

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(Национальный исследовательский университет)

Факультет «Материаловедение и металлургические технологии»  
Кафедра «Материаловедение и физико-химия материалов»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, ( )

\_\_\_\_\_ ( )  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ (Винник Д.А.)  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

## ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ КОЛЕЦ ИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ ЮУрГУ–  
22.04.02.2020.152. ПЗ ВК НИР

Руководитель проекта, к.т.н., доцент,  
\_\_\_\_\_ /Н.А. Шабурова/  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

Автор ВКР  
студент группы П-243  
\_\_\_\_\_ /Сагидуллин Р.З.  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

Нормоконтролер, профессор, к.т.н.  
\_\_\_\_\_ /Н.А. Шабурова./  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

Челябинск 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	9
1. Литературный обзор .....	10
1.1 Основные характеристики инструментальных сталей.....	11
1.2 Геометрическая нестабильность металлических изделий.....	17
1.2.1 Нестабильности фазового и структурного состояния .....	17
1.2.2 Воздействие различных физических полей и излучений.....	21
1.2.3 Микроползучести под действием внешних нагрузок.....	23
1.2.4 Релаксации остаточных внутренних напряжений .....	24
1.3 Методы определения характеристик размерной стабильности металлов....	24
1.3.1 Общая характеристика основных методов стабилизирующей обработки .....	30
1.4 Калибры из инструментальных сталей .....	32
1.4.1 Контроль резьбы и эксплуатация .....	32
1.4.2 Система допусков калибров.....	36
1.4.3 Калибры нефтяного сортамента .....	42
1.5 Описание проблемы и постановка задач .....	43
2. Методы исследования и оборудование.....	44
2.1. Исследование химического состава... ..	44
2.2 Исследование микроструктуры .....	47
2.3 Определение содержания остаточного аустенита в стали по <i>термо</i> ЭДС...48	
2.4 Измерение твердости. Микротвердомер FM 800.....	53
3. Результаты.....	55
3.1 Анализ существующей технологии изготовления калибров на предприятии.....	55
3.2 Химический состав образца .....	60
3.3 Анализ режима проведенной термообработки.....	60
3.4 Результаты исследования микроструктуры.....	65
3.4.1. Металлографический анализ образца № 1 .....	65
3.4.2. Металлографический анализ образца № 2 .....	67

3.4.3. Металлографический анализ образца №3 .....	69
3.5. Результаты определения количества остаточного аустенита.....	71
Выводы .....	72
Библиографический список.....	73
Приложения .....	76

## АННОТАЦИЯ

Сагидуллин Р.З. Геометрическая нестабильность колец из инструментальной стали  
Челябинск: ЮУрГУ, 2020, 74с, 31 илл.  
Библиография литературы – 32 наименований,  
15 таблиц, 3 приложения.

В данной выпускной квалификационной работе изучены и установлены причины возникновения геометрической нестабильности колец из инструментальной стали. Дана общая характеристика колец-калибров. Проведен химический анализ образцов, анализ режимов термообработки и металлографический анализ. Выявлены причины изменения размеров образцов.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- Собрана и проанализирована литературная информация о возникновении геометрической нестабильности.
- Исследован, с помощью атомно-эмиссионном спектрометра, химический состав образцов.
- Сделан металлографический анализ образцов, с помощью микроскопа.
- Установлены причины возникновения изменения размера образца.

*Ключевые слова: сталь, геометрическая нестабильность, калибр, пределы релаксации и ползучести, прецизионные детали и узлы, размерная нестабильность, микропластические деформации, прецизионный предел упругости, микроползучесть.*

## **Введение**

Способность металлов к самопроизвольному изменению формы и размеров, на пути обеспечения постоянно растущих условий к точности и прочности приборов, с течением времени является существенным препятствием. К деталям и узлам приборов комплексов предъявляются весьма жесткие требования по их геометрической точности: отклонение линейных размеров по 3—4 квалитетам и с более высокой точностью, отклонение взаимного расположения и формы поверхностей — доли угловой секунды или десятые, сотые доли микрометра. При этом требования к постоянству размеров и формы еще более высоки и обязаны обеспечиваться при продолжительной эксплуатации в условиях постоянной и переменной температуры, так как геометрическая нестабильность прецизионных деталей и узлов напрямую влияет на погрешность прибора.

Обеспечение указанных требований считается довольно непростой задачей, решение которой связано с потребностью применения металлических материалов с высоким качеством, необходимостью использования специальных методов и технологических процессов обработки при изготовлении изделий.

## 1. Литературный обзор

Для наиболее подробного изучения геометрической неустойчивости металлических материалов, необходимо изучить характеристики инструментальных сталей. Следует провести подробный анализ состава исследуемого материала, различных свойств, которые способен проявлять данный объект. Основные свойства таких сталей, которые должны обладать после окончательной обработки: механические, тепловые, некоторые физические и химические свойства. Нужно знать, что при улучшении одного или нескольких свойств неминуемо приводит к ухудшению других свойств. Инструментальные стали считаются одним из самых больших групп, которые в следствии термических нагрузок приобретают весьма значительную прочность, а также твердость и износостойкость, подобные характеристики нужны для обработки материалов резанием или давлением. Также данные стали обладают теплостойкостью, то есть способностью сохранять свои свойства при нагреве.

Использование таких сталей можно встретить в авиастроении, машиностроительной отрасли, нефтяной отрасли, используют для подшипников качения, пружин различных типов, деталей топливной аппаратуры и ходовых винтов. Более отличительной группой по структурному признаку считаются заэвтектоидные и ледебуритные стали. Они после закалки обладают твердой металлической основой и более распределены в ней твердые карбиды. Данные стали чаще подвергают отпуску, для того, чтобы они сохраняли для эксплуатации мартенситную структуру и высокую твердость 58-60 HRC. По химическому составу большая часть инструментальных сталей высоко- и сложнелегированные; некоторые из них содержат до 30-45% легирующих элементов.

## 1.1 Основные характеристики инструментальных сталей

По характеру легирования, свойствам и областям применения, стали для режущего и измерительного инструмента можно разделить на две группы:

- 1) небольшой прокаливаемости: 7ХФ, 8ХФ, 9ХФ, 11ХФ, 13Х, ХВ4, ХВ5;
- 2) повышенной прокаливаемости: 9Х, Х, 9ХС, ХГС, 12Х1, 9ХВГ, ХВГ, ХВСГ.

Химический состав легированных инструментальных сталей приведен в ГОСТ 5950-2000 .

Стали первой группы, незначительно превосходят углеродистые стали У7-У13, по устойчивости переохлажденного аустенита, но из-за легирования хромом (0,2-0,7 %), ванадием (0,15-0,3%) и вольфрамом (до 4 %) обладают повышенной устойчивостью против износостойкости, перегрева и теплостойкости.

Содержание остаточного аустенита незначительна, после термической обработки, что гарантирует им высокий предел текучести. Большая часть из этих сталей подвергают поверхностной закалке, при изготовлении инструментов. Стали небольшой прокаливаемости имеют специальное применение. К примеру, сталь 13Х предназначена обычно для бритвенных ножей, лезвий, хирургического и гравировального инструмента; а сталь ХВ4 рекомендуется для резцов и фрез, применяемых с целью обработки резанием с небольшими скоростями материалов достаточно высокой твердости.

Стали 2-ой группы обладают более высоким содержанием хрома (0,8-1,7%). Существенно увеличивает прокаливаемость комплексное легирование, сравнительно с небольшими количествами элементов, способствует к увеличению дисперсности и однородности распределения карбидов (за исключением сталей типа ХВГ), содействует к сохранению более мелкого зерна при закалке, уменьшает восприимчивость к перегреву. Стали повышенной прокаливаемости используют для изготовления инструментов больших сечений,

охлаждаемых при закалке в масле или горячих средах. Эти особенности сталей второй группы (9ХС, ХГС, ХВГ, ХВСГ) позволяют использовать их для изготовления режущего (метчики, плашки, развертки, фрезы, протяжки), а также штампового инструмента, чем из углеродистых и низкопрокаливающихся сталей. Отличительной особенностью марганецсодержащих сталей (ХВГ, ХВСГ, 9ХВГ) считается их небольшая деформируемость при термической обработке, обусловленная высоким содержанием остаточного аустенита. Они рекомендованы для изготовления тех инструментов, к которым предъявляются жесткие требования относительно стабильности размеров при термической обработке. В ходе замедленного охлаждения после горячей пластической деформации или высокотемпературного нагрева, указанные стали склонны к повышенному формированию карбидной сетки по границам зерен в результате выделения карбидов. К низколегированным инструментальным сталям, при термической обработке, следует отнести необходимость использования резких охлаждающих сред (водные растворы солей и щелочей) для сталей небольшой прокаливаемости, закаливаемых на максимальную твердость (7ХФ, 8ХФ, 9ХФ, 11ХФ, 13Х).[1]

Стали повышенной прокаливаемости (9ХС, ХВГ, 9ХВГ, ХВСГ) необходимо подвергать неполной изотермической (выдержка при 180-250 °С продолжительностью 30-60 мин) или ступенчатой (охлаждение в горячих средах с температурой 150- 220 °С с дальнейшим переносом на воздух) закалке с целью снижения термических напряжений и коробления у инструментов сложной формы. Длительность выдержки при аустенизации низколегированных сталей выбирают из расчета 50-70 с/мм при нагреве в воздушной печи и 35- 40 с/мм при нагреве в соляной ванне.

Продолжительность отпуска, как правило, составляет 1-2 ч плюс 1 – 1,5 мин на 1 мм толщины крупногабаритного инструмента. Критические точки, режимыковки и отжига, режимы окончательной термической обработки и назначение легированных инструментальных сталей приведены в таблицах ниже (табл 1, 2, 3)[1]:



Таблица 1. Критические точки легированных инструментальных сталей.

Сталь	$A_{c1}$	$A_{cM}$	$A_{rM}$	$A_{r1}$	$M_H$	$M_K$
Стали небольшой прокаливаемости						
9ХФ	700	—	-	-	215	-
11ХФ	—	—	-	-	195	-
13Х	760	780	740	710	-	-
В2Ф	750	800	690	650	-	-
Стали повышенной прокаливаемости						
9Х	730	860	-	700	270	
Х	745	900	-	700	240	-
9ХС	770	870	-	730	160	-30
12Х1	750	890	-	-	245	-40
9ХВГ	750	900	-	-	205	-
ХВГ	750	940	-	710	210	-50
ХВСГ	770	785	730	720	200	20
Х6ВФ	815	845	775	625	150	-100

Таблица 2. Режимы ковки и отжига легированных инструментальных сталей

Сталь	Интервал ковочных температур, °С	Режим отжига	НВ, МПа, не более
7ХФ	1160—850	Нагрев на 780—800 °С, охлаждение со скоростью 50°С/ч до 640—680 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50°С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2290
8ХФ	1150—850	Такой же, как для стали 7ХФ	2550
9ХФ	1180—800	Нагрев на 760—790 °С, далее как для стали 7ХФ	2550
11ХФ	1100—800	Нагрев на 750—790 °С, охлаждение со скоростью 50°С/ч до 670—700 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50°С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2290
13Х	1100-800	Такой же, как для стали 11ХФ	2410

XB4	1125-850	Нагрев на 800-820 °С, охлаждение со скоростью 50°С/ч до 600 °С, выдержка 2-3 ч, охлаждение со скоростью 50°С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2850
B2Ф	1200-900	Нагрев на 780-800 °С, охлаждение со скоростью 50 °С до 710-730 °С, выдержка 2- 3 ч, охлаждение со скоростью 50°С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2850
9X1	1150-850	Нагрев на 800-820 °С, охлаждение со скоростью 50°С/ч до 670-680 °С, выдержка 2-3 ч, охлаждение со скоростью 50°С/ч до 550°С, далее на воздухе	2290
X	1150-850	Нагрев на 780-800 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 670-720 °С, выдержка 2-3 ч, охлаждение со скоростью 50°С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2290
9XC	1140-800	Нагрев на 790-810 °С, охлаждение со скоростью 50°С/ч до 670-720 °С, выдержка 2-3 ч, охлаждение со скоростью 50°С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2410
12X1	1120-850	Такой же, как и для стали X	2410
9XBГ	1120-850	Такой же, как и для стали X	2410
XBГ	1150-850	Такой же, как и для стали X	2550
XBCГ	1140-850	Такой же, как для стали 9XC	2410
X6BФ	1100-850	Нагрев на 830-850 °С, охлаждение со скоростью 40°С/ч до 700-720 °С, выдержка 2-3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С	2410

Таблица 3. Температуры закалки и отпуска

Сталь	Закалка			Отпуск		
	Температура, °С		Охлаждающая среда	HRC	Температура отпуска, °С	HRC
	подогрева	аустенизации				
7ХФ	600-650	820-840 800-820	Масло Вода	62-64	200-220	58-60
8ХФ	600-650	810-820 830-860	Вода	58-59 63-65	200-220	57-58 60-62
9ХФ	600-650	850-880 820-840	Масло Вода	61-64 61-64	200-250	58-60 58-58
11ХФ	600-650	810-830 840-860	Вода Масло	62-65 62-64	150-170	62-65
13Х	600-650	780-820 810-830	Вода Масло	63-65 62-64	150-170	62-65
ХВ4	600-650	830-850 820-840	Масло Вода	63-65 65-67	140-170	62-67
В2Ф	600-650	780-840	Масло Вода	66-67 66-67	100-180	62-65
9Х1	600-650	820-850	Масло	61-63	160-180	59-61
Х	650	840-860	Масло	62-63	130-150	62-65
					170-210	58-60
9ХС	650-700	840-860	Масло	62-63	180-250	58-62
12Х1	650-700	850-870	Масло	63-65	120-130	62-65
9ХВГ	650	820-840	Масло	64-66	160-180	64
					170-230	60-62
					230-275	56-60
					200-300	

В таблице 4 приведены примеры изделий для изготовления которых используются описанные марки сталей.

Таблица 4. Назначение сталей

<b>Сталь</b>	<b>Назначение</b>
7ХФ	Деревообрабатывающий инструмент (топоры, долота, зубила), круглые и ленточные пилы со сдвоенными и разведенными зубьями,
8ХФ	Ножи для холодной резки металла, обрезающие матрицы, также пуансоны, кернеры, штемпели
9ХФ	Рамные, ленточные, круглые, строгальные пилы, ножи, обрезающие матрицы и пуансоны для холодной обрезки заусенцев, кернеры.
11ХФ	Метчики и другие режущие инструменты диаметром до 30 мм, закаливаемые в горячих средах, хирургические инструменты, штампы для холодной штамповки, пуансоны, калибры
13Х	Вместо стали У13, У13А для мелких инструментов диаметром 1- 15 мм, для того, чтобы проводить закалку в масле; для инструментов диаметром до 30-35 мм (при закалке в воду) получают более глубокий закаленный слой, чем у стали У13, У13А;
ХВ4	Инструменты с целью чистового резания твердых материалов (отбеленный чугун, валки с закаленной поверхностью) с маленькой скоростью, гравёрный инструмент, прошивные пуансоны
В2Ф	Ленточные пилы по металлу, ножовочные полотна
9Х1	Деревообрабатывающий инструмент, валки холодной прокатки, клейма, пробойники, холодновысадочные матрицы, а также пуансоны
Х	Токарные, строгальные и долбежные резцы, работающие при небольших скоростях резания; зубила, гладкие калибры и кольца.
9ХС	Сверла, развертки, метчики, плашки, гребенки, фрезы; машинные штемпели; клейма; деревообрабатывающий инструмент
12Х1	Измерительные инструменты (плитки, калибры, шаблоны)
9ХВГ	Резьбовые калибры непростой формы, штампы для холодного деформирования сложной формы, которые при закалке не обязаны подвергаться значительным объемным изменениям и короблению
ХВГ	Режущие и измерительные инструменты, в том числе крупных сечений, для которых повышенное коробление при закалке недопустимо (протяжки, длинные метчики и развертки, плашки, резьбовые калибры; деревообрабатывающий инструмент; ножи для бумажной промышленности; холодновысадочные матрицы .
ХВСГ	Инструмент для ручной работы (плашки, сверла, развертки, гребенки, штемпели, клейма); холодновысадочные матрицы и пуансоны; деревообрабатывающий инструмент;
Х6ВФ	Дереворежущий фрезерный инструмент, ручные ножовочные полотна, резбонакатной инструмент, матрицы и пуансоны холодного деформирования

## **1.2 Геометрическая нестабильность металлических изделий**

Самопроизвольное изменение размеров металлических изделий является следствием в основном трех факторов [2]:

- 1) нестабильности фазового и структурного состояния материала;
- 2) микроползучести под действием внешних нагрузок
- 3) релаксации остаточных внутренних напряжений, возникающих в деталях в процессе различных технологических операций горячей и холодной обработки, а также при механосборочных операциях и в процессе длительного хранения.

Воздействие любого фактора способен оказаться превалирующим в зависимости от определенных условий, к примеру, материала, его структурного состояния, а также рабочих напряжений. В особенности усилены процессы микроползучести и релаксации формируется в сплавах с метастабильным фазовым и структурным состоянием. В условиях эксплуатации прецизионных приборов наблюдается процесс медленного и непрерывного нарастания пластической деформации при снижающихся во времени внутренних напряжениях в материале, существенно меньших предела текучести. Чем больше сопротивление материала микропластическим деформациям во времени, тем выше его размерная стабильность в условиях эксплуатации и продолжительного хранения. По этой причине, основной функцией применяемых при изготовлении деталей приборов стабилизирующих обработок считается повышение сопротивления материала изделий к микропластическим деформациям.[4]

### **1.2.1 Нестабильности фазового и структурного состояния**

Микроструктурные изменения, включают в себя изменения в концентрации вакансий, а также междоузельных атомов, атомное упорядочение, дисперсионное выделение и растворение вторичных фаз, фазовые превращения с изменением типа кристаллической решетки. При температуре, схожей с комнатной, особенно велика роль точечных дефектов. К подобным недостаткам, в первую очередь необходимо отнести вакансии и междоузельные атомы,

возникающие при закалке от значительных температур, пластическом деформировании, в том числе при механической обработке, и при иных технологических воздействиях. Из-за высокой активности точечных дефектов при низких температурах происходит их интенсивное перемещение к стокам, в качестве которых выступают поверхности деталей, границы зерен и блоков, дислокации и другие элементы структуры. Выход вакансий на стоки приводит к сокращению размера образца, а междоузельных атомов к увеличению.

Пусть образец содержит точечные дефекты одного типа, которые вызывают относительное изменение объема, приходящегося на один атом металла равное утроенному относительному изменению длины, где  $V_0$  – атомный объем совершенного кристалла[2].

$$\frac{\Delta V}{V_0} = 3 \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1)$$

Можно представить изменение объема:

Где  $V_x$  – изменение атомного объема, вызванное деформацией вокруг одного дефекта,  $n$  – концентрация дефектов( атомная доля). Знак + соответствует вакансии, а – междоузельному атому. Концентрация точечных дефектов с ростом температуры возрастает согласно зависимости :

—

Где .

При нагреве металлов на высокие температуры доля дивакансий составляет, как правило, менее 1% от количества вакансий. При температуре, близкой к комнатной. За счет объединения вакансий доля дивакансий может возрасти до 25%. Концентрация вакансий в золоте, нагретом до 1100 градусов составляет . Тогда с учетом (1) и (2) относительное изменение(уменьшение)длины образца, из-за стоков вакансий при комнатной температуре составит —

также позволяет оценить изменение размеров. Для меди энергия образования вакансии При 300К значение  $kT$  —  $kT$  — эВ.

Тогда при закалке от 1200К будут зафиксированы вакансии с концентрацией  $n$  с учетом (2) относительное изменение объема составит — , а относительное уменьшение длины согласно (1): —

Оба расчета свидетельствуют о возможных изменениях размеров за счет стока вакансий, значительно превышающих деформации на уровне прецизионного предела упругости (1). Следует отметить, что точечные дефекты при комнатной температуре могут перемещаться к стокам многие десятки, а то и сотни часов, в течение которых будет проявляться размерная нестабильность. Повышение температур до умеренных значений (от 150 до 200°C) резко ускоряет диффузию за несколько часов или десятков минут.

Имеются также сведения об отжиге вакансий, возникших в никеле различной чистоты в результате пластической деформации прокаткой и сжатием. В работе применен новый метод исследования кинетики отжига – метод угловой корреляции аннигиляционных  $\gamma$ -квантов, возникающих при захвате позитронов дефектами. Специфика метода в том, что позитроны могут захватываться вакансиями, кластерами вакансий, дефектами, связанными с дислокациями, но не внедрениями. Установлено, в частности, что независимо от степени загрязнения никеля и типа деформации вакансии отжигаются при температуре около 80°C.

Изменение размеров при дисперсионном выделении второй фазы может быть также оценено расчетом, для которого необходимо иметь некоторые кристаллографические и структурные параметры, полученные с помощью рентгеноструктурного анализа.

Следует отметить еще заметную роль в ряде случаев фазовых превращений, сопровождающихся при комнатной или близкой к ней

температуре изменением параметров кристаллической решетки и появлением новых фаз. Особенно, заметны фазовые превращения проявляется при этих температурах в сталях, закаленных на высокую твердость, например в подшипниковых сталях[3]. В таких сталях, как и в углеродистых, закаливаемых на мартенситную структуру, при температурах, близких к комнатной, возможно протекание двух превращений – уменьшение тетрагональности мартенсита заковки и распад остаточного аустенита. Первое превращение ускоряется при нагреве до 100 – 150°С и сопровождается относительным уменьшением размера до . Второе превращение ускоряется при нагреве до 200°С и сопровождается относительным увеличением размера до .

Имеются сведения о размерной стабильности стали типа 52100(аналог стали ШХ15), закаленной на твердость HRC65 рис.1.

Верхние две кривые для каждого уровня твердости представлены для образцов, закаленных непосредственно с температуры заковки до комнатной температуры, а две нижние кривые в каждой секции относятся к образцам, которые в процессе охлаждения до комнатной температуры подвергались промежуточному отпуску при 150 ° С . Стабилизация всех образцов достигалась послезакалочным отпуском до заданной твердости. При твердости HRC 64 со временем наблюдается уменьшение размера образцов, особенно при более высокой твердости. Такое поведение соответствует превращению мартенсита в смесь феррита и карбидов. При твердости HRC60 наблюдается незначительное увеличение длины во времени образцов, закаленных без промежуточного отпуска. Такое поведение соответствует превращению остаточного аустенита в мартенсит. Образцы с промежуточным отпуском в процессе заковки при 150° С и этой твердости практически сохранили свои размеры за 8 лет вылеживания. Из всех образцов наименьшей стабильности обладали образцы, закаленные на твердость HRC65 , относительное уменьшение длины которых за 8 лет составило около 6·

### **1.2.2 Воздействие различных физических полей и излучений**

Причиной размерной нестабильности как радиация, магнитные и электрические поля могут вызывать изменение механических свойств,



структурные изменения, магнестрикционные явления в ферромагнитных материалах. Для металлических материалов со структурно стабильными характеристиками действие умеренной радиации в обычных земных и даже космических условиях не может вызвать объемных изменений. Вместе с тем воздействие радиации на структурно нестабильные упорядочивающиеся сплавы может вызывать структурные превращения в космических условиях, в которых доза облучения(околоземное пространство) может составить за год -

част./ Повышенные дозы радиации могут вызвать разбухание некоторых металлов за счет выделения газов при ядерных реакциях. Радиация может существенно ускорить релаксацию остаточных материалов, облученных нейтронами. На рис. 2 представлены результаты этих экспериментов. Авторы на необлученных образцах не наблюдали релаксации напряжений[3].

Электрические и магнитные поля могут изменять размеры материалов прямым и косвенным путем. Косвенное их воздействие проявляется благодаря инициированию в материалах различных структурных превращений и носит, как правило, необратимый характер.

Прямое воздействие проявляется в стрикционных материалах и носит, как правило, обратимый характер. В настоящее время насчитывается большое количество специальных электро- и магнестрикционных материалов, используемых в технике по прямому назначению. Целый ряд конструкционных материалов в той или иной степени может реагировать на изменение внешних полей, и эти явления имеют непосредственное отношение к проблеме.

Особенно важным классом материалов, которые могут быть использованы в качестве конструкционных и в которых возникают размерные изменения под действием поля, являются ферромагнитные металлы и сплавы и диэлектрические ферриты. В монокристаллах магнестрикция носит резко анизотропный характер, причем в малых магнитных полях она практически не сопровождается ростом магнестрикции(отрицательной и положительной), причем в отличие от насыщения намагниченности многие ферромагнетики не испытывают насыщения магнестрикции. Характерные изменения длины металлических ферромагнитных материалов в небольших полях составляют, как правило, не

более  $10 \cdot$  , а диэлектрических ферритов - до  $200 \cdot$  , В больших полях величина магнитострикции металлов и сплавов может возрасти в несколько раз.

### **1.2.3 Микроползучести под действием внешних нагрузок**

Второй из наиболее часто встречающихся в работающих конструкциях причин нестабильности является приложенная нагрузка, что способна самостоятельно вызвать упругие и микропластические деформации, а может стимулировать релаксацию остаточных напряжений либо структурные превращения, которые сопровождаются изменением формы детали или узла. Увеличение прилагаемой нагрузки даже в области упругих деформаций не сохраняет линейной зависимости между напряжениями и деформациями, что свидетельствует о неподчинении закону Гука. Рост напряжений приводит к увеличению площади петли упругого гистерезиса, если механическое воздействие проводить по циклу «нагрузка-разгрузка»[6].

Кратковременное нагружение выше определенного значения напряжения может привести к появлению микропластических деформаций, величина которых в случае представления зависимости напряжения от деформации в виде петли гистерезиса будет определяться раскрытием петли. Длительное нагружение даже при напряжениях, соответствующих упругой области при кратковременном нагружении, может вызвать появление пластических деформаций. Такое поведение называют микроползучестью. Следует отметить важную особенность сопротивления материалов микропластическим деформациям, заключающуюся в том, что перемена знака нагружения на обратный заметно снижает это сопротивление. Изменения размеров под действием внешних нагрузок для высокоточных конструкций ограничивают величинами порядка нескольких мкм/м ( ), а иногда и меньше. Это может быть достигнуто созданием таких конструкций, в которых напряжения не превосходят прецизионный предел упругости или ползучести.

### **1.2.4 Релаксации остаточных внутренних напряжений**

И еще одной причиной размерной нестабильности является изменение внутренних(остаточных) напряжений, которые делятся на напряжения 1 рода 2 рода и 3 рода. Напряжения 1 рода уравниваются в макроскопических объемах, часто в объеме всего образца или детали. Напряжения 2 рода уравниваются в объемах отдельных кристаллов. Напряжения 3 рода по существу являются статическими искажениями кристаллической решетки и уравниваются в пределах небольшой группы атомов. Изменение напряжений 2 и 3 рода не вызывает обычно изменения формы детали, а сопровождается объемными изменениями[2]. Изменения напряжений 1 рода, образующиеся в следствии предыдущих обработок, могут спровоцировать значительное формоизменение. Снижение напряжений, именуемой релаксацией, способен осуществляться самопроизвольно, он значительно ускоряется при увеличении температуры, механических и термомеханических воздействиях. Под действием остаточных напряжений деформации могут достигать значительных величин. Особенно велики поводки и коробления в деталях, не подвергнутых обработкам, снижающим остаточные напряжения.

### **1.3 Методы определения характеристик размерной стабильности металлов и сплавов**

Прецизионный предел упругости, а также сопротивление микротекучести устанавливаются методом последовательного нагружения с фиксацией остаточной деформации после разгрузки образца.

В последнее время для этой цели, как правило, используют испытательные машины «Instron»[3], оснащенные гидравлической системой нагружения с точностью. Для обеспечения точного центрирования образца относительно оси нагружения используют захваты, снабженные шаровыми опорами(рис 3). Для измерения остаточной деформации 1· применяют проволочные, фольговые и емкостные датчики, оптические интерферометры.

При этом принимают специальные меры по виброизоляции испытательных средств и стабилизации температуры в пределах  $\pm 0,1$ . Особый интерес уделяют к вопросам подбора клея, а также технологии приклеивания датчиков к образцам с целью избежания ползучести клеевой прослойки.

Рис.3 Приспособление для растяжения образца при определении прецизионного предела упругости[3]

Остаточную деформацию измеряли с помощью проволочных тензодатчиков на бумажной основе. В качестве измерительного устройства применяли автоматический электронный мост с восстановлением баланса с помощью асинхронного электродвигателя, введенного через усилитель в измерительную диагональ и связанного с подвижным реохордом и стрелками – указателями шкалы. С целью повышения надежности контроль деформации производили одновременно по двум тензодатчикам с базой 100мм, показанных на рис.3. Отмечали остаточную деформацию величиной однако в целях увеличения точности метода предела упругости измеряли при величине остаточной деформации 0,002 – 0,005 %.

Метод испытаний на релаксацию напряжений при растяжении базируется на компенсационном принципе: нагрузка автоматически уменьшается при возрастании деформации на величину, характеризуемую чувствительностью тензометра. За промежуток времени между последовательными циклами

сбрасывания нагрузки размер образца увеличивается на величину т.е в описываемых условиях воспроизводится не релаксация, а ступенчатая ползучесть при падающем напряжении. Из-за трудностей в формировании достаточно чувствительных и надежных устройств для автоматического снижения нагрузки при малых деформациях эти машины трудно регулируемы и сложны в эксплуатации.

Относительно обычный метод релаксационных испытаний растяжением на моделях болтовых соединений в жесткой станине из-за трудностей воспроизведения первоначального напряжения после периодических разгрузок, воздействия температурных напряжений и податливости нагруженных элементов не гарантирует точности, нужной при исследовании характеристик размерной стабильности материалов согласно к потребностям прецизионного приборостроения и машиностроения.

В наибольшей степени удовлетворяют этой цели релаксационные испытания при изгибе, из которых малыми распространенными являются метод кольцевых образцов И.А.Одинга.

Рабочая часть кольцевого образца И.А. Одинга (рис.4.а) представляет собой брус равного сопротивления изгибу, который нагружается посредством вставляемого в прорезь клина. Величину релаксировавшего напряжения измеряют по разнице между размером прорези после разгрузки и в исходном состоянии(до нагружения).

В случае достаточно высокой твердости материала обработка его резанием затруднительна, можно применить кольцевые образцы равного сечения. Значение коэффициента пропорциональности между максимальным напряжением и изменением раствора кольца при его нагружении клином зависит от размеров образца и также может быть определен экспериментально с помощью тензодатчиков либо расчетным путем. Для кольца, изображенного на рис 4. Этот коэффициент равен 0,0004.

В.Д Пискаревым изобретена универсальная оправка, радиус которой возможно менять в широких пределах посредством винта и гаек, шарнирно

укрепленных в концевых зажимах (рис.5). При измерении остаточного прогиба посредством электроконтактной головки с ценой деления 0,001мм (см. рис.4.б) разрешающая способность метода по остаточной деформации составляет 0,00003%, что на порядок выше метода релаксационных испытаний на кольцевых образцах.

Представляет интерес сопоставление результатов, полученных различными методами испытаний на релаксацию напряжений рис.6, рис.7 , рис.8.[3].

В качестве примера, на рис.8 представлена зависимость величины остаточной деформации от нагрузки за 500 ч испытаний при 100 градусов для сплавов ВД1Т1 и Д16Т1, из которой видно, то что с повышением напряжения отличие в результатах существенно увеличивается. Для второго участка кривой отличие между результатами удовлетворяет правильности метода лишь до деформаций меньше  $3 \cdot 10^{-3}$  (рис 8) При определении условного предела релаксации с допуском на остаточную деформацию 0,001% испытания на пластинах и кольцевых образцах представляют почти одинаковые результаты.

Из изложенного следует, что для установления характеристик размерной стабильности металлов и сплавов можно применять любые из описанных методов испытаний при изгибе, на предел упругости и релаксацию напряжений с допуском по остаточной деформации меньше 0,001%

### **1.3.1 Общая характеристика основных методов стабилизирующей обработки**

Как следует из приведенного выше анализа факторов, характеризующих самопроизвольное изменение размеров металлических изделий в условиях эксплуатации, а также продолжительного хранения, основной задачей стабилизирующей обработки является повышение сопротивления материала изделий микропластическим деформациям.

Для высокого сопротивления микропластическим деформациям при кратковременном, а также длительном нагружении, следует обеспечить высокую устойчивость дислокационной структуры и фазового состояния во всех микрообъемах металла, в таком случае для достижения высоких прочностных свойств достаточно высокого сопротивления движению дислокаций в макрообъемах или среднестатистическом количестве микрообъемов материала.

В основу методов увеличения сопротивления металлов и сплавов микропластическим деформациям обязан быть положен принцип обеспечения стабильности их структурного состояния в условиях эксплуатации. Решение указанной задачи может быть достигнуто на основе следующих методов стабилизирующей обработки[5]:

а) Термического и термомеханического упрочнения сплавов, который обеспечивает формирование устойчивых при продолжительном влиянии напряжений и температур дислокационных образований, концентрационных неоднородностей из сегрегаций растворенных атомов и распределенных по объему высокодисперсных вторых фаз.

б) термоциклического влияния, который обеспечивает приобретение стабильной дислокационной структуры с наименьшим уровнем микронапряжений.

в) дорекристаллизационного отжига использованных материалов и изделий с наклепанным поверхностным слоем от механической обработки резанием, который обеспечивает получение стабильной слабо разориентированной субструктуры.

г) термической обработки в напряженном состоянии, обеспечивающей стабильную ориентированную структуру в микрообъемах.

д) механико-термической обработки, увеличивающей устойчивость структуры с помощью блокирования дислокаций по механизму деформационного старения.

Наравне со структурным состоянием релаксационная стойкость зависит и от величины действующих напряжений. По этой причине, снижение остаточных внутренних напряжений считается важной задачей стабилизирующей обработки.

В реальных деталях окончательное напряженное состояние обуславливается взаимодействием конструкционных и остаточных внутренних макронапряжений, различных по происхождению: термических структурных, усадочных (в отливках), от механического наклепа (обработки резанием), обработки давлением.

Наиболее полное устранение остаточных макронапряжений достигается при нагреве до температурного интервала начала рекристаллизации. Но установленный нагрев приводит к почти полному разупрочнению материала и, соответственно, к снижению его сопротивления микропластическим деформациям, что особенно соответственно для металлов и сплавов в упрочненном состоянии. Поэтому максимально допустимое снижение остаточных внутренних напряжений не решает проблему обеспечения постоянства размеров изделий во времени, так как никак не достигаются подходящие значения характеристик размерной стабильности материала.



## 1.4 Калибры из инструментальных сталей

### 1.4.1 Контроль резьбы и эксплуатация

Резьбовые калибры предназначены для проверки контроля внутренне резьбы, получаемой после операции резьбонарезания на деталях.

Проверка соответствия калибрами должна осуществляться при температуре около +20 С°. Данной температуре должна соответствовать как температура самой обработанной детали, так и температура резьбового калибра. При проверке резьбы в других температурных условиях следует учитывать коэффициенты температурного расширения.

Резьбовые калибры изготавливаются из специализированной инструментальной стали и имеют твердость рабочей поверхности **62-65 HRC**.

Для увеличения количества возможных замеров резьбы, доступны калибры на проходной части которых нанесено дополнительное покрытие *TiCN*, позволяющее продлить срок службы калибра.



Для удобства на калибрах нанесена красная маркировка на непроходной стороне калибров. Существует несколько видов резьбовых калибров(табл.5).

Таблица 5. Виды резьбовых калибров.

	<b>LD</b>	Проходной/ непроходной резьбовой калибр-пробка	Представляет собой комбинацию проходного и непроходного калибра, который расположены на разных концах ручке.
	<b>GD</b> пробка	Проходной резьбовой калибр	Представляет собой инструмент, на ручке которого с одной стороны расположен проходной калибр, вторая сторона ручки свободна.
	<b>AD</b> пробка	Непроходной резьбовой калибр	Представляет собой инструмент, на ручке которого с одной стороны расположен непроходной калибр, вторая сторона ручки свободна.

Резьбовые калибры-кольца предназначены для контроля наружной резьбы на деталях. Кольца (особенно проходные)(табл.6)подвержены механическому износу, поэтому необходимо осуществлять контроль износа с помощью соответствующих контр-калибров.

Таблица 6. Кольца-калибры

	GR	<p>Проходное кольцо- калибр</p>	<p>Представляет собой проходной калибр-кольцо, который проверяет диаметр свинчивания (приведённый средний диаметр) наружной резьбы на установленной длине свинчивания.</p>
	AR	<p>Непроходное кольцо- калибр</p>	<p>Представляет собой непроходной калибр-кольцо, который проверяет не имеет ли фактический средний диаметр (приведённый средний диаметр) контролируемой наружной резьбы значение ниже минимально установленного стандартом.</p>

При эксплуатации калибром необходимо соблюдать ряд обязательных правил их применения. В противном случае Вы можете получить неточный или ошибочный результат измерения резьбы.

Проходной калибр-пробка(рис.8) проверяет средний диаметр внутренней резьбы. Т.е. он контролирует наименьшее значение среднего диаметра изготовленной внутренней резьбы, а также возможные отклонения по шагу и углу наклона стороны профиля резьбы. Также он контролирует наименьший наружный диаметр внутренней резьбы. Внутренний диаметр резьбы при этом никак не контролируется. Резьбовой проходной калибр должен ввинчиваться рукой на всю глубину проверяемой резьбы, без прикладывания особых усилий. Невозможность ввинчивания означает несоответствие резьбы инструмента.

Непроходной резьбовой калибр(рис.9) проверяет, не превышает ли фактический средний диаметр контролируемой внутренней резьбы максимально допустимое значение. При этом наружный и внутренний диаметр внутренней резьбы не контролируется. При попытке закрутить рукой непроходной резьбовой калибр не должно возникнуть необходимость прикладывания особых усилий. Калибр не должен ввинчиваться в контролируемое резьбовое отверстие не более чем на 2 оборота (2 нитки). В случае если калибр входит более чем на 2 оборота, это свидетельствует о несоответствии резьбы требованиям.

Проходной калибр-кольцо контролирует наибольшее значение среднего диаметра, а также возможные отклонения по шагу и углу наклона стороны профиля изготовленной наружной резьбы, которые вызывают мнимое увеличение резьбы. При этом наружный диаметр наружной резьбы не контролируется. Резьбовой проходной кольцевой калибр должен навинчиваться рукой на всю длину контролируемой наружной резьбы, при этом не требуется прилагать особые усилия(рис.10).

Непроходной резьбовой калибр-кольцо проверяет, не имеет ли фактический средний диаметр (приведённый средний диаметр) контролируемой наружной резьбы значение ниже минимально установленного стандартом. При этом наружный и внутренний диаметр наружной резьбы не контролируются. Резьбовой непроходной калибр-кольцо не должен навинчиваться рукой(рис.11) на контролируемую наружную резьбу (собеих сторон) более чем на 2 оборота, при этом требуется прилагать особые усилия. Два полных оборота определяются непосредственно по калибру-кольцу при его свинчивании с контролируемой резьбы.

Проверяемое калибрами изделие должна быть обязательно очищена от пыли, грязи, заусенцев и насухо вытерто. Проверка смазанных изделий или изделий смазанными калибрами приводит к ошибкам в оценке размера изделия. Запрещается проверка калибрами вращающихся изделий.

Калибры должны храниться на рабочем месте, а также в кладовой на специально назначенных участках. Измерительные поверхности калибров не должны контактировать с металлическими предметами. Не следует допускать ударов по калибру или падения калибра на пол, это способно послужить причиной к его поломке или к несоответствию показаний. Относительная влажность воздуха в помещении, где выполняют проверку, не должна быть выше 80 %. Строго в установленные сроки калибры должны предъявляться органам технического контроля для проверки.

## 1.4.2. Система допусков калибров

С помощью предельных калибров определяют годность детали, т.е. изучают, выходит ли контролируемый параметр за нижний или верхний предел, либо находится среди двух допустимых пределов. Для калибров, как и у остальных деталей, устанавливается допуск на изготовление, однако, так как это еще и проверочный инструмент, на них устанавливается дополнительный допуск — на износ (рис. 12)[7].

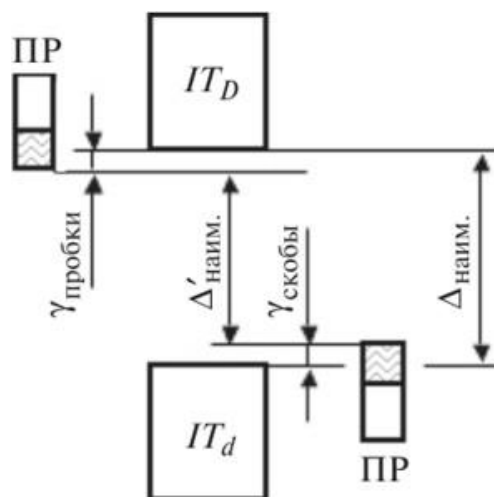


Рис. 12. Схема полей допусков при контроле изношенными проходными калибрами

$$\Delta'_{\text{наим.}} = \Delta_{\text{наим.}} - (\gamma_{\text{пробки}} + \gamma_{\text{скобы}}), \quad (4)$$

где  $\gamma$  — износ калибра (скобы или пробки);  $\Delta_{\text{наим}}$  — наименьший расчетный зазор;  $\Delta'_{\text{наим}}$  — наименьший зазор, образовавшийся при износе.

Допуски на погрешность изготовления проставляются только лишь на рабочих чертежах калибров — исполнительный размер. Для непроходных калибров, которые изнашиваются незначительно, определяют только допуск на изготовление, поле которого находится симметрично соответствующему предельному размеру детали.

Износ непроходных калибров не вызывает искажения характера посадки. В ходе измерения совершается износ проходных калибров, при этом он вызывает искажение характера посадки[8].

В посадках с натягом износ проходных калибров может спровоцировать увеличение натяга, в скользящих посадках может сформироваться небольшой натяг.

Степень износа проходных калибров ограничивается установлением допуска на износ. Поле допуска на износ откладывается от границы поля допуска на изготовление, также износ предпочтительно располагать целиком в поле табличного допуска детали. Но это почти невозможно, особенно для деталей точных квалитетов, таким образом, это ужесточило бы и без того жесткие допуски прецизионных деталей. По этой причине, для обеспечения оптимальной точности в квалитетах 6, 7, 8 часть полей допусков на износ проходных и изготовление непроходных калибров выносится за пределы поля допуска, увеличивая при этом допуск детали. Практика демонстрирует, то что нарушения взаимозаменяемости деталей при этом не происходит, таким образом, вероятность сочетания на сборке наибольших валов и наименьших отверстий — мала. Данному содействует также действующий порядок передачи части изношенных калибров — ОТК цеха.

Погрешность калибра  $\delta_k$  и допуск на износ  $\Delta_{из}$  зависят от допуска изделия  $IT_{изл}$ , при этом:

- $\delta_k \approx \Delta_{из} \approx 25\%$  от  $IT_{изд}$  для квалитетов 5–6;
- $\delta_k \approx \Delta_{из} \approx 20\%$  от  $IT_{изд}$  для квалитетов 7–9;
- $\delta_k \approx \Delta_{из} \approx 15\%$  от  $IT_{изд}$  для квалитетов 10–11;
- $\delta_k \approx \Delta_{из} \approx 10\%$  от  $IT_{изл}$  для квалитетов 12.

## Схемы расположения полей допусков калибровки контркалибров

Калибры с целью контроля валов и отверстий (рис. 13 и 14) обладают разным расположением полей допусков в зависимости от номинальных размеров, специализированных для контроля и качественных точности.

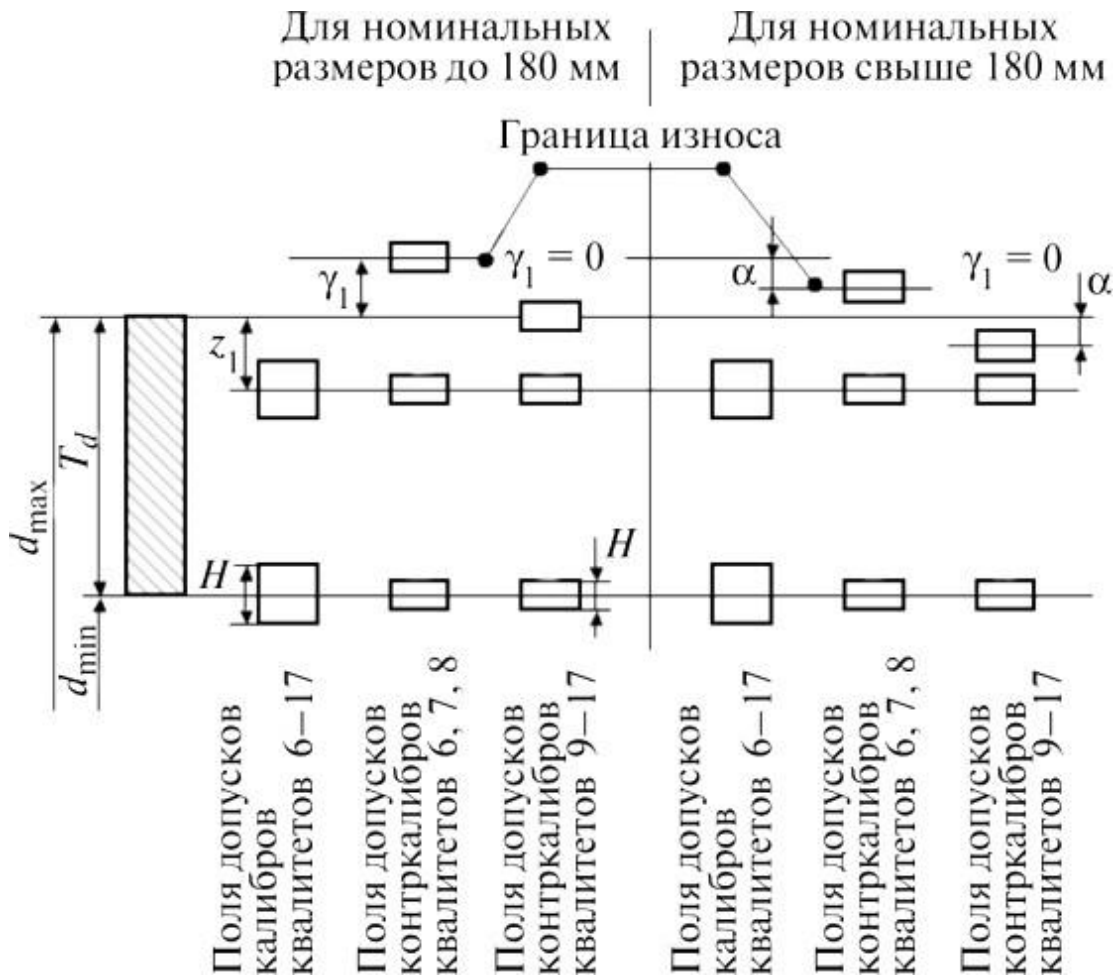


Рис. 13. Расположение полей допусков калибров и контркалибров для контроля валов

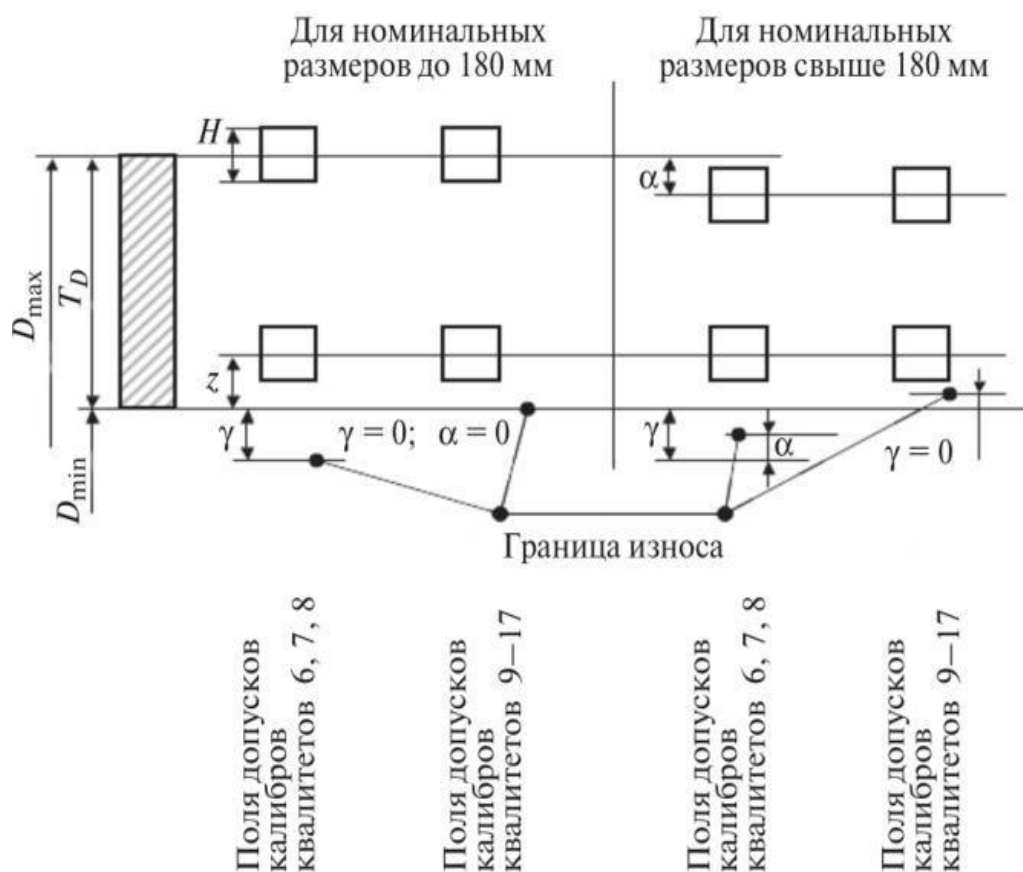


Рис. 14. Расположение полей допусков калибров и для контроля отверстий

$D_{\min}$ ;  $(D_{\max})$ ;  $d_{\min}$ ;  $(d_{\max})$  — минимальный (максимальный)

предельный размер изделия;

•  $H$ ;  $H_1$  — допуск на изготовление калибров для отверстия (вала);

$z$  — отклонение середины поля допуска на изготовление проходного калибра для отверстия сравнительно минимального предельного размера изделия;

•  $Z_j$  — отклонение середины поля допуска на изготовление проходного калибра для вала сравнительно максимального предельного размера изделия;

•  $\gamma$ ;  $\gamma_j$  — допустимый выход размера изношенного проходного калибра для отверстия (вала) за границу поля допуска изделия;

•  $H_p$  — допуск на изготовление контрольного калибра для скобы;

•  $a$ ;  $ot_j$  — величина для компенсации погрешностей контроля калибрами отверстий (валов) с размерами свыше 180 мм.



Расположение полей допусков рабочих и контрольных калибров для контроля валов и отверстий будет различным для номинального диаметра:

- вплоть до 180 миллиметров;
  - больше 180 миллиметров,
- а также для изделий квалитетов:
- с 6 по 8;
  - с 9 по 17.

Проанализируем схему расположения полей допусков калибров и контркалибров для контроля валов (рис. 13) и калибров для контроля отверстий (рис. 14).

Величины устанавливают так называемую «зону безопасности», которая ликвидирует вероятность искажения характера посадок и обеспечивает приобретения размеров годных деталей в пределах установленных допусков. Физический смысл «зоны безопасности» заключается в том, что она обеспечивает точность размеров с учетом погрешностей измерения деталей больших диаметров.

При подсчете исполнительных размеров калибров (наибольших для отверстий и наименьших для валов) следует пользоваться следующим правилом округления:

1. Закругление размеров рабочих калибров (наибольших для отверстий и наименьших для валов) для изделий от 15 до 17 квалитетов производят до целого микрона.

2. Для изделий квалитетов от 6 до 14 и всех контрольных калибров производят до величины кратной 0,5 микрона, при этом допуск на калибры сохраняется. Размеры, оканчивающиеся на 0,25 и 0,75 мкм, необходимо округлять вплоть до величин 0,5 мкм в сторону уменьшения производственного допуска изделия (табл. 7).

Стандартом учтены контракалибры для скоб величиной до 500 мм и квалитетов от 6 до 17. Прежде эти контракалибры для деталей с допуском до 6 квалитета включительно в нашей стране не использовались, так как, невзирая на небольшую величину допуска, контракалибры действительно искажают поля допусков. По этой причине, по возможности предпочтительно применять концевые меры или универсальные измерительные средства. В приведенной ниже табл. 7 расчет производился для размеров:

Валы с допуском точнее 6 квалитета рекомендуется проверять универсальными измерительными средствами[7].

Таблица 7. Формулы для расчета размеров калибров

Определяемый параметр Калибра		Калибр – пробка		Калибр - кольцо	
		Размер	Предел ные отклоне ния	Размер	Предел ные отклоне ния
Центрирующ й диаметр $d$ или $D$			—		—
			-		-
			—		—
			-		-
Нецентрирующ ий диаметр $D$ или $d$			—		—
		$d-0,1$	h8	$d-0,1$	-
Размер $b$			—		—
			-		-

### **1.4.3 Калибры нефтяного сортамента**

Изготовлением калибров нефтяного сортамента занимаются несколько предприятий в России, это такие как «КалибрНефтеСервис», «ИМЕРТУЛ», «СИТИМО», в том числе ЧИЗ – одно из ведущих предприятий России. Выпускает более 1000 наименований продукции для качественного измерения всех типов резьбы, безотказной работы систем сцепки железнодорожных вагонов и других узлов, а также измерительный инструмент для всех видов промышленности. Челябинский инструментальный завод предприятия международного уровня, продукция сертифицирована и на заводе есть собственная кредитованная лаборатория дающая право поверки и калибровки средств измерений. Большую часть продукции они выпускают калибры нефтяного сортамента и калибры для промышленного назначения.

В современной отечественной нефтедобывающей промышленности себестоимость добываемого «черного золота» на треть состоит из средств, затрачиваемых на содержание трубопроводов – насосов, компрессоров, труб и муфт для них. Причиной более чем половины неисправностей трубных подвесок является несоответствующее качество резьбы на соединениях труб и неподобающей проверки калибрами. Это происходит во многом по причине того, что компании, занятые в нефтедобывающей промышленности, слабо оснащены необходимыми средствами контроля – калибрами нефтяного сортамента. В итоге производимые резьбовые соединения оказываются непрочными, с малыми показателями герметичности. Ввиду использования некачественных калибров для НКТ потери на участках добычи нефти, а также при транспортировке «черного золота» оказываются весьма значительными. Помимо этого, вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций на нефтяных скважинах оказывается существенно превышающей допустимые нормы.

#### **Применение нефтяных калибров**

Решение проблем во многом зависит от качества метрологического оборудования, применяемого на предприятиях. Качественные нефтяные калибры являются главным залогом стабильной работы нефтедобывающих и

перерабатывающих комплексов. Калибры НКТ позволяет вести метрологический контроль максимально эффективно, с учетом шага, конусности, профиля и среднего диаметра деталей для нефтянки. Представленные нефтяные калибры являются пригодными для замера параметров внешней и внутренней резьбы на бурильном оборудовании, насосных установках, компрессорных и обсадных трубах. Калибры нефтяного сортамента позволяют контролировать параметры резьбы различного типа.

Ручные калибры НКТ позволяют с минимальной погрешностью оценивать диаметры и уровень прямолинейности трубных отверстий. С помощью предлагаемых средств контроля измеряются все нормируемые параметры резьбы, а также гладкой части изделий, оснащенных резьбой. С помощью средств метрологического контроля резьбы обеспечиваются прозрачность и точность измерений, а также объективность в отношении всех видов деталей.

### **1.5 Постановка задач и описание проблемы**

На предприятии, занимающемся изготовлением калибров, после длительного хранения на складе часть готовой продукции была забракована по причине изменения геометрических размеров.

Для определения причин возникновения дефекта было проведен анализ химического состава материала готовых изделий, микроструктурный анализ материала калибров, проведена оценка правильности проведения упрочняющей термообработки, а так же определение количества остаточного аустенита в стали.

## 2. Методы исследования и оборудование

### 2.1. Исследование химического состава

ДФС-500 специализирован с целью анализа как черных, так и цветных металлов на все легирующие элементы и примеси, в том числе серу, фосфор, углерод.

Современная конструкция в комбинации с использованием надежных и проверенных компонентов гарантирует выполнение норм точности и диапазонов измерения концентраций элементов в соответствии с требованиями ГОСТ и других нормативных документов. Вот поэтому ДФС-500 – превосходное решение для металлургического, литейного и машиностроительного производства.

ДФС-500 – компактный высоконадежный современный прибор для анализа металлов и сплавов. Данный прибор новейшего поколения спектрометров серии ДФС, обширно известных в Российской Федерации, а также СНГ, совмещающий наилучшие качества собственных предшественников с наиболее современными промышленными решениями.

Оптическая система создана согласно по схеме Пашена-Рунге с диаметром круга Роланда 0.5 м. Для предоставления пространственной стабильности спектра все оптические элементы определены на единой платформе, имеющей хорошую теплопроводность. В качестве приемников излучения применяются линейные CCD детекторы. Уникальная конструкция установки детекторов без мертвых зон дает возможность фиксировать весь спектр целиком во всем диапазоне работы прибора. Регистрация всего спектра, а не отдельных линий,

как в случае применения фотоумножителей, раскрывает почти безграничные возможности по анализу сплавов самых разных типов на одном приборе. Для решения задач, которые требуют коротковолнового ультрафиолета, полихроматор продувается аргоном или азотом. Расход газа составляет 0.05 л/мин., что значительно меньше расхода на продувку штатива. Согласно с вакуумной, продувная конструкция более легкая и недорогая, она проще и надежнее в эксплуатации при этом гарантирует такие же спектроскопические возможности прибора.

### **Штатив**

Конструкция столика оптимизирована с целью снижения расхода аргона. Отсутствие верхнего кожуха и практичный механизм прижима позволяют исследовать образцы разной формы. Для тонких стержней и проволоки имеются специальные адаптеры. Процесс очистки разрядной камеры весьма элементарна и не требует разборки с использованием инструмента. Замкнутая система водяного охлаждения ликвидирует воздействие разогрева столика на результаты анализа.

### **Источник возбуждения спектра**

Малогабаритный, высокостабильный источник низковольтной искры в аргоне с цифровым управлением. Амплитуда и форма тока в разряде, а также частота и длительность следования разрядных импульсов могут регулироваться в большом диапазоне. Вследствие, источник гарантирует анализ самых разнообразных металлов и сплавов. Управление абсолютно всеми параметрами генератора от компьютера обеспечивает выбор оптимальных параметров разрядного контура и частоты.

### **Система регистрации**

Система регистрации гарантирует управление узлами спектрометра, его испытание, определение и обработку аналитических сигналов. Применение наиболее нынешней элементной базы позволило уменьшить габариты и снизить энергопотребление. Благодаря высокоскоростному USB интерфейсу весь зарегистрированный спектр (около 40000 значений) передается в компьютер почти моментально.

Технические характеристики ДФС-500(табл.8)

Таблица.8 ХарактеристикаДФС-500

Ток разряда	25...350 А
Длительность разряда	30...600 мкс
Частота	50...400 Гц
Диапазон измеряемых концентраций	0,001% - десятки %
Относительная погрешность (в зависимости от концентрации)	0,5%...5%
Время анализа	10...40 с

**Оптическая система:** по схеме Пашена Рунге с кругом Роуланда 0.5м.- для черных металлов – с продувкой аргоном (расход аргона около 0,05 л/мин),спектральный диапазон 175-425 нм, доп. диапазон (по заказу, для анализа натрия) 585-595 нм. Приемники излучения – 10 линейных ССD детекторов по 3648 пикселей (по заказу – 11 детекторов)

**Штатив:** открытая конструкция, удобная для анализа образцов различных размеров и формы. Продувка аргоном: во время анализа – 4 л/мин, холостая продувка – 0,1 л/мин.

**Источник возбуждения:** Цифровой генератор низковольтнойискры управляемой фор.

## 2.2 Исследование микроструктуры

**AxioObserverD1m** предназначен для измерений линейных размеров микрорельефа твердотельных структур, а так же служат для исследования в отраженном и проходящем свете крупных и тяжелых деталей в металлографии, а именно: исследование материалов и деталей, контроль этапов обработки, определение поверхностных свойств деталей, глубин микронеровностей.

### Характеристики

- Методы исследования: светлое поле, темное поле, фазовый контраст, DIC-контраст, варел-контраст, поляризация, люминесценция.
- Револьверное устройство для крепления 6 объективов.
- Окуляры с большим полем зрения (20 и 23 мм).
- Система освещения проходящего света: галогеновая лампа (12В, 100 Вт), принцип Келера, светодиод LED; менеджер света (D1, Z1).
- Модуль для флуоресцентного анализа: ртутная лампа с саморегулировкой НВО103 (100 Вт), 6-позиционное револьверное устройство смены светоделителей.
- Возможность дооснащения программным обеспечением для более качественных исследований и дистанционного управления микроскопом с компьютера.



## 2.3 Определение содержания остаточного аустенита в стали по термоЭДС

Термоэлектрический метод базируется на том, что изменение химического и фазового состава сплава тянет за собой и изменение термоЭДС ( $E$ ), измеряемой согласно к какому-либо элементу сравнения. Значительная восприимчивость термоэлектрических свойств к изменению химического и фазового составов, простота и экспрессность измерений гарантирует успешное использование термоэлектрического метода при рассортировке металлических материалов по маркам, установлении химического состава, глубины обезуглероженного слоя, содержания остаточного аустенита, а также для исследования процессов, совершающихся в сплавах при нагревании и охлаждении. Термоэлектрические свойства находят обширное использование при излучении фазового состава сплавов и измерениях температуры.

Способ определения количества остаточного аустенита в стали, который основан на измерении термоЭДС от образца или детали, следует из установленного факта, что для множества исследованных процесс изменения термоЭДС в зависимости от температуры закалки и отпуска обладает в основном тот же характер, что и для намагниченности насыщения[9].

Для точного установления содержания остаточного аустенита в случае использования эталонов необходимо придерживаться идентичности ферромагнитных фаз эталонов и исследуемых образцов. Количество карбидной фазы в эталоне может быть установлен отдельно методами карбидного анализа. Для практических целей определения количества остаточного аустенита по намагниченности выполняется по приближенным формулам в предположении, что содержание карбидной фазы в эталоне ( ) и исследуемых образцах одинаково. Количество остаточного аустениата  $A(\%)$  в образцах с точностью до изменения карбидной фазы испытуемого образца по сравнению с эталонным определяется с помощью формулы

---

(2.1)

Количество остаточного аустенита в стали по *термоЭДС* от образца определяется по аналогичной формуле(2.1). Для случая одинаковых знаков величин *термоЭДС* эталона и образца .

$$\text{---} \quad (2.2)$$

Где  $x$  – *термоЭДС* эталонного образца, в котором прошел 100% распад аустенита. В качестве эталона может быть взят образец, подвергнутый закалке, обработке холодом и низкотемпературному отпуску.

Термоэлектрический метод позволяет определить количество остаточного аустенита на деталях любой формы и размеров, проходящих как сквозную, так и поверхностную закалку.

### **Явление и метод измерения *термоЭДС***

Термоэлектрический метод основан на эффектах, сопряженных с появлением в металлах *термоЭДС*. Все термоэлектрические приборы, используемые в наше время, базируются на эффекте Зеебека, заключающийся в следующем: если два проводника из разных металлов соединить в замкнутый контур и одно из соединений нагреть до температуры, превышающей температуру другого соединения, в контуре начинает протекать ток, величина которого зависит от природы материалов и разности температур двух спаев.

Зависимость *термоЭДС* от природы(физических свойств) соприкасающихся металлов и от разности температур спаев в классической электронной теории выражается формулой

$$\text{---} \quad (2.3)$$

Где – *термоЭДС* исследуемого материала или сплава относительно элемента сравнения.  $K_B$  – постоянная Больцмана,  $e$  – заряд электрона,  $\Delta T$  – разность температур горячего и холодного спаев. – концентрации свободных электронов исследуемого металла, сплава и элемента сравнения.

Величина *термоЭДС* для ферромагнетикаов зависит от магнитной предыстории, по этой причине перед измерением образцы заранее следует размагнитить.

Из средств измерений постоянных напряжений в пределах 10нВ / 1В наименьшую погрешность дают компенсаторы или потенциометры.

Определение *термоЭДС* с целью контроля фазового состава термоэлектрических методом производят на лабораторной установке, главными частями которой являются датчик, устройство для поддержания постоянной разности температур холодного и горячего электродов и потенциометр с индикаторным устройством(рис.17)

Точность измерения *термоЭДС* зависит от конструкции термоэлектрического датчика, температуры и материала горячего электрода. В основу конструкции датчиков при неразрушающем контроле положен принцип механического контакта электродов с изделием. При этом используется одна из двух схем создания и измерения *термоЭДС*, получивших название простой и дифференциальной (рис.18).

Главными частями датчика считаются горячий электрод 2, холодный электрод 3 в виде подъемного столика, подставка 12, стойка 11 и траверза с двумя направляющими для перемещения нагревателя 10. Обогревательный горячий электрод нижним концом помещен в керамический нагревательный элемент со спиралью 4 из нихрома( диаметр 0.3 мм, сопротивление 42Ом). Для поддержания комнатной температуры на верхнем конце обогреваемого электрода расположены воздушные радиаторы 8, которые могут обдуваться вентилятором, укрепляемым на стойке 11.

Температура нижнего конца горячего электрода, обладающего конусное окончание, удерживается с помощью термопары хромель – копель и электронного терморегулятора, в качестве которого использован программируемый термоконтролер CAL-3200. К плюсам этого прибора следует отнести цифровой дисплей, возможность выбора единиц измерения температуры, типа термопары и типа выходного устройства (твердотельного или электромагнитного реле).Пример подключения терморегулятора(рис.19).

Провода от горячего, а также холодного датчика ведутся к низко омному потенциометру постоянного тока Р306. Оба электрода электрически отделены от металлической арматуры прибора. Провода от нагревателя через разъем подводятся к источнику электрического тока напряжением 24В. Нагреватель совместно с горячим электродом может перемещаться по вертикальным направляющим на 5-1 мм, что дает возможность прижимать горячий конец электрода к образцу с постоянной силой, величина которой подбирается двумя грузами.

Для измерения *термоЭДС* испытуемый образец помещают на подъемный столик, поворачивают эксцентрик ручкой на 90 градусов, при этом столик поднимается подшипниками, образец упирается в горячий электрод, который поднимается и давит всем весом на образце. Отсчет величины *термоЭДС* производят в момент достижения в месте контакта горячего электрода с образцом выбранной температуры, что фиксируется уменьшением тока по амперметру  $A$  и при введении в цепь нагревателя сопротивления  $R$ .

## **2.4 Измерение твердости. Микротвердомер FM 800**

Микротвердомер FM 800 предназначен для измерения твердости металлов и сплавов по шкалам Виккерса по соответствию с ГОСТ Р ИСО 6507-1:2007.

Принцип работы прибора основан на статическом вдавливании алмазного пирамидального наконечника Виккерса для измерения длин диагоналей восстановленного отпечатка. Твердость вычисляется на основе средней длины диагоналей отпечатка.

Прибор состоит из устройства приложения нагрузки, рабочего столика для размещения образцов и измерительного оптического блока.

Прибор поставляют с автоматической револьверной головкой, на которой установлены 2 наконечника и 4 объектива. Окуляр имеет увеличение 10. Подсветка осуществляется галогеновой лампой рис (20).

Микропроцессор твердомера позволяет задавать параметры измерительного цикла и автоматически вычисляет числа твердости на основе среднего измерений длины диагоналей отпечатка. Сенсорная панель предназначена для ввода информации и отображения результатов измерений.

Таблица 9. Метрологические и технические характеристики.

Обозначение шкалы измерения твердости	Диапазоны твердости, HV							
	100	200	300	400	500	600	800	1100
	50							
	Пределы допускаемой абсолютной погрешности по шкалам, HV							
HV 0.01	6							
HV 0.025	6	18	30	44				
HV 0.05	6	16	27	40	55	68	85	
HV 0.1	6	14	24	36	50	64	80	
HV 0.2	6	12	21	32	45	60	75	110
HV 0.3	4	10	18	28	40	54	70	110
HV 0.5	3	10	15	24	30	42	49	90
HV 1	3	8	12	16	25	30	35	60
HV 2	3	6	9	16	20	24	28	50

Пределы допускаемой относительной погрешности нагрузок:

- При испытательной нагрузке меньше или равно 1,961Н, %
- При испытательной нагрузке больше 1,961Н, %

Увеличение интегрального микроскопа :

- По вертикали 95мм ,
- По горизонтали 115мм

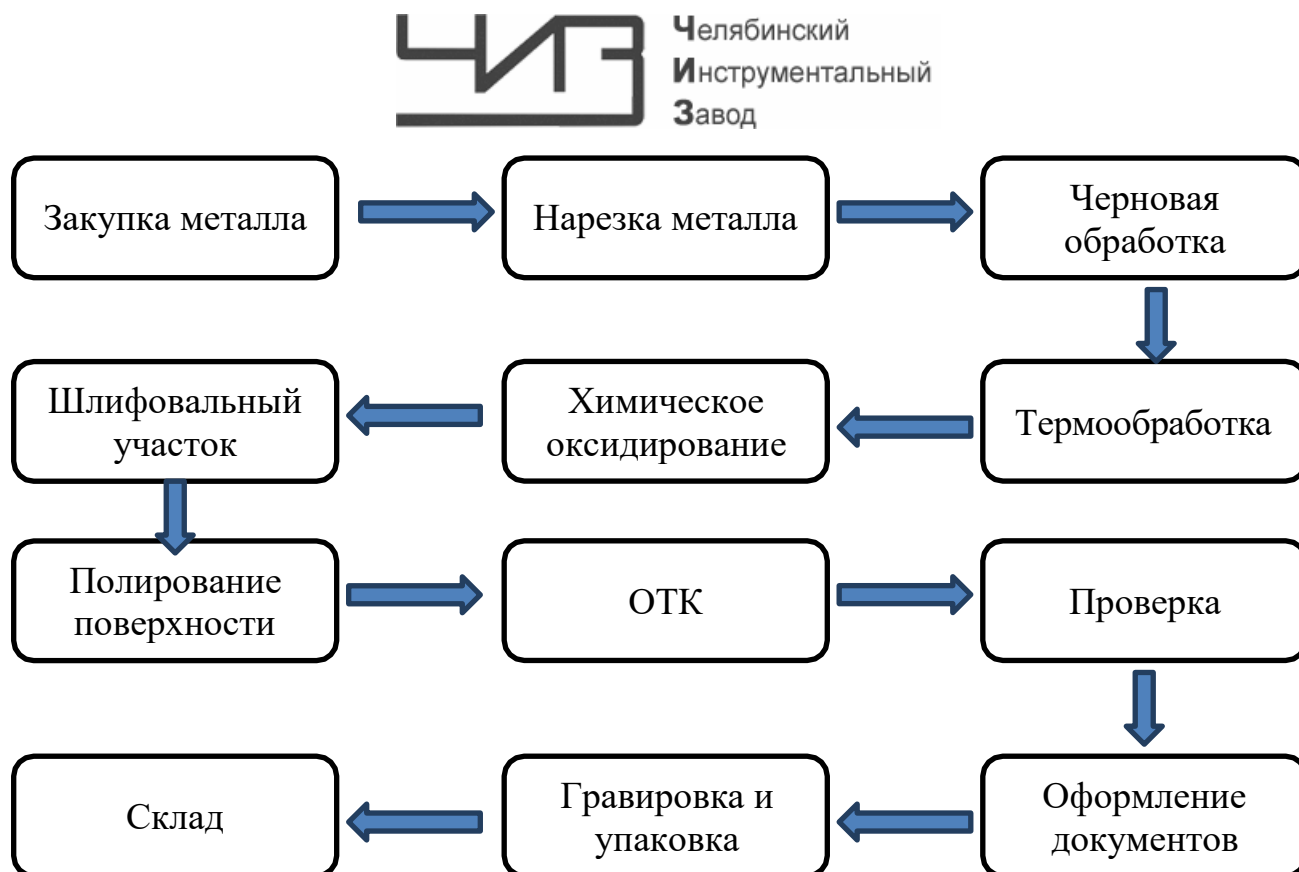
Условия применения:

- Температура воздуха, от +10 до +35
- Относительная влажность воздуха, % от 35 до 85.

### 3. Результаты

#### 3.1. Анализ существующей технологии изготовления калибров на предприятии

Вся последовательность операций:



1) Закуп металла. Закупка металла для изготовления калибров производится в г. Ижевск в «ПАО Ижсталь» и в г.Златаусте «ООО ЗМЗ», отделом снабжения без согласования с начальником участка. Габариты металла диаметром от 60мм до 240мм с шагом 10мм и длиной 6м. Основным критерием при выборе поставщика является стоимость металла. Сталь, применяемая для изготовления рассматриваемых калибров должна соответствовать по составу и свойствам стали ШХ15.

2) Нарезка металла производится ленточной пилой. Ленточная пила представляет собой полотно, которое закрепляется в специальном оборудовании. Материал инструмента такой же, как и у ручного изделия. На одной стороне расположены зубцы. В процессе работы двигателя станка идет

вращение шкивов, благодаря которому происходит непрерывное движение ленты. В процессе работы наблюдается небольшой отход, потому что ширина полотна составляет 1,5 мм. Возможна резка как листового металла, так и круглых заготовок.

3) Черновая обработка. Черновая обработка (выборка) является предварительной операцией, позволяющей удалить основную часть материала из массива заготовки, заключается в придании заготовке размеров и форм, приближенных к тем, которые заданы в чертежах. При этом остаются припуски на получистовую и чистовую обработку, которая проводится на специальных станках и установках.

4) Термообработка. После черновой обработки металл отправляется на закалку.

Нагревают металл в соленой ванне до 860°C. Состав ванны

.Выдерживают и отправляют на закалку в другую соленую ванну нагретую до 165 Состав второй ванны + 2% .

5) Химическое оксидирование(чернение) заключается в поочерёдном перемещении изделий в специальные растворы. Чернение металла не изменяет габаритных его размеров и позволяет получать равномерное черное покрытие на обработанных поверхностях, резьбе и глухих отверстиях. Сам процесс подготовки и последующей обработки происходит следующим образом:

- химическая расконсервация;
- размещение (монтаж) деталей на специальных подвесках;
- химическое обезжиривание;
- промывка - последовательно в теплой и холодной воде, обязательно проточной;
- травление (применяют раствор едкого натра);
- очередная промывка, условия прежние;



- осветление при помощи азотной кислоты;
- промывка в холодной проточной воде;
- собственно химическое оксидирование;
- опять промывка (на этот раз сначала холодной, потом теплой водой);
- сушка покрытия;
- демонтаж готовых деталей с подвесок;

Такой способ обеспечивает очень надежную антикоррозионную защиту, сохраняет размеры прецизионных деталей, позволяет получить консервационное покрытие различных цветов (чаще всего - чёрного).

б) Шлифовальный участок (Чистка металла). Благодаря шлифовальной установки металл доводят до необходимого состояния какой-то детали, имеющую плоскую, цилиндрическую или конусную поверхность. Принципом работы шлифовального агрегата является вращательное движение режущего инструмента, а также возвратно-поступательный ход доски. Диск вращается на большой скорости и за один подход он может снять тонкий слой металла, а если постоянно и аккуратно двигаться вперёд и назад, то тогда будет обеспечиваться довольно медленная обработка всей поверхности детали.

Глубина шлифования, от которой зависит качество поверхности, будет обеспечиваться на различных станках по-разному. Обычно её можно регулировать с помощью автоматического перемещения рабочего стола вверх или вниз. На современных моделях местоположение по вертикальной оси изменяется при помощи специальной рабочей головки, которая имеет режущий инструмент.

7) Полирование поверхности. Полирование является окончательным шагом при изготовлении колец. Особый интерес необходимо уделить к подготовке поверхности перед процессом полирования, то есть черновому полированию. Данное объясняется тем, что для получения высококачественного результата на поверхности не допускаются никакие

дефекты. Глубокие риски и раковины, легко обнаруживаются в начальной стадии полирования, нужно ликвидировать с помощью мелкозернистых шлифовальных кругов или абразивных лент и только после этого приступить к чистовому полированию. С целью снижения расхода абразива и повышения производительности полирование реализуется с наименьшим числом переходов. Под переходом понимают процедуру полирования, выполняемую, например, абразивом конкретной зернистости. За каждый “переход” шероховатость поверхности улучшается на 1-2 класса. На количество переходов, таким образом, и на время полирования оказывает существенное влияние исходная шероховатость поверхности. Чем лучше подготовлена поверхность под полирование, т. е. чем выше класс исходной чистоты поверхности, тем меньше переходов потребуется при полировании и тем стремительнее будет обработка.

8) Отдел технического контроля (ОТК). После изготовления и обработки кольца отправляются на проверку всех параметров в ОТК.

- Клеймение принятой и забракованной продукции, оформление в установленном порядке документаций.
- Контроль за качеством и комплектностью изготавливаемых предприятием деталей, узлов и готовых изделий, за их соответствием стандартам, техническим условиям, нормам, эталонам и чертежам;
- Анализ и технический учет брака и дефектов продукции предприятия;
- Контроль за изъятием из производства окончательно забракованных изделий;

9) Гравировка и упаковка. Последний этап - это гравировка изделия лазерным методом. На изделиях наносятся : ГОСТ, названия предприятия, маркировка и номер калибра.

## Описание отбора образцов.

Для исследования были вырезаны образцы калибров трех размеров. В табл 10. показаны габариты выбранных для исследования калибров непосредственно после изготовления и после вылежки в течение 6 месяцев .

Полная характеристика в приложениях (А,Б,В).

Таблица 10 Образцы калибров выбранные для исследования

Наименование	Параметр	Было, мм	Допуск, мм	Стало, мм
Кольцо гладкое Г BCSG 168.28 №28/24 ОТ 23.10.19 Образец 1	Конусность	- 0,008	-0,005/- 0,025	-0,001/-0,005
	Несовпадение измерительных плоскостей	+0,06	0,10	-0,15
Кольцо резьбовое контрольное К-Р Обс 168 №91 от 18.04.19 Образец 2	Конусность	-0,010/- 0,035	-0,010/- 0,035	-0,005/-0,007
	Несовпадение измерительных плоскостей	82,02	0,10	81,82
Кольцо резьбовое PBCSG 146 №17 ОТ 13.08.19 Рекламация завода Образец 3	Конусность	-0,014	-0,005/- 0,025	Завод -0,003 ЧК 11.19 -0,003/-0,007 ЧК12.19.19 -0,001/-0,003
	Несовпадение измерительных плоскостей	3,24		ЧК 28.11.19 3.14 ЧК 13.12.19 3,11

Для проведения металлографического анализа из выбранных калибров изготавливались микрошлифы вдоль оси детали.

Травление микрошлифов производилось в 4%-ном спиртовом растворе HNO<sub>3</sub> химическим способом.

### 3.2 Химический состав образца

Результаты исследования.

Анализ проводился на атомно – эмиссионном спектрометре ДФС-500 зав. №110038, годен до 25.06.2020г

Химический состав образца представлен в таблице 11.

Таблица 11. Химический состав стали, масс. %.

Образец	C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Ni, %	Ti, %	V, %	Mo, %	Cu, %	P, %	S, %	W, %	Сталь
№1	0.8 60	1.4 51	0.37 3	1.0 46	0.0 94	0.0 07	0.0 05	0.01 5	0.1 93	0.0 12	0.0 24	0.0 01	9ХС

Таким образом, результаты химического анализа показали, что для изготовления калибров вместо стали ШХ15 использовалась сталь 9ХС.

Поскольку предприятие изготовитель термообработку изделий проводило по режиму стали ШХ15 имеет смысл сравнить эти стали и режимы обработки этих сталей.

### 3.3 Анализ режима проведенной термообработки

ШХ15 – конструкционная подшипниковая сталь. Из данной стали изготавливают шарики диаметром вплоть до 50 мм, ролики диаметром до 23 мм, кольца подшипников с толщиной стенки до 14 мм, втулки плунжеров, плунжеры, нагнетательные клапаны, корпуса распылителей, ролики толкателей и другие детали, от которых необходима значительная твердость, износостойкость и контактная прочность.

Критические точки стали ШХ15 представлены в таблице 12 [10].

Таблица 12 – Температура критических точек стали ШХ15 в °С

Критическая точка	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub> (Ac <sub>cm</sub> )	Ar <sub>1</sub>
°С	724	724	900	700

В таблице 13 представлен химический состав стали ШХ15 [10].

Таблица 13 – Химический состав стали ШХ15 (по ГОСТ 801-78) в мас. %

C	Mn	Si	Cr	S	P	Ni	Cu	Ni+Cu
					не более			
0,95-1,05	0,20 -0,40	0,17-0,37	1,3-1,65	0,02	0,027	0,30	0,25	0,50

На рисунке 21 приведена диаграмма изотермического распада переохлаждённого аустенита стали ШХ15 [11].

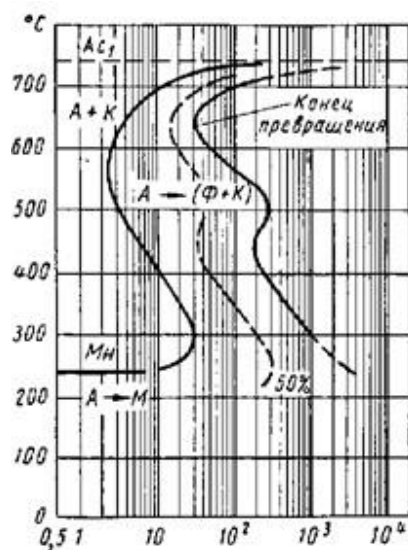


Рис.21 – Диаграмма изотермического распада аустенита стали ШХ15

Из диаграммы минимальная устойчивость у переохлаждённого аустенита наблюдается при температуре 550 °С и инкубационный период составляет 2,3 секунды.

Сталь ШХ15 содержит существенное количество хрома (1,3-1,65%), который обеспечивает прокаливаемость стали. Большое содержание хрома в стали, обеспечивает прокаливаемость деталей больших размеров. Увеличение прокаливаемости объясняется тем, что карбиды образованные в результате взаимодействия хрома и цементита медленнее растворяются в аустените, а наличие хрома в аустените замедляет его распад при охлаждении, всё это уменьшает критическую скорость закалки подшипниковых сталей по сравнению с углеродистыми. Также для повышения прокаливаемости в сталь вводя кремний и марганец [4].

Содержание никеля и меди в шарикоподшипниковой стали должно быть минимальным. Это связано с тем, что наличие никеля больше 0,3 % снижает твёрдость закалённой стали. Медь же, не смотря на то что улучшает некоторые характеристики стали (повышает твёрдость, предел пропорциональности, предел прочности и прокаливаемость стали) оказывает негативное влияние на

поведение стали при горячей механической обработке, что проявляется в образовании мелких трещин и надрывов, поэтому её содержанию в стали ограничивается 0,25%. Высокий процент содержания углерода в стали обеспечивает её повышенную износостойкость.

Сталь ШХ15 обладает высокой твёрдостью, контактной выносливостью и износостойкостью, а также высокой вязкостью и прочностью, что позволяет изделиям из данной стали противостоять значительным статическим и динамическим нагрузкам. Сталь выплавляется в дуговых электропечах, с целью уменьшения загрязнённости неметаллическими включениями, получения более плотного и химически однородного слитка сталь ШХ15 дополнительно подвергают внепечному рафинированию (вакуумирование, продувка инертными газами).

Сталь 9ХС – инструментальная, легирована хромом и кремнием. Обладает хорошей прокаливаемостью и повышенной устойчивостью аустенита. После закалки в образцах сечением до 40 мм (в горячих средах до 30 мм) получается в масле твердость HRC 60 и более. Сталь 9ХС имеет повышенную теплостойкость при твердости не ниже HRC 60 и сохраняется при нагреве закаленной стали до 250—260° С, хорошие режущие свойства, равномерное распределение карбидов (в прутках диаметром 50—60 мм карбидная неоднородность).

Критические точки стали ШХ15 представлены в таблице 14 [10].

Таблица 14. Температура критических точек стали 9ХС в °С

Критическая точка	$A_{c1}$	$A_{c3}(A_{cm})$	$A_{r1}$	Мн
°С	770	870	730	160

В таблице 15 представлен химический состав стали 9ХС[10].

Таблица 15 – Химический состав стали 9ХС в мас. %

С	Mn	Si	Cr	S	P	Ni	Cu	Ni+Cu
				не более				
0,85-0,95	0,30-0,60	1,20-1,60	0,95-1,25	0,030	0,030	0,35	0,30	0,60

Кремний специально вводят в сталь, наравне с марганцем и алюминием считаются главными раскислителями стали. Кремний не является карбидообразующим элементом, также его количество в стали ограничивают до 2%. Он увеличивает предел текучести и прочность стали, а при содержании более 1% уменьшает вязкость, пластичность и повышает порог хладноломкости. Кремний структурно не возможно найти, так как полностью растворим в феррите, помимо этой части кремния, которая в виде окиси кремния не успела всплыть в шлак и осталась в металле в виде силикатных включений.

Хром положительно влияет на ряд характеристик сталей (прокаливаемость, склонность к вторичному твердению, теплостойкость и т.д.). По мере повышения его концентрации в твердом растворе, существенно возрастает устойчивость аустенита, как в перлитной, так и в промежуточной областях, качественно изменяется вид С-образных кривых.

На рисунке 22 приведена диаграмма изотермического распада переохлаждённого аустенита стали 9ХС[11].

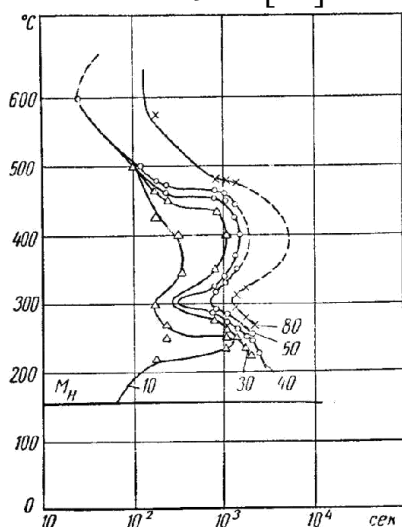


Рис. 22. Диаграмма изотермического распада аустенита стали 9ХС, предварительный нагрев 875°С.

Устойчивость аустенита при охлаждении, которая определяет прокаливаемость стали, в хромоуглеродистых сталях, применяемых для инструмента, значительно больше, чем у углеродистых сталей с тем же содержанием углерода. Цифры на диаграмме (рис.22) указывают процент распада аустенита[12]. При 250°С превращение начинается через 12-13мин и протекает очень медленно. В течении первых 10 мин распадается лишь 5 % аустенита. При 200°С превращение протекает еще более медленно; за час распадается лишь 20% аустенита. В связи с этим эту сталь удобно применять для ступенчатой закалки.

После термообработки стали ШХ15, должен получиться мартенсит отпуска и дисперсные карбиды в структуре, за счет длительной выдержки и при температуре 860 °С. После этого, идет закалка до 165°С. Аустенит и карбиды превращаются в карбиды и мартенсит отпуска. За счет выдержки отпуска мартенситной, количество остаточного аустенита меньше 5% и соответственно структура такая будет устойчива.

*осле химического анализа выяснилось, что вместо стали ШХ15 использовалась сталь 9Х. У стали 9Х критическая точка 870 .*

*олучается, нагрев идет под самую критическую точку, тем самым количество не растворившихся карбидов уменьшается и аустенит обогащается углеродом. Устойчивость аустенита увеличивается. осле происходит закалка с охлаждением до 165 , где сталь выдерживается выше температуры мартенситного превращения  $M_n=160$  .*

*Вследствие чего, идет образование нижнего бейнита, плюс еще на воздухе дополнительно образуется мартенсит. оответственно, в бейните и мартенсите образуется повышенное количество остаточного аустенита. На складе при вылеживании, остаточный аустенит начинает распадаться и превращаться в мартенсит отпуска. оскольку остаточный аустенит и мартенсит имеют разные удельные объемы, у них начинается изменение размеров. Эти микроскопические смещения в размерах начинают происходить за счет распада остаточного аустенита.*



### **3.4 Результаты исследования микроструктуры**

#### **3.4.1 Металлографический анализ образца № 1**

Загрязненность металла неметаллическими включениями соответствует 1,5 баллу (рис.23) Микроструктура характерна для шарикоподшипниковой стали и представляет собой троосто-мартенситотпуска и дисперсные карбиды (рис. 24а-б). Карбидная фаза присутствует в структуре неравномерно. На рис. 24а видны отдельные скопления глобулярных карбидов в троосто-мартенситной матрице. В макроструктуре наблюдается полосчатость, свидетельствующая о недогреве (недостаточная выдержка)(рис. 25).

Измерения микротвердости образца показали результаты HRC 61-65.

### **3.4.2. Металлографический анализ образца № 2**

Загрязненность металла неметаллическими включениями соответствует 1,5 баллу (рис.26) Микроструктура характерна для шарикоподшипниковой стали и представляет собой троосто-мартенситотпуска и дисперсные карбиды (рис. 27а-в). Как и в предыдущем образце карбидная фаза присутствует в структуре неравномерно. На рис. 27 видны отдельные скопления глобулярных карбидов в троосто-мартенситной матрице. В макроструктуре наблюдается полосчатость, свидетельствующая о недогреве (недостаточная выдержка) (рис. 28).

Измерения микротвердости образца показали результаты HRC 64-65.

### **3.4.3. Металлографический анализ образца № 3**

Загрязненность металла неметаллическими включениями соответствует 1 баллу (рис.29). Микроструктура характерна для шарикоподшипниковой стали и представляет собой участки троосто-мартенсита отпуска и дисперсные точечные равномерно распределенные карбиды (рис. 30). Карбидная неоднородность соответствует 1 баллу, карбидная сетка 1 баллу. Полосчатость соответствует 1 баллу. В макроструктуре присутствует равномерная полосчатость (рис.31).

## **3.5. Результаты определения количества остаточного аустенита**

Ввиду того, что на предприятии сохранился металл (сталь 9ХС), используемый для изготовления исследуемых калибров. То для сравнительного анализа количества остаточного аустенита была проведена термообработка металла по режиму обработки калибров их стали ШХ15.

Таким образом определялось количество остаточного аустенита непосредственно после термообработки и на исследуемых образцах (т.е. вылежки в течение полугода).

Результаты исследования показали, что количество остаточного аустенита в металле после термообработки составляет 20%, после вылежки –5%. Таким образом, изменение геометрических размеров калибров можно объяснить

распадом остаточного аустенита.

### **Выводы:**

В выпускной работе был проведен обзор на тему «Геометрическая нестабильность колец из инструментальной стали»;

Изучены причины геометрической нестабильности металлов;

Изучена причина изменений размеров данных нам образцов;

Проведен анализ данных нам образцов и установлены причины изменений размеров колец;

Причиной изменением геометрических размеров калибров было неправильно выбран режим термообработки. После химического анализа выяснилось, что вместо стали ШХ15 использовалось сталь 9ХС. У стали 9ХС критическая точка  $870^{\circ}\text{C}$ . Получается, нагрев идет под самую критическую точку, тем самым количество не растворившихся карбидов уменьшается и аустенит обогащается углеродом. Устойчивость аустенита увеличивается. После происходит закалка-с охлаждением до  $165^{\circ}\text{C}$ , где сталь выдерживается выше температуры мартенситного превращения  $M_n=160^{\circ}\text{C}$ .

Вследствие чего, идет образование нижнего бейнита, плюс еще на воздухе дополнительно образуется мартенсит. Соответственно, в бейните и мартенсите образуется повышенное количество остаточного аустенита. На складе при вылеживании, остаточный аустенит начинает распадаться и превращаться в мартенсит отпуска. Поскольку остаточный аустенит и мартенсит имеют разные удельные объемы, у них начинается изменение размеров. Эти микроскопические смещения в размерах начинают происходить за счет распада остаточного аустенита.

## Библиографический список:

1. Кнорозов Б.В., Усова Л.Ф. и др. Технология металлов и материаловедение М.: Металлургия, 1987
2. Гаврюсов В. И. Размерная стабильность материалов и элементов конструкций. Л.: ЦНИИ „Румб“, 1990. 113 с.
3. Хенкин М. Л., Локшин И. Х. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. М.: Машиностроение, 1974. 256 с.
4. Яковлева С.А., Юльметова О.С. Размерная стабильность материалов и элементов конструкций в приборостроении. ИЗВ. ВУЗОВ. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. 2010. Т. 53, № 8
5. Гаврюсов В. И. Геометрическая стабильность металлических приборных конструкций и технологические методы ее повышения. Л.: ЦНИИ „Румб“, 1981. 146 с.
6. Яковлева С.А., Гаврюсов В.И., Щербак А.Г. Особенности процесса изготовления прецизионных узлов. Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2010, № 6 (70)
7. ГОСТ 24853-81 «Калибры гладкие для размеров до 500 мм. Допуски»;
8. ГОСТ 24852-81 «Калибры гладкие для размеров свыше 500 до 3150 мм. Допуски».
9. Катаев В.А. Методы исследования фазового состава и свойств углеродистой стали : [учеб.-метод. пособие] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. Ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 84с.
10. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др; Под общ. ред. В. Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.
11. Попов, А.А. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета – раствора в сплавах титана: справочник / А.А. Попов, Л.Е. Попова. – 3-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1991 – 503 с.

12. Гуляев, А.П. Инструментальные стали: справочник / А.П. Гуляев, К.А. Малинина, С.М. Саверина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Изд-во Машиностроение, 1975. – 272 с.
13. Воскобойников, В.Г. Общая металлургия: учебник для вузов / Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. – 6 – изд., перераб. и доп. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005 – 768 с.
14. Рощин, В. Е. Электрометаллургия и металлургия стали: учебник / В.Е.Рощин, А.В.Рощин. – 4-е изд., перераб. и доп. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 572 с.
15. Карева, Н. Т., Термическая обработка сталей и сплавов: учебное пособие / Н.Т. Карева, И.В. Лапина, С.И. Ильин. – 2-е изд., испр. и доп. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2006. – 98 с.
16. Артингер, И. Инструментальные стали и их термическая обработка / И. Артингер. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
17. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер. – М.: Металлургия, 1968. – 568 с.
18. Гаврюсов В. И. Метод оценки размерной нестабильности замыкающего звена гироскопических сборок // Гироскопия и навигация. 1993. № 1. С. 18—25.
19. Медовой И.А. и др. Исполнительные размеры калибров Справочник. В 2-х кн. Кн. 1 / И. А. Медовой, Я. Г. Уманский, Н. М. Журавлев - М.: Машиностроение, 1980. - 384 с.: ил. Калибры гладкие для валов и отверстий с размерами 1 - 500 мм
20. Зуев В.М. Термическая обработка металлов / В.М. Зуев. М. : Высш. шк., 2001.
21. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин. М. : Металлургия, 1983.
22. Материаловедение и термическая обработка : справочник / под ред. М.Л. Берштейна, А.Г. Рахштадта. М. : Металлургия, 1995.
23. Адаскин А.М. Материаловедение (металлообработка) / А.М. Адаскин, В.М. Зуев. 3-е изд., стер. М. : ИЦ «Академия».
24. Эфрон, Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали / Л.И. Эфрон. – М.: Металлургиздат, 2012. – 696 с.

25. Варнак, О.В. Влияние структуры на склонность к деформационному старению и проявлению эффекта баушингера в низкоуглеродистых сталях для трубопроводов.: дис.... канд. техн. наук / О.В. Варнак. – Челябинск., – 2018. 226с.
26. Смирнов, М.А. Основы термической обработки стали: учебное пособие / М.А. Смирнов, В.М. Счастливцев, Л.Г. Журавлев. – Екатеринбург: УрОРАН, 1999.  
– 488 с.
27. Schwinn, V. Recent Developments and Applications of TMCP Steel Plates / V. Schwinn, J. Bauer, P. Fluess, H.-J. Kirsch, E. Amoris // *Revue de Métallurgie*. 2011.  
– V. 108. – №5. – P. 283–294.
28. Okatsu, M. Development of a High-Deformability Linepipe with Resistance to Strain-aged Hardening by НОР / M. Okatsu, N. Shikanai, J. Kondo // *JFE TECHNICAL REPORT*. – 2008. – №12. – P. 8–14.
29. Энтин, Р.И. Превращения аустенита в сталях / Р.И. Энтин. – М.: Металлургиздат, 1960. – 256 с.
30. Roitburd, A.L. Nature of Martensitic Transformation / A.L. Roitburd, G.V. Kurdumov // *Materials Science Engineering*. – 1979. – V. 39. – P. 141–167.
31. Yakubtsov, I.A. Bainite Transformation During Continuous Cooling of Low Carbon Microalloyed Steel / I.A. Yakubtsov, J.D. Boyd // *Materials Science and Technology*. – 2001. – V. 17. – Pp. 296–301.
32. Smirnov, M.A. Classification of low-carbon pipe steel microstructures / M.A. Smirnov, I.Yu. Pyshmintsev, A.N. Boryakova // *Metallurgical Transactions*. – 2010. – V. 54, No. 7. – Pp 444–454.