

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Кузбасский государственный университет имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра технологии машиностроения

Составители  
В. Ю. Блюменштейн  
М. С. Махалов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ  
В ДЕТАЛЯХ ПРИ УПРОЧНЕНИИ МЕТОДОМ  
ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

**Методические указания к лабораторной работе  
для студентов всех форм обучения**

Рекомендовано учебно-методической комиссией направлений подготовки  
15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств» и 15.03.01 «Машиностроение»  
в качестве электронного издания для использования в учебном процессе

Кемерово 2016

## Рецензенты:

Клепцов А. А. – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения

Кречетов А. А. – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения

**Исследование остаточных напряжений в деталях при упрочнении методом поверхностного пластического деформирования:** метод. указания к лабораторной работе [Электронный ресурс] по дисциплине «**Прогрессивные технологии упрочнения и восстановления деталей машин**» для студентов направлений подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» и 15.03.01 «Машиностроение» всех форм обучения / сост. В. Ю. Блюменштейн, М. С. Махалов; КузГТУ. – Кемерово, 2016. – Систем. требования: Pentium IV; ОЗУ 256 Мб; Windows XP; мышь. – Загл. с экрана.

Изложены основные цели и порядок выполнения лабораторной работы «Исследование остаточных напряжений в деталях при упрочнении методом поверхностного пластического деформирования».

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлениям подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», профиль «Технология машиностроения» и «Машиностроение», профиль «Реновация оборудования топливно-энергетического комплекса».

© КузГТУ, 2016

© Блюменштейн В. Ю.,

Махалов М. С., составление, 2016

## **1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ**

Целью работы: исследование влияния упрочняющей обработки методами поверхностного пластического деформирования (ППД) на формирование остаточных напряжений (ОН) в поверхностном слое (ПС) деталей.

Задачи работы:

1. Ознакомиться с методикой расчета окружных ОН методом разрезки колец.
2. Провести упрочняющую обработку образцов-колец методами ППД.
3. Провести расчет окружных ОН образцов-колец.
4. Исследовать влияние метода и режимов упрочняющей обработки на формирование ОН в поверхностном слое деталей.

## **2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

### **2.1. Методика определения остаточных напряжений методом разрезки колец**

Остаточные напряжения – это упругие напряжения, остающиеся в твёрдом теле, подвергнутом какому-либо внешнему воздействию, после его снятия. ОН возникают в том случае, когда внешние воздействия создают в теле не только упругую деформацию, но и пластическую. ОН возникают в деталях в результате действия различных технологических факторов при выполнении большинства технологических операций (при литье, ковке, термической и механической обработке) и по своей величине могут даже превосходить напряжения от внешних нагрузок на деталь. Во многих случаях разрушение конструкций при переменных нагрузках связано с действием растягивающих ОН (рабочие лопатки турбин и компрессоров, коленчатые валы, плунжеры и многие другие детали). Для уменьшения ОН часто применяется специальная термическая обработка, однако ее использование не всегда возможно и целесообразно.

Сжимающие ОН являются полезными, особенно для поверхностных слоев материала деталей, работающих при воздействии циклических нагрузок, поэтому в машиностроении исполь-

зуются методы обработки, создающие сжимающие ОН в поверхностном слое деталей (например, обдувка дробью, обкатывание роликами и др.). Полезное действие сжимающих ОН обусловлено тем, что они, складываясь с растягивающими напряжениями от эксплуатационной нагрузки, снижают величину действующих напряжений.

Для определения величины и знака ОН в деталях в машиностроении используются методы рентгеноструктурного анализа или послойного травления. Эти методы требуют серьезного аппаратного обеспечения.

Одним из доступных методов определения ОН является метод разрезки тонкостенных колец. Тонкостенными считают кольца, для которых выполняется неравенство:

$$\frac{R}{h} \geq 3, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус кольца,  $h$  – толщина стенки кольца.

В общем случае имеется трехосное напряженное состояние (рис. 1). Величина  $\sigma_r$  для тонкостенных колец мала по сравнению с напряжениями  $\sigma_\theta$   $\sigma_z$ , что становится понятным, если учесть равенство нулю радиальных напряжений на внешней и внутренней цилиндрических поверхностях [1-2].

При разрезке кольца вдоль образующей в материале кольца возникают дополнительные окружные напряжения  $\sigma'_\theta$ . Дополнительные напряжения также называются снимаемыми напряжениями, так как они обычно противоположны по знаку существовавшим до разрезки ОН. Рассмотрим определение дополнительных напряжений в поверхностном слое кольца (рис. 2). Дополнительные напряжения определяются по изменению диаметра кольца после обработки. В силу условия равновесия независимо от особенностей распределения напряжений по плоскости разреза, существенное значение имеет лишь момент, создаваемый этими напряжениями.

Следует отметить, что не зная распределения ОН в кольце, можно по изменению диаметра после разрезки  $\delta_r$  однозначно определить величину момента  $M_r$  ОН в сечении разреза и дополнительные напряжения  $\sigma'_\theta$ , вызванные этим моментом. Пусть до разрезки в кольце существуют некоторые ОН  $\sigma_\theta$  (рис. 3, а). Пунк-

тиром показано линейное распределение напряжений, создающих такой же изгибающий момент. Дополнительные напряжения  $\sigma'_\theta$  (рис. 3, а) соответствуют моменту  $M_p$ , создаваемому истинными ОН  $\sigma_\theta$ , а эпюра дополнительных напряжений  $\sigma'_\theta$  представляют собой зеркальное отображение пунктирной прямой. Распределение ОН после разрезки показано на рис. 3, б. Эпюра ОН в кольце после его разрезки является самоуравновешенной.

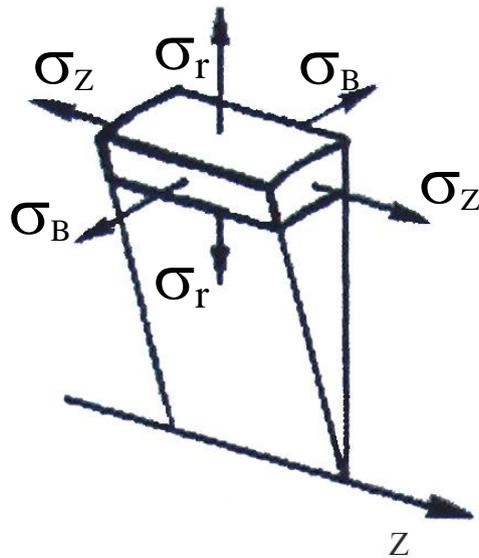
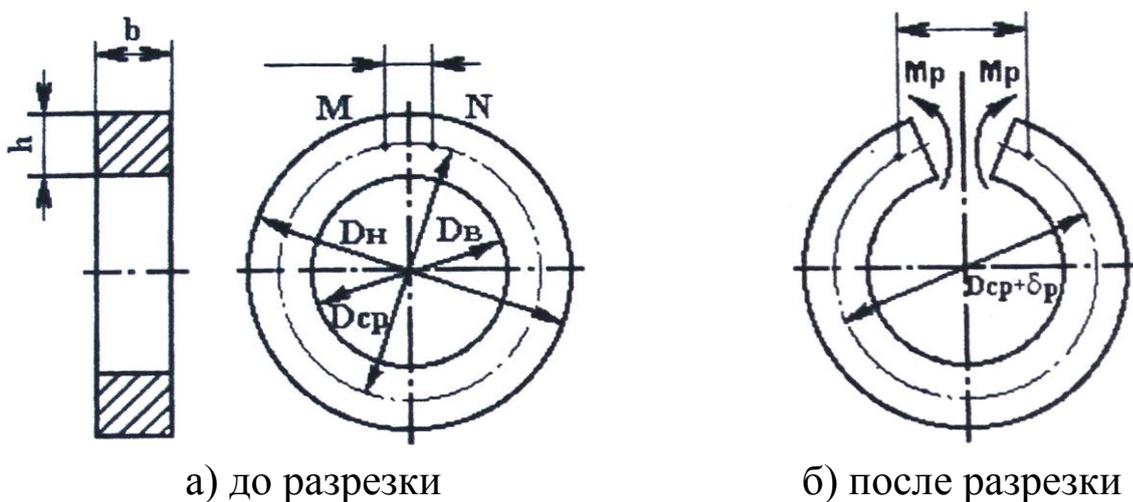


Рис. 1. Напряженное состояние элемента тонкостенного кольца



а) до разрезки

б) после разрезки

Рис. 2. Экспериментальный образец

Если увеличение диаметра составляет  $\delta_p$  (рис. 2), то это перемещение вызвано изгибающим моментом:

$$M_P = \frac{2EJ}{D_{cp}^2}, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $J$  – момент инерции сечения кольца;  $D_{cp}$  – средний диаметр кольца.

Момент инерции сечения кольца определяется по формуле:

$$J = \frac{bh^3}{12},$$

где  $b$  – размер кольца в осевом направлении;  $h$  – толщина стенки кольца.

Дополнение напряжение, создаваемое моментом  $M_P$  в поверхностном слое:

$$\sigma'_\theta = -\frac{M_P h}{2J}. \quad (3)$$

Таким образом, учитывая равенства (2) и (3), оценить величину дополнительных напряжений в поверхностном слое можно по формуле

$$\sigma'_\theta = -\frac{E\delta_P h}{D_{cp}^2}. \quad (4)$$

Принимая, что хорда  $MN$  приближенно равна дуге  $MN$  (см. рис. 2), величину  $\delta_P$  можно определить из соотношения:

$$\delta_P = \frac{\Delta}{\pi}, \quad (5)$$

где  $\Delta$  – изменение расстояния между метками  $M$  и  $N$  после разрезки кольца (см. рис. 2). Величина  $\Delta$  определяется из соотношения:

$$\Delta = \Delta_{КОН} - \Delta_{НАЧ}, \quad (6)$$

где  $\Delta_{КОН}$  и  $\Delta_{НАЧ}$  – соответственно расстояние между метками  $M$  и  $N$  до и после разрезки кольца.

Правило знаков при расчете по формуле (3) таково: положительное значение  $\sigma'_\theta$  соответствует растягивающим ОН, величина  $\delta_P$  положительна при увеличении диаметра кольца. Соответственно, истинные ОН  $\sigma_\theta$  имеют знак, противоположный знаку дополнительных напряжений  $\sigma'_\theta$ .

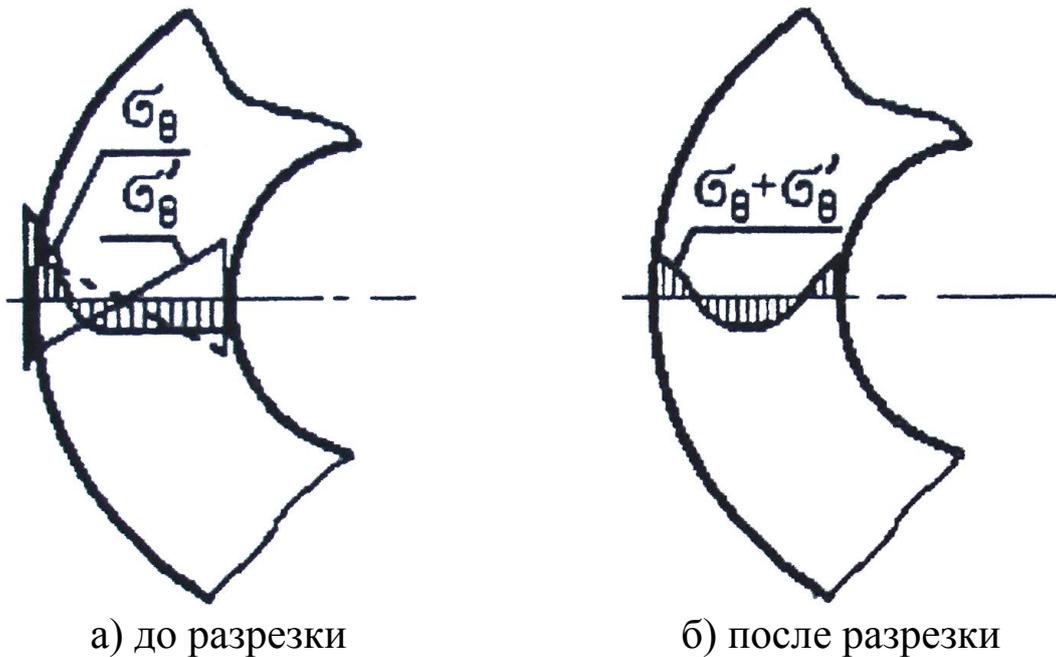


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений в образце

## 2.2. Методика определения изменения диаметра кольца после его разрезки

Определение изменения диаметра кольца основано на измерении расстояния между метками *M* и *N* на торцевой поверхности до и после его разрезки (рис. 2) и последующем расчете по формулам (5,6). Определение этого расстояния выполняется с помощью микроскопа твердомера ПМТ-3.

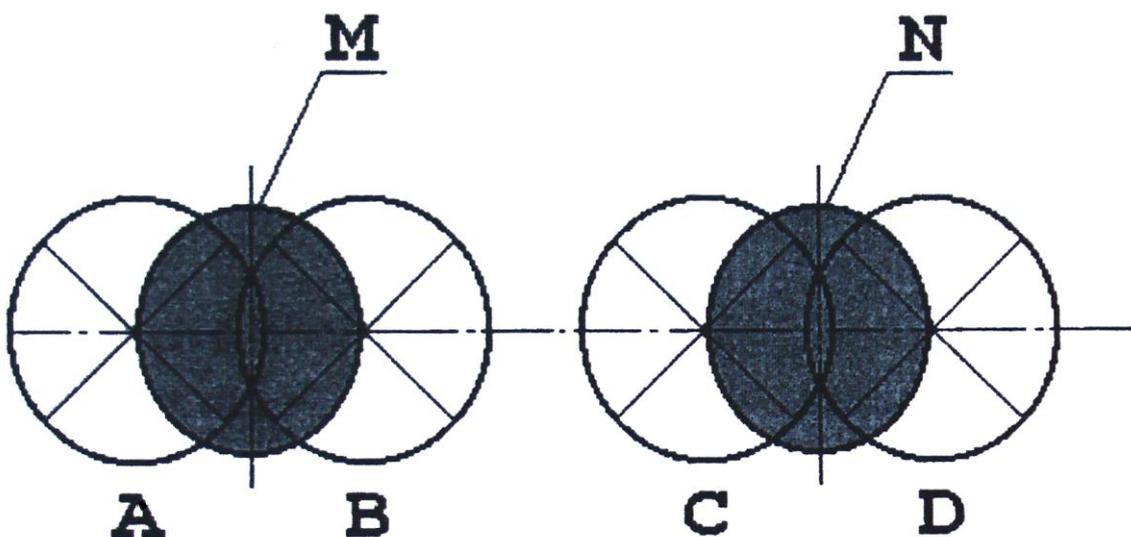


Рис. 4. Схема определения расстояний между метками на образце

Метки представляют собой углубления от конического индентора и в окуляре микроскопа видны как темные круги (рис. 4). Расстояние  $MN$  фактически является расстоянием между центрами этих кругов. Для определения этого расстояния нужно расположить экспериментальный образец на предметном столике микроскопа таким образом, чтобы воображаемая линия, соединяющая центра кругов, была параллельна направлению столика. Перемещение столика осуществляется с помощью вращающегося микрометрического винта. Оптическая система микроскопа имеет перекрестье, видимое в окуляре. Для определения расстояния  $MN$  следует вращением микрометрического винта добиться последовательного совмещения границ отпечатков с перекрестьем в окуляре (рис. 4) и снять показания микрометрического винта  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ . Расстояние между центрами отпечатков (меток) в этом случае определяется по формуле

$$MN = \left| \frac{A+B}{2} - \frac{C+D}{2} \right|. \quad (7)$$

### 3. ОБЩАЯ МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 3.1. Экспериментальные образцы и план исследований

Образцы изготовлены из стали 45 ГОСТ 1050-88; химический состав и механические свойства представлены в табл. 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1

Химический состав стали 45 ГОСТ 1050-88 (%)

$C$	$Si$	$Mn$	$Cr$	$S$	$P$
0,42-0,5	0,17-0,37	0,5-0,8	до 0,25	до 0,04	до 0,035

Таблица 3.2

Механические свойства стали 45 ГОСТ 1050-88 после нормализации

$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_e$ , МПа	$\psi$ , %	$\delta$ , %	$KCU$ , Дж/см <sup>2</sup>	$HV$
355	600	16	40	49	160-180

Образцы представляют собой кольца, устанавливаемые на специальную цилиндрическую оправку с промежуточными кольцами и закрепляемые гайкой. На торце каждого образца маркируется его порядковый номер в соответствии с планом экспериментальных исследований. Исследования проводятся по плану классических однофакторных экспериментов путем обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием (ППД). Обработка производится согласно методике, описанной в [3]. Размеры колец составляют:  $b = 7$  мм,  $D_n = 60$  мм,  $D_v = 30$  мм.

### 3.2. Оборудование, инструменты, материалы

При проведении лабораторной работы используются:

- 1) образцы-кольца (12 шт.), обработанные согласно табл. 3.3, табл. 3.4 и табл. 3.5;
- 2) станок токарно-винторезный 1К62;
- 3) накатное устройство для обработки деталей ППД;
- 4) микротвердомер ПМТ-3;
- 5) машина отрезная абразивная ручная.

Таблица 3.3

Маршруты обработки колец-образцов

Номера колец	Вид обработки			
	токарная	ППД №1	ППД №2	ППД №3
№1 - №3	+	-	-	-
№4 - №6	+	+	-	-
№7 - №9	+	+	+	-
№10 - №12	+	+	-	+

Таблица 3.4

Режимы резания образцов при токарной обработке

Толщина срезаемого слоя $a$ , мм	0,5
Подача $S$ , мм/об	0,1
Частота $n$ , об/мин	630

Таблица 3.5

Режимы обработки ППД роликом (частота  $n = 630$  об/мин)

Номер образца	Подача $S$ , мм/об	Усилие $P$ , кгс (Н)		
		ППД №1	ППД №2	ППД №3
4	0,1	200 (2000)		
5		250 (2500)		
6		300 (3000)		
7		200 (2000)	300 (3000)	
8		250 (2500)	350 (3500)	
9		300 (3000)	400 (4000)	
10	0,2	200 (2000)		300 (3000)
11		250 (2500)		350 (3500)
12		300 (3500)		400 (4000)

#### 4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Изготовить экспериментальные образцы-кольца, маркировать на торце номер образца.
2. Измерить экспериментальные образцы-кольца. Результаты измерений занести в протокол табл. 5.1.
3. Ознакомиться с общей методикой выполнения исследований.
4. Ознакомиться с паспортными данными станка токарно-винторезного 1К62.
5. Изучить конструкцию роликового обкатного устройства и методику его тарировки [3].
6. Выполнить механическую обработку образцов в соответствии с табл. 3.3–3.5.
7. Изучить устройство и технические характеристики микротвердомера ПМТ-3.
8. На микротвердомере ПМТ-3 расставить метки  $M$  и  $N$  и измерить расстояние между ними. Результаты занести в протокол табл. 5.1.
9. Выполнить разрезку колец ножовкой по плоскости осевого сечения между метками  $M$  и  $N$ .
10. На микротвердомере ПМТ-3 измерить конечное значение расстояния между метками  $M$  и  $N$ .

11. Согласно формулам 1–5 произвести расчеты ОН. Результаты занести в протокол табл. 5.1.

12. Построить графические зависимости величины и знака ОН поверхностного слоя от метода и режимов обработки.

13. Сделать выводы по выполненной работе.

## 5. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет о лабораторной работе выполняется на отдельных листах формата 210×297 мм. Текст, эскизы, схемы, таблицы, расчетные данные, графики зависимостей и другое должны соответствовать требованиям, предъявляемым государственными стандартами.

Целесообразно выполнение графических зависимостей с использованием стандартных программных продуктов типа Excel, Statistica и др.

Отчет о выполненной работе оформляется в виде протокола, содержащего следующие разделы:

1. Титульный лист с указанием необходимых выходных данных.
2. Цель и задачи комплексной лабораторной работы.
3. Основные теоретические положения.
4. Общая методика выполнения исследований, включающая: эскиз образца с указанием его действительных размеров, химического состава, механических свойств материала; схемы обработки резанием и обкатыванием; переходы обработки образцов с указанием режимов резания и обкатывания.
5. Перечень средств технологического оснащения и используемого измерительного инструмента.
6. Начальные размеры колец, занесенные в табл. 5.1.
7. Результаты измерения начального и конечного расстояния между метками, занесенные в табл. 5.1.
8. Результаты расчета окружных ОН в кольцах при различных видах их обработки, занесенные в табл. 5.1
9. Графики зависимости величины ОН от режимов резания и обкатывания.

Таблица 5.1

## Сводная таблица измерений и расчетов

Измеряемый или рассчитываемый параметр	Обозначение и расчетная формула	№ кольца-образца											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Начальный внутренний диаметр кольца	$Dв$												
Начальный наружный диаметр кольца	$Dн$												
Толщина стенки кольца	$h = \frac{Dн - Dв}{2}$												
Средний диаметр кольца	$D = \frac{Dн + Dв}{2}$												
Начальное расстояние между метками $M$ и $N$	$\Delta_{нач}$												
Расстояние между метками $M$ и $N$ после разрезки кольца	$\Delta_{кон}$												
Изменение расстояния между метками $M$ и $N$ (увеличение «+» уменьшение «-»)	$\Delta = \Delta_{кон} - \Delta_{нач}$												
Изменение диаметра кольца после разрезки (увеличение «+» уменьшение «-»)	$\delta_p = \frac{\Delta}{\pi}$												
Дополнительные напряжения	$\sigma'_\theta = -\frac{E\delta_p h}{D_{CP}^2}$												
Остаточные напряжения в кольцах	$\sigma_\theta = -\sigma'_\theta$												

10. Анализ влияния режимов резания и обкатывания на величину ОН поверхностного слоя.

11. Общие выводы по работе.

## **6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что такое остаточные напряжения?
2. Какие значения ОН являются наиболее предпочтительными с точки зрения надежности и долговечности эксплуатации машин?
3. Какими методами обработки можно добиться создания сжимающих ОН в поверхностном слое деталей?
4. Какие методы используются для определения величины и знака остаточных напряжений?
5. В чем сущность методики расчета ОН методом разрезки колец?
6. Что такое дополнительные напряжения?
7. Назовите методы расчета дополнительных напряжений?

## **7. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Биргер И. А. Остаточные напряжения. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 232 с., ил.
2. Технология машиностроения: в 2 т. Т 1. Основы ТМС: учеб. для вузов / В. М. Бурцев, А. С. Васильев, А. М. Дальский [и др.]; под ред. А. М. Дальского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 564 с.: ил.
3. Исследование параметров качества поверхностного слоя деталей машин при обработке методами пластического деформирования : метод. указания к лабораторной работе [Электронный ресурс]: для студентов направлений подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» и 15.03.01 «Машиностроение» / сост. В. Ю. Блюменштейн, М. С. Махалов; КузГТУ. – Кемерово, 2016. – Систем. требования: Pentium IV; ОЗУ 256 Мб; Windows XP; мышь. – Загл. с экрана.

## Содержание

1.	Цель и задачи работы	3
2.	Теоретические положения	3
2.1.	Методика определения остаточных напряжений методом разрезки колец	3
2.2.	Методика определения изменения диаметра кольца после его разрезки	7
3.	Общая методика проведения исследований	8
3.1.	Экспериментальные образцы и план исследований	8
3.2.	Оборудование, инструменты, материалы	9
4.	Порядок выполнения лабораторной работы	10
5.	Требования к отчету	11
6.	Контрольные вопросы	13
7.	Список рекомендуемой литературы	13