высоты наплыва) с напряжениями в деталях последние задавали в пределах от $-\sigma_T$ до $+\sigma_T$ материала (σ_T – предел текучести материала). Количество измерений было достаточным для обеспечения возможности статистической обработки информации и построения корреляционных зависимостей. Сначала исследовали выпучивание вокруг отпечатка при одноосном напряженном состоянии контртела, затем при плоском напряженном состоянии.

Расшифровка распределений интерференционных полос нормальных перемещений заключалась в определении величин перемещений W_σ на осях симметрии картин на расстоянии $r_{\text{max}} = 1,33r_{\text{отп}}$ от центра отпечатка [54]. Последовательность обработки экспериментальных данных:

1) исходными данными являются величина напряжения в образце, диаметр отпечатка и величина максимального перемещения для ненапряженного материала образца [54];

2) по картине интерференционных полос нормальных перемещений на ее осях симметрии в контрольных точках определяли перемещения W_σ и определяли

средние арифметическое этих перемещений на каждой из осей (x, y) ;

3) для каждой из осей (x, y) рассчитывали долю нормального перемещения, которая связана с влиянием остаточных напряжений $\Delta W(x,y)$:

$$\Delta W^{(x,y)} = W_{\sigma}^{(x,y)} - W_{\max} ; \quad (4.15)$$

4) восстанавливали связь между долей нормального перемещения $\Delta W(x,y)$ и величиной напряжения в образце.

Экспериментальные исследования, проведенные на образцах, подтверждают установленные при теоретическом анализе задачи основные качественные закономерности влияния остаточных напряжений на распределение нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка.

1. В случае одноосного напряженного состояния основные изменения в перемещениях вокруг отпечатка наблюдаются на перпендикулярной к действующему напряжению оси.

2. При увеличении величины напряжения отмечается рост изменений в распределении перемещений.

3. При увеличении растягивающих напряжений от нуля до предела текучести материала величина перемещения W_{σ} на оси, перпендикулярной действующему напряжению, уменьшается. Перемещения W_{σ} на этой оси становятся отрицательными при напряжениях, близких к пределу текучести материала.

4. При увеличении сжимающих напряжений от нуля до предела текучести материала величина перемещения W_{σ} на оси, перпендикулярной действующему напряжению, увеличивается.

5. В случае плоского напряженного состояния на обеих осях происходят изменения в распределении нормальных перемещений. При этом, как доказано теоретическим анализом, результирующее распределение перемещений является суммой трех компонент: базового распределения перемещений, связанного с ненапряженным материалом, перемещений от действия каждого из напряжений независимо.

Следовательно, что при расшифровке распределения нормальных перемещений вокруг отпечатка конического индентора получаем следующий объем данных:

- величины главных остаточных напряжений при плоском напряженном состоянии;
- направления главных осей остаточных напряжений;
- знаки главных остаточных напряжений.

Определение знака остаточных напряжений возможно вследствие:

- а)* наличия на интерферограмме нормальных перемещений базовой компоненты, относительно которой совершаются изменения;
- б)* зависимости градиентов изменения нормальных перемещений в радиальном направлении на главных осях от знака остаточного напряжения, которая визуальна выражается в частоте интерференционных полос;
- в)* однозначной взаимосвязи между знаком остаточного напряжения и знаком нормального перемещения.

Следовательно, что наличие опорного распределения перемещений дает возможность без затруднений регистрировать направление изменений, а вследствие однозначной взаимосвязи последних со знаком напряжения, и знак остаточного напряжения.

Опытным путем, ограничивая объем испытаний одноосным напряженным состоянием, была определена количественная взаимосвязь между изменениями в распределении перемещений и остаточными напряжениями, основываясь на установленных закономерностях влияния остаточных напряжений на распределение нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка конического индентора.

Результаты экспериментальных исследований, проведенных на образцах из нескольких материалов, подтвердили результаты численных расчетов. В качестве иллюстрации на рисунке 4.7 представлено сравнение результатов эксперимента (точки, сплошная линия) и данных численных расчетов (прерывистая линия) для образца из стали Ст3.

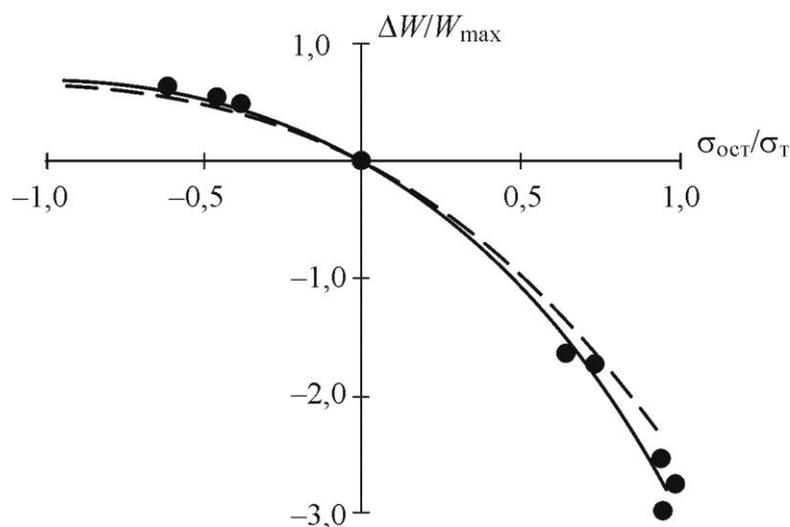


Рисунок 4.7 – Влияние остаточных напряжений на изменение величины нормального перемещения в контрольных точках

Разброс экспериментальных данных по отношению к данным численных расчетов с 95%-ной доверительной вероятностью не превышает 8%.

Экспериментальные исследования позволили подтвердить выявленные при теоретическом анализе основные аспекты влияния остаточных напряжений на нормальные перемещения в наплыве вокруг отпечатка конического индентора.

Качественным признаком наличия остаточных напряжений поверхностном слое детали является появление на распределении интерференционных полос осей симметрии, распределение нормальных перемещений приобретает седлообразную форму.

Наблюдаемые оси симметрии интерференционных полос совпадают с главными осями остаточных напряжений.

В распределении перемещений присутствуют две составляющие – несущая, образованная вытеснением материала из отпечатка, и переменная, связанная с влиянием остаточных напряжений.

Выделение из общей картины перемещений переменной составляющей показало, что изменения происходят на оси, перпендикулярной действующему напряжению, а на оси действия напряжения перемещения незначительны, по величине не превышают погрешности измерительной системы. Кроме того, знак изменений однозначно связан со знаком действующего напряжения.

Набор экспериментальных данных описывается выражением

$$\frac{\Delta W}{W_{\max}} = 1 - e^{-\frac{7\sigma^{\text{ост}}}{5\sigma_T}}, \quad (4.16)$$

полностью совпадающим с полученным при теоретическом анализе задачи.

В случае плоского напряженного состояния поверхностного слоя детали переменная составляющая поля перемещений является суперпозицией изменений от действия каждого из главных напряжений. Изменения на осях симметрии независимо связаны с компонентами действующих главных напряжений и соответствуют только им. На основании этого

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta W^{(x)}}{W_{\max}} = 1 - e^{-\frac{7\sigma_y^{\text{ост}}}{5\sigma_T}} \\ \frac{\Delta W^{(y)}}{W_{\max}} = 1 - e^{-\frac{7\sigma_x^{\text{ост}}}{5\sigma_T}} \end{array} \right. ; \quad (4.17)$$

В силу того, что величина перемещения W_{\max} зависит от усилия вдавливания, диаметра отпечатка, свойств материала, представленные выражения описывают влияние остаточных напряжений на перемещения в наплыве в обобщенном виде.

4.5 Выводы

Экспериментально подтверждены ключевые положения математической модели, полученной при теоретическом решении задачи об упругопластическом вдавливании конического индентора в поверхность контртела.

1. Доказана адекватность математической модели, описывающей связь между усилием вдавливания конического индентора и диаметром отпечатка. Зависимость диаметра отпечатка от усилия вдавливания индентора описывается выражением (4.1) с коэффициентом ковариации $R^2 = 0,98...0,99$, имеет

индивидуальный характер и учитывает механические свойства материала контртела.

2. Доказана адекватность математической модели, описывающей связь между диаметром отпечатка конического индентора и величиной максимального перемещения в наплыве. Зависимость максимального перемещения от диаметра отпечатка индентора описывается выражением (4.5) с коэффициентом ковариации $R^2 = 0,96...0,97$, имеет индивидуальный характер и учитывает механические свойства материала контртела.

3. Доказана адекватность математической модели, описывающей связь между остаточными напряжениями в детали и параметрами распределения нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка. Зависимость относительного изменения перемещений в контрольных точках распределения нормальных перемещений от величин остаточных напряжений описывается выражениями (4.17) с погрешностью, не превышающей 8% по отношению к данным численных расчетов.

4. С целью получения количественных данных при измерении остаточных напряжений в восстановленных деталях предварительно необходимо установить связь между диаметром отпечатка и величиной максимального перемещения в наплыве.

5. Взаимосвязь остаточных напряжений в поверхностном слое образца и распределения вертикальных перемещений вокруг отпечатка имеет однозначный характер. Качественно взаимосвязь обнаруживается в изменении характера распределения перемещений в наплыве, количественно – в изменении величин перемещений в контрольных точках, которые расположены на расстоянии от центра отпечатка, равном 1,33 его радиуса. Данные изменения происходят относительно перемещений, возникающих при внедрении индентора в образец свободный от остаточных напряжений.

6. При определении остаточных напряжений за одно измерение обеспечивается получение следующего объема данных: направление главных

осей, величины главных остаточных напряжений, знаки главных остаточных напряжений в поверхностном слое образца.

7. Применение упругопластического внедрения конического индентора позволяет определять остаточные напряжения в диапазоне их изменения от $-\sigma_T$ до $+\sigma_T$ материала, где σ_T – предел текучести. По данным экспериментальных исследований погрешность измерения остаточных напряжений не превышает 10%.

5 МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ВОССТАНОВЛЕННЫХ ДЕТАЛЯХ, ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВНЕДРЕНИЕ

5.1 Метод измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях

Основной принцип измерения остаточных напряжений следующий: остаточные напряжения в поверхностном слое восстановленного образца определяют с использованием данных о распределении и величинах нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка конического индентора. Величины нормальных перемещений определяют в контрольных точках на осях симметрии распределения перемещений на расстоянии $1,33$ радиуса отпечатка. Информацию о распределении и величинах нормальных перемещений получают методом электронной спекл-интерферометрии [55-56, 59, 64, 121, 205, 231, 236, 237].

Технология измерения остаточных напряжений с использованием конического индентора осуществляется следующим образом [121].

1) Подготавливают поверхность детали и располагают её в оптической системе. Проводят предварительную настройку оптической системы с целью обеспечить требуемую резкость в плоскости регистрирующей среды и усиления яркости при освещении исследуемого участка детали.

2) Записывают световое поле, соответствующее исходному состоянию исследуемой поверхности детали, которое было получено при помощи лазера (источника излучения).

3) Извлекают деталь из оптической системы.

4) Воздействуют коническим индентором на поверхность детали в заданной точке. Механическое вдавливание выполняется с применением стандартных твердомеров типа ТК или ТШ. Используется стандартный конический алмазный индентор, применяемый при измерении твердости по Роквеллу. Для того чтобы обеспечить требуемое усилие вдавливания, применяются тарированные грузы,

которые входят в комплект твердомера. Цикл нагружения состоит из стадии плавного увеличения усилия вдавливания до максимального, выдержки и плавного уменьшения до полного снятия; при этом реализуются условия статического нагружения образца. Действие силы на индентор должно иметь строго перпендикулярное к поверхности детали направление.

5) Возвращают деталь в оптическую систему.

6) Записывают световое поле, которое соответствует состоянию поверхности после вдавливания индентора.

7) Обрабатывают полученные исходные данные и использованием компьютерного программного обеспечения и получают интерферограмму, полосы на которой являются линиями равных нормальных перемещений.

Обработка полученных данных включает следующие действия:

а) совмещают изображения, полученные при первой и второй записях световых полей. Требования к кадрам – одинаковые размеры и цветовая дискретизация;

б) вычисляют разностное изображение - получают разностную картину двух совмещенных кадров путем вычитания кодов цветов в соответствующих пикселях. В результате получается цифровой аналог интерферограммы. В областях с неизменным контрастом спеклов между двумя записями (максимальная корреляция интенсивностей), получают нулевой разностный сигнал, и в картине полос возникает темная полоса. Участки, где контраст спеклов обратный, появятся светлые полосы. Эти полосы представляют собой интерференционные полосы равных нормальных деформационных перемещений поверхности детали в зоне воздействия;

в) снижают шум в изображении. С целью повышения качества изображения и удобства его дальнейшей расшифровки применяются операции медианной фильтрации и линейного контрастирования [65, 117].

8) Проводят расшифровку распределения нормальных перемещений. В обработку интерферограммы входит определение величины нормальных перемещений в контрольных точках на осях симметрии системы полос. На

интерферограмме нормальных перемещений отмечают направления осей симметрии. Определяют положение контрольных точек - на осях симметрии на расстоянии 1,33 радиуса от центра отпечатка. С учетом знака находят порядковые номера полос, проходящих через контрольные точки. Вычисляют средние значения номеров полос в контрольных точках на осях симметрии по разные стороны от отпечатка. Определяют средние значения нормальных перемещений:

$$W_{\sigma}^{(x,y)} = \frac{N_{(x,y)}\lambda}{2}. \quad (5.1)$$

где λ – длина волны лазера, $N_{(x,y)}$ – среднее значение номеров полос на соответствующей оси симметрии.

Измеряют диаметр отпечатка d и вычисляют величину перемещения W_{\max} , соответствующую ненагруженному материалу детали:

$$W_{\max} = 4,75 \frac{\sigma_T}{E_T^{3/2}} d, \quad (5.2)$$

Где σ_T и E_T – механические свойства материала поверхностного слоя детали – предел текучести и модуль упрочнения.

Предел текучести материала предварительно определяют с использованием вдавливания шарового индентора по методике, изложенной в [72], а модуль упрочнения – при вдавливании конического индентора с использованием выражения (2.12).

Далее вычисляют разностные перемещения $\Delta W^{(x)}$ и $\Delta W^{(y)}$:

$$\begin{aligned} \Delta W^{(x)} &= W_{\sigma}^{(x)} - W_{\max}, \\ \Delta W^{(y)} &= W_{\sigma}^{(y)} - W_{\max}. \end{aligned} \quad (5.3)$$

Наконец, с использованием всех полученных данных рассчитывают величины главных остаточных напряжений для каждой из осей:

$$\begin{aligned} \sigma_x^{\text{ост}} &= \frac{5}{7} \sigma_T \ln \left(1 - \frac{\Delta W^{(y)}}{W_{\max}} \right), \\ \sigma_y^{\text{ост}} &= \frac{5}{7} \sigma_T \ln \left(1 - \frac{\Delta W^{(x)}}{W_{\max}} \right). \end{aligned} \quad (5.4)$$

5.2 Анализ чувствительности метода

Чувствительность метод измерения остаточных напряжений определяется как величина напряжения, вызывающего появление разностного перемещения ΔW , величина которого равна половине длины волны лазера:

$$\sigma_n^{\text{ост}} = \frac{5}{7} \sigma_T \ln \left(1 - \frac{\lambda}{2W_{\text{max}}} \right) = \frac{5}{7} \sigma_T \ln \left(1 - \frac{0,3164 \cdot 10^{-3}}{W_{\text{max}}} \right). \quad (5.5)$$

При практических измерениях этот параметр представляет собой цену полосы, т.е. величину напряжения, приходящегося на единицу номера полосы. Исходя из этого, величина $2W_{\text{max}}/\lambda$ трактуется как номер полосы, проходящей через контрольную точку.

На значение чувствительности способа влияют:

1) вид зависимости между разностным перемещением ΔW и величиной остаточного напряжения;

2) величина базового перемещения W_{max} .

На рисунке 5.1 представлено изменение цены полосы в зависимости от величины базового перемещения (номера полосы в контрольной точке). Из данных рисунка следует, что при возрастании величины базового перемещения W_{max} чувствительность метода к остаточным напряжениям увеличивается. Например, при $2W_{\text{max}}/\lambda = 3$ одной полосе соответствует растягивающее напряжение $0,4\sigma_T$ или сжимающее $0,56\sigma_T$, а при $2W_{\text{max}}/\lambda = 6$ – соответственно $0,21\sigma_T$ и $0,25\sigma_T$. Приемлемая чувствительность, когда цена полосы составляет $0,3\sigma_T$ для растягивающих напряжений, будет при $2W_{\text{max}}/\lambda = 4$. Чувствительность $0,15\sigma_T$ достигается при $2W_{\text{max}}/\lambda > 9$.

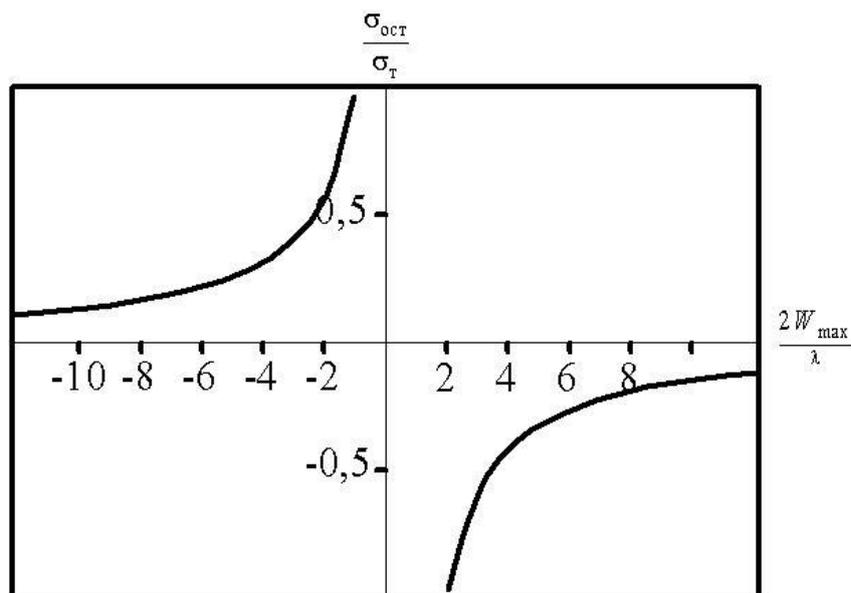


Рисунок 5.1 – Изменение цены полосы в зависимости от базового перемещения

Однако для того, чтобы при наличии значительных градиентов перемещений обеспечить возможность считывания информации с интерферограммы, следует ограничить максимальное значение базового перемещения $2W_{\max}/\lambda$. Исходя из практического опыта измерений, максимальная величина базового перемещения $2W_{\max}/\lambda = 14$.

Таким образом, рекомендуемый диапазон величины базового перемещения будет $4 \leq 2W_{\max}/\lambda \leq 14$. Поскольку для конкретного материала величина максимального перемещения W_{\max} зависит от диаметра отпечатка, по диаграмме вдавливания в виде (5.2), определяется рекомендуемый диапазон изменения диаметра. Например, для стали 40X $0,30 \leq d \leq 1,06$ (мм).

5.3 Анализ погрешности метода

Погрешность измерения остаточных напряжений зависит от ошибки определения значения базового перемещения W_{\max} .

При определении параметров диаграммы вдавливания $W_{\max}(d)$ экспериментальным путем на величину погрешности влияет точность измерения

диаметра отпечатка и величины перемещения в контрольной точке распределения полос:

$$W_{0d} = \frac{W_{\max}}{d / d_0}. \quad (5.6)$$

Диаметр отпечатка измеряется с ошибкой $d \pm \Delta d$, перемещение W_{\max} – с ошибкой $W_{\max} \pm \Delta W_{\max}$. Погрешность определения параметра W_{0d} будет [156]:

$$\Delta W_{0d} = \frac{\Delta W_{\max} \cdot d - W_{\max} \cdot \Delta d}{d^2} = \frac{\Delta W_{\max}}{d} - \frac{W_{\max} \cdot \Delta d}{d^2}, \quad (5.7)$$

или с использованием порядковых номеров полос

$$\Delta N_{0d} = \frac{\Delta N_{\max} \cdot d - N_{\max} \cdot \Delta d}{d^2} = \frac{\Delta N_{\max}}{d} - \frac{N_{\max} \cdot \Delta d}{d^2}. \quad (5.8)$$

Диаметр отпечатка измеряется с точностью 0,01 мм, а номер полосы в контрольной точке – с точностью 0,25. Для этих условий зависимость ΔN_{0d} от диаметра отпечатка d представлена на рисунке 5.3.

Дадим оценку предельной относительной погрешности нахождения параметра W_{0d} , используя порядковые номера полос:

$$\frac{\Delta N_{0d}}{N_{0d}} = \frac{\Delta N_{\max} \cdot d - N_{\max} \cdot \Delta d}{N_{\max} \cdot d} = \frac{\Delta N_{\max}}{N_{\max}} - \frac{\Delta d}{d}. \quad (5.9)$$

при условиях $\Delta d = 0,01$ мм, $\Delta N_{\max} = 0,25$ отношение относительной погрешности к диаметру отпечатка показано на рисунке 5.3.

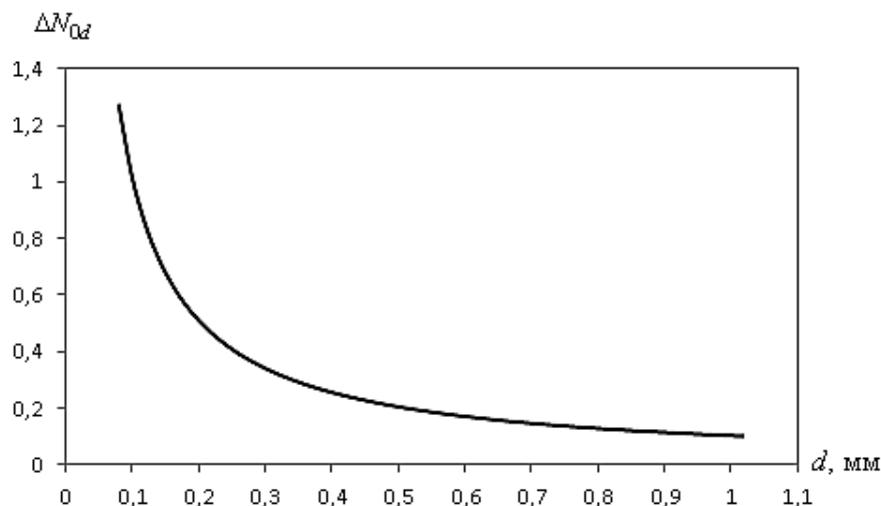


Рисунок 5.2 – Зависимость предельной ошибки определения базового перемещения от диаметра отпечатка

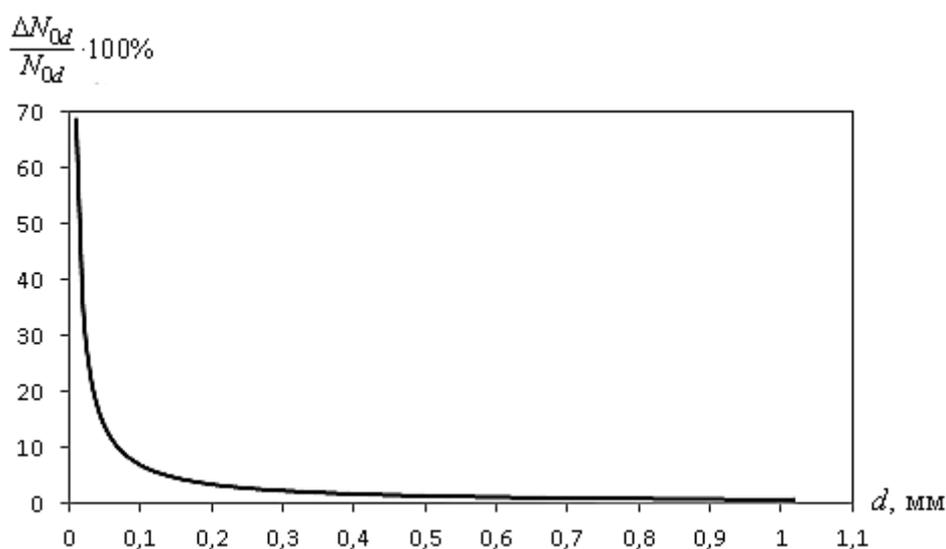


Рисунок 5.3 – Зависимость предельной относительной погрешности определения базового перемещения от диаметра отпечатка

Основываясь на полученных данных, рекомендуемые значения диаметра отпечатка, при которых относительная погрешность определения базового перемещения не превышает 10%, составляют $d \geq 0,08$ мм.

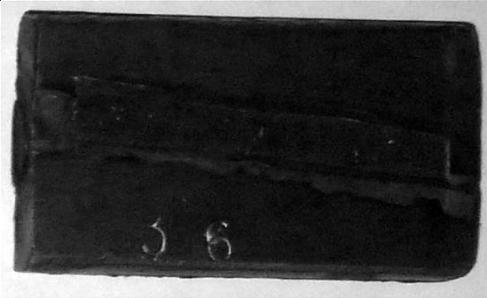
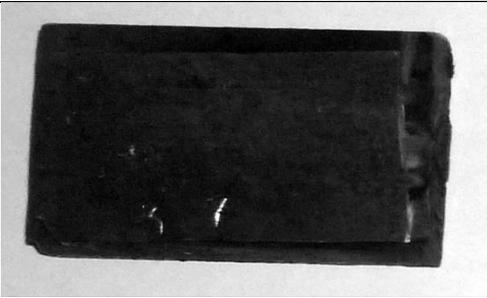
5.4 Практические результаты и внедрение

Разработанный метод измерения остаточных напряжений применен в ряде работ, выполняемых в рамках совместной научно-исследовательской деятельности с ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет». Общее направление исследований связано с обеспечением надежности восстановленных деталей. Целью исследования являлось получение данных об остаточных напряжениях, возникающих в восстановленных деталях при использовании различных технологий восстановления, для последующего совершенствования технологий.

5.4.1 Исследование остаточных напряжений при электроконтактной приварке металлической ленты

Исследования остаточных напряжений, возникающих при восстановлении деталей электроконтактной приваркой (ЭКП) металлической ленты, проводили на образцах. Внешний вид образцов, данные по материалам основы, материалам и толщине покрытий, особенностям нанесения покрытия приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Образцы для измерения остаточных напряжений при ЭКП металлической ленты

№	Материал основы	Материал покрытия	Внешний вид	Примечание
1	Сталь 45	Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т		
2	Сталь 45	Сталь 45		Приварка за 2 прохода
3	Сталь 45	Сталь 45		

Эскиз образцов, основные размеры и схема измерений показаны на рисунке 5.4. Измерения выполняли на плоских образцах длиной $L = 40...50$ мм, шириной $B = 30...40$ мм, толщиной $S = 5...7$ мм. В направлении L по центру поверхности

образца электроконтактным способом приварено покрытие шириной $b = 10...15$ мм.

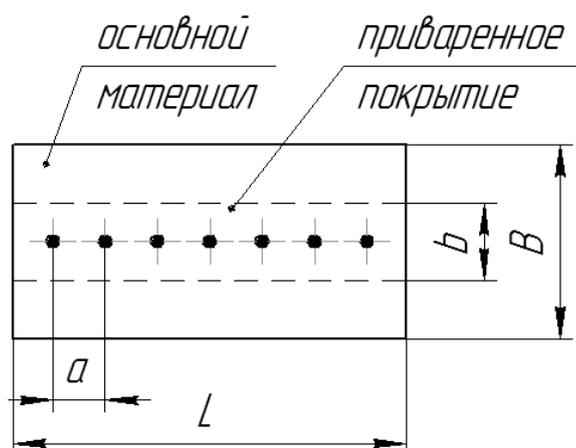


Рисунок 5.4 – Эскиз образцов, восстановленных ЭКП металлической ленты

Измерение остаточных напряжений проводили в точках с шагом $a = 5...7$ мм вдоль оси образца.

В соответствии с технологией метода:

- 1) определяли механические свойства основного материала детали (ОМ) и материала покрытия (МП);
- 2) получали диаграммы вдавливания $W_{\max}(d)$, описывающие связь между высотой наплыва и диаметром отпечатка индентора, для ОМ и МП;
- 3) получали данные об остаточных напряжениях в поверхностном слое восстановленных деталей.

Механические свойства и диаграммы вдавливания для ОМ и МП приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Механические свойства материалов и диаграммы вдавливания для образцов, восстановленных ЭКП металлической ленты

Номер образца	Материал основы			Материал покрытия		
	Предел текучести σ_T , МПа	Модуль упругости $E_T \cdot 10^{-4}$, МПа	Диаграмма вдавливания $N(d)$	Предел текучести σ_T , МПа	Модуль упругости $E_T \cdot 10^{-4}$, МПа	Диаграмма вдавливания $N(d)$
1	300±10	0,64...0,66	$8,6 \cdot d$	420±20	0,98...1,0	$6,4 \cdot d$
2	300±10	0,64...0,66	$8,6 \cdot d$	890±40	0,79...0,9	$17,0 \cdot d$
3	300±10	0,64...0,66	$8,6 \cdot d$	890±40	0,79...0,9	$17,0 \cdot d$

Измерения остаточных напряжений в образцах, восстановленных ЭКП металлической ленты, в целом показали на высокий уровень нагруженности поверхностного слоя. Во всех случаях остаточные напряжения в поверхностном слое (в покрытии) одного знака, растягивающие, по величине близки к пределу текучести σ_T материала покрытия.

При ЭКП ленты из нержавеющей стали 12Х18Н10Т на основу из стали 45 (образец 1) средние величины компонент тензора остаточных напряжений в области, удаленной от краев, составляют $\sigma_x^{\text{ост}} = 0,92\sigma_T$, $\sigma_y^{\text{ост}} = 0,95\sigma_T$ в долях предела текучести металла покрытия или в абсолютных значениях $\sigma_x^{\text{ост}} = 386$ МПа, $\sigma_y^{\text{ост}} = 399$ МПа.

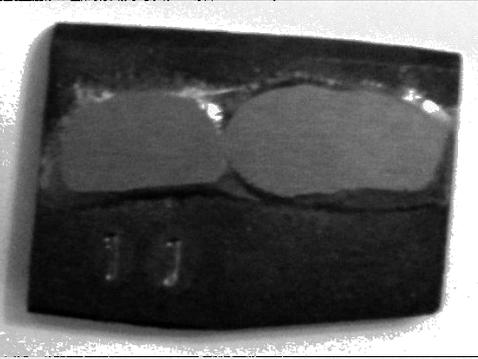
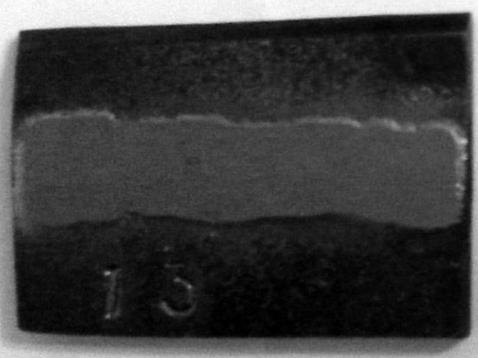
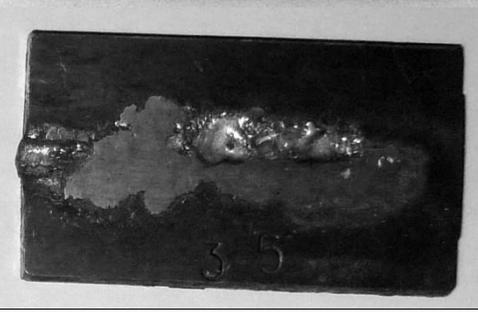
При приварке на сталь 45 ленты из стали 45 в два прохода (образец 2) средние остаточные напряжения $\sigma_x^{\text{ост}} = 0,23\sigma_T$, $\sigma_y^{\text{ост}} = 0,19\sigma_T$ в долях предела текучести металла покрытия или в абсолютных значениях $\sigma_x^{\text{ост}} = 205$ МПа, $\sigma_y^{\text{ост}} = 169$ МПа.

В образце из стали 45 с приваренной лентой из стали 45 за один проход (образец 3) средние величины остаточных напряжений составляют $\sigma_x^{\text{ост}} = 0,37\sigma_T$, $\sigma_y^{\text{ост}} = 0,37\sigma_T$ в долях предела текучести металла покрытия или в абсолютных значениях $\sigma_x^{\text{ост}} = 329$ МПа, $\sigma_y^{\text{ост}} = 329$ МПа.

5.4.2 Исследование остаточных напряжений при электроконтактной приварке порошковых материалов

Исследования остаточных напряжений, возникающих при восстановлении деталей электроконтактной приваркой (ЭКП) порошковых материалов, проводили на образцах, внешний вид которых, а так же данные по материалам основы, материалам и толщине покрытий, особенностям нанесения покрытия приведены в таблице 5.3 [147].

Таблица 5.3 – Образцы для измерения остаточных напряжений при ЭКП порошковых материалов

№	Материал основы	Материал покрытия	Внешний вид	Примечание
1	Сталь 65Г	ПГ12Н-02		Наплавленный слой 2 мм
2	Сталь 65Г	ПГ12Н-02		Наплавленный слой 1,5 мм удален до основания
3	Сталь 65Г	ПГ12Н-02		Наплавленный слой 1 мм
4	Сталь 45	Порошок ФБХ-6-2		

Эскиз образцов, основные размеры и схема измерений показаны на рисунке 5.4. Измерения выполняли на плоских образцах длиной $L = 40 \dots 50$ мм, шириной $B = 30 \dots 40$ мм, толщиной $S = 5 \dots 7$ мм. В направлении L по центру поверхности образца электроконтактным способом приварено покрытие шириной $b = 10 \dots 15$ мм.

Механические свойства и диаграммы вдавливания для ОМ и МП приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Механические свойства материалов и диаграммы вдавливания для образцов, восстановленных ЭКП порошковых материалов

Номер образ-ца	Материал основы			Материал покрытия		
	Предел текуче-сти σ_T , МПа	Модуль упрочнения $E_T \cdot 10^{-4}$, МПа	Диаграмма вдавливания $N(d)$	Предел текуче-сти σ_T , МПа	Модуль упрочнения $E_T \cdot 10^{-4}$, МПа	Диаграмма вдавливания $N(d)$
1	785±20	0,92...0,93	12,9·d	260±15	0,64...0,66	7,4·d
2	785±20	0,92...0,93	12,9·d	260±15	0,64...0,66	7,4·d
3	785±20	0,92...0,93	12,9·d	260±15	0,64...0,66	7,4·d
4	300±10	0,64...0,66	8,6·d	450±20	0,6...0,62	14,1·d

Измерения остаточных напряжений в образцах, восстановленных ЭКП порошковых материалов, в целом показали на невысокий уровень нагруженности поверхностного слоя. Во всех случаях остаточные напряжения в поверхностном слое (в покрытии) одного знака, растягивающие, по величине не превышают $0,25\sigma_T$ материала покрытия.

При приварке на сталь 65Г порошка ПГ12Н-02 слоем толщиной 2 мм (образец 1) средние значения главных остаточных напряжений составили $\sigma_x^{ост} = 0,19\sigma_T$, $\sigma_y^{ост} = 0,22\sigma_T$ в долях предела текучести материала покрытия или в абсолютных значениях $\sigma_x^{ост} = 49$ МПа, $\sigma_y^{ост} = 57$ МПа.

При приварке слоя толщиной 1 мм средние значения главных остаточных напряжений $\sigma_x^{ост} = 0,24\sigma_T$, $\sigma_y^{ост} = 0,17\sigma_T$ в долях предела текучести материала покрытия или в абсолютных значениях $\sigma_x^{ост} = 62$ МПа, $\sigma_y^{ост} = 44$ МПа.

Для тех же материалов после полного удаления приваренного слоя средние значения главных остаточных напряжений составили $\sigma_x^{ост} = 0,24\sigma_T$, $\sigma_y^{ост} = 0,2\sigma_T$ в долях предела текучести материала покрытия или в абсолютных значениях $\sigma_x^{ост} = 62$ МПа, $\sigma_y^{ост} = 52$ МПа.

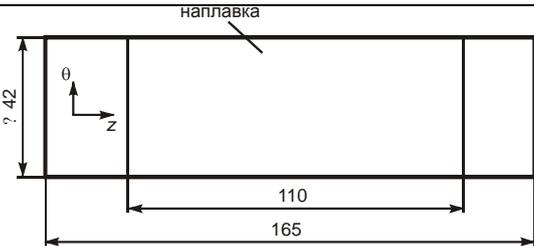
При приварке на сталь 45 порошка ФБХ-2 слоем толщиной 2 мм средние значения главных остаточных напряжений составили $\sigma_x^{ост} = 0,14\sigma_T$, $\sigma_y^{ост} = 0,24\sigma_T$ в

долях предела текучести металла покрытия или в абсолютных значениях $\sigma_x^{\text{ост}} = 63$ МПа, $\sigma_z^{\text{ост}} = 108$ МПа.

5.4.3 Исследование остаточных напряжений при электроконтактной приварке наплавочной проволоки

Исследования остаточных напряжений, возникающих при восстановлении деталей электроконтактной приваркой (ЭКП) наплавочной проволоки, проводили на образцах. Внешний вид образцов, данные по материалам основы, материалам покрытий, особенностям нанесения покрытия приведены в таблице 5.5 [57, 147].

Таблица 5.5 – Образцы для измерения остаточных напряжений при ЭКП наплавочной проволоки

№	Материал основы	Материал покрытия	Внешний вид (эскиз)	Примечание
1	Сталь 45	НП 65Г		
2	Сталь 45	НП 65Г		Одновременная наплавка двух проволок
3	Сталь 30ХГСА	НП 30ХГСА		Одновременная наплавка двух проволок

Образец № 1 цилиндрической формы диаметром 42 мм длиной 165 мм изготовлен из стали 45. По образующей части поверхности электроконтактным способом нанесено покрытие, материал проволоки – НП 65Г, длина наплавки вдоль оси образца – 110 мм.

При проведении измерений использованы два технологических варианта

метода: 1) вдавливание шарового индентора, 2) вдавливание конического индентора с углом раскрытия 120° .

Измерение предела текучести материала основы проводили с использованием шарового индентора диаметром 10 мм при усилии вдавливания 1471,3 Н. По данным 10 измерений предел текучести $\sigma_T^{ом} = 460 \pm 30$ МПа.

Измерение предела текучести материала покрытия выполняли при тех же параметрах вдавливания индентора. По данным 5 измерений условный предел текучести $\sigma_T^{мп} = 1430 \pm 70$ МПа.

Измерение поверхностных остаточных напряжений проводили в 3 сечениях в разных зонах наплавленной поверхности на удалении от краев (т.е. за пределами зоны краевого эффекта). Сечения ориентированы вдоль оси образца (рисунок 5.5).

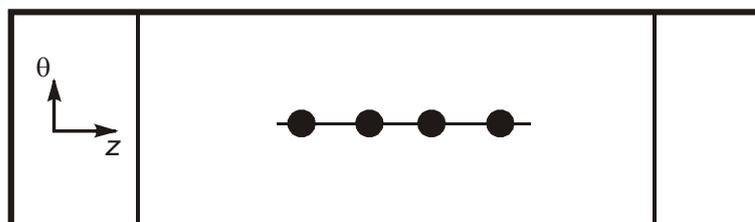


Рисунок 5.5 – Схема измерений остаточных напряжений

Данные измерений поверхностных остаточных напряжений приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Результаты измерения поверхностных остаточных напряжений в наплавленном образце

Номер измерения	Остаточные напряжения по отношению к условному пределу текучести материала покрытия	
	$\sigma_z / \sigma_T^{мп}$	$\sigma_\theta / \sigma_T^{мп}$
1	-0,12	0,02
2	0,03	0,05
3	-0,09	0,06
4	-0,01	0,02
5	-0,01	0,05
6	0	0,05
Средние значения	-0,03	0,04

По результатам измерений в поверхностном слое образца как осевые (т.е. действующие вдоль продольной оси образца) σ_z , так и окружные σ_θ остаточные напряжения практически равны 0.

Образец № 2 цилиндрической формы диаметром 50 мм длиной 110 мм изготовлен из стали 45. По образующей части поверхности наплавлено покрытие, материал проволоки– НП 65Г. Длина наплавки вдоль оси образца – 45 мм.

Измерение предела текучести материала основы проводили с использованием шарового индентора диаметром 10 мм при усилии вдавливания 1471,3 Н. Измерение предела текучести материала покрытия выполняли при тех же параметрах вдавливания индентора. По данным 5 измерений средняя величина предела текучести материала основы (сталь 45) - 430 ± 30 МПа, средняя величина предела текучести материала покрытия (сталь 65Г) - 1413 ± 80 МПа.

Измерение поверхностных остаточных напряжений проводили в 4 сечениях в разных зонах наплавленной поверхности на удалении от краев (т.е. за пределами зоны краевого эффекта) в соответствии со схемой, представленной на рисунке 5.5.

Данные измерений поверхностных остаточных напряжений приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Результаты измерения поверхностных остаточных напряжений в образце № 2

Номер измерения	Остаточные напряжения по отношению к условному пределу текучести металла покрытия	
	$\sigma_z / \sigma_T^{МП}$	$\sigma_\theta / \sigma_T^{МП}$
1	0,154	-0,009
2	0,171	-0,087
3	0,152	-0,129
4	0,135	-0,041
5	0,006	-0,129
6	0,152	-0,086
7	0,136	-0,048
8	0,166	-0,122
9	0,151	-0,046
10	0,018	-0,091
Средние значения	0,124	-0,079

По результатам измерений в поверхностном слое образца как осевые (т.е. действующие вдоль продольной оси образца) σ_z , так и окружные σ_θ остаточные напряжения незначительные, $\sigma_z = 0,124\sigma_T$, $\sigma_\theta = -0,079\sigma_T$ в долях предела текучести материала покрытия. Абсолютные значения остаточных напряжений: $\sigma_z = 218$ МПа, $\sigma_\theta = -117$ МПа.

Образец № 3 цилиндрической формы диаметром 50 мм длиной 110 мм изготовлен из стали 30ХГСА. По образующей части поверхности наплавлено покрытие, материал проволоки – НП 30ХГСА. Длина наплавки вдоль оси образца – 70 мм.

Измерение предела текучести материала основы проводили с использованием шарового индентора диаметром 10 мм при усилии вдавливания 1471,3 Н. Измерение предела текучести материала покрытия выполняли при тех же параметрах вдавливания индентора. По данным 5 измерений средняя величина предела текучести материала основы (сталь 30ХСА) - 610 ± 40 МПа, средняя величина предела текучести материала покрытия (сталь 30ХГСА) - 1590 ± 80 МПа.

Измерение поверхностных остаточных напряжений проводили в 4 сечениях в разных зонах наплавленной поверхности на удалении от краев (т.е. за пределами зоны краевого эффекта) в соответствии со схемой, представленной на рисунке 5.6.

Данные измерений поверхностных остаточных напряжений приведены в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Результаты измерения поверхностных остаточных напряжений в образце № 3

Номер измерения	Остаточные напряжения по отношению к условному пределу текучести металла покрытия	
	$\sigma_z/\sigma_T^{МП}$	$\sigma_\theta/\sigma_T^{МП}$
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
1	0,141	-0,097
2	0,177	-0,038
3	0,121	-0,129
4	0,081	-0,204
5	0,19	-0,027
6	0,121	-0,117
7	0,137	-0,068
8	0,164	-0,121
9	0,182	-0,138
10	0,104	-0,046
Средние значения	0,142	-0,099

По результатам измерений в поверхностном слое образца как осевые (т.е. действующие вдоль продольной оси образца) σ_z , так и окружные σ_θ остаточные

напряжения незначительные, $\sigma_z = 0,142\sigma_T$, $\sigma_\theta = -0,099\sigma_T$ в долях предела текучести материала покрытия. Абсолютные значения остаточных напряжений: $\sigma_z = 226$ МПа, $\sigma_\theta = -161$ МПа.

5.4.4 Исследование остаточных напряжений при электроконтактной приварке металлической сетки

Исследования остаточных напряжений, возникающих при восстановлении деталей электроконтактной приваркой (ЭКП) металлической сетки, проводили на образцах. Внешний вид образцов, данные по материалам основы, материалам покрытий, особенностям нанесения покрытия приведены в таблице 5.9 [147, 152].

Таблица 5.9 – Образцы для измерения остаточных напряжений при ЭКП металлической сетки

№	Материал основы	Материал покрытия	Внешний вид (эскиз)	Примечание
1	Сталь 12X18H10T	Сетка 12X18H10T		3 слоя
2	Сталь 12X18H10T	Сетка 12X18H10T		2 слоя
3	Сталь 12X18H10T	Сетка 12X18H10T + порошок 316L (04X18H10T) + 10% порошок чугуна		

Геометрические данные по образцам приведены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Геометрические данные по образцам

№ образца	Длина, мм	Диаметр, мм	Длина покрытия, мм	Диаметр покрытия, мм	Толщина покрытия, мм
1	75	47,5	43	48,6	0,55
2	86	47,5	55	48,1	0,3
3	92	47,5	52	48,3	0,4

Измерение предела текучести материала основы проводили с использованием шарового индентора диаметром 10 мм при усилии вдавливания 1471,3 Н. По данным пяти измерений предел текучести $\sigma_T^{OM} = 260 \pm 20$ МПа.

Измерение предела текучести материала покрытия выполняли при тех же параметрах вдавливания индентора. По данным 5 измерений условный предел текучести $\sigma_T^{MN} = 260 \pm 20$ МПа.

Схема измерений остаточных напряжений и принятая система координат для образцов представлены на рисунке 5.6.

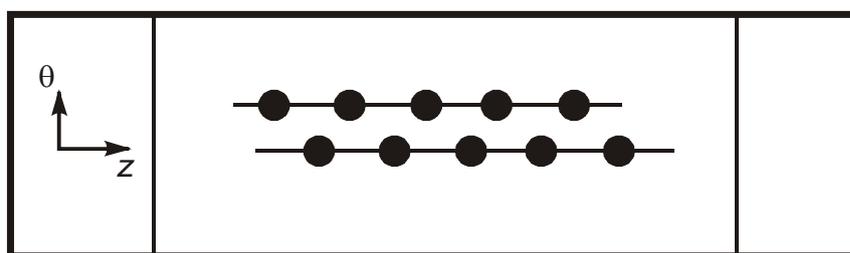


Рисунок 5.6 – Схема измерений остаточных напряжений

При проведении измерений использованы два технологических варианта метода: 1) вдавливание шарового индентора, 2) вдавливание конического индентора с углом раскрытия 120° .

Измерение поверхностных остаточных напряжений на каждом образце проводили в 2-4 сечениях в разных зонах приваренного покрытия на удалении от краев (вне пределов зоны краевого эффекта).

Результаты измерений поверхностных остаточных напряжений приведены в таблицах 5.11-5.13.

Таблица 5.11 – Результаты измерения поверхностных остаточных напряжений в образце № 1

Номер измерения	Остаточные напряжения по отношению к условному пределу текучести металла покрытия	
	$\sigma_z/\sigma_T^{МП}$	$\sigma_\theta/\sigma_T^{МП}$
1	0,10	-0,05
2	0,07	-0,17
3	0,09	-0,12
4	0,14	-0,16
5	0,10	-0,15
6	0,11	-0,14
7	0,08	-0,14
8	0,06	-0,17
9	0,09	-0,17
10	0,06	-0,17
11	0,09	-0,07
12	0,09	-0,17
13	0,09	-0,17
14	0,09	-0,17
Средние значения	0,09	-0,15

Таблица 5.12 – Результаты измерения поверхностных остаточных напряжений в образце № 2

Номер измерения	Остаточные напряжения по отношению к условному пределу текучести металла покрытия	
	$\sigma_z/\sigma_T^{МП}$	$\sigma_\theta/\sigma_T^{МП}$
1	0,05	-0,14
2	0,08	-0,09
3	0,11	-0,14
4	0,10	-0,16
5	0,15	-0,09
6	0,15	-0,14
7	0,13	-0,07
Средние значения	0,11	-0,12

Таблица 5.13 – Результаты измерения поверхностных остаточных напряжений в образце № 3

Номер измерения	Остаточные напряжения по отношению к условному пределу текучести металла покрытия	
	$\sigma_z/\sigma_T^{МП}$	$\sigma_\theta/\sigma_T^{МП}$
1	0,13	-0,15
2	0,09	-0,07
3	0,08	-0,09
4	0,08	-0,13
5	0,03	-0,11
6	0,09	-0,17
Средние значения	0,08	-0,12

По результатам измерений в поверхностном слое всех образцов как осевые (т.е. действующие вдоль продольной оси образца) σ_z , так и окружные σ_θ остаточные напряжения незначительные по величине. Осевые напряжения σ_z – растягивающие, окружные напряжения σ_θ – сжимающие.

В образце № 1 осевые остаточные напряжения $\sigma_z = 0,09 \pm 0,05$ от предела текучести материала покрытия, окружные $\sigma_\theta = -0,15 \pm 0,04$ от предела текучести материала покрытия. Абсолютные значения остаточных напряжений: $\sigma_z = 23 \pm 13$ МПа, $\sigma_\theta = -39 \pm 10$ МПа.

В образце № 2 осевые остаточные напряжения $\sigma_z = 0,11 \pm 0,04$ от предела текучести материала покрытия, окружные $\sigma_\theta = -0,12 \pm 0,04$ от предела текучести материала покрытия. Абсолютные значения остаточных напряжений: $\sigma_z = 29 \pm 10$ МПа, $\sigma_\theta = -31 \pm 10$ МПа.

В образце № 3 осевые остаточные напряжения $\sigma_z = 0,08 \pm 0,04$ от предела текучести материала покрытия, окружные $\sigma_\theta = -0,12 \pm 0,04$ от предела текучести материала покрытия. Абсолютные значения остаточных напряжений: $\sigma_z = 21 \pm 10$ МПа, $\sigma_\theta = -31 \pm 10$ МПа.

Для всех образцов интенсивность остаточных напряжений, определяемая по энергетической теории, находится в пределах 50...65 МПа. Это позволяет заключить о невысокой нагруженности поверхностного слоя образцов.

5.4.5 Исследование влияния остаточных напряжений на долговечность по критерию усталостной прочности

Испытания на многоцикловую усталость проводили на образцах в соответствии с ГОСТ 25.502-79. Использовали образцы следующих типов: эталонный (сталь 45 нормализованная), закаленный (сталь 45 закаленная, твердость поверхности HRC 48...50), наваренные (основной металл – сталь 45, металл покрытия – лента, сталь 45), упрочненные (наваренные образцы с дополнительным электроконтактным упрочнением поверхности).

Испытания проводили при симметричном изгибе консольных образцов с коэффициентом асимметрии цикла $R = -1$ на базе 107 циклов [154, 163]. В каждой серии испытывали не менее 6 образцов. По результатам испытаний строили кривые усталостной прочности (кривые Велера), показывающие взаимосвязь напряжения σ с количеством N циклов, выдержанных образцом до конца испытания.

Результаты измерения остаточных напряжений в образцах с приваренным покрытием, дополнительно подвергнутых поверхностному пластическому деформированию (ППД) обкаткой шариком в соответствии со схемой (рис. 5.7) показаны на рис. 5.8. Данные приведены по отношению к пределу текучести основного металла.

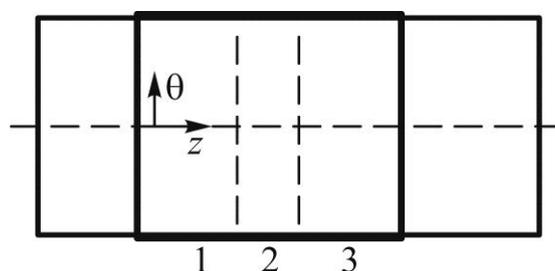


Рис. 5.7 Схема обработки поверхности покрытия ППД:
1 – зона обработки с усилием обкатки P_{\max} ; 2 – зона без обработки;
3 – зона обработки с усилием обкатки $0,5P_{\max}$

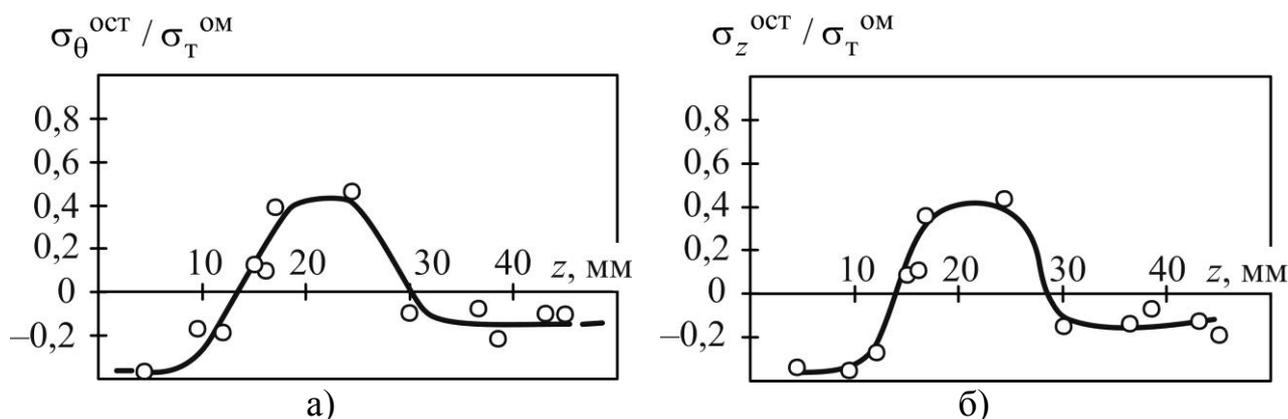


Рис. 5.8 Распределение окружных (а) и осевых (б) остаточных напряжений в поверхностном слое образца, обработанного ППД

В зонах, где проведена обработка поверхности ППД, выявлены сжимающие остаточные напряжения $\sigma_{\theta}^{ост}$ и $\sigma_z^{ост}$. В зоне 2, где обработка не применялась, окружные и осевые остаточные напряжения растягивающие, но вследствие общего перераспределения их максимальный уровень не превышает 0,5 от предела текучести основного металла. В зоне 1 в удаленной от ее краев области средние величины сжимающих остаточных напряжений находятся на уровне $0,35\sigma_T$, а в зоне 3 – $0,13\sigma_T$ в долях предела текучести основного металла или в абсолютных значениях соответственно 105...112 МПа и 39...42 МПа.

Результаты исследования подтвердили, что ППД обкаткой роликом или шариком является эффективным способом управления остаточными напряжениями в деталях, восстановленных электроконтактной приваркой металлической ленты. Следует констатировать качественное и количественное совпадение полученных результатов с данными других авторов [155].

Однако ППД характерно значительное деформационное воздействие на поверхностный слой, что может привести к повреждению восстановленной детали в процессе обработки вследствие существенно пониженных пластических свойств металла в области сцепления покрытия с основой. Наличие такого рода повреждений в виде отслоения покрытия от основы выявлено в процессе испытаний и на некоторых образцах достигало 80...85% площади покрытия. Таким образом, применение ППД возможно при условии выбора режимов, исключая повреждение восстановленной детали.

Результаты измерения остаточных напряжений в образцах с покрытием, дополнительно подвергнутых электроконтактному упрочнению, показаны на рис. 5.9 Данные приведены по отношению к пределу текучести основного металла.

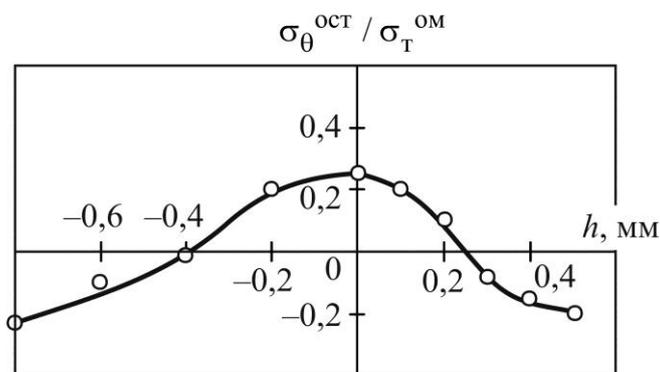


Рис. 5.9 Распределение окружных остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя образца после электроконтактного упрочнения

Применение электроконтактного упрочнения приводит к появлению на поверхности покрытия сжимающих остаточных напряжений $\sigma_{\theta}^{ост}$, достигающих по величине $0,2$ предела текучести основного металла. В области сцепления покрытия с основой остаточные напряжения $\sigma_{\theta}^{ост}$ растягивающие, но незначительные по величине, не превышают $0,2\sigma_T$. Следовательно, электроконтактное упрочнение деталей, восстановленных приваркой ленты, приводит к значительному снижению нагруженности поверхностного слоя. Это можно считать одним из существенных факторов, способствующих повышению долговечности восстановленных деталей.

Результаты сравнительных усталостных испытаний образцов приведены на рис. 5.10.

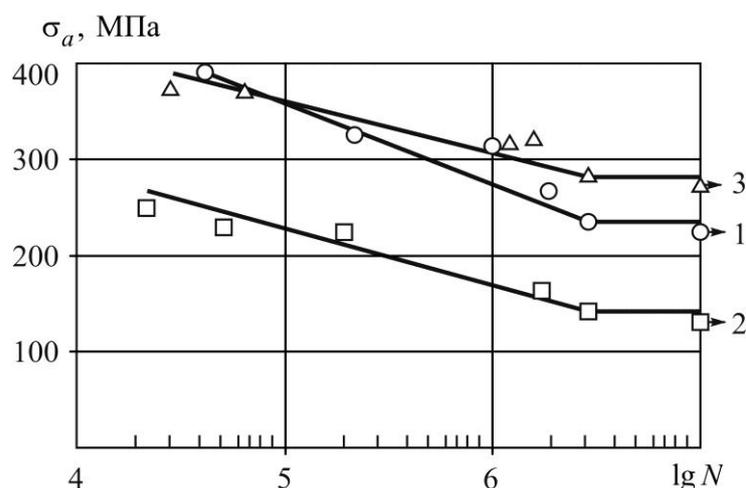


Рис. 5.10 Результаты усталостных испытаний образцов [27]:
 1 – образцы из нормализованной стали 45; 2 – образцы с приваренным покрытием (лента, сталь 45); 3 – образцы с приваренным покрытием (лента, сталь 45) и электроконтактным упрочнением

Предел выносливости образцов с приваренным покрытием составил 55...65% от предела выносливости эталонных образцов. В результате применения электроконтактного упрочнения предел выносливости образцов увеличился до 120...125% от предела выносливости эталонных образцов. В целом применение электроконтактного упрочнения позволило практически в 2 раза повысить предел выносливости деталей, восстановленных электроконтактной приваркой металлической ленты.

Эксплуатационные испытания деталей были проведены на реальных машинах при тяжелых режимах работы без длительных простоев в течение сезона. Результаты измерений после испытаний показали, что износ рабочих поверхностей деталей, восстановленных с применением электроконтактного упрочнения, был в 1,2-1,3 раза ниже износа аналогичных поверхностей новых деталей.

5.4.6 Анализ результатов исследований

Полученные результаты позволяют заключить следующее.

Деталям, восстановленным ЭКП металлической ленты, в основном характерна высокая нагруженность поверхностного слоя. Этот фактор оказывает значительное влияние на их эксплуатационные характеристики, в частности,

вызывает существенное снижение усталостной прочности - до 30% в сравнении с новой деталью [156].

Поверхностный слой деталей, восстановленных ЭКП порошковых материалов, нагружен на 30...50% ниже. С этим, в частности, связано то, что у этих деталей показатели усталостной прочности выше по сравнению с ЭКП металлической ленты [96].

При ЭКП наплавочной паволоки поверхностный слой восстановленной деталей практически разгружен от остаточных напряжений. Соответственно, предел выносливости восстановленных по этой технологии деталей выше, чем при приварке металлической ленты [109].

Новая технология восстановления деталей ЭКП металлической сетки также обеспечивает благоприятное напряженное состояние поверхностного слоя. Остаточные напряжения незначительные по величине, не превышают 0,15 предела текучести материала покрытия.

В технологии восстановления ЭКП металлической ленты для обеспечения долговечности деталей необходимо снижение остаточных напряжений. Применение ППД на рациональных режимах приводит к появлению сжимающих поверхностных остаточных напряжений и повышению усталостной прочности, а соответственно, и долговечности восстановленных деталей, в 3...3,5 раза. Однако применение ППД с большой вероятностью может привести к повреждению восстановленных деталей в виде отслоения покрытия от основного металла. В связи с этим необходимо проведение дополнительных исследований с целью подбора рациональных режимов обработки, исключающих возможность повреждения восстановленных деталей.

Для повышения долговечности восстановленных деталей рекомендуется применение электроконтактного упрочнения. Несмотря на несколько меньшую по сравнению с ППД эффективность в контексте управления остаточными напряжениями, данный способ обработки характеризуется существенно меньшей степенью воздействия на восстановленную деталь. При этом применение электрокон-

тактного упрочнения позволяет повысить предел выносливости восстановленных деталей в 1,5...2,5 раза.

Результаты исследований положены в основу усовершенствованной технологии восстановления деталей типа «вал» [81]. Приведенные в этой работе данные ресурсных испытаний показали почти двукратное повышение долговечности валов, восстановленных по новой технологии.

Результаты измерения остаточных напряжений в деталях, восстановленных ЭКП присадочных материалов, позволили разработать ресурсосберегающие технологии восстановления деталей и дали возможность эффективно применять технологии на ряде ремонтных предприятий АПК Республики Башкортостан. Результаты исследований используются в опытно-технологических работах, проводимых Башкирским государственным аграрным университетом, при разработке и совершенствовании технологий восстановления деталей, что подтверждено Актами внедрения результатов НИР в ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» и ПКФ «Ресурс» (Республика Башкортостан).

5.5 Эффективность применения конического индентора при измерении поверхностных остаточных напряжений в восстановленных деталях

Способ измерения поверхностных остаточных напряжений с использованием конического индентора в восстановленных деталях был разработан с целью повышения эффективности измерений, которая складывается из набора факторов:

- 1) технологическая способность;
- 2) геометрические характеристики оборудования;
- 3) затраты на эксплуатацию оборудования;
- 4) затраты времени на измерение;
- 5) затраты энергии на измерение;
- 6) стоимость оборудования.

Применение конического индентора в сравнение с прототипом, сферическим индентором, уменьшает степень воздействия на поверхность исследуемой детали. Диаметр отпечатка конического индентора в сравнении с отпечатком шарового меньше на 40-45%. Кроме того, применение конического индентора позволяет в 2-3 раза снизить усилие вдавливания при достижении достаточной чувствительности на уровне 0,1 предела текучести материала. При этом объем получаемой информации такой же, как и при вдавливании шарового индентора: величины компонент остаточных напряжений в точке на поверхности детали, их знаки, направления главных осей. Технология измерений с использованием конического индентора открывает перспективы разработки мобильного, портативного измерительного оборудования.

Прототипом для разработанного способа является метод определения остаточных напряжений на основе упругопластического контактного взаимодействия шара и контртела. Так как методика определения остаточных напряжений в прототипе и новом способе одинакова и основное отличие состоит в характеристиках используемого инструмента (индентора), то целесообразней показать техническую эффективность в сравнении с методами, имеющими практическое применение – методы удаления слоя [82, 96] и метод отверстия [172, 216, 225]. Рассмотрим методы, основанные на удалении слоя материала: метод стрелы прогиба для пластин, обточка и расточка для деталей цилиндрической формы.

1) Технологическая способность. Объем информации в прототипе получаемой за одно измерение:

– деформационные кривые для относительной окружной и осевой деформаций;

– величины радиальной σ_r , окружной σ_θ и осевой σ_z компонент остаточных напряжений.

При использовании приближенных решений погрешность расчета напряжений не превышает 3,2%, при этом неучёт упругой неоднородности материала при определении остаточных напряжений приводит к погрешности,

достигающей 42%. Методика предполагает непрерывное или периодическое измерение тензометрическим способом осевой и окружной деформации в процессе удаления материала как с наружной, так и с внутренней поверхности. Методы обеспечивают решение задачи измерения остаточных напряжений в покрытиях для случаев одновременного удаления материала по площади восстанавливаемой поверхности, когда напряжения в пределах элементарного слоя dr неизменны. Если же поверхностный слой удаляется последовательно, неравномерность распределения остаточных напряжений по площади поверхности зафиксирована не будет, что может привести к появлению значительной погрешности результатов измерений.

Метод удаления слоя входит в число разрушающих, а метод наращивания слоя, который квалифицируется как неразрушающий, имеет существенные ограничения в применении по номенклатуре деталей.

Объем информации в новом способе:

- величины компонент остаточных напряжений в точке на поверхности детали и их знаки;
- направления главных осей.

Способ позволяет измерять поверхностные остаточные напряжения в диапазоне от $-\sigma_T$ до $+\sigma_T$ материала с погрешностью не выше 10% при чувствительности $(0,05 \dots 0,15)\sigma_T$.

На основании анализа качественных характеристик разработанного метода доказана его пригодность к неразрушающему измерению остаточных напряжений на поверхности восстановленных деталей в режиме экспресс-измерений.

2) Геометрические характеристики оборудования. В прототипе применяется горизонтально-расточной станок, тензодатчики и персональный компьютер. Габариты горизонтально-расточного станка 2А622 6790×4880×3100 мм, его масса 16000 кг. Площадь рабочего места при работе за персональным компьютером 4,5 м² по СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы». Габаритами тензодатчиков в данной задаче можно пренебречь. Необходимая площадь лаборатории минимум 45 м².

В новом способе используется:

- He-Ne лазер ЛГН-215 габариты 1910x285x280 мм;
- стандартный твердомер типа ТШ: габариты 730x225x880 мм, масса 200 кг;
- оптический стол с системой виброизоляции УИГ-22К;
- высокочувствительная высокоразрешающая цифровая видеокамера: габариты – 110x57x52 мм;
- персональный компьютер: площадь рабочего места не отличается от прототипа.

Необходимая площадь лаборатории не превышает 25 м².

3) Затраты на эксплуатацию оборудования состоят из затрат на ремонт и обслуживание, расходов на электроэнергию и на амортизацию части здания, относящейся к установке.

Для базового и нового варианта норма годовых амортизационных отчислений для базового варианта 3%, норма годовых затрат на текущий ремонт оборудования 3%, годовые затраты на обслуживание 2%.

4) Затраты времени на измерение. Время необходимое на одно измерение состоит из времени на настройку/подготовку оборудования, измерение и времени на обработку полученной информации. В базовом варианте время на измерение занимает примерно 5-6 часов, в новом способе – 1 час, а для одной точки поверхности даже при ручном способе обработки регистрируемой информации не превышает 5 минут.

5) Затраты энергии на измерение. Мощность горизонтально-расточного станка 11 кВт.

Потребляемая мощность лазера ЛГН-215 не более 280 Вт.

Потребляемая мощность персонального компьютера 350...400 Вт.

Потребляемая мощность высокочувствительной высокоразрешающей цифровой видеокамеры 10...20 Вт.

6) Стоимость оборудования. Горизонтально-расточной станок 2А622 на данный момент стоит 3 000 000 руб., персональный компьютер типа Notebook – 10 000 руб.

Лазер ЛГН-215 стоит примерно 100 000 руб., стандартный твердомер типа ТШ-2М – 88 000 руб., оптический стол – 50 000 руб., цифровая видеокамера – 7 000 руб.

Техническая оценка совершенствования технологии восстановления на основе измерения остаточных напряжений с применением конического индентора, показала ее эффективность в сравнении с базовой технологией.

5.6 Экономическая эффективность внедрения метода измерения остаточных напряжений

Важным показателем экономической эффективности при внедрении нового метода измерения взамен существующего является окупаемость капитальных вложений на улучшение или модернизацию базовой технологии. Оценку экономической эффективности технологий выполним по методике, утвержденной Министерством сельского хозяйства РФ [104].

Годовой экономический эффект от разработки и внедрения нового способа измерения остаточных напряжений взамен базового можно определить по формуле

$$\mathcal{E}_2 = \left(\left[\frac{C_{\epsilon 1} + E \cdot K_1}{V_1} \right] - \left[\frac{C_{\epsilon 2} + E \cdot K_2}{V_2} \right] \right) \cdot V_2, \quad (5.10)$$

где $C_{\epsilon 1}$ и $C_{\epsilon 2}$ – себестоимость измерения по базовому и новому вариантам, руб.; K_1 и K_2 – капитальные вложения на приобретение, установку и модернизацию оборудования по базовому и новому вариантам, руб.; V_1 и V_2 – годовые объемы (количество) измерений по базовому и новому вариантам в расчетном году, шт.; E – коэффициент капитальных вложений для ремонтных предприятий.

Себестоимость C_B (руб.) измерения остаточных напряжений в детали определяем по формуле

$$C_{\epsilon} = P_y + P_{3л}, \quad (5.11)$$

где P_y – расходы на эксплуатацию оборудования; $P_{3л}$ – расходы на заработную плату.

Зарботную плату рабочего в час определим исходя из известной зарботной платы лаборанта (в месяц на данный момент 5600 руб.) и количества рабочих часов в месяц:

$$P_{zn} = \frac{5600}{160} = 35 \text{ руб.}$$

Расходы P_y (руб.) на содержание и эксплуатацию оборудования в расчете на одно измерение определим по формуле [219]

$$P_y = P_{po} + P_э + P_з, \quad (5.12)$$

где P_{po} – расходы на ремонт и обслуживание, руб.; $P_э$ – расходы на электроэнергию, руб.; $P_з$ – расходы на амортизацию части здания, относящейся к установке, руб.

Расходы на ремонт и обслуживание оборудование P_{po} составляют 3% от стоимости установки.

Расходы на технологическую электроэнергию определим по формуле [139]

$$P_э = (Nt_{umm}K_uC_э) / 100 \cdot 60, \quad (5.13)$$

где N – потребляемая мощность, кВт; t_{umm} – штучно-калькуляционное время, мин; $C_э$ – стоимость 1 кВт/ч электроэнергии.

При расчете показателя $P_э$ стоимость электроэнергии – 1,76 руб./кВт, K_u – коэффициент использования установки.

Расходы $P_з$ на содержание и амортизацию части здания рассчитываем по формуле

$$P_з = \Sigma \left[\frac{(SHC_{мз}a_1t)}{\Phi \cdot 100} \right], \quad (5.14)$$

где S – площадь здания, занимаемая установкой; H – высота здания, м; $C_{мз}$ – стоимость 1 м³ здания, руб.; a_1 – процент амортизации; Φ – эффективный годовой фонд работы оборудования, ч; t – время, затрачиваемое на операцию, ч.

Показатели сравнения экономической эффективности, измерения остаточных напряжений по базовой и новой технологиям приведены в таблице 5.14.

Таблица 5.14 – Составляющие себестоимости измерения остаточных напряжений по базовому и новому способам

Показатели	Обозначение	базовый	новый
Себестоимость одного измерения, руб., в том числе:	C_{B1}, C_{B2}	2632,54	26,65
- расходы на заработную плату, руб.	$P_{з.п}$	166,6	16,6
- расходы на амортизацию, руб	$P_з$	158,2	17,57
- расходы на ремонт и обслуживание, руб	P_{po}	253,1	3,98
- расходы на энергию, руб	$P_э$	100,32	1,23
Годовой объем измерений, шт.	V_1, V_2	384	1920
Капиталовложения, руб.	K_1, K_2	3000000	255000

Подставив принятые и расчетные значения, представленные в таблице 5.5, определим годовой экономический эффект от внедрения в производство нового метода измерения:

$$\mathcal{E}_2 = \left(\left[\frac{660,34 + 0,15 \cdot 3000000}{384} \right] - \left[\frac{56,12 + 0,15 \cdot 255000}{1920} \right] \right) \cdot 1920 = 2222495 \text{ руб.},$$

тогда срок окупаемости капитальных вложений составит

$$T = \frac{K_2}{\mathcal{E}_2} = \frac{255000}{2222495} = 0,1147$$

В пересчете на рабочие дни окупаемость составит 28 дней.

5.7 Выводы

1. Разработана технология измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях с применением разработанного метода. Обоснованы основные параметры воздействия на поверхность детали, при которых обеспечивается требуемая на практике чувствительность и точность измерений. Показано, что для получения чувствительности измерений на уровне 0,1 от предела текучести материала необходимо на поверхности детали создавать

отпечаток диаметром не менее 0,9 мм. При этом погрешность измерений не превышает 10%. Верхний предел диаметра отпечатка ограничен значением 1,5 мм, что обусловлено требованиями визуального наблюдения и количественной обработки регистрируемой информации.

2. Качественные характеристики разработанного способа доказывают его пригодность к неразрушающему измерению поверхностных остаточных напряжений в восстановленных деталях. Затраты времени на получение исходной информации (распределения нормальных перемещений вокруг отпечатка) в одном измерении не превышают 3 минут.

3. Возможности и преимущества разработанного метода показаны при решении практических задач измерения остаточных напряжений в деталях, восстановленных с использованием разных способов восстановления. При проведении серии измерений на поверхности детали метод позволяет получать распределения компонент тензора остаточных напряжений и обнаруживать наиболее нагруженные зоны.

4. Получены новые данные об остаточных напряжениях в деталях, восстановленных электроконтактной приваркой металлической ленты. Выявлен высокий уровень нагруженности поверхностного слоя восстановленных деталей. Поверхностные остаточные напряжения в деталях растягивающие, близки к пределу текучести материала покрытия. Сделан вывод о необходимости снижения остаточных напряжений при использовании данной технологии восстановления для обеспечения надежности деталей.

5. Установлено, что при восстановлении деталей электроконтактной приваркой порошковых материалов поверхностные остаточные напряжения на 20...30% ниже по сравнению с приваркой металлической ленты. Уровень нагруженности поверхностного слоя детали можно считать невысоким.

6. Получены новые данные об остаточных напряжениях в деталях, восстановленных электроконтактной приваркой присадочной проволоки и металлической сетки. При применении обеих технологий поверхностный слой практически разгружен от остаточных напряжений.

7. Полученные данные об остаточных напряжениях в восстановленных деталях используются в опытно-технологических работах по разработке и совершенствованию технологий восстановления деталей, проводимых Башкирским государственным аграрным университетом. Результаты исследований позволили разработать ресурсосберегающие технологии восстановления деталей сельскохозяйственной техники, дали возможность эффективно применять технологии на ряде ремонтных предприятий АПК Республики Башкортостан. Внедрение результатов исследований подтверждено Актами внедрения ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» и ПКФ «Ресурс» (Республика Башкортостан).

8. Технико-экономическая оценка применения разработанного метода измерения остаточных напряжений показала его эффективность в сравнении с базовой технологией. Экономический эффект возникает за счет значительного ускорения процесса измерения, дешевизны оборудования, а также уменьшению расхода энергии. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения нового способа измерения составляет 2 222 495 рублей при сроке окупаемости 28 рабочих дней.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

По результатам проведенного в рамках диссертационной работы научного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Для широкого диапазона материалов, применяемых при восстановлении деталей, получены уравнения, описывающие влияние усилия вдавливания, механических свойств материала поверхностного слоя и поверхностных остаточных напряжений на распределение нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка конического индентора, с погрешностью 2-5%.

2. Анализ основных зависимостей, полученных в ходе экспериментальной проверки ключевых положений математической модели на материалах, используемых при восстановлении изношенных деталей, показал их соответствие данным численных расчетов с погрешностью не выше 10%.

3. Применение для измерения остаточных напряжений конического индентора, в отличие от шарового индентора, позволяет измерять остаточные напряжения без ограничений по твердости поверхностного слоя, при снижении в 1,5-2 раза диаметра отпечатка и в 3-4 раза усилия вдавливания индентора.

4. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан новый способ определения поверхностных остаточных напряжений в восстановленных деталях (патент № 2572670 опубл. 20.01.2016 г.). Метод позволяет получать информацию о направлениях главных осей и величинах главных поверхностных остаточных напряжений с погрешностью не выше 10%. Заявленная погрешность может быть обеспечена при отпечатке диаметра 0,4...0,9 мм.

5. Использование результатов измерений поверхностных остаточных напряжений с целью создания в поверхностном слое благоприятного напряженного состояния при разработке или совершенствовании технологии восстановления приводит к повышению долговечности деталей на 20-40% и более.

6. Возможности и преимущества разработанного метода показаны при решении практических задачах измерения остаточных напряжений в деталях, восстановленных электроконтактной приваркой ленты, порошковых материалов, прово-

локи, металлической сетки. Результаты измерений позволили разработать технологию электроконтактного упрочнения восстановленных деталей и показала увеличение предела выносливости на 50-52% относительно восстановленной детали без электроконтактного упрочнения.

Дальнейшее развитие работы

Разработанный в настоящем исследовании метод измерения поверхностных остаточных напряжений может быть использован технологическими и научно-исследовательскими отделами предприятий технического сервиса АПК при разработке, совершенствовании и отладке методов и технологий восстановления изношенных деталей. С целью внедрения метода измерений в практику предприятий технического сервиса предполагается: 1) повышение уровня автоматизации измерений, 2) разработка измерительного оборудования. Первое направление предполагает разработку специализированного программного обеспечения, предназначенного для автоматического получения, визуализации, обработки информации и предоставления данных. Второе направление включает разработку компактного автономного измерительного прибора, пригодного для проведения натурных измерений в условиях заводской лаборатории или участка восстановления деталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 А.с. 953438 СССР, МКИ G 01 В 5/30. Устройство для определения внутренних остаточных напряжений изделий / А.А.Антонов, Г.Н.Чернышев, В.К.Морозов // Открытия. Изобретения.– 1982.– № 31.
- 2 А.с. № 1717941 СССР, МКИ G 01 В 5/30. Способ определения остаточных напряжений в объекте и устройство для его осуществления / А.Г.Игнатъев, М.В.Шахматов, В.П.Костюченко и др. // Открытия. Изобретения.– 1992.– № 9.
- 3 Александров В.М., Пожарский Д.А. Неклассические пространственные задачи механики контактных взаимодействий упругих тел.- М.: Факториал, 1998.- 288 с.
- 4 Алексеев, П.Г. Устойчивость остаточных напряжений и их влияние на износостойкость деталей, упрочненных наклепом / П.Г.Алексеев // Повышение эксплуатационных свойств деталей поверхностным пластическим деформированием.– М.: МДНТП, 1971.– С. 76-79.
- 5 Антонов, А.А. Исследование технологических остаточных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводов / Стеклов О.И., Антонов А.А. (мл.), Сидорин Ю.В. // Заготовительные производства в машиностроении. – 2010. – № 3; URL: http://www.mashin.ru/files/2010/zag_03_2010.pdf
- 6 Антонов, А.А. Научные основы оперативного метода измерения технологических остаточных напряжений и результаты исследований / А.А.Антонов, Г.Н.Чернышев // Труды 6 всесоюзн. съезда по теор. и прикладной механике.– Ташкент, 1986.– С. 45.
- 7 Апальков, А.А. Применение электронной спекл-интерферометрии для измерения остаточных напряжений / А.А.Апальков, И.Н.Одинцев, И.А.Разумовский // Заводская лаборатория.– 2002.– Т. 68, № 4.– С. 48-51.
- 8 Бакулин, В.В. Метод конечных элементов и голографическая интерферометрия в механике композитов / В.В.Бакулин, А.А.Рассоха.– М.: Машиностроение, 1987.– 311 с.
- 9 Бакши, О.А. Напряжения и коробление при сварке / О.А.Бакши.– М., Свердловск: Машгиз, 1961.– 72 с.
- 10 Балдаев, М.Х. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления / М.Х.Балдаев.– М.: Изд-во КХТ, 2004.– 134 с.
- 11 Барвинок, В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий / В.А.Барвинок.– М.: Машиностроение, 1990.– 384 с.
- 12 Батанова, О.А. Численное моделирование испытаний на сопротивление разрушению образцов из хрупких материалов / Матвиенко Ю.Г., Гогоци Г.А.– ВНТР, 2013. 13 с.
- 13 Батуев, Г. С. Инженерные методы исследования ударных процессов / Голубков Ю. В., Ефремов А. К., Федосов А. А. // М.: Машиностроение, 1977.

- 14 Беленький, Д.М. Измерение вектора механических свойств материала деталей машин / Бескопыльный А.Н. // Вестник машиностроения.– 1997. №8.– с. 44-47.
- 15 Бернштейн, М.Л. Механические свойства металлов / Займовский М.А. Изд. второе, М., «Металлургия», – 1979.
- 16 Бескопыльный А.Н. Измерение механических свойств материала деталей машин и элементов конструкций / Бескопыльный А.Н. // Заводская лаборатория.– 1994. №8. с. 47-50.
- 17 Бескопыльный, А.Н. Задача о статическом внедрении конического индентора в область с радиальными начальными напряжениями / Веремеенко А.А. // Инженерный вестник Дона, – 2012 – № 4-2 (23).- С. 189. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1368>.
- 18 Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А.Биргер.– М.: Машгиз, 1963.– 178 с.
- 19 Бирюков, Д.Г. Динамический упругопластический контакт индентора и сферической оболочки : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Ростов на Дону, 2005. 16 с.
- 20 Бирюков, Д.Г. Неосесимметричное соударение конического ударника и сферической оболочки // Математическое моделирование, вычислительная механика и геофизика. Труды III Школы-семинара. Ростов-на-Дону, 2004. С. 42-44.
- 21 Бирюков, Д.Г. Неосесимметричный упругопластический контакт конического тела и сферической оболочки // Труды аспирантов и соискателей РГУ. Т.10. Ростов-на-Дону, 2004. С. 8-10.
- 22 Бирюков, Д.Г., Динамический упругопластический контакт ударника и сферической оболочки / Кадомцев И.Г // ПМТФ, 2002. Т.43. №5. С. 171-175.
- 23 Бородин, Ю.П. Голографический комплекс для экспресс-анализа остаточных напряжений / Ю.П.Бородин // Оптико-геометрические методы исследования деформаций и напряжений: тез. докл. 4 всесоюзн. семин.– Челябинск, 1986.– С. 70-71.
- 24 Буканова И.С., Ятло И.И., Одинаев Е.О. Моделирование внедрения конического индентора в упругопластический материал для определения глубины впадины частично-регулярного микрорельефа // Ползуновский альманах. 2012. № 1. С. 109-111.
- 25 Булычев С.И. Соотношение между восстановленной и невосстановленной твердостью при испытании наномикроиндентированием // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 7. С. 42-48.
- 26 Бурумкулов, Ф.Х. Работоспособность и долговечность восстановленных деталей и сборочных единиц машин / Ф.Х.Бурумкулов, П.П.Лезин.– Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 1993.– 121 с.
- 27 Васильев В.Б. Интегральное уравнение одной задачи о вдавлении клиновидного штампа // ПММ. 1995. Т. 59. Вып. 2. С. 272-279.

- 28 Веремеенко А.А. Статические и динамические задачи о взаимодействии инденторов с предварительно напряженными упругопластическими средами: дисс. ... канд. тех. наук.- Ростов-на-Дону, 2004.- 164 с.
- 29 Вест Ч. Голографическая интерферометрия / пер. с англ. – М. : Мир, 1982. – 504 с.
- 30 Винокуров, В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В.А.Винокуров, А.Г.Григорьянц.– М.: Машиностроение, 1984.– 280 с.
- 31 Вишняков, Я.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах / Я.Д.Вишняков, В.Д.Пискарев.– М.: Металлургия, 1989.– 254 с.
- 32 Воловик, Е.Л. Восстановление и упрочнение деталей оборудования перерабатывающих отраслей АПК: обзор. информ. / Е.Л.Воловик, В.А.Михайлов, И.Г.Голубев.– М.: АгроНИИТЭИИТО, 1989.– С. 2-9.
- 33 Воловик, Е.Л. Справочник по восстановлению деталей / Е.Л.Воловик.– М.: Колос, 1981.– 351 с.
- 34 Восстановление деталей машин / Ф.И.Пантелеев, В.П.Лялякин, В.П.Иванов, В.М.Константинов; под ред. В.П.Иванова.– М.: Машиностроение, 2003.– 672 с.
- 35 Галкин, С.Г. Экспериментальные измерения остаточных напряжений методом голографической интерферометрии повышенной чувствительности / С.Г.Галкин, В.К.Морозов // Остаточные технологические напряжения: труды 2 всесоюзн. симп.– М., 1985.– С. 116-121.
- 36 Голографический контроль качества сварных соединений полимерных материалов / Л.М.Лобанов, В.А.Пивторак, Г.И.Ткачук, Г.В.Черкашин // Автоматическая сварка.– 1986.– № 1.– С. 29-32.
- 37 Гудков, А.А. Методы измерения твердости металлов и сплавов / А.А.Гудков, Ю.И.Славский.– М.: Металлургия, 1982.– 168 с.
- 38 Давиденков, Н.Н. Об измерении остаточных напряжений // Заводская лаборатория.– 1950.– № 2.– С. 188–192.
- 39 Данильченко, С.А. Моделирование упругого индентирования многослойного антифрикционного покрытия рельса методом конечных элементов / Наседкин А.В.– СамНЦ: Механика и машиностроение, 2011. 4 с.
- 40 Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К.Джонсон.– М.: Мир, 1989. – 510 с.
- 41 Дорожкин, Н.Н. Новые методы ремонта деталей машин / Н.Н.Дорожкин, Л.П.Кашицин, А.П.Елистратов.– Минск: Ураджай, 1980.– 120 с.
- 42 Дрозд, М.С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М.С.Дрозд, М.М.Матлин, Ю.И.Сидякин.– М.: Машиностроение, 1986.– 224 с.
- 43 Евсеев, П.П. Способы восстановления деталей машин: лаб. практикум / П.П.Евсеев, В.Н.Катаргин, Ю.И.Ковалев.– Красноярск: Изд-во Краснояр. гос. техн. ун-та, 1997.– 128 с.
- 44 Ермолов, Л.С. Основы надежности сельскохозяйственной техники / Л.С.Ермолов, В.М.Кряжков, В.Е.Черкун.– М.: Колос, 1982.– 271 с.

- 45 Жилкин, В.А. Экспериментальная установка для исследования напряженно-деформированного состояния изделий методом электронной спекл-интерферометрии / В.А.Жилкин, А.Г.Игнатьев // Достижения науки – агропромышленному производству: материалы XLV междунар. науч.-техн. конф.– Челябинск: ЧГАУ, 2006.– Ч. 4.– С. 62-66.
- 46 Зарезин, А.А. Разработка методики определения остаточных сварочных напряжений на основе метода пенетрации в сочетании с электронной спекл-интерферометрией: дисс. ... канд. техн. наук / А.А.Зарезин.– Челябинск, 2003.– 187 с.
- 47 Иванов, В.П. Технология и оборудование восстановления деталей машин / В.П.Иванов.– М.: Изд-во «Техноперспектива», 2007.– 458 с.
- 48 Иващенко, Н.И. Технология ремонта автомобилей / Н.И.Иващенко.– Киев: Вища школа, 1977.– 358 с.
- 49 Игнатьев А.Г. Диагностирование поверхностных остаточных напряжений в металлических покрытиях, нанесенных при восстановлении деталей сельскохозяйственной техники: дисс. ... докт. техн. наук. Челябинск, 2008. 324 с.
- 50 Игнатьев А.Г., Коротков В.А., Игнатьев Г.С. Учет остаточных напряжений при совершенствовании технологий восстановления деталей // Тракторы и сельхозмашины. 2009. № 8. С. 47-49.
- 51 Игнатьев А.Г., Лисицина Е.В. Прогнозирование долговечности восстановленных деталей с учетом остаточных напряжений // Вестник ЧГАА. 2012. Т.62. С. 50-53.
- 52 Игнатьев А.Г., Третьяков А.А. Деформированное состояние поверхности в окрестности отпечатка при вдавливании конического индентора // Достижения науки – агропромышленному производству: материалы LIII международной научно-технической конференции. Челябинск : ЧГАА, 2014.
- 53 Игнатьев А.Г., Третьяков А.А. Деформированное состояние поверхности вокруг отпечатка конического индентора: результаты экспериментального исследования / Вестник ЧГАА. 2014. Т. 69. С. 33-38.
- 54 Игнатьев А.Г., Третьяков А.А. Деформированное состояние поверхности вокруг отпечатка конического индентора: влияние остаточных напряжений / Вестник ЧГАА. 2014. Т. 70. С. 61-66.
- 55 Игнатьев А.Г., Третьяков А.А. Измерение остаточных напряжений в восстановленных деталях с использованием конического индентора / Агропродовольственная политика России. 2015. № 1 (13). С. 48-51.
- 56 Игнатьев А.Г., Третьяков А.А. Измерение остаточных напряжений в восстановленных и упрочненных деталях / Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 122. С. 167-171.
- 57 Игнатьев А.Г., Третьяков А.А. Измерение остаточных напряжений в деталях, восстановленных электроконтактной приваркой проволоки / Достижения науки - агропромышленному производству: мат-лы LIV междунар. науч.-техн. конф.- Челябинск : ЧГАА, 2015. – Ч. IV. С. 87-92.

- 58 Игнатъев А.Г., Третьяков А.А. Моделирование задачи о вдавлении конуса в поверхность упругопластического тела / Достижения науки - агропромышленному производству: мат-лы III междунар. научно-техн. конф., Ч. 6.— Челябинск: ЧГАА, 2013.— С. 68–72.
- 59 Игнатъев А.Г., Третьяков А.А. Новая методика измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях с использованием конического индентора / Контроль. Диагностика. 2015. № 6. С. 26-30.
- 60 Игнатъев А.Г., Третьяков А.А. Остаточные напряжения при плазменной закалке деталей / Достижения науки - агропромышленному производству: мат-лы LV междунар. науч.-техн. конф.-. Челябинск: ФГБОУ ВО Южно-УральскийГАУ, 2016.- Ч. IV.- С. 91-96.
- 61 Игнатъев А.Г., Третьяков А.А. Применение конического индентора при диагностировании остаточных напряжений в восстановленных деталях / Промышленный салон. Ремонт, восстановление, реновация : мат-лы V междунар. науч.-практ. конф. – Уфа: БашГАУ, 2014. С. 120-124.
- 62 Игнатъев А.Г., Третьяков А.А. Применение контактных задач для измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях // Инжиниринг, инновации, инвестиции: сборник научных трудов / Рос.союз науч. и инженер. обществ. орг., Междунар. акад. информатизации, Междунар.акад. авторов науч. открытий и изобретений, Регион. отделение; [ред. В.В. Ерофеев]. – Челябинск : [б. и.], 2013.- С. 46-52.
- 63 Игнатъев А.Г., Третьяков А.А. Проблема остаточных напряжений в восстановленных деталях сельскохозяйственной техники / Инжиниринг, инновации, инвестиции: сб. научн. трудов. / Рос. союз науч. и инженер. обществ. орг., Междунар. акад. информатизации, Междунар. акад. авторов науч. открытий и изобретений, Регион. отд-ние ; [ред. В. В. Ерофеев]. — Челябинск : [б. и.], 2013. - С. 32-36.
- 64 Игнатъев А.Г., Третьяков А.А. Экспериментальная оптико-электронная установка для измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях / Агропродовольственная политика России. 2015. № 6 (18). С. 24-28.
- 65 Игнатъев, А.Г. Голографические измерения остаточных сварочных напряжений / А.Г.Игнатъев, М.В.Шахматов, В.И.Михайлов // Автоматическая сварка.– 1990.– № 1.– С. 17-21.
- 66 Игнатъев, А.Г. Диагностирование остаточных напряжений в деталях, восстановленных наплавкой / А.Г.Игнатъев // Труды ГОСНИТИ.– М.: ГОСНИТИ, 2006.– Т. 98.– С. 134-136.
- 67 Игнатъев, А.Г. Диагностирование остаточных напряжений в деталях, восстановленных электроконтактной приваркой присадочных материалов / А.Г.Игнатъев, М.Н.Фархшатов // Контроль, диагностика.– 2007.– № 6 (108).– С. 55-60.
- 68 Игнатъев, А.Г. Диагностирование остаточных напряжений в сварных соединениях и восстановленных деталях сельскохозяйственной техники / А.Г.Игнатъев // Достижения науки – агропромышленному производству: ма-

- териалы XLV междунар. науч.-техн. конф.– Челябинск: ЧГАУ, 2006.– Ч. 3.– С. 63-67.
- 69 Игнатъев, А.Г. Исследование остаточных перемещений при упругопластическом контактном взаимодействии методом электронной спекл-интерферометрии / А.Г.Игнатъев // Достижения науки – агропромышленному производству: материалы XLVI междунар. науч.-техн. конф.– Челябинск: ЧГАУ, 2007.– Ч. 3.– С. 94-99.
- 70 Игнатъев, А.Г. Метод диагностирования остаточных напряжений в деталях сельскохозяйственной техники, восстановленных нанесением покрытий / А.Г.Игнатъев // Ремонт, восстановление, модернизация.– 2007.– № 8.– С. 26-28.
- 71 Игнатъев, А.Г. Метод измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях / А.Г.Игнатъев // Тракторы и сельскохозяйственные машины.– 2007.– № 9.– С. 36-38.
- 72 Игнатъев, А.Г. Метод измерения остаточных напряжений на основе упругопластического контактного взаимодействия / А.Г.Игнатъев // Вестник ЧГАУ.– 2007.– Вып. 50.– С. 51-59.
- 73 Игнатъев, А.Г. Неразрушающий метод определения остаточных напряжений в сварных соединениях / А.Г.Игнатъев, М.В.Шахматов, Ф.Г.Айметов // Сварные конструкции: материалы докл. междунар. конф.– Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1990.– С. 53-54.
- 74 Игнатъев, А.Г. Расчет остаточных перемещений при упругопластическом контактном взаимодействии шарового индентора с плоской поверхностью контртела. Сообщение 1. Разработка конечно-элементной модели и основные закономерности / А.Г.Игнатъев // Современные технологии и бизнес: сб. науч. трудов.– Челябинск: ЧНЦ РАЕН, 2006.– Вып. 1.– С. 49-60.
- 75 Игнатъев, А.Г. Расчет остаточных перемещений при упругопластическом контактном взаимодействии шарового индентора с плоской поверхностью контртела. Сообщение 2. Влияние механических свойств материала на диаметр остаточного отпечатка / А.Г.Игнатъев // Современные технологии и бизнес: сб. науч. трудов.– Челябинск: ЧНЦ РАЕН, 2006.– Вып. 1.– С. 61-70.
- 76 Игнатъев, А.Г. Расчет остаточных перемещений при упругопластическом контактном взаимодействии шарового индентора с плоской поверхностью контртела. Сообщение 3. Влияние механических свойств материала на перемещения в наплыве / А.Г.Игнатъев // Современные технологии и бизнес: сб. науч. трудов.– Челябинск: ЧНЦ РАЕН, 2006.– Вып. 2.– С. 15-32.
- 77 Игнатъев, А.Г. Расчет остаточных перемещений при упругопластическом контактном взаимодействии шарового индентора с плоской поверхностью контртела. Сообщение 4. Результаты экспериментальных исследований / А.Г.Игнатъев // Наука и производство.– Челябинск: ЧНЦ РАЕН, 2007.– С. 147-161.

- 78 Игнатъев, А.Г. Совершенствование технологий восстановления деталей с учетом остаточных напряжений / А.Г.Игнатъев, В.А.Коротков // Вестник ЧГАУ.– 2007.– Т. 51.– С. 110-115.
- 79 Игнатъев, А.Г. Электронная спекл-интерферометрия при измерении остаточных сварочных напряжений / А.Г.Игнатъев, М.В.Шахматов, А.А.Зарезин // Сварочное производство.– 1998.– № 12.– С. 24-27.
- 80 Игнатъков, Д.А. Остаточные напряжения в покрытиях, полученных электроискровым нанесением порошковых материалов и усталостная прочность легированных деталей / Д.А.Игнатъков, Н.Я.Парканский, А.Е.Гитлевич // Электронная обработка материалов.– 1980.– № 4.– С. 32-36.
- 81 Исламов, Л.Ф. Повышение ресурса деталей, восстанавливаемых электроконтактной приваркой присадочных материалов : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2017. – 20 с.
- 82 Исследование остаточных напряжений / А.А.Антонов, В.Н.Казаров, Б.М.Мампория и др.– М.: 1982.– 66 с.– Препринт / ИПМ АН СССР; № 202.
- 83 Кагнер, Ю.В. Методы восстановления деталей машин / Ю.В.Кагнер // Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками.– М.: Россельхозиздат, 1985.– С. 25-30.
- 84 Кадомцев И.Г. Осесимметричное упругопластическое соударение двух тел, одно из которых коническое // Известия СКНЦ ВШ, Естественные науки, 1990. №4. С. 50-54.
- 85 Касаткин, Б.С. Напряжения и деформации при сварке / Б.С.Касаткин, В.М.Прохоренко, И.М.Чертов.– Киев: Вища школа, 1987.– 246 с.
- 86 Качанов, Л.М. Основы теории пластичности / Л.М.Качанов.– М.: Наука, 1969.– 420 с.
- 87 Когаев, В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: справочник / В.П.Когаев, Н.А.Махутов, А.П.Гусенков.– М.: Машиностроение, 1985.– 230 с.
- 88 Комаров, С.Ю. Помехоустойчивый цифровой спекл-интерферометр для виброметрии объектов на основе метода усреднения во времени: дисс. ... канд. техн. наук / С.Ю.Комаров.– Самара, 2004.– 150 с.
- 89 Коновалов Д. А., Смирнов С.В. Определение кривых упрочнения металлов методом внедрения трех конических инденторов // <http://book.uraic.ru/project/conf/txt/008/2007>
- 90 Коновалов Д.А., Вичужанин Д.И., Смирнов С.В. Оценка остаточных напряжений методом внедрения индентора // Матем. моделирование и краев. задачи. 2005. № 1. С. 155–157.
- 91 Коновалов, Д.А. Разработка методики восстановления кривой деформационного упрочнения металлических материалов по диаграммам вдавливания конических инденторов : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2007. 21 с.

- 92 Константинов, А.Ю. Экспериментально-расчетное исследование поведения конструкционных материалов под действием динамических нагрузок : автореф. дисс. ... канд. техн. наук.–Нижний Новгород, 2007. 26 с.
- 93 Копельман, Л.А. Сопrotивляемость сварных узлов хрупкому разрушению / Л.А.Копельман.– М.: Машиностроение, 1978.– 232 с.
- 94 Кудрявцев, П.И. Остаточные сварочные напряжения и прочность сварных конструкций / П.И.Кудрявцев.– М.: Машиностроение, 1964.– 95 с.
- 95 Кудрявцев, Ю.Ф. Изменение предельных циклических напряжений под действием остаточных напряжений / Ю.Ф.Кудрявцев, П.П.Михеев // Конструкционная прочность и механика разрушения сварных соединений: материалы науч.-техн. семина.– Л., 1986.– С. 68-72.
- 96 Латыпов, Р.А. Выбор компактных и порошковых металлических материалов и управление качеством покрытий при упрочнении и восстановлении деталей электроконтактной приваркой: автореф. дис. ... докт. техн. наук.– М., 2007.– 48 с.
- 97 Лившиц, Л.Г. Восстановление автотракторных деталей / Л.Г.Лившиц, А.В.Поляченко.– М.: Колос, 1966.– 479 с.
- 98 Лобанов, Л.М. Оптические методы исследования напряженного состояния сварных соединений / Л.М.Лобанов // Надежность и долговечность машин и сооружений.– Киев, 1983.– № 3.– С. 68-75.
- 99 Лобанов, Л.М. Переносный голографический модуль для определения остаточных напряжений / Л.М.Лобанов, В.А.Пивторак, С.Г.Андрущенко // Остаточные технологические напряжения: труды 2 всесоюзн. симп.– М.: 1985.– С. 215-219.
- 100 Марковец, М.П. Определение механических свойств металлов по твердости / М.П.Марковец.– М.: Машиностроение, 1979.– 191 с.
- 101 Марочник сталей и сплавов / Волосникова А.В. и др.; под общ. ред. В.Г. Сорокина. М. : Машиностроение, 1989. 640 с.
- 102 Махутов, Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М. : Машиностроение, 1981. 272 с.
- 103 Машрабов Н., Игнатъев А.Г., Сучилин В.И. Свойства и характеристики поверхностного слоя при восстановлении деталей высокоскоростной аргонодуговой наплавкой // Вестник ЧГАА. 2010. Т.57. С. 115-121.
- 104 Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники.– М.: ВНИИЭСХ, 1998.– 220 с.
- 105 Механика контактных взаимодействий / под ред. И.И. Воровича и В.М. Александрова.- М.: Физматлит, 2001.- 673 с.
- 106 Молодык, Н.В. Восстановление деталей машин / Н.В.Молодык, А.С.Зенкин.– М.: Машиностроение, 1989.– 480 с.
- 107 Мордвинкин, В.А. Исследование поля напряжений поверхностного слоя при выглаживании / В.А.Мордвинкин, Б.С.Хомяк, В.В.Трепачев // Мех. деформир. тел. / Рост. н/Д ин-т с.-х. машиностр. (РИСХМ).– Ростов н/Д, 1990.– С. 108-111.

- 108 Налимов, В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В.Налимов, Н.А.Чернова.– М.: Наука, 1965.– 340 с.
- 109 Нафиков М.З. Обоснование технологических процессов и разработка технических средств восстановления автотракторных деталей электроконтактной наплавкой: автореф. дисс. ... докт. техн. наук.- Саранск, 2010.- 36 с.
- 110 Николаев, Г.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций / Г.А.Николаев, С.А.Куркин, В.А.Винокуров.– М.: Высшая школа, 1982.– 272 с.
- 111 Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник / Л.Г.Одинцов.– М.: Машиностроение, 1987.– 328 с.
- 112 Основы ремонта машин / под общ. ред. Ю.Н.Петрова.– М.: Колос, 1972.
- 113 Остаточные напряжения в профилях и способы их снижения / А.Н.Скороходов, Е.Г.Зудов, А.А.Киричков, Ю.П.Петренко.– М.: Metallургия, 1985.– 185 с.
- 114 Остаточные напряжения и методы регулирования: труды всесоюзн. симп.– М.: ИПМ АН СССР, 1982.– 412 с.
- 115 Остаточные напряжения: учеб. пособие / Ж.А.Мрочек, С.С.Макаревич, Л.М.Кожуро и др.– Минск: УП Технопринт, 2003.– 352 с.
- 116 Остаточные технологические напряжения: труды 2 всесоюзн. симп.– М.: ИПМ АН СССР, 1985.– 390 с.
- 117 Островский, Ю.И. Голографические интерференционные методы измерения деформаций / Ю.И.Островский, В.П.Щепинов, В.В.Яковлев.– М.: Наука, 1988.– 248 с.
- 118 Пат. 2032162 Российская Федерация, МПК6 G 01 N 3/00. Способ определения остаточных напряжений / заявитель Бякова А.В., Горбач В.Г. Власов А.А., Грушевский Я.Л.; патентообладатель Бякова А.В., – № 5004772/28; заявл. 11.10.91; опубл. 27.03.95. – 3 с.
- 119 Пат. 2145655 Российская Федерация, МПК7 E 02 D 1/00. Способ определения модуля деформаций / Алейников С.М.; заявитель и патентообладатель ВГА-СА, – № 98117270 /28; заявл. 15.09.98; опубл. 20.02.2000.
- 120 Пат. 2310183 Российская Федерация, МПК G 01 N 3/00. Способ определения остаточных напряжений / Бякова А.В., Мильман Ю.В., Власов А.А. и др.; заявитель и патентообладатель Ин-т проблем материаловедения им. И.Н.Францевича Нац. акад. наук Украины, – № 2005139811/28; заявл. 21.12.2005; опубл. 10.11.2007. – 3 с.
- 121 Пат. 2572670 Российская Федерация, МПК G01L1/06. Способ определения поверхностных остаточных напряжений / Игнатъев А.Г., Третьяков А.А.; заявитель Третьяков А.А.; патентообладатель Третьяков А.А., – № 2014131423/28; заявл. 29.07.2014; опубл. 20.01.2016. – 3 с.
- 122 Повышение ресурса работы деталей машин и инструмента созданием в них высоких сжимающих напряжений / Н.И.Кобаско, Б.И.Николин,

- А.Г.Драчинская и др. // Известия ВУЗов. Машиностроение.– 1987.– № 10.– С. 153-157.
- 123 Праведников И.С. Определение напряжений в пластически деформируемых деталях // Нефтегазовое дело. 2005.
- 124 Проников, А.С. Надежность машин / А.С.Проников.– М.: Машиностроение, 1978.– 592 с.
- 125 Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела: учеб. пособие / Ю.Н.Работнов.– М.: Наука, 1988.– 712 с.
- 126 РД ЭО 0027-2005. Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости.- Росэнергоатом, 2005. <http://www.fsetan.ru/library/doc/rd-eo-0027-2005-instruktsiya-po-opredeleniyu-mehnicheskikh-svoystv-metalla-oborudovaniya-atomnyih-stantsij-bezobraztsovyimi-metodami-po-harakteristikam-tverdosti/>
- 127 Ремонт машин / И.Е.Ульман, Г.А.Тонн, И.М.Герштейн и др.; под общ. ред. И.Е.Ульмана.– М.: Колос, 1982.
- 128 Сагалевич, В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В.М.Сагалевич.– М.: Машиностроение, 1974.– 248 с.
- 129 Сагалевич, В.М. Стабильность сварных соединений и конструкций / В.М.Сагалевич, В.Д.Савельев.– М.: Машиностроение, 1986.– 264 с.
- 130 Сайфуллин, Р.Н. Свойства покрытий, полученных электроконтактной приваркой присадочных материалов из стальных лент / Р.Н. Сайфуллин, М.Н. Фархшатов и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 3 (111). – С. 13–16.
- 131 Сидоров, А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А.И.Сидоров.– М.: Машиностроение, 1987.
- 132 Смирнов С.В., Экземплярова Е.О. Учет различных факторов при моделировании внедрения конического индентора в упругопластический материал / Ресурс и диагностика материалов и конструкций: мат-лы IV Рос. науч.-техн. конф.- Екатеринбург, 2009.
- 133 Смирнов, С.В. Определение сопротивления деформации по результатам внедрения конического индентора / Смирнов В.К., Солошенко А.Н., Швейкин В.П. // Кузнечно-штамповочное производство, 2000, №8.С. 3 – 6.
- 134 Смирнова, Е.О. Определение диаграмм деформационного упрочнения поверхностных слоев металлических материалов по результатам испытаний на вдавливание и царапание индентором Берковича : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2011. 22 с.
- 135 Соколов, И.А. Остаточные напряжения и качество металлопродукции / И.А.Соколов, В.И.Уральский.– М.: Металлургия, 1981.– 96 с.
- 136 Соломкин, А. П. Восстановление изношенных деталей сельхозтехники / Соломкин А.П., Комаренко П.А., Бабушкин В.А. – URL: <http://www.tspsc.ru/about/lit/agrotechprotection> (дата обращения: 10.11.2010)

- 137 Стеклов, О.И. Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
- 138 Степнов, М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний: справочник / М.Н.Степнов.– М.: Машиностроение, 1985.– 232 с.
- 139 Схиртладзе, А.Г. Расчет эффективности восстановления изношенных деталей / А.Г.Схиртладзе.– Ремонт, восстановление, модернизация.– 2004.– № 2.– С. 2-4.
- 140 Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве: учеб. пособие / В.И.Черноиванов, В.В.Бледных, А.Э.Северный и др.; под ред. В.И.Черноиванова.– М.: Челябинск: ГОСНИТИ, ЧГАУ, 2003.– 992 с.
- 141 Технологические основы обеспечения качества машин / под общ. ред. К.С.Колесникова.– М.: Машиностроение, 1990.– 256 с.
- 142 Технология ремонта машин: учебник / Е.А.Пучин, В.С.Новиков и др.; под ред. проф. Е.А.Пучина.– М.: «КолосС», 2007.– 488 с.
- 143 Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П.Тимошенко, Дж.Гудьер.– М.: Наука, 1979.– 560 с.
- 144 Третьяков, А.А. Влияние усилия вдавливания и свойств материала на геометрические параметры наплыва при вдавливании конического индентора // Фундаментальные исследования. 2013. № 11 (часть 5). С. 905-909.
- 145 Третьяков, А.А. Влияние усилия вдавливания конуса в поверхность упруго-пластического тела и механических свойств материала детали на диаметр отпечатка // Вестник Совета молодых учёных и специалистов Челябинской области. – 2013. - № 1; URL: <http://www.smus74.ru/content/vypusk-1> (дата обращения: 27.11.2013).
- 146 Третьяков, А.А. Влияние усилия вдавливания конуса в поверхность упруго-пластического тела и механических свойств материала детали на распределение нормальных перемещений в наплыве // Научный взгляд на современный этап развития общественных, технических, гуманитарных и естественных наук, актуальные проблемы: материалы всероссийской научно-практической конференции. – С-Пб.: ИПМ, 2014.
- 147 Третьяков, А.А. Исследование остаточных напряжений в восстановленных деталях / А.А.Третьяков, А.Ф.Фаюршин, Р.Р.Хакимов, И.И.Багаутдинова.– Ремонт, восстановление, модернизация. 2016. №1. Наука и технологии (Москва). С. 39-44.
- 148 Третьяков, А.А. Исследование профиля наплыва при вдавливании конического индентора в плоскую поверхность упругопластического тела // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. URL: <http://www.science-education.ru/113-10793> (дата обращения: 15.11.2013).
- 149 Третьяков, А.А. Метод измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях // Ремонт. Восстановление. Реновация: материалы VI всероссийской научно-практической конференции. –Уфа, 2015
- 150 Третьяков, А.А. Моделирование задачи о вдавливании конуса в поверхность упруго-пластического тела и влияние остаточных напряжений на распреде-

- ление нормальных перемещений в наплыве // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки.– 2014.– №7/8
- 151 Третьяков, А.А. Применение конического индентора для исследования напряженно-деформированного состояния // Вестник Совета молодых учёных и специалистов Челябинской области. – 2014. - № 3; URL: <http://www.smus74.ru/content/vypusk-3> (дата обращения: 16.09.2014).
- 152 Третьяков, А.А. Применение конического индентора при измерении остаточных напряжений в восстановленных деталях // Сварка. Реновация. Триботехника. тезисы докладов VII Уральской научно-практической конференции. – Нижний Тагил, 2015
- 153 Третьяков, А.А. Учет различных факторов при моделировании задачи о вдавливании конуса в поверхность упругопластического тела // Вестник Совета молодых учёных и специалистов Челябинской области. – 2014. - № 2; URL: <http://www.smus74.ru/content/vypusk-2>(дата обращения: 13.08.2014).
- 154 Усталостные испытания материалов и конструкций с использованием современного оборудования / А.В. Ерпалов, Л.А. Шефер, Е.Е. Рихтер, П.А. Тараненко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2015. – Т. 15. – № 2. – С. 70–80.
- 155 Фархшатов, М.Н. Определение остаточных напряжений покрытий, нанесенных электроконтактной приваркой ленты из коррозионно-стойких сталей / М.Н. Фархшатов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2006. – № 10–2 (60). – С. 403–409.
- 156 Фархшатов, М.Н. Ресурсосберегающие технологии восстановления деталей сельскохозяйственных машин и оборудования электроконтактной приваркой коррозионностойких и износостойких материалов: автореф. дисс. ... докт. техн. наук.- Саранск, 2007.- 31 с.
- 157 Филин, А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела / А.П.Филин.– М.: Наука, 1975.– Т. 1.– 832 с.
- 158 Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов. Монография. – М.: Машиностроение, 1972. – 472 с.
- 159 Хворостухин, Л.А. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Л.А.Хворостухин, С.В.Шишкин, А.П.Ковалев, Р.А.Ишмаков.– М.: Машиностроение, 1988.– 144 с.
- 160 Черноиванов, В.И. Восстановление деталей машин / В.И.Черноиванов.– М.: ГОСНИТИ, 1995.
- 161 Черноиванов, В.И. Восстановление деталей сельскохозяйственных машин / В.И.Черноиванов, В.П.Андреев.– М.: Колос, 1983.
- 162 Чернятин, А.С. Метод индентирования, как способ комплексной оценки состояния технических объектов / МИКМУС-2014: мат-лы XXVI междунар. иннов.-ориентированной конф. молодых учёных и студентов.- М.: ИМАШ РАН, 2015.- С. 4-7.

- 163 Шакиров, А.А. Работоспособность нахлесточных клеемеханических соединений при циклическом растяжении-сжатии / А.А. Шакиров, С.Б. Сапожников, С.В. Словиков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2015. – Т. 15. – № 4. – С. 70–79. doi: 10.14529/engin150408.
- 164 Штерн, М.Б. Влияние реологических особенностей поведения пористых поврежденных материалов на результаты их индентирования / Кузьмов А.В. // Вестник машиностроения.– 2012.– 66. 8 с.
- 165 Щепинов, В.П. Когерентно-оптические методы исследования деформаций и напряжений моделей и элементов конструкций ЯЭУ: дисс. ... докт. техн. наук / В.П.Щепинов.– М., 2004.– 350 с.
- 166 Щиголев, Б.М. Математическая обработка наблюдений / Б.М.Щиголев.– М.: Наука, 1969.– 344 с.
- 167 Экспериментальная механика: в 2-х кн. / под ред. А.Кобаяси.– М.: Мир, 1990.– Кн. 2.– 552 с.
- 168 Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Ф.Х.Бурумкулов, П.П.Лезин, П.В.Сенин и др.– Саранск, Изд-во «Красный Октябрь», 2003.– 504 с.
- 169 Ящерицын, П.И. Определение остаточных напряжений по микротвердости в наклепанном от накатки роликом слое / П.И.Ящерицын, В.А.Колот // Вестн АН БССР, сер. физ.-техн. н.– 1984.– № 3.– С. 41-44.
- 170 Abu Al-Rub, R.K. Prediction of micro and nanoindentation size effect from conical or pyramidal indentation // *Mechanics of Materials*. - 2007. – Vol. 39, Issue 8. – pp. 787-802.
- 171 *Advances in surface Treatment: technology, applications, effects*. Vol. 4. Residual stresses / Ed. A.Niku-Lari.– Oxford: Pergamon press, 1987.– 566 p.
- 172 Albertazzi, A. A radial in-plane DSPI interferometer using diffractive optics for residual stress measurement / Viotti, M.R., Kapp, W.A. // *Proceedings Volume 7155, Ninth International Symposium on Laser Metrology*. – 2008.
- 173 Alcala, J. The influence of plastic hardening on surface deformation modes around Vickers and spherical indents / Barone, A.C. // *Acta Materialia*. – 2000. – Vol. 48, Issue 13. – pp. 3451-3464.
- 174 Alkorta, J. Absence of one-to-one correspondence between elastoplastic properties and sharp-indentation load-penetration data / Martínéz-Esnoala, J.M., Gil Sevillano, J.// *J. Mater. Res.* – 2005. – Vol. 20, Issue 2. – pp. 432-437.
- 175 Antunes, J.M. A new approach for reverse analyses in depth-sensing indentation using numerical simulation / Fernandes, J.V., Menezes, L.F., Chaparro, B.M. // *Acta Materialia*. – 2007. – Vol. 55. –pp. 69–81.
- 176 Antunes, J.M. Three-dimensional numerical simulation of Vickers indentation tests / Menezes, L.F., Fernandes, J.V. // *International Journal of Solids and Structures*. – 2006. – Vol. 43, Issues 3-4. – pp. 784-806.
- 177 Bellow, D.G. Residual stresses and fatigue of surface treated welded specimens / D.G.Bellow, N.Wahab, M.G.Faulkner // *Adv. In Surface Treat.: Technol. Appl. Eff.*– 1986.– Vol. 2.– P. 85-94.

- 178 Bijak-Zochowski, M. Investigation of the distribution of residual stress inside the material by penetration method / M.Bijak-Zochowski // Proc. 5 Int. Congr. Exp. Mech., Montreal, June 10-15, 1984.– Brookfield Center, Conn., 1984.– P. 63-70.
- 179 Bijak-Zochowski, M. Nieniszczace metody badania napreren wlasnych / M.Bijak-Zochowski.– Prace Naukowe, Mechanica. z.54. Warszawa, 1976.– 98 p.
- 180 Bijak-Zochowski, M. Nondestructive investigation of residual stress in hardened surface layers / M.Bijak-Zochowski // Arch. bud. masz.– 1993.– 40, № 1.– P. 29-53.
- 181 Bisrat, Y. Residual stress measurement by hertzian indentation / Y.Bisrat, S.G.Roberts // Mat. Sci. & Eng.– 2000.– A288.– P. 148-153.
- 182 Bolshakov A.O. A finite element study of the effects of residual stress on conical indentation: thesis... degree master of science.- Houston, Texas, 1993. 103 p.
- 183 Cao, Y.P. A new scheme for computational modeling of conical indentation in plastically graded materials / Lu, J. // Journal of Materials Research. – 2004. – Vol. 19. – pp. 1703–1716.
- 184 Celentano, D. Numerical simulation and experimental validation of the microindentation test applied to bulk elastoplastic materials / Guelorget, B. // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering.– 2012.– 20.
- 185 Chen, X. A combined inverse finite element – elastoplastic modelling method to simulate the size-effect in nanoindentation and characterise materials from the nano to micro-scale / Ashcroft, I.A., Wildman, R.D., Tuck, C.J. // International Journal of Solids and Structures. – 2017. – Vol. 104-105. – pp. 25-34.
- 186 Chen, X. On the determination of residual stress and mechanical properties by indentation / Yan, J., Karlsson, A.M. // Materials Science and Engineering: A. – 2006. – Vol. 416, Issue 1-2 - pp. 139–149.
- 187 Cheng, Y.T. Can stress-strain relationships be obtained from indentation curves using conical and pyramidal indenters? / Cheng, C.M. // J. Mater. Res. – 1999. –Vol. 14, Issue 9. – pp. 3493-3496.
- 188 Cheng, Y.T. Hardness obtained from conical indentations with various cone angles / Li, Z. // J. Mater. Res. – 2000. – Vol. 15. – pp. 2830–2835.
- 189 Cheng, Y.T. Scaling relationships in conical indentation of elastic perfectly plastic solids / Cheng, C.M. // International Journal of Solids and Structures. - 1999. – Vol. 36, Issue 8. - pp. 1231–1243.
- 190 Cheng, Y.-T. Scaling, dimensional analysis, and indentation measurements / Cheng, C. // Materials Science and Engineering R. – 2004. – Vol. 44, Issues 4-5. – pp. 91–149.
- 191 Choi, I.S. Mechanics of indentation of plastically graded materials / Dao, M., Suresh, S. // Journal of the Mechanics and Physics of Solids.– 2008.– 56.
- 192 Doval A.F. A systematic approach to TV holography // Meas. Sci. Technol. 2000. № 11. P. R1-R36.

- 193 Elmustafa, A.A. Nanoindentation and the indentation size effect: Kinetics of deformation and strain gradient plasticity / Stone, D.S. // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2003. – Vol. 51, Issue 2. – pp. 357-381.
- 194 Futakawa, M. Stress-strain relationship evaluated by load-depth curve obtained from indentation technique / Ioka I. // Japan Atomic Energy Research Institute.– 2001; URL: <http://www.ndt.net/apcndt2001/papers/976/976.htm>
- 195 Ge, L. Material property identification and sensitivity analysis using micro-indentation / Kim, N.H., Bourne, G.R., Sawyer, W.G. // *Journal of Tribology*. – 2009. – Vol. 131, Issue 3.
- 196 Gryzagoridis, J. Residual Stress Determination and Defect Detection Using Electronic Speckle Pattern Interferometry / J.Gryzagoridis, D.Findeis, R.B.Tait.– www.ndt.uct.ac.za/Papers/bindt2004.pdf
- 197 Guelorget, B. Extracting the plastic properties of metal materials from microindentation tests: Experimental comparison of recently published methods / François, M // *Journal of Materials Research*. - 2007. – Vol. 22, Issue 6. – pp. 1512-1519.
- 198 Handbook of Measurement of Residual Stresses / eds. M.James, J.Lu, G.Roy.– Society for Experimental Mechanics, GA, USA, 1996.
- 199 Hardy, C. Elastoplastic indentation of a half-space by a rigid sphere / C.Hardy, C.N.Baronet, G.V.Tordion // *J. Numerical Methods in Engng.*– 1971.– № 3.– P. 451.
- 200 Harsono, E. Numerical and experimental indentation tests considering size effects / Swaddiwudhipong, S., Liu, Z.S., Shen, L. // *International Journal of Solids and Structures*. – 2011. – Vol. 48, Issue 6. – pp. 972-978.
- 201 Heinrich, C. Determination of material properties using nanoindentation and multiple indenter tips / Waas, A.M., Wineman, A.S. // *International Journal of Solids and Structures*. – 2009. - Vol. 46, Issue 2. - pp. 364–376.
- 202 Hernot, X. An expanding cavity model incorporating pile-up and sink-in effects / Bartier O. // *Journal of Materials Research*.– 2012. 27, Issue 01. pp 132-140
- 203 Husain, A. Small punch and indentation tests for structural health monitoring / Sharma, R., Sehgal, D.K. // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 173. – pp. 710-717.
- 204 Hyun, H.C. A conical indentation technique based on FEA solutions for property evaluation / Kim, M., Lee, J.H., Lee, H. // *Trans. KSME A*. - 2009. – Vol. 33, Issue 9. - pp. 859–869.
- 205 Ignatiev A.G., Erofeev V.V., Tretyakov A.A. Residual Stress Measurements Using Elasto-plastic Indentation and ESPI / *Materials Science Forum*, Vol. 843 (2016), pp. 161-166.
- 206 International Conference on Residual Stresses (ICRS2): Proc. 2nd Int. Conf., Nancy. 23–25 Nov., 1988 / London, New York: Elsevier Appl. Sci., 1989.– XXIII, 1020 p.
- 207 Jackson, R. A finite element study of the residual stress and deformation in hemispherical contacts / R.Jackson, I.Chusoipin, I.Green // *J. of Tribology*.– 2005.– v.127, № 7.– P. 484-493.

- 208 Jin, H. Determination of residual stresses and material properties by an energy-based method using artificial neural networks / Yang, W., Yan, L. // Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. – 2012. – Vol. 61, Issue 4. – pp. 296-305.
- 209 Kim, K. Residual stress measurement on the butt-welded area by electronic speckle pattern interferometry / Choi, T., Na, M.G., Jung, H. // Nuclear Engineering and Technology. - 2015. – Vol. 47, Issue 1. – pp. 115-125.
- 210 Lee, J.H. A numerical approach and experimental verification of the indentation techniques for material property and residual stress evaluation. Doctor's thesis. Seoul, Korea, 2006.
- 211 Lee, J.H. A numerical approach to evaluation of elastic modulus using conical indenter with finite tip radius / Lee, H., Kim, D.H. // J. Mater. Res. – 2005. – Vol. 23, Issue 2. – pp. 2528–2537.
- 212 Lee, J.H. A study on robust indentation techniques to evaluate elastic–plastic properties of metals / Kim, T., Lee, K. // International Journal of Solids and Structures. – 2010. – Vol. 47, Issue 5. – pp. 647-664.
- 213 Lee, Y.H. Measurement of residual-stress by nanoindentation on elastically strained (100) W / Kwon, D. // Scripta Materialia. - 2003. – Vol. 49, Issue 5. – pp. 459–465.
- 214 Lin, S.T. Two holographic blind-hole methods for measuring residual stresses / S.T.Lin, C.T.Hsieh, C.P.Hu // Exp. Mech.– 1994.– 34, № 2.– P. 141–147.
- 215 Lord, J. Hole Drilling Techniques / J.Lord / The NPL Materials Centre.– BCA Structural Materials Workshop, 2000.
- 216 Lothhammer, L.R. Residual stress measurements in steel pipes using DSPI and the hole-drilling technique / Viotti, M.R., Albertazzi, A., Veiga, C. // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2017. – Vol. 152. – pp. 46-55.
- 217 Makino, A. Residual-stress determination by single-axis holographic interferometry and hole drilling. Pt. 1 / A.Makino, D.Nelson // Exp. Mech.– 1994.– 34, № 1.– P. 66-78.
- 218 Marshall, D.B. An indentation method for measuring residual stresses in fiber-reinforced ceramic / D.B.Marshall, W.C.Oliver // Mater. Sci. and Eng. A.– 1990.– 126.– P. 95-103.
- 219 Nelson, D.V. Residual-stress determination through combined use of holographic interferometry and blind-hole drilling / D.V.Nelson, J.T.McCrickerd // Exp. Mech.– 1986.– 26.– № 4.– P. 371-378.
- 220 Oliver, W.C. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / Pharr, G.M. // Journal of Materials Research. - 2004. – Vol. 19, Issue 1. – pp. 3-20.
- 221 Ouyang, C. Cylindrical nano-indentation on metal film/elastic substrate system with discrete dislocation plasticity analysis: A simple model for nano-indentation size effect / Li, Z., Huang, M., Fan, H. // International Journal of Solids and Structures. – 2010. – Vol. 47, Issues 22-23. – pp. 3103-3114.

- 222 Poon, B. An analysis of nanoindentation in elasto-plastic solids / Rittel, D., Ravichandran, G. // *International Journal of Solids and Structures*. – 2008. – Vol. 45, Issues 25-26. – pp. 6399-6415.
- 223 Poon, B. An analysis of nanoindentation in linearly elastic solids / Rittel, D., Ravichandran, G. // *International Journal of Solids and Structures*. – 2008. – Vol. 45, Issues 24. – pp. 6018-6033.
- 224 Residual stress effects in fatigue of welded joints / Sarkaki Shahram, Lutes Loren D. // *J. Struct. Eng.*– 1988.– 114, № 2.– P. 462-474.
- 225 Rickert, T. Residual Stress Measurement by ESPI Hole-Drilling // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 45. – pp. 203-206.
- 226 Sameur, A. A simple model for elastic and viscoelastic punch indentation problems with experimental validation / Yin, H., Duhamel, D., Vilke, V. // *Cornell University Library*. – 2008; URL: <https://arxiv.org/abs/0802.0241>.
- 227 Šandera, P. Modeling Load-displacement Curve and Pop-in Effect in Nanoindentation Tests / Pokluda, J., Schöberl, T., Horníková, J., Černý, M. // *Procedia Materials Science*. – 2014. – Vol. 3. – pp. 1111-1116.
- 228 Schmitt, D.R. Inversion of Speckle Interferometer Fringes for Hole-drilling Residual Stress Determinations / D.R.Schmitt, R.W.Hunt // *Exp. Mech.*– 2000.– v. 40.– № 2.
- 229 Schöberl T. Do we measure theoretical strength by instrumented indentation? // *ESIS TC2 Meeting, Oxford*. – 2012; URL: <http://energy.materials.ox.ac.uk/uploads/ESIS%20TC2%20Workshop%202012/Presentations/Schöberl%20Measure%20of%20theoretical%20strength.pdf>.
- 230 Sirohi, R.S. Speckle interferometry / R.S.Sirohi // *Contemporary Physics*.– 2002.– v. 43.– № 3.– P. 161-180.
- 231 Steinzig, M. Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry: part 1 / M.Steinzig, E.Ponslet // *Exp. Tech.*– May/June 2003.– P. 43-46.
- 232 Suterio, R. Residual stress measurement using indentation and a radial in-plane ESPI interferometer / Albertazzi, A., Amaral, F.K., Pacheco, A. // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. – 2005. - Proc. SPIE 5776.
- 233 Swadener, J.G. The correlation of the indentation size effect measured with indenters of various shapes / George, E.P., Pharr, G.M. // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2002. – Vol. 50. - no. 4. – pp. 681-694.
- 234 Tho, K.K. Numerical simulation of indentation with size effect / Swadidwudhipong, S., Hua, J., Liu, Z.S., // *Materials Science and Engineering: A*- 2006. – 421 (1-2). pp. 268-275.
- 235 Underwood, J.H. Residual-stress measurement using surface displacement around an indentation / J.H.Underwood // *Exp. Mech.*– 1973.– № 9.– P. 373-380.
- 236 Viotti, M.R. Accuracy and sensitivity of a hole drilling and digital speckle pattern interferometry combined technique to measure residual stresses / M.R.Viotti,

- G.H.Kaufmann // Optics and Laser Eng.– 2004.– v. 41, № 2.– P. 297-305.
- 237 Viotti, M.R. Radial in-plane digital speckle pattern interferometer combined with instrumented indentation / Albertazzi, A., Bonomo, D., Fontana, F. // Optics and Lasers in Engineering. – 2015. – Vol. 71. – pp. 1-8.
- 238 Woirgard, J. Some results on the indentation of an elastic half space // Philosophical Magazine. – 2006. – Vol. 86, Issues 33–35. – pp. 5199–5217.
- 239 Xu, Z. H. Estimation of residual stresses from elastic recovery of nanoindentation / Li, X. // Philosophical Magazine. – 2006. – Vol. 86. – pp. 2835–2846.
- 240 Yan, J. Determining equi-biaxial residual stress and mechanical properties from the force-displacement curves of conical microindentation / Chen, X., Karlsson, A. M. // J. Eng. Mater. Technol. – 2007. – Vol. 129, Issue 2. – pp. 200–206.
- 241 Yan, J. Determining plastic properties of a material with residual stress by using conical indentation / Karlsson, A.M., Chen, X. // International Journal of Solids and Structures. – 2007. – Vol. 44, Issues 11-12. – pp. 3720–3737.
- 242 Yan, J. On internal cone cracks induced by conical indentation in brittle materials / Karlsson, A.M., Chen, X. // Engineering Fracture Mechanics. – 2007. – Vol. 74, Issue 16. – pp. 2535-2546.

ПРИЛОЖЕНИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2572670

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Патентообладатель(ли): *Третьяков Андрей Алексеевич (RU)*

Автор(ы): *Игнатъев Андрей Геннадьевич (RU), Третьяков Андрей Алексеевич (RU)*

Заявка № 2014131423

Приоритет изобретения 29 июля 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 14 декабря 2015 г.

Срок действия патента истекает 29 июля 2034 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Изrael



«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор

ФГБОУ ВПО «Башкирский ГАУ»



М.Н. Фархшатов

2015 г.

СПРАВКА

об использовании результатов научно-исследовательской работы
«Измерение остаточных напряжений в деталях,
восстановленных по технологии одновременной
электроконтактной наплавки двух проволок»

Комиссия в составе представителей ФГБОУ ВПО «Башкирский ГАУ» д.т.н., профессора Нафикова М.З., к.т.н., доцента Загирова И.И., аспиранта Нуртдинова Д.М. и представителей ФГБОУ ВПО «Челябинская ГАА» д.т.н., доцента Игнатъева А.Г., аспиранта Третьякова А.А. составила настоящую справку об использовании результатов НИР по измерению остаточных напряжений в деталях, восстановленных по технологии одновременной электроконтактной наплавки двух проволок.

Остаточные напряжения в поверхностном слое образцов измерены разработанным в Челябинской государственной агроинженерной академии методом, основанным на использовании упругопластического контактного взаимодействия. Используются технологические варианты метода с вдавливанием шарового индентора диаметром 10 мм и конического индентора с углом раскрытия 120°.

Получены данные о величинах поверхностных остаточных напряжений при восстановлении деталей с/х техники с использованием новой технологии электроконтактной наплавки двух проволок, разработанной в Башкирском государственном аграрном университете.

Использование полученных результатов подтвердило перспективность новой технологии восстановления деталей электроконтактной наплавки двух

проволок. Результаты НИР позволили разработать ресурсосберегающую технологию восстановления деталей сельскохозяйственной техники электроконтактной наплавкой двух проволок, дали возможность эффективно применять технологию на ремонтных предприятиях АПК Республики Башкортостан.

Результаты исследований используются в опытно-технологических работах, проводимых Башкирским государственным аграрным университетом, при разработке и совершенствовании технологий восстановления деталей, а также в учебном процессе.

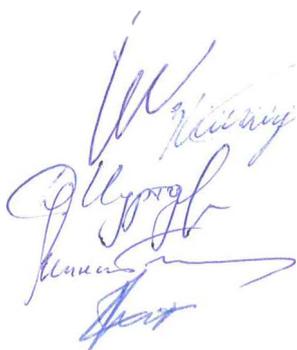
Д.т.н., профессор

К.т.н., доцент

Аспирант

Д.т.н., доцент

Аспирант



Нафиков М.З.

Загиров И.И.

Нуртдинов Д.М.

Игнатъев А.Г.

Третьяков А.А.

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной и инновационной
деятельности ФГБОУ ВО

Башкирский государственный
аграрный университет



Р.Х. Авзалов

2016 г.

АКТ

внедрения результатов научно-исследовательской работы
«Измерение остаточных напряжений в деталях,
восстановленных по технологии электроконтактной приварки
многослойной металлической сетки и комбинированной присадки»

Комиссия в составе представителей Башкирского государственного аграрного университета д.т.н., профессора Фархшатов М.Н., инженера Коннова А.Ю. и представителей Южно-Уральского государственного аграрного университета д.т.н., доцента Игнатъева А.Г., ассистента Третьякова А.А. составила настоящий акт внедрения результатов НИР по измерению остаточных напряжений в деталях, восстановленных по технологии электроконтактной приварки многослойной металлической сетки и комбинированной присадки.

Остаточные напряжения в поверхностном слое образцов измерены разработанным в Южно-Уральском государственном аграрном университете методом, основанным на использовании упругопластического контактного взаимодействия. Используются технологические варианты метода с вдавливанием шарового индентора диаметром 10 мм и конического индентора с углом раскрытия 120°.

Получены данные о величинах поверхностных остаточных напряжений при восстановлении деталей оборудования перерабатывающих предприятий АПК с использованием новой технологии электроконтактной приварки много-

слойной металлической сетки и комбинированной присадки, разработанной в Башкирском государственном аграрном университете.

Использование полученных результатов подтвердило перспективность новой технологии восстановления деталей электроконтактной приваркой многослойной металлической сетки и комбинированной присадки. Результаты НИР позволили разработать ресурсосберегающую технологию восстановления деталей оборудования перерабатывающих предприятий АПК электроконтактной приваркой многослойной металлической сетки и комбинированной присадки, дали возможность эффективно применять технологию на ремонтных предприятиях АПК Республики Башкортостан.

Результаты исследований используются в опытно-технологических работах, проводимых Башкирским государственным аграрным университетом, при разработке и совершенствовании технологий восстановления деталей, а также в учебном процессе.

Д.т.н., профессор

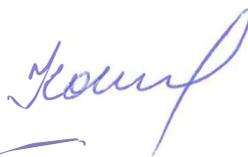
Инженер кафедры ТМ и РМ

Д.т.н., доцент

Ассистент



Фархшатов М.Н.



Коннов А.Ю.



Игнатъев А.Г.



Третьяков А.А.

таллической сетки. Результаты НИР позволили разработать ресурсосберегающую технологию восстановления деталей оборудования перерабатывающих предприятий АПК электроконтактной приваркой металлической сетки, дали возможность эффективно применять технологию на ремонтных предприятиях АПК Республики Башкортостан.

Результаты исследований используются в опытно-технологических работах, проводимых ПКФ «Ресурс», при разработке и совершенствовании технологий восстановления деталей

Заместитель директора

Инженер

Д.т.н., доцент

Ассистент



Рустумханов Р.Ф.

Коннов А.Ю.

Игнатъев А.Г.

Третьяков А.А.


«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по научной и инновационной
деятельности Башкирского государственного аграрного университета

_____ Асылбаев И.Г.

« » _____ 2013 г.

АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской работы «Изменение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей, восстановленных электроконтактной наплавкой проволоки»

Комиссия в составе представителей Башкирского государственного аграрного университета д.т.н., профессора Фархшатов М.Н., д.т.н., доцента Нафикова М.З., к.т.н., доцента Загирова И.И. и представителей Челябинской государственной агроинженерной академии д.т.н., доцента Игнатъева А.Г., аспиранта Третьякова А.А. составила настоящий акт о внедрении результатов НИР по измерению остаточных напряжений в деталях, восстановленных электроконтактной наплавкой проволоки.

Остаточные напряжения в поверхностном слое наплавленных образцов измерены разработанным в Челябинской государственной агроинженерной академии методом, основанным на использовании упругопластического контактного взаимодействия. Используются два технологических варианта метода: 1) вдавливание шарового индентора, 2) вдавливание конического индентора с углом раскрытия 120°.

В процессе внедрения получены данные о величинах поверхностных остаточных напряжений при восстановлении деталей с/х техники электроконтактной наплавкой проволоки.

Полученные результаты использовались при разработке ресурсосберегающих технологий восстановления деталей сельскохозяйственной техники электроконтактной наплавкой проволоки, эффективно применяемых на ряде ремонтных предприятий АПК Республики Башкортостан. Результаты исследований используются в опытно-технологических работах, проводимых Башкирским государственным аграрным университетом, при разработке и совершенствовании технологий восстановления деталей, а также в учебном процессе.

Д.т.н., профессор



Фархшатов М.Н.

Д.т.н., доцент



Нафиков М.З.

К.т.н., доцент



Загиров И.И.

Д.т.н., доцент



Игнатъев А.Г.

Аспирант



Третьяков А.А.