

На правах рукописи

Плешанова Юлия Андреевна

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ДЕТАЛЯХ МАШИН

Специальность 05.02.02 – Машиноведение,
системы приводов и детали машин

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова».

Научный руководитель

Каратушин Станислав Иванович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург

Официальные оппоненты

Шур Евгений Авелевич,
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник,
АО «ВНИИЖТ», г. Москва;

Васильков Сергей Дмитриевич,
кандидат технических наук, доцент,
ФГАО ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

Ведущая организация

ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 31 мая 2016 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.12 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан 28 марта 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

А. Н. Евграфов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Упрочнение рабочих поверхностей различных деталей всегда было актуальной задачей. Со временем изменяются конструкции деталей и технологии упрочнения, но сохраняется физическая сущность: деталь после упрочнения становится биметаллической. Физико-механические свойства упрочненного слоя всегда будут отличаться от основного металла. В конечном итоге это приводит к изменению напряженно-деформированного состояния и как следствие к возникновению остаточных напряжений (ОН). Сжимающие ОН в поверхностном слое благоприятно сказываются на эксплуатационных характеристиках деталей, но они, естественно, сосуществуют с растягивающими. Для достижения наилучшего эффекта упрочнения (износостойкости и контактной прочности) необходимо обеспечить оптимальное соотношение между толщиной упрочненного слоя и габаритами изделия, выбрать оптимальную технологию упрочнения. Все это будет выполнимо при надлежащем контроле напряженно-деформированного состояния детали (НДС). Существующие способы экспериментального определения НДС пока не в состоянии дать полную картину НДС многих конфигураций изделий. Аналитические методы мало приемлемы для сложных форм изделий, как например, зубчатые колеса, а разрушающие методы при достаточной достоверности трудоемки и также имеют ограниченную область применения. Все эти вопросы достаточно подробно разобраны в литературном обзоре.

Наиболее распространенный способ упрочнения поверхности – это цементация, на примере которой и решается задача компьютерного моделирования НДС заготовок и деталей различной конфигурации и сложности. Точное знание НДС упрочненной детали позволяет определить оптимальную толщину упрочнения, сделать проверочный силовой расчет, отвечающий физической сущности действующих усилий и напряжений, физически правильно обосновать выбор марки стали с точки зрения кратковременной и длительной прочности цементованного слоя и сердцевины. Все это принципиально важно при выборе новых марок сталей и сплавов для сопряженных деталей.

Моделирование ОН, предложенное в работе, может быть использовано для сложных конфигураций изделий.

Цель работы заключается в разработке метода компьютерного моделирования ОН и НДС цементованных заготовок и деталей, основанного на использовании простых экспериментальных данных в программе ANSYS.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) выбор прототипа упрочняемых цементацией деталей и заготовок и разработка для них виртуальных моделей;
- 2) разработка метода создания на модели остаточных напряжений в соответствии с заданным распределением концентрации углерода;
- 3) разработка и апробирование метода контроля глубины цементованного слоя и деформаций, вызванных остаточными напряжениями;
- 4) исследование влияния толщины упрочненного слоя на полную картину НДС на образцах и выборочно на деталях;

5) разработка метода решения контактных задач на примере зубчатых зацеплений и тел качения по оценке влияния ОН на контактную прочность и изгибную выносливость при действии циклических нагрузок.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Факторы, влияющие на происхождение и величину ОН.
2. Методы моделирования ОН и его результаты в виде расчетов НДС заготовок и деталей.
3. Компьютерная 3D модель цементованной заготовки и зубчатого зацепления.
4. Оценка влияния растягивающих ОН на изгибную прочность зубьев колес.
5. Результаты расчета НДС зубчатого зацепления с наружным и внутренним зацеплением.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработаны модели цементуемых заготовок и сопряженных деталей для решения задач статического нагружения и контактных.
2. Предложен метод моделирования ОН на основе экспериментальных результатов цементованных образцов-свидетелей.
3. Разработан метод решения задач по оценке полной картины НДС цементованных деталей при контактном взаимодействии по касательным напряжениям.
4. Предложен метод проверочного расчета зубчатого зацепления, в том числе цементованного, по изгибным и контактными нагрузкам с учетом ОН.
5. Дана оценка влияния растягивающих ОН на изгибную выносливость цементованного зубчатого зацепления.
6. Получена полная картина НДС цементованного и нецементованного зубчатого зацепления с наружным и внутренним зацеплением при однопарном и двухпарном зацеплении.
7. Предложен метод расчета и оценки НДС упрочненных упругих элементов с переменными параметрами.

Достоверность полученных результатов основывается на экспериментах, используемых при моделировании ОН, моделях деталей и заготовок, построенных в программе КОМПАС, и методе конечных элементов, заложенного в программном комплексе ANSYS. Полученные в работе результаты не противоречат другим авторам.

Практическая ценность и реализация результатов. Предложенные методы моделирования ОН в зубчатых колесах и других деталях с использованием экспериментального определения объемных изменений при термической обработке могут быть положены в основу инженерных расчетов как проверочных, так и при использовании вновь разработанных марок сталей и сплавов по стандартным характеристикам механических свойств.

По данной работе имеется два Акта внедрения от АО «КБСМ» (ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей»), сентябрь 2015 г. и АО «ВНИИЖТ», февраль 2016 г.

Личный вклад автора. Проведение экспериментов на образцах-свидетелях, экспериментальное определение остаточных напряжений на роликах для контактных испытаний и участие в обработке и анализе расчетов ANSYS.

Апробация работы. Основные положения и результаты выполненной работы докладывались и обсуждались на конференциях:

Международная научно-техническая конференция «Актуальные задачи машиноведения, деталей машин и триботехники» (СПб., 27–28 апреля 2010 г.). Каратушин С.И., Плешанова Ю.А. Моделирование внутренних напряжений. С. 242–243;

XIV Международная научная конференция «Трибология и надёжность» (СПб., 17–19 сентября 2014 г.). Каратушин С.И., Спиридонов Д.В., Плешанова Ю.А., Бокучава П.Н. Значение остаточных напряжений в контактной прочности. С. 83–91.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 9 – в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, литературного обзора, пяти глав, выводов по работе, списка используемых источников. Объем работы – 144 страницы машинописного текста, включающего 75 рисунков, список использованных источников из 78 наименований и два приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится описание основного аспекта работы – остаточных напряжений (ОН). Их различные формы по степени локальности: 1-го, 2-го и 3-го родов, причины их возникновения.

Основой возникновения ОН является структурная неоднородность. Причиной могут быть температурные напряжения, фазовые превращения, неоднородность пластической деформации (ОН после поверхностного наклепа).

Представлена актуальность работы – упрочнение рабочих поверхностей различных деталей. Физико-механические свойства упрочненного слоя всегда будут отличаться от основного металла. В конечном итоге это приводит к изменению НДС и как следствие к возникновению ОН. Безусловно, при поверхностном упрочнении сохраняется и физическая сущность: деталь после упрочнения становится биметаллической.

Для достижения наилучшего эффекта упрочнения (износостойкости и контактной прочности) необходимо обеспечить оптимальное соотношение между толщиной упрочненного слоя и габаритами изделия, выбрать оптимальную технологию упрочнения. Все это будет выполнимо при надлежащем контроле НДС детали.

В работе выбран способ упрочнения поверхности – цементация. Выбор обусловлен большим количеством справочных данных на эту тему. Вопросы цементации широко исследовались НДС заготовок и деталей различной конфигурации и сложности.

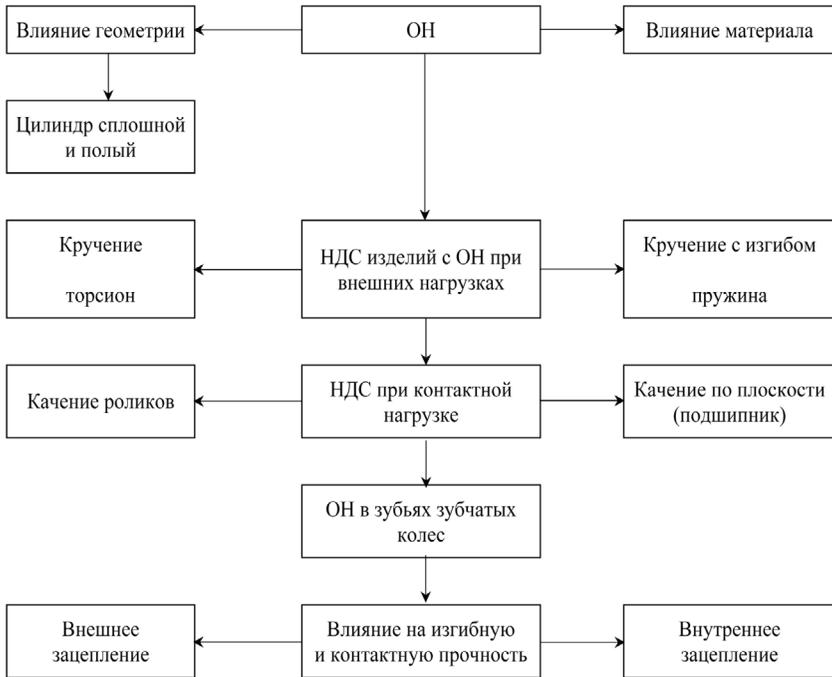
Структурная схема исследования представлена ниже.

В первой главе – литературном обзоре проанализированы литературные источники за XX–XXI вв., в которых приведены методы определения, расчета и управления остаточными напряжениями.

В литературном обзоре рассмотрены все виды возможного появления ОН и способы их количественной оценки, предложенные разными учеными, среди которых И.А. Биргер, И.А. Одинг, Н.Н. Давиденков, В.В. Абрамов и другие отечественные и иностранные ученые.

Физическая природа формирования ОН после различных технологических процессов (цементация, пластическая деформация, термические воздействия), несмотря на общие закономерности, имеет много различий и неизученных вопросов.

Структурная схема исследования ОН методом моделирования



Проанализирована связь диаграмм изотермического превращения аустенита для наиболее распространенных сталей (20X, 18ХГТ, 12ХНЗА и пр.) с кинетикой формирования ОН. Рассмотрено взаимовлияние превращений аустенита в цементованном слое и сердцевине на процесс образования ОН. Цементация, хотя и создает в поверхностном слое структуру (мартенсит) со значительно большим удельным объемом, не всегда приводит к созданию благоприятных сжимающих напряжений.

Характер распределения ОН определяется типом и количеством образующихся структур, а также последовательностью их образования во время закалки и технологическими факторами. При всем разнообразии исходных составов цементуемых сталей изложены три возможные схемы образования структур в поверхностном слое и сердцевине.

Методы анализа и определение ОН, представленные в работе, объединены в две группы: расчетные и физические (механические). В работе представлена одна из схем классификации методов.

Расчетные методы, в которых могут задаваться параметры, связанные с объемными или структурными изменениями в материале деталей, легко реализуются в случаях достаточно простой конфигурации деталей.

Вторая группа методов используется для изделий, прошедших полный технологический цикл изготовления, когда были использованы разнообразные виды теплового и механического воздействия (литье, обработка давлением, резание, термобработка и т. п.).

Так же затронут вопрос математического моделирования как метода определения ОН. Моделирование ОН, как и других физических явлений, производится математическими методами и с помощью компьютерных программ. Компьютерное моделирование приобретает все более широкое применение в связи с появлением новых программ и совершенствованием вычислительной техники. Для реализации обоих методов необходима физическая модель и значения основных параметров процесса.

В настоящее время для моделирования наибольшее применение получила программа ANSYS. Большое достоинство компьютерного моделирования – возможность наложения внешних нагрузок и таким образом анализ всей картины НДС изучаемой модели.

В работе была рассмотрена и реализация методов использования остаточных напряжений на примере поверхностного наклепа.

Вторая глава посвящена непосредственно вопросу моделирования остаточных напряжений.

Используемый в работе метод конечных элементов (МКЭ) при линейной аппроксимации перемещений есть формирование и решение линейной алгебраической системы.

Обобщением является случай физической нелинейности, когда энергия деформации на единицу объема ($\Pi(\epsilon)$) не выражается квадратичной формой.

В случае начальных напряжений можно так изменить «закон Гука»:

$$\tau = \tau_0 + C \cdot \epsilon \quad \tau = c(\epsilon - \epsilon_0) = c\epsilon - c\epsilon_0 = c\epsilon - \tau_0.$$

В ANSYS заданное поле τ_0 выступает как внешнее воздействие и расчеты рассматриваются как моделирование τ_0 . Внешнее воздействие решается в виде тепловой задачи: $[k] \cdot \{u\} = \{F\} + \{F^t\}$, где F – силовые нагрузки, а F^t – температурные нагрузки; для конечного элемента $\{F^t\}_e = \int_V [B]^T [D] \{e\} dV$, где

F^t – вектор температурных нагрузок;

B – матрица производных от функций формы;

D – матрица упругих свойств материала;

e – вектор температурных деформаций.

Величина и характер распределения ОН определяются физической природой объемных изменений и геометрией изделий. Этим обстоятельством и определяется выбранный метод моделирования ОН.

Изложенная в работе методика моделирования ОН при цементации решается с использованием программного комплекса ANSYS и основной исходный параметр – экспериментально определенное распределение углерода по глубине детали. В качестве начального объекта исследования выбрана пластина из конкретной стали.

Плоские образцы $6 \times 16 \times 150$ мм, изготовленные из сталей 20; 20Х; 18ХГТ; 20ХН3А, цементировались со стороны 16×150 (остальная поверхность покрывалась медью) на глубину 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 мм. После цементации медное покрытие удалялось и химическим анализом с шагом 0,1 мм определялось распределение углерода по глубине. Цементованные образцы закаливались и отпускались по

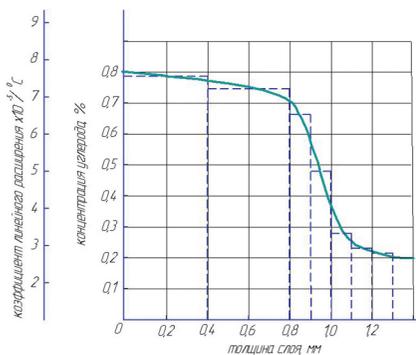


Рис. 1а. Распределение концентраций углерода и коэффициентов линейного расширения по толщине пластины для стали 20X

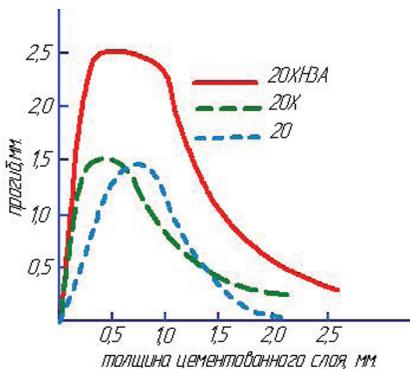


Рис. 1б. Зависимость прогиба от толщины цементованного слоя

стандартной технологии. На образцах, прошедших термообработку, измерялся прогиб. Величина прогиба, соответствующие прогибу нормальные напряжения и распределение углерода по глубине являются исходными данными для определения НДС пластин в ANSYS. В работе принято допущение, что удельный объем фаз прямо пропорционален содержанию углерода. В конечном итоге в ANSYS используется не объемная характеристика расширения мартенсита, а линейная, пересчитанная в усредненный коэффициент линейного расширения, прямопропорциональный концентрации углерода (рис. 1).

Критерием правильности выбора численных значений коэффициентов линейного расширения является прогиб конкретного образца.

Модуль нормальной упругости принимается 2×10^{11} МПа; коэффициент Пуассона – 0,3; предел текучести в зависимости от прочности сердцевины цементованной детали от 300 до 1400 МПа. Распределение концентрации углерода при расчетах берется дискретным: в зоне малых изменений шаг 0,2–0,4 мм; в переходной зоне 0,1 мм (рис. 2, а).

Распределение нормальных напряжений вдоль поверхности образца зависит от толщины цементованного слоя и податливости образца (рис. 3).

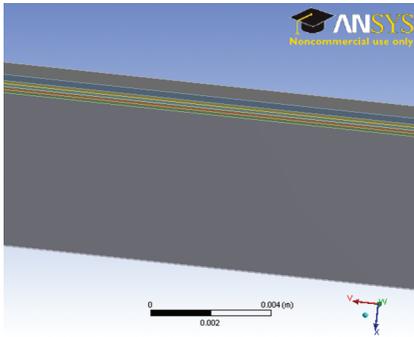
Выводы

1. При минимальном количестве экспериментов программный модуль ANSYS позволяет моделировать различные варианты упрочнения поверхности стальных изделий и имитировать нагрузки.

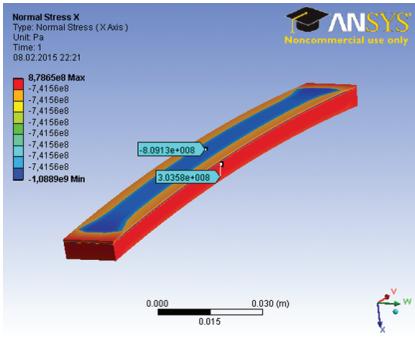
2. Наибольшие сжимающие напряжения достигаются при минимальной глубине цементации.

3. С увеличением глубины цементации уменьшается величина сжимающих напряжений и увеличивается область действия и амплитуда растягивающих напряжений.

4. Моделирование в ANSYS позволяет выбрать оптимальную величину толщины упрочненного слоя с учетом поля напряжений от действия внешних сил.

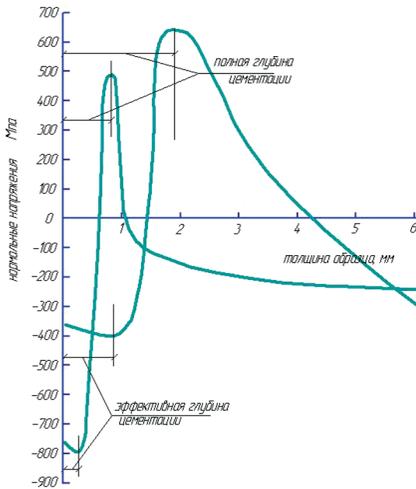


а

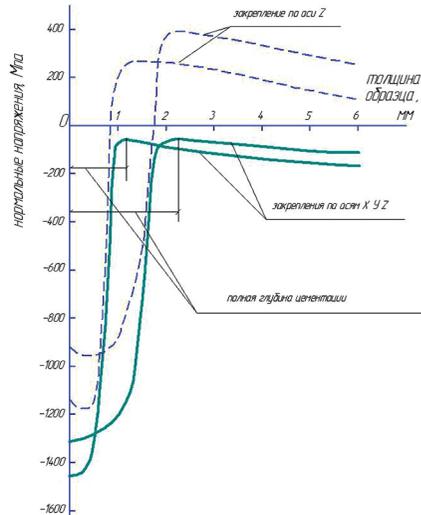


б

Рис. 2. Расчет остаточных напряжений для пластины:
а – распределение слоев цементации по толщине образца;
б – деформация образца под действием остаточных напряжений



а



б

Рис. 3. Распределение остаточных напряжений в пластине по толщине: а – пластина без закрепления;
б – пластина с закреплением по плоскости 16 × 150

Далее во второй главе приведены варианты моделирования на примере сплошного и полого цилиндров с целью выяснения влияния геометрического фактора на остаточные напряжения.

Аналитическое решение задачи по остаточным напряжениям в цементованном цилиндре

В работе решается аналитическая задача по ОН, возникшим в результате первоначальной остаточной деформации. Осесимметричное распределение первоначальных остаточных деформаций вызывает осесимметричное распределение ОН и деформаций в цилиндре. Длина цилиндра предполагается настолько большой, что условия на его торцах не влияют на напряженное состояние в средней части.

В соответствии с обобщенным законом Гука решается система уравнений упругости:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu (\sigma_\theta + \sigma_z)] + \varepsilon_{0r};$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \mu (\sigma_r + \sigma_z)] + \varepsilon_{0\theta};$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu (\sigma_r + \sigma_\theta)] + \varepsilon_{0z};$$

где σ_r , σ_θ , и σ_z – радиальные, окружные и осевые остаточные напряжения; ε_{0r} , $\varepsilon_{0\theta}$ и ε_{0z} – радиальные, окружные и осевые первоначальные остаточные деформации.

Решение производится в Matchad.

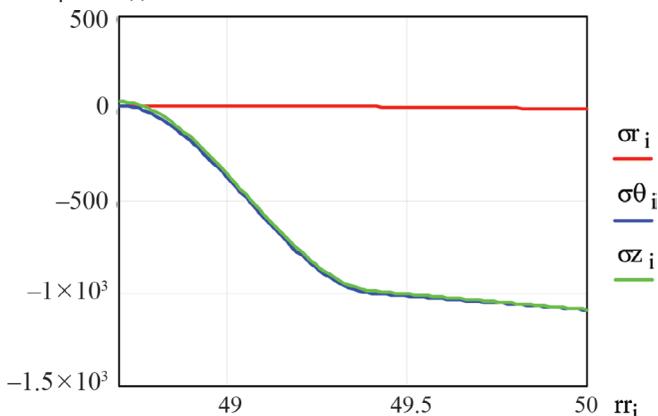


Рис. 4. Все компоненты напряжений по радиусу точек упрочненного слоя: левая граница графика – контакт с неупрочненным материалом, правая граница – наружная поверхность детали (МПа)

Напряжения на наружной поверхности детали

$\sigma_{r_{101}} = 0$	– радиальные
$\sigma_{\theta_{101}} = -1.087 \cdot 10^3$	– тангенциальные
$\sigma_{z_{101}} = -1.087 \cdot 10^3$	– осевые

В основе двух методов лежат одни уравнения упругости.

Аналитические методы расчета неприемлемы для изделий сложной конфигурации, как например, зубчатые колеса. Сравнивать эти два метода некорректно. В обоих случаях необходимо задаваться исходными параметрами. Применение

ANSYS позволяет просто использовать любые результаты экспериментов, чего нельзя сказать об аналитических методах.

Исходные данные для расчета сплошного и полого цилиндров в ANSYS даны на рис. 5. Полученные графики распределения напряжений – на рис. 6.

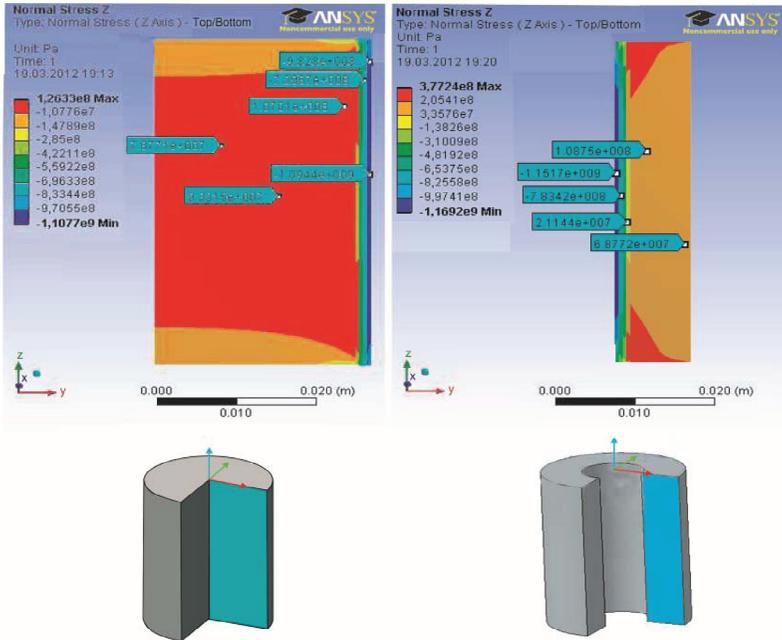


Рис. 5. Сплошной и полой цилиндры и сечение расчетов

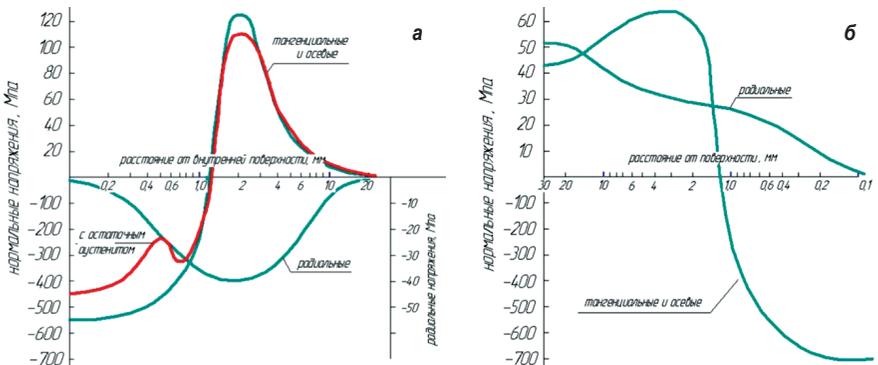


Рис. 6. Распределение напряжений: а – в полом цилиндре; б – в сплошном цилиндре в отсутствии остаточного аустенита

Характер ОН на внутренней и наружной поверхностях цилиндров принципиально отличается, сказывается влияние вида кривизны поверхности (выпуклая или вогнутая).

В окончании второй главы изучается влияние ОН на НДС при сложном напряженном состоянии в упругих элементах, работающих на кручение, и пружинах с переменными параметрами.

В третьей главе рассмотрены вопросы, касающиеся влияния остаточных напряжений на контактную прочность.

В основу компьютерного моделирования также положена экспериментальная работа для подтверждения полученных результатов.

Для оценки влияния ОН на контактную прочность были изготовлены ролики из сталей 20Х и ШХ15. Выбор сталей обусловлен тем обстоятельством, что цементованный слой ролика из стали 20Х аналогичен по структуре и составу стали ШХ15, но принципиально отличается наличием ОН.

В отрезанной пластине перераспределение напряжений, вследствие устранения радиальных напряжений под слоем, деформировало ее в сторону увеличения радиуса (рис. 7, а). По величине остаточной деформации далее аналитически рассчитывались ОН. При вырезании из диска упругоненного поверхностного коль-

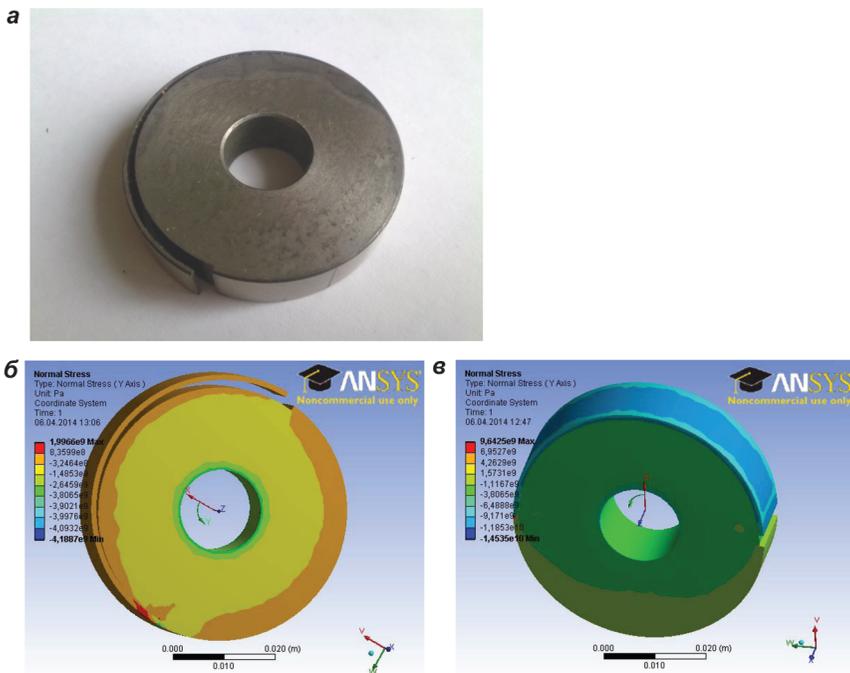


Рис. 7. Ролик: а – общий вид, фото; б – с отрезанной пластиной; в – с прижатой пластиной

ца оценивались два фактора, определяющие деформации этого кольца: средние остаточные напряжения в нем и неравномерность распределения этих напряжений по толщине кольца.

Разница между остаточными напряжениями наружной и внутренней поверхностями кольца определяется через изменение радиуса кривизны кольца:

$$\Delta\sigma = E \cdot h \cdot \frac{\Delta R}{R^2} = 2 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,75 \cdot 10^{-3}}{(25 \cdot 10^{-3})^2} = 2,4 \cdot 10^8 \text{ Па} = 240 \text{ МПа}$$

где $h = 1 \text{ мм}$ – толщина кольца.

Параллельно в программе ANSYS была создана модель ролика с отрезанной пластиной (рис. 7, б, в) и рассчитаны $\text{ОН} \approx 240 \text{ МПа}$. При моделировании НДС роликов ось ведомого закреплялась неподвижно и нагрузка прикладывалась к оси ведущего ролика. Для выбранной схемы испытаний определен вид напряженного состояния по параметру Надаи-Лоде $\chi = 0,17$, которое близко к сдвигу. В этом случае считается, что $\sigma_{\text{сдв}-1}^{\text{сдв}} \approx 0,6\sigma_{\text{сдв}-1}^{\text{ист}}$. На поверхности цементованного ролика тангенциальные напряжения однородны и всегда сжимающие. На нецементованном в зоне контакта происходит чередование зон растяжения и сжатия от -400 до $+1 \text{ МПа}$, против $-600 \dots -400$ на поверхности цементованного ролика.

Результаты расчета НДС в зоне контакта роликов: определены тангенциальные напряжения, осевые и радиальные показали, что наибольший интерес представляют тангенциальные и радиальные напряжения.

Полученные результаты сравнивались с теорией Герца (табл. 1), где максимальное касательное напряжение определяется давлением, а глубина залегания полушириной участка контакта. Эксперименты связывают глубину залегания с радиусом кривизны контактирующих тел.

Небольшие расхождения в цифрах, вероятно, связаны с тем, что формулы Герца справедливы для цилиндрических тел бесконечной длины, т. е. в них не учтены краевые эффекты, а также различие в деформируемости цементованного и нецементованного роликов.

При контактном взаимодействии рассматриваемых тел разрушение происходит в виде отслаивания и питтинга, и связывают его с касательными напряжениями. Для контактных нагрузок опасными считаются не только тангенциальные циклически изменяющиеся напряжения, но и в большей степени касательные, возникающие в глубине под контактом. Если в зону действия этих напряжений

Таблица 1

Результаты расчетов по теории Герца и моделирования в ANSYS

Нагрузка F, кН		1,5	5
Максимальное контактное давление p, МПа	Герц	375	1250
	ANSYS	420	960
Максимальное касательное напряжение τ , МПа	Герц	112	375
	ANSYS	104	210
Глубина залегания z, мм	Герц	0,11	0,2
	ANSYS	0,18	0,25

попадают неметаллические включения или другие подобные концентраторы, то начинает развиваться питтинг.

В этой же главе рассчитано НДС элемента роликового подшипника качения.

Четвертая глава посвящена изучению остаточных напряжений в зубчатых колесах и их влиянию на НДС.

При постановке задачи оговаривается упрочнение только рабочей поверхности, что связано с необходимостью сочетания износостойкости и контактной выносливости с изгибной выносливостью зубьев, имеющих в основаниях концентраторы напряжений, т.к. упрочнение всего объема зуба резко повышает чувствительность к концентраторам напряжений и, соответственно, снижает изгибную выносливость.

Сложность экспериментального определения ОН непосредственно в зубьях колес делают невозможным их учет при прочностных расчетах. Компьютерное моделирование ОН показало возможность определения ОН на образцах-свидетелях.

Методика исследования

Для анализа расчетов выбрана зубчатая пара прямозубая:

$$Z_a = 24; Z_g = 39;$$

$$m = 2,75; b_w = 24; T_a = 150 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Результаты расчетов по общепринятой методике и рекомендуемого программой КОМПАС практически полностью совпадают.

В работе рассматриваются несколько вариантов расчета: для нецементированных и цементованных зубьев с глубиной цементации 0,5 и 1 мм с величиной приложенного крутящего момента 150 и 400 Н·м. Итого, получается, пять вариантов. Эти варианты сведены в табл. 2.

Таблица 2

Характерные напряжения в зубьях

Вид упрочнения и нагрузка, М	Maximum Principal Stress, МПа	Normal Stress Y, МПа	Normal Stress Y, МПа (M = 0)	Shear Stress YZ, МПа
Нецементированный M = 150 Н·м	260 на поверхности	150		-240...+150
Цементация 0,5 мм M = 150 Н·м	250 под цементованным слоем	160	98 под цементованным слоем	-200...+100
Цементация 0,5 мм M = 400 Н·м	420 под цементованным слоем	300	105 под цементованным слоем	-300...+200
Нецементированный M = 400 Н·м	320 на поверхности	220		-300...+70
Цементация 1,0 мм M = 400 Н·м	500 под цементованным слоем	470	180 под цементованным слоем	-230...+210

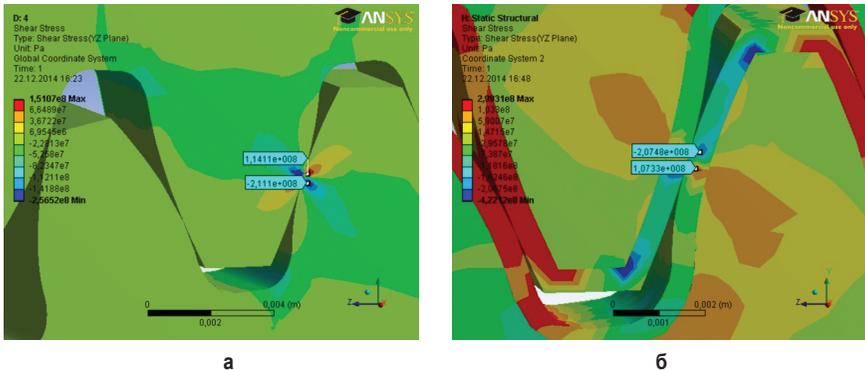


Рис. 8. Распределение касательных напряжений в зубчатом зацеплении:
а – нецементованный и б – цементированный зуб

Проверочный силовой расчет зубчатого зацепления в ANSYS производится на основе справочных данных о материалах, используемых для зубчатых колес. Этими данными являются: марка стали, механические свойства после различных режимов термической и химико-термической обработки.

Основной критерий для оценки изгибной выносливости – это наибольшие растягивающие напряжения (Maximum Principal Stress). Напряжения MPS несколько больше рассчитанных по общепринятой методике, но меньше Normal Stress, что вполне нормально.

Оценка контактной выносливости, производимой по касательным напряжениям – Shear Stress (рис. 8) в зоне контакта, согласуется с величиной допустимых контактных нагрузок и имеет вполне определенный физический смысл.

Полная картина изменения напряжений в процессе различных фаз зацепления представлена на рис. 9. Приведенные на рисунке изменения Maximum Principal Stress даны для анализируемого зуба и сопряженного.

Допускаемые контактные нагрузки с применением программы ANSYS можно оценивать по величине нормальных тангенциальных и радиальных напряжений Normal Stress. Все эти напряжения взаимосвязаны.

Рассмотренная прямозубая зубчатая пара является частью ступени планетарной передачи – центральное колесо а и г – сателлит. Логическим продолжением будет анализ НДС пары с внутренним зацеплением, т. е. сателлита с колесом б. Для этого выбраны условия: колесо б с числом зубьев 102, нецементованное, вращающееся, крутящий момент 230 Н·м прикладывается к сателлиту.

Вид напряженного состояния в контакте а-б также отличается: на сателлите $\chi \approx -1$, что соответствует растяжению, а на колесе б $\chi \approx 1$ – сжатию. Величина MPS в паре а-г составляет 250 МПа, а для пары г-б 190 МПа на сателлите и не более 50 МПа для колеса б. Существенно меньше и касательные напряжения для пары а-г SS -240...+150 МПа, для г-б SS -57...+14 на сателлите и SS -68...+35 на колесе б. Все это иллюстрируется на рис. 10, а, б.

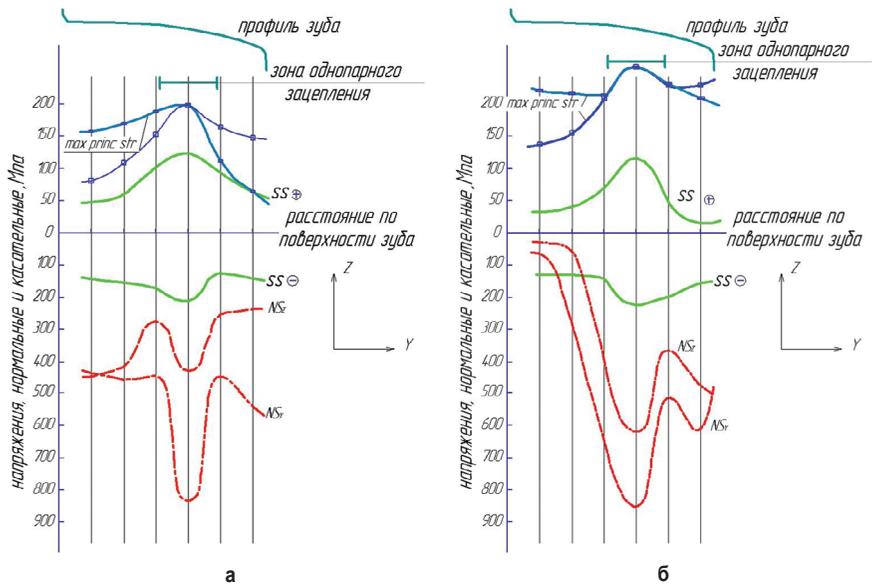


Рис. 9. Распределение напряжений в зоне контакта по поверхностному слою нецементированного (а) и цементованного (б) зуба

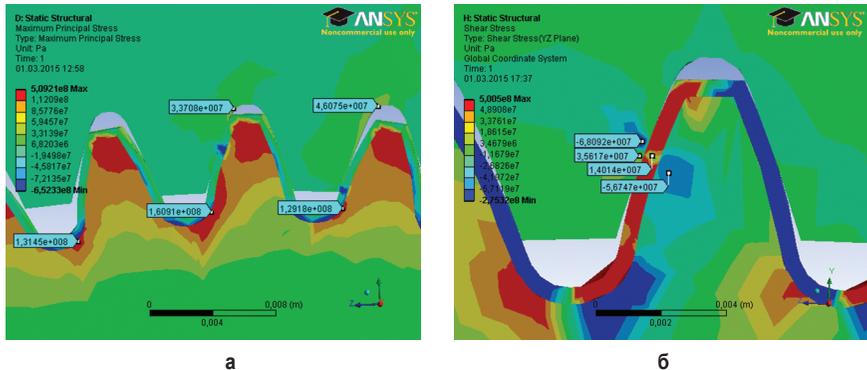


Рис. 10. Maximum Principal Stress при двухпарном зацеплении – а и Shear Stress (касательные напряжения) – б

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБОБЩЕННЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработан принцип моделирования ОН в деталях различной конфигурации при поверхностном упрочнении. Моделируется двухслойное изделие: упрочненный поверхностный слой и сердцевина с плавным переходом.

2. ОН в цементованном изделии моделируются на основе экспериментальных данных образцов-свидетелей по величине остаточной деформации. Образец-свидетель из той же марки стали, что и изделие, проходит идентичный цикл термообработки.

3. Расчет НДС изделия производится по главным напряжениям с учетом касательных в выбранных сечениях. По критерию Надаи-Лоде определяется преобладающий вид напряженного состояния.

4. При действии внешних циклических нагрузок используется модуль Fotig в программе ANSYS для расчета долговечности. Исходными данными являются: вид напряженного состояния, коэффициент асимметрии цикла и величина предела выносливости для выбранного режима упрочнения стали.

5. Картина НДС цементованных зубьев колес позволяет определить наиболее нагруженную область. Обычно это ножка зуба под цементованным слоем. По величине наибольших растягивающих напряжений – Maximum Principal Stress определяются действующие напряжения. Максимум напряжений реализуется при однопарном зацеплении и приложении нагрузки в полюсе зацепления.

6. С увеличением глубины цементованного слоя (более 0,3 м) расширяется область растягивающих напряжений и снижается изгибная прочность.

7. По величине касательных напряжений оценивается контактная прочность. Максимум касательных напряжений, как правило, находится в цементованном слое.

8. Компьютерное моделирование ОН позволяет оценить вклад ОН в изгибную и контактную прочность отдельно, а также их вклад в усталостную прочность. Компьютерное моделирование НДС изделий дает оценку роли растягивающих напряжений.

9. Низкий уровень напряжений в зубьях колеса с внутренним зацеплением позволяет рассматривать для его изготовления легкие алюминиевые сплавы. Эти сплавы имеют предел выносливости существенно выше действующих напряжений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для достижения поставленной цели – разработки метода компьютерного моделирования ОН и НДС цементованных заготовок и деталей, основанного на использовании простых экспериментальных данных в программе ANSYS, были решены следующие задачи:

1) выбран прототип упрочняемых цементацией деталей и заготовок и разработаны для них виртуальные модели;

2) разработан метод создания на модели остаточных напряжений в соответствии с заданным распределением концентрации углерода;

3) разработан и апробирован метод контроля глубины цементованного слоя и деформаций, вызванных остаточными напряжениями;

4) проведено исследование влияния толщины упрочненного слоя на полную картину НДС на образцах и выборочно на деталях;

5) разработан метод решения контактных задач на примере зубчатых зацеплений и тел качения по оценке влияния ОН на контактную прочность и изгибную выносливость при действии циклических нагрузок.

В диссертации достигнута цель и решены поставленные задачи.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Каратушин С.И., **Плешанова Ю.А.** Моделирование внутренних напряжений // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Актуальные задачи машиноведения, деталей машин и триботехники». – СПб., 2010. – С. 242–243.

2. Каратушин С.И., Спиридонов Д.В., **Плешанова Ю.А.** Моделирование остаточных напряжений при цементации // Известия вузов. Машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 49–52.

3. Каратушин С.И., Бильдюк Н.А., **Плешанова Ю.А.**, Бокучава П.Н. Расчет ружин с переменными параметрами // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2013. – № 1 (23). – С. 23–26.

4. Каратушин С.И., Спиридонов Д.В., **Плешанова Ю.А.**, Бокучава П.Н. Влияние цементации на остаточные напряжения в зубчатом зацеплении // Физика и химия обработки металлов. – 2013. – № 3. – С. 79–81.

5. Каратушин С.И., Бильдюк Н.А., **Плешанова Ю.А.** Напряженно-деформированное состояние при качении с противодействующим моментом // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2013. – № 4 (26). – С. 42–45.

6. Каратушин С.И., Спиридонов Д.В., **Плешанова Ю.А.** Остаточные напряжения в цилиндрических изделиях // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – № 6 (696). – С. 53–55.

7. Каратушин С.И., Спиридонов Д.В., **Плешанова Ю.А.** Моделирование остаточных напряжений в упругих элементах, работающих на кручение // Технология металлов. – 2013. – № 7. – С. 10–14.

8. Каратушин С.И., **Плешанова Ю.А.**, Бокучава П.Н. Влияние цементации на контактные напряжения при качении // Вестник машиностроения. – 2014. – № 8. – С. 57–58.

9. Каратушин С.И., Спиридонов Д.В., **Плешанова Ю.А.**, Бокучава П.Н. Значение остаточных напряжений в контактной прочности: Сборник трудов XIV Международной научной конференции «Трибология и надежность». – СПб., 2014. – С. 83–91.

10. Каратушин С.И., Бильдюк Н.А., **Плешанова Ю.А.**, Бокучава П.Н. Проверочный силовой расчет в ANSYS зубчатого зацепления // Известия вузов. Машиностроение. – 2015. – № 3. – С. 27–34.

11. Каратушин С.И., **Плешанова Ю.А.**, Бильдюк Н.А., Бокучава П.Н. Проверочный силовой расчет зубьев планетарной ступени редуктора с использованием пакета ANSYS // Известия вузов. Машиностроение. – 2015. – № 12. – С. 48–55.

Подписано в печать 22.03.2016. Формат 60 × 90/16
Бумага офсетная. Печать офсетная
Печ. л. 1,25. Тираж 120 экз.
Зак. № 30005188

Отпечатано на Картографической фабрике ВСЕГЕИ
199178, Санкт-Петербург, Средний пр., 72
Тел. 328-91-90, факс 321-81-53