

На правах рукописи

УДК 621.01:621.793:539.4.014.13

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2018

Работа выполнена на кафедре «Техническая механика» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: А.Г. Игнатьев – доктор технических наук, доцент ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: Р.Н. Сайфуллин – доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет»
Г.В. Шимов – кандидат технических наук, доцент ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Ведущая организация: Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь

Защита диссертации состоится «__» _____ 2018 г., в __⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: 454080 г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001 гл. корп.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на его официальном сайте <http://susu.ac.ru/>.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.298.09.

E-mail: D212.98.09@mail.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Лазарев Е. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Остаточные напряжения в деталях машин могут возникать как следствие разнообразных явлений, обусловленных тем или иным технологическим процессом. Имеется значительный объем данных об их влиянии на прочность, работоспособность, долговечность деталей, которое может быть как отрицательным, так и положительным. Негативное влияние в большинстве случаев оказывают растягивающие поверхностные остаточные напряжения.

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, Б.С. Касаткин, Н.А. Махутов, Г.А. Николаев, Н.О. Окерблом, Н.Н. Прохоров, А.Г. Игнатьев и др.

Задача определения остаточных напряжений особенно актуальна при разработке и совершенствовании технологий восстановления деталей машин. 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.

Анализ современной практики восстановления деталей показывает, что остаточные напряжения зачастую не учитываются или учитываются в недостаточной степени при разработке и совершенствовании технологий восстановления. В первую очередь это связано с недостаточным развитием методов и технических средств измерения.

К основным недостаткам методов, получивших широкое распространение, можно отнести:

- трудоемкость;
- высокий уровень воздействия на деталь;

- низкая оперативность, вызванная сложностью обработки результатов и значительным количеством времени проведения одного измерения;
- ограничения применимости методов, связанных с твердостью, применимость для конкретных деталей или узкого диапазона материалов;
- высокие требования к однородности материала;
- чувствительность к механическим характеристикам материала, микроструктуре, напряжениям не только I, но также II и III рода, потребность в тонком тарировании.

Остаточные напряжения являются основной причиной снижения усталостной прочности восстановленных деталей на 35-50% по сравнению с новой. Поэтому получение данных о поверхностных остаточных напряжениях, возникающих при применении той или иной технологии восстановления, служит значительным потенциалом повышения их ресурса за счет обоснованного и целенаправленного управления технологиями восстановления.

Таким образом, одной из наиболее значимых задач в проблеме оценки технического состояния изготовленных или восстановленных деталей с целью повышения долговечности является измерение остаточных напряжений. В этом аспекте актуальным является решение задачи разработки методов определения остаточных напряжений, позволяющих оперативно получать необходимый объем данных.

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

Задачи исследования:

- 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

- разработать численные модели для расчета геометрических параметров отпечатка при упругопластическом контактном взаимодействии конического индентора и контртела;

- выявить основные закономерности влияния остаточных напряжений на геометрические параметры отпечатка при упругопластическом вдавливании конического индентора с учетом степени воздействия и механических свойств материала и на базе этих закономерностей установить возможность измерения остаточных напряжений;

- на основе упругопластического вдавливания конического индентора и оптической регистрации деформированного состояния поверхности вокруг отпечатка разработать технологию измерения остаточных напряжений в деталях;

- провести апробацию и оценить эффективность применения метода для повышения долговечности восстановленных деталей.

Методология и методы исследования. При проведении диссертационного исследования была смоделирована задача о контактном взаимодействии жесткого конуса и упругопластического контртела методом конечных элементов. Верификация контактного алгоритма осуществлялась на основе качественного и количественного сопоставления результатов решения задачи о сосредоточенной силе в упругой и пластичной области с полученной математической моделью. Регистрация деформированного состояния поверхности при экспериментальном исследовании проводилась на основе метода электронной спекл-интерферометрии. При построении модели и обработки полученных результатов численного экспериментального исследования использованы программные пакеты Ansys, Abaqus, SigmaPlot и Excel.

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

Реализация работы. 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 цилиндрических деталей машин. Внедрение результатов исследований подтверждено Актами внедрения ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» и ПКФ «Ресурс» (Республика Башкортостан).

На защиту выносятся.

Положения научной новизны, практической значимости, а так же результаты и выводы по работе.

Степень достоверности результатов. Достоверность научных положений работы, подтверждена сравнением результатов численного моделирования и экспериментальных исследований. Расхождение полученных результатов не превышает 8...10%.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на научных конференциях:

- «Достижения науки – агропромышленному производству» (г. Челябинск, ЧГАА, ЧГАА-ЮУрГАУ, 2013-2016 гг.);
- «Ремонт. Восстановление. Реновация» (г. Уфа, БашГАУ, 2014 г.);
- «Сварка. Реновация. Триботехника» (г. Нижний Тагил, 2015 г.);
- International Conference on Industrial Engineering ICIE-2015 (г. Челябинск, 2015);

Публикации. По теме диссертации опубликовано 27 научных работ, из них 6 в журналах, рекомендованных ВАК, 1 в издании, входящем в базу данных Scopus, получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 153 страницах и включает в себя 20 таблиц, 52 рисунка. Работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, библиографического списка из 242 наименований и приложений.

Работа соответствует четвертому пункту заявленной специальности: «Методы исследования и оценки технического состояния объектов машиностроения, в том числе на основе компьютерного моделирования». В качестве объектов машиностроения рассмотрены высоконагруженные цилиндрические детали, в том числе валы и оси.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность, научная новина и краткая характеристика работы, сформулированы цель и задачи исследований, а также основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса. Цель и задачи исследования» проведен анализ существующих разработок по теме диссертации, выявлены наиболее близкие технические решения по измерению остаточных напряжений, рассмотрены основные направления применения конического индентора при исследовании напряженно-деформированного состояния тела, обозначены достоинства и недостатки.

На сегодняшний момент накоплено немало информации о механизмах образования, способах получения данных об остаточных напряжениях, их распределении и влиянии на долговечность восстановленных деталей. И в принципе проблема имеет решение, при использовании сферического индентора. Однако, указанный метод имеет ряд недостатков, таких как ограничение по твердости поверхностного слоя, сравнительно большой отпечаток и значительное усилие вдавливания индентора. В связи с этим метод требует развития и совершенствования в направлении их минимизации. Одним из перспективных вариантов в этом аспекте является применение конического индентора. В связи с этим необходима разработка методики и технических средств, учитывая уровень современных требований по производительности измерений, информативности, минимизации воздействия, универсальности и пригодности к экспресс-контролю.

Во второй главе «Аналитическое описание взаимосвязи остаточных напряжений с перемещениями поверхности восстановленной детали вокруг отпечатка конического индентора» представлена математическая модель формирования наплыва вокруг отпечатка при упругопластическом вдавливании конического индентора с учетом влияния комплекса факторов – степени силового воздействия, механических свойств материала и поверхностных остаточных напряжений.

Задачу вдавливания индентора в полупространство моделировали в осесимметричной постановке. Расчетная схема и деление расчетной модели на конечные элементы показаны на рисунке 1. Материал зоны №1 изотропный, упругий. В зоне №2, где имеет место упругопластическое течение, материал упругопластический с билинейной диаграммой деформирования.

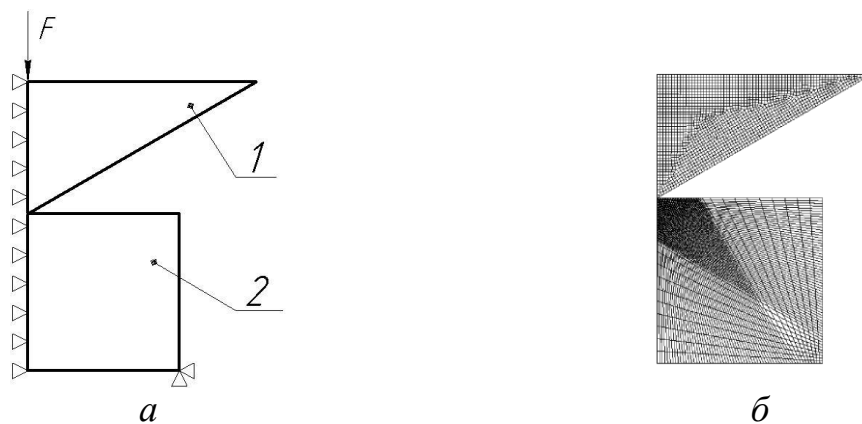


Рисунок 1 – Расчетная схема (а) и конечно-элементная сетка (б)

Верификация контактного алгоритма проведена с использованием имеющей точное решение задачи о сосредоточенной силе, действующей на плоскость, ограничивающую полупространство. Полученные результаты позволили сделать заключение об адекватности контактного алгоритма и пригодности его для данной задачи.

Дополнительная проверка и подтверждение корректности разработанной численной модели проведена при качественном сопоставлении полученных данных, получаемых расчетным путем,

(распределений напряжений) с результатами расчетов в работах Л.М. Качанова, Ю.Н. Работнова, В.Б. Васильева, В.М. Александрова, Д.А. Пожарского, X. Hernot.

Результатом исследований является представленная в математической форме взаимосвязь между остаточными напряжениями и нормальными перемещениями в наплыве, учитывающее влияние варьируемых параметров, изменяющихся в принятых диапазонах. Проведена серия расчетов с различными величинами усилия воздействия на индентор F для каждого сочетания механических свойств (σ_T и E_T) и предварительными напряжениями $\sigma^{\text{ост}}$.

Исследования проводились для материалов с характеристиками, соответствующими конструкционным сталям со следующими механическими свойствами: предел текучести $\sigma_T = 250 \dots 1000$ МПа, модуль упругости $E_T = 5000 \dots 15000$ МПа.

Результатом цикла взаимодействия конического индентора и упруго-пластического контртела является появление наплыва, окончательное формирование которого происходит при завершении цикла нагружения, во время снятия нагрузки. Зависимость диаметра отпечатка d от усилия вдавливания F описывается регрессионным уравнением

$$d(F) = d_{0F} \cdot \left(\frac{F}{F_0} \right)^{n_d}, \quad (1)$$

где d_{0F} – условный диаметр отпечатка (мм), возникающий при единичном усилии вдавливания F_0 , равном 1 Н.

Погрешность определения диаметра отпечатка по выражению (1) относительно результатов расчетов не превышает 1,5%. Выражение (1) используем как **первую диаграмму вдавливания « $d-F$ »**.

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

$$W_{\max}(d) = W_{0d} \cdot \left(\frac{d}{d_0} \right)^{n_w}, \quad (2)$$

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

Установлено, что показатель степени n_w во всем диапазоне механических свойств материала контртела изменяется незначительно, с допустимой погрешностью его можно принять равным 1.

Погрешность определения максимального перемещения по выражению (2) не превышает 3% относительно результатов расчета. Выражение (2) используем как **вторую диаграмму вдавливания** « $W_{\max}-d$ ».

Для двух разных материалов 1 и 2 соотношение условных максимальных перемещений в отпечатках W_{0d} зависит от соотношений механических свойств контртела в относительном:

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

и абсолютном виде

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

Выражения (2)-(4) формируют математическую модель, описывающую закономерности изменения геометрических параметров наплыва вокруг отпечатка индентора в зависимости от параметров нагружения индентора и механических свойств материала контртела.

Для изучения влияния остаточных напряжений на нормальные перемещения в наплыве задача рассмотрена в трехмерной постановке. Для количественного описания зависимости перемещения W от величины остаточных напряжений использовано относительное изменение $\Delta W/W_{\max} = (W - W_{\max})/W_{\max}$, которое показывает связь между изменениями перемещений

и остаточными напряжениями в независимом от свойств материала детали виде (рисунок 2).

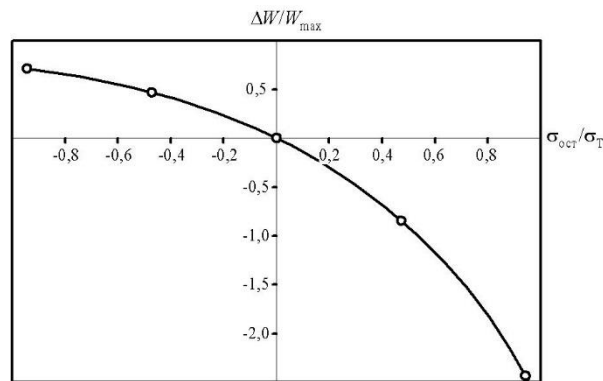


Рисунок 2 – Зависимость разности перемещений ΔW от остаточных напряжений в детали

Зависимость относительного изменения перемещения от величины остаточных напряжений имеет вид

$$\frac{\Delta W}{W_{\max}} = 1 - e^{\frac{9 \sigma_{\text{ост}}}{7 \sigma_T}} \quad (5)$$

Уравнение (9) показывает, что относительное изменение перемещения в наплыве в точках на фиксированном расстоянии от центра отпечатка зависит только от остаточных напряжений. Погрешность описания расчетных данных не превышает по абсолютному значению 10%.

В третьей главе «Методика экспериментальных исследований перемещений вокруг отпечатка конического индентора и их взаимосвязи с остаточными напряжениями» описан метод регистрации перемещений – электронная спекл-интерферометрия (ЭСИ) и методики воздействия (вдавливания индентора), регистрации и обработки информации.

Методика регистрации информации методом ЭСИ включает следующий набор действий:

- а) подготовка поверхности детали, размещение детали в блоке интерферометра, настройка интерферометра;
- б) регистрация первой интерференционной картины;
- в) вдавливание конического индентора;

г) регистрация второй интерференционной картины.

Расшифровка полученных данных о распределении нормальных перемещений поверхности. Обработка записанной интерферограммы заключается в определении величин нормальных перемещений в заданных точках на заданных осях распределения полос. Для этого необходимо:

- 1) обозначить направления осей симметрии распределения интерференционных полос;
- 2) определить положение контрольных точек – на осях симметрии на расстоянии $1,33$ радиуса от центра отпечатка;
- 3) определить номера полос, проходящих через контрольные точки, учитывая их знак;
- 4) вычислить средние значения числа полос, в контрольных точках, лежащих на оси симметрии на противоположных сторонах отпечатка;
- 5) вычислить средние величины нормальных перемещений для каждой их осей симметрии интерференционной картины

$$W = \frac{N\lambda}{2}. \quad (6)$$

где N – номер полосы, λ – длина волны лазера.

6) определить разностные перемещения $\Delta W(x)$ и $\Delta W(y)$. Для измеренного диаметра отпечатка по диаграмме вдавливания (2) вычислить величину перемещения $W_{\max}$. Наконец, с использованием всех полученных данных по формулам (7), выведенным из выражения (5), рассчитать величины остаточных напряжений.

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

где оси x и y направлены вдоль осей симметрии зарегистрированного распределения перемещений; $W_{\max}$ – величина нормального перемещения в контрольной точке для материала поверхностного слоя детали без остаточных напряжений (определяется по диаграмме вдавливания « $W_{\max} - d$ »)

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований перемещений вокруг отпечатка конического индентора и их взаимосвязи с остаточными напряжениями» экспериментально подтверждены и доказаны основные положения математической модели.

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

Результаты экспериментального исследования влияния усилия вдавливания на диаметр отпечатка приведены на рисунке 3.

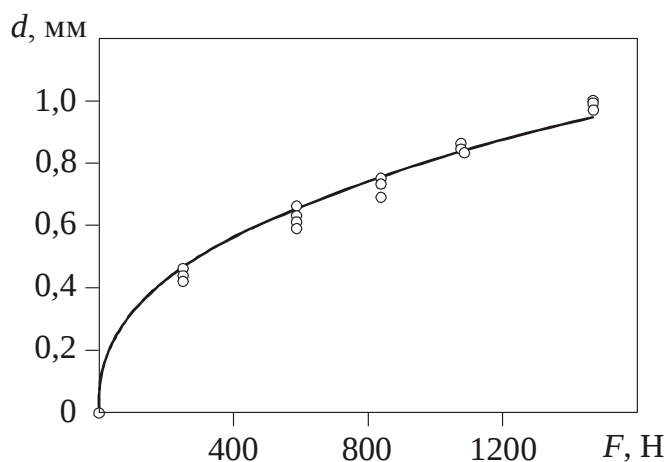


Рисунок 3 – Влияние усилия вдавливания индентора на диаметр отпечатка: сплошная линия – теоретическое решение, точки – экспериментальные данные

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

$$d(F) = 5,046 \cdot 10^{-2} \cdot F^{0,4}, \quad (8)$$

С целью уточнения справочных данных механические свойства материала образцов определены экспериментально с использованием известных методик: $\sigma_T = 266 \pm 20$ МПа, $E_T = 4500 \pm 500$ МПа. Считаем, что значи-

тельное отличие величины модуля упрочнения от полученного по справочным данным связано с особенностями свойств поверхностного слоя.

С учетом данных измерения механических свойств материала получено значение коэффициента $d_{0F} = 5,074 \cdot 10^{-2}$ (мм). Тогда уравнение регрессии, описывающее теоретические данные для стали 40Х имеет вид

$$d(F) = 5,074 \cdot 10^{-2} \cdot F^{0,4}. \quad (9)$$

Отклонение полученной по механическим свойствам диаграммы вдавливания « $d - F$ » от экспериментальной составляет 6%, что позволяет заключить об адекватности первой части математической модели, описывающей взаимосвязь диаметра отпечатка с усилием вдавливания.

Результаты экспериментального исследования влияния диаметра отпечатка на максимальные вертикальные перемещения в наплыве приведены на рисунке 4.

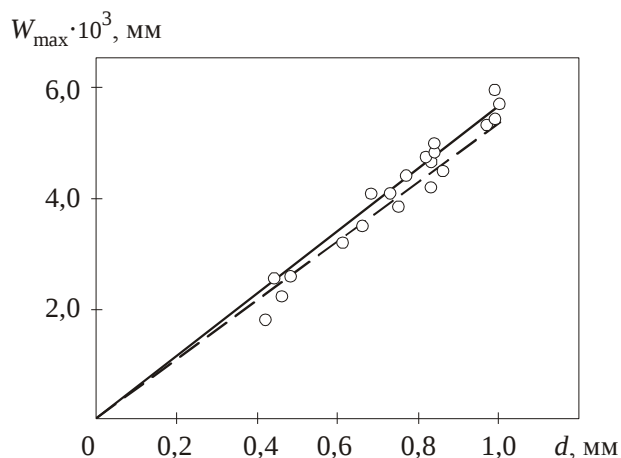


Рисунок 4 – Влияние диаметра отпечатка на высоту наплыва:
сплошная линия – теоретическое решение, точки –
экспериментальные данные, пунктирная линия – аппроксимация
экспериментальных данных

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

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

Восстановим значение условного перемещения W_{0d} уравнения регрессии, используя данные о механических свойствах по формуле (4).

Используя данные о механических свойствах стали 40Х (предел текучести σ_T и модуль упругости E_T) по формуле (4) получено значение коэффициента $W_{0d} = 5,37 \cdot 10^{-3}$ мм, а само выражение зависимости максимальных перемещений от диаметра отпечатка имеет вид

$$W_{\max}(d) = 5,37 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d}{d_0}. \quad (11)$$

Отклонение экспериментальных значений от теоретических в среднем составляет 7%, что позволяет заключить об адекватности второй части математической модели. Качественные и количественные результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, соответствуют данным теоретического анализа.

Экспериментальные исследования позволили установить графическую связь между величиной остаточных напряжений и изменениями перемещений $\Delta W^{(x,y)}$ в контрольных точках системы интерференционных полос. В исследованиях были использованы цилиндрические и плоские образцы из стали марок: Ст3, 40Х, 45, 30ХГСА, 12Х18Н10Т. В качестве иллюстрации на рисунке 5 представлено сравнение результатов эксперимента (точки, сплошная линия) и данных численных расчетов (прерывистая линия) для образца из стали Ст3.

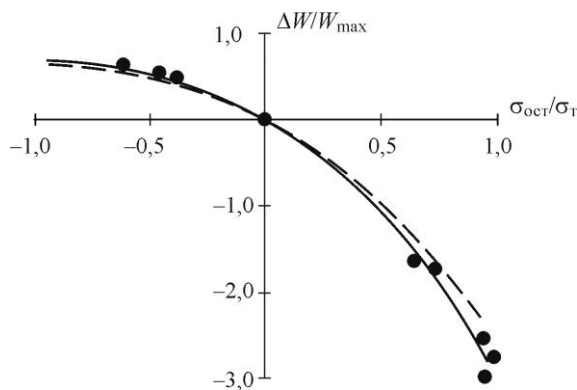


Рисунок 5 – Влияние остаточных напряжений на изменение величины нормального перемещения в контрольных точках

Экспериментальные данные удовлетворительно, с погрешностью 8%, коррелируют с результатами теоретического анализа

$$\frac{\Delta W}{W_{\max}} = 1 - e^{\frac{7 \sigma^{\text{ост}}}{5 \sigma_T}}, \quad (12)$$

В пятой главе *«Метод измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях, практические результаты и внедрение»* приведено полное описание разработанного метода с учетом корректировки теоретического решения (математической модели) данными, полученными в ходе экспериментальной проверки.

Метод заключается в том, что регистрируют рассеянное исследуемой поверхностью детали световое поле, соответствующее начальному состоянию поверхности детали, с помощью оптической измерительной системы, источником излучения которой является лазер; вдавливают в испытуемый материал детали индентор до образования отпечатка; регистрируют рассеянное исследуемой поверхностью детали световое поле, соответствующее ее состоянию после воздействия индентора; получают интерферограмму путем вычитания двух записанных световых полей, которая является распределением нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка; регистрируют диаметр отпечатка; вычисляют координаты контрольных точек на осях симметрии отпечатка; определяют порядковые номера проходящих через контрольные точки интерференционных полос; определяют максимальные вертикальные перемещения в наплыве вокруг отпечатка в контрольных точках по формуле, включающей зависимость количества полос от длины волны лазера; определяют изменение максимальных нормальных перемещений относительно максимальных перемещений в наплыве при испытании материала без остаточных напряжений по диаграмме вдавливания и определяют остаточные напряжения с помощью формулы, включающей зависимость остаточных напряжений от предела текучести материала.

ла, нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка и изменения нормальных перемещений в наплыве относительно базовых.

Проанализирована эффективность применения конического индентора и показан экономический эффект в сравнении с прототипом. Применение конического индентора, в сравнение со сферическим, уменьшает степень воздействия на поверхность исследуемой детали, снимая при этом ограничения использования метода связанные с твердостью поверхностного слоя. 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.

Метод был применен в рамках совместных работ с Башкирским государственным аграрным университетом при разработке и совершенствовании технологий восстановления цилиндрических деталей электроконтактной приваркой присадочных материалов.

Анализ результатов исследований позволил заключить следующее:

- при ЭКП наплавочной проволоки поверхностный слой восстановленной детали практически разгружен от остаточных напряжений. Соответственно, предел выносливости восстановленных по этой технологии деталей выше, чем при приварке металлической ленты.

- новая технология восстановления деталей ЭКП металлической сетки также обеспечивает благоприятное напряженное состояние поверхностно-

го слоя. Остаточные напряжения незначительные по величине, не превышают 0,15 предела текучести материала покрытия.

– деталям, восстановленным ЭКП металлической ленты и порошков, в основном характерна высокая нагруженность поверхностного слоя. Наблюдаются остаточные напряжения, достигающие соответственно 0,95 и 0,85 предела текучести материала покрытия (рис. 6). Этот фактор оказывает значительное влияние на их эксплуатационные характеристики, в частности, вызывает существенное снижение усталостной прочности – до 30% в сравнении с новой деталью, следовательно, требуется совершенствование данной технологии восстановления деталей.

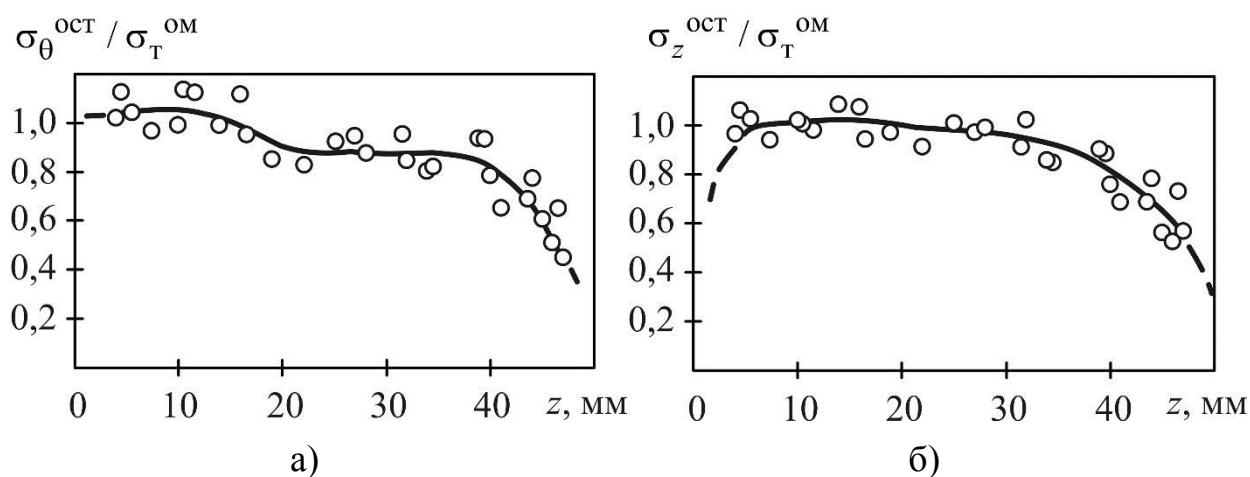


Рисунок 6. Распределения окружных (а) и осевых (б) остаточных напряжений в поверхностном слое образца с приваренным покрытием

Основываясь на результатах исследований, в работе Исламова Л.Ф. было предложено применить поверхностное пластическое деформирование и электроконтактное упрочнение поверхностного слоя деталей, восстановленных ЭКП металлической ленты и порошков.

Результаты измерений показали, что в поверхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения (рис. 7), что положительно влияет на усталостные характеристики деталей, повышая предел выносливости на 50-52% при сравнении с восстановленной деталью и на 18-30% при сравнении с новой деталью.

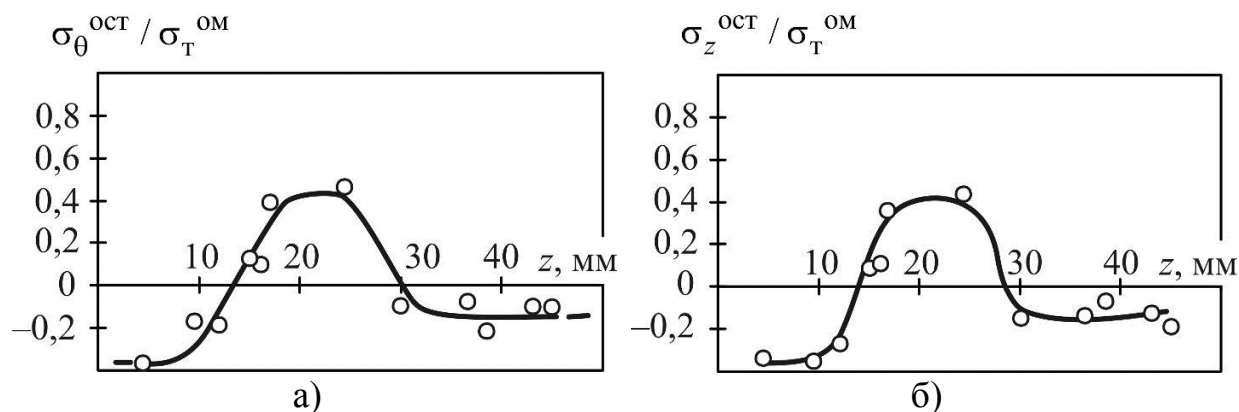


Рисунок 7. Распределение окружных (а) и осевых (б) остаточных напряжений в поверхностном слое образца, обработанного ППД

Результаты сравнительных усталостных испытаний образцов приведены на рисунке 8.

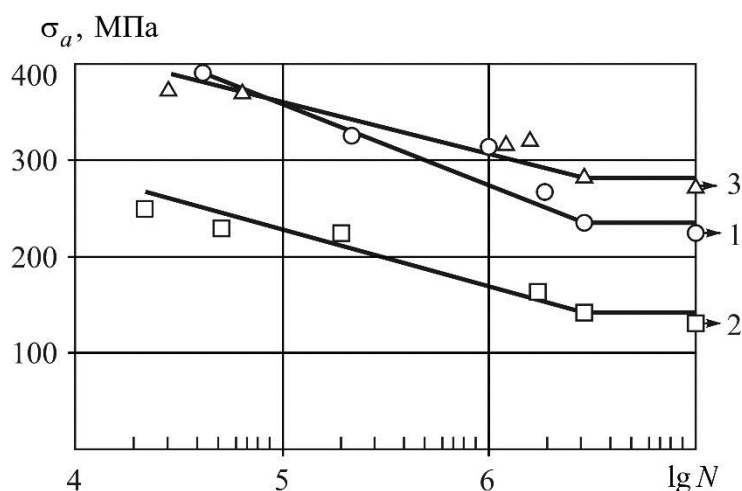


Рисунок 8. Результаты усталостных испытаний образцов:
1 – образцы из нормализованной стали 45; 2 – образцы с приваренным покрытием (лента, сталь 45); 3 – образцы с приваренным покрытием (лента, сталь 45) и электроконтактным упрочнением

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 электро-контактной приваркой металлической ленты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И 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, проволоки, 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, входящих в базы Scopus, Web of science:

1. 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.

Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

2. **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.

3. **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).

4. 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.

5. Игнатъев А.Г., **Третьяков А.А.**, Ерофеев В.В. Измерение остаточных напряжений в восстановленных и упрочненных деталях / Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 122. С. 167-171.

6. **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.

7. Игнатьев А.Г., **Третьяков А.А.** Повышение долговечности восстановленных деталей машин на основе управления остаточными напряжениями. Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2018. Т.18. № 1. С. 58-67. DOI: 10.14529/engin18010

Авторские свидетельства, патенты:

8. Пат. 2572670 Российская Федерация, МПК G01L1/06. Способ определения поверхностных остаточных напряжений / Игнатьев 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.

Научное издание

Третьяков Андрей Алексеевич

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати ___.___.18 Формат 60х84 1/16 Заказ	Формат 60х84 1/16 Усл. печ. л. 1,0 Тираж 100 экз.	Бумага тип. №1 Уч.- изд. л. 1,0 Бесплатно

Издательский центр ЮУрГУ,
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76
Южно-Уральский государственный университет.