

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт машиностроения
Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
Направление 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»
Профиль «Технология автоматизированного машиностроения»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Повышение геометрической точности мало жестких длинномерных валов с применением термосиловой обработки»

Студент

К.О. Семенов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

Д.А. Расторгуев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Консультанты

В.Г. Виткалов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель магистерской
программы

д.т.н., доцент

Н.М. Бобровский

(личная подпись)

«_____» _____ 2016 г.

Допустить к защите

И.о. заведующего кафедрой

к.т.н., доцент

А.В. Бобровский

(личная подпись)

«_____» _____ 2016 г.

Тольятти 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ФОРМУЛИРОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ	5
1.1 Остаточные напряжения в технологическом процессе изготовления маложестких деталей	5
1.2 Технологические процессы, применяемые для стабилизации размеров и форм маложестких деталей	7
1.3 Развитие технологий термомеханических и термосиловых видов обработки	9
1.4 Формулировка цели и задач	21
2 ОБЗОР ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СРЕД И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ СИНТЕЗА	22
2.1 Реологические модели материалов при термосиловой обработке	22
2.2 Разработка математической модели термосиловой обработки	24
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗМЕРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И ТОЧНОСТИ МАЛОЖЕСТКИХ ВАЛОВ	26
3.1 Экспериментальное исследование влияния термосиловой обработки при отпуске на стабильность формы маложестких валов и геометрическую точность	26
3.2 Экспериментальное исследование термосиловой обработки на равномерность пластической деформации	50
4 ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОЙ ОБРАБОТКЕ	60
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	68
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	69
ПРИЛОЖЕНИЯ	75

ВВЕДЕНИЕ

Во многих современных машинах, агрегатах и приборах применяются маложесткие детали (МЖД) типа «вал». Непрерывный рост объема производства МЖД обусловлен совершенствованием прочностных расчетов, оптимизацией форм деталей и конструкций, постоянным возрастающим выпуском прецизионных машин и снижением металлоемкости изделий.

Диспропорция в конструктивных параметрах МЖД создаёт серьёзные технологические трудности в производстве.

Отрицательное действие таких факторов как: коробление заготовок, вызванное остаточными неравномерными напряжениями, вносимыми на всех стадиях обработки; значительные пластические и упругие деформации; при изготовлении нежестких деталей приводит к погрешностям формы и размеров деталей, нарушению технологических баз, ограничению режимов резания, поверхностным дефектам, стойкости инструмента и точностных возможностей станков и в конечном итоге к снижению эксплуатационной надёжности нежестких деталей и готовых изделий в целом [1, 2].

Наиболее слабым звеном технологической системы являются обрабатываемые заготовки. Их значительные пластические и упругие деформации на всех стадиях изготовления приводят к погрешностям форм и размеров деталей и ограничению режимов обработки.

Повышение геометрической точности обработки заготовок на всех стадиях способствует улучшению эксплуатационных свойств машин и приборов, полному или частичному устранению пригоночных работ, что приводит к уменьшению припусков на обработку. Это, в свою очередь, увеличивает надёжность и снижает трудоёмкость изготовления деталей и сборки машин.

Анализ производственного опыта изготовления МЖД в мелкосерийном, индивидуальном и серийном производствах показал, что традиционные способы обработки маложестких длинномерных

осесимметричных деталей малоэффективны и поэтому вопросы их изготовления на практике решаются ограничением режимов обработки.

Такой путь не гарантирует необходимое качество изделий и увеличивает трудоемкость обработки. Поэтому совершенствование процессов изготовления МЖД является основной задачей, повышающей качество продукции машиностроения и эффективность производства [3].

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.

ФОРМУЛИРОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ

1.1 Остаточные напряжения в технологическом процессе изготовления маложестких деталей

Остаточными напряжениями, называют напряжения, которые существуют и уравниваются внутри тела после устранения воздействий, вызвавших их появление.

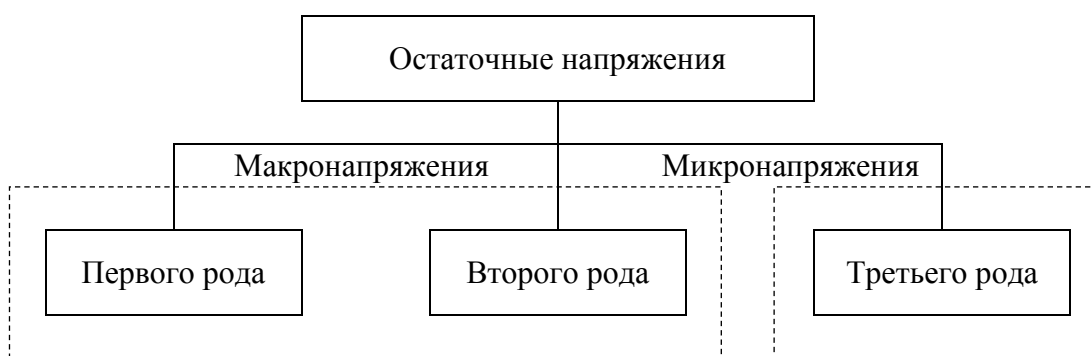


Рисунок 1 – Виды остаточных напряжений в зависимости от скорости их изменения

Остаточные напряжения (макронапряжения) первого рода изменяются незначительно в пределах зерна материала (для технических сплавов обычно порядка сотых долей миллиметра). Обычно напряжения от нагрузок относят к макронапряжениям.

Второго и третьего рода (микронапряжения) изменяются резко в пределах зерен и ячеек кристаллической решетки. Они связаны с наличием различных фаз, ориентацией кристаллографических плоскостей, анизотропией кристаллов и т.д.

Они возникают почти при всех технологических процессах механической, термической обработки, обработке металлов давлением и других видах обработки. Причины образования остаточных напряжений

многообразны (фазовые превращения, неоднородность пластической деформации, неоднородность температурного поля) [4, 5].

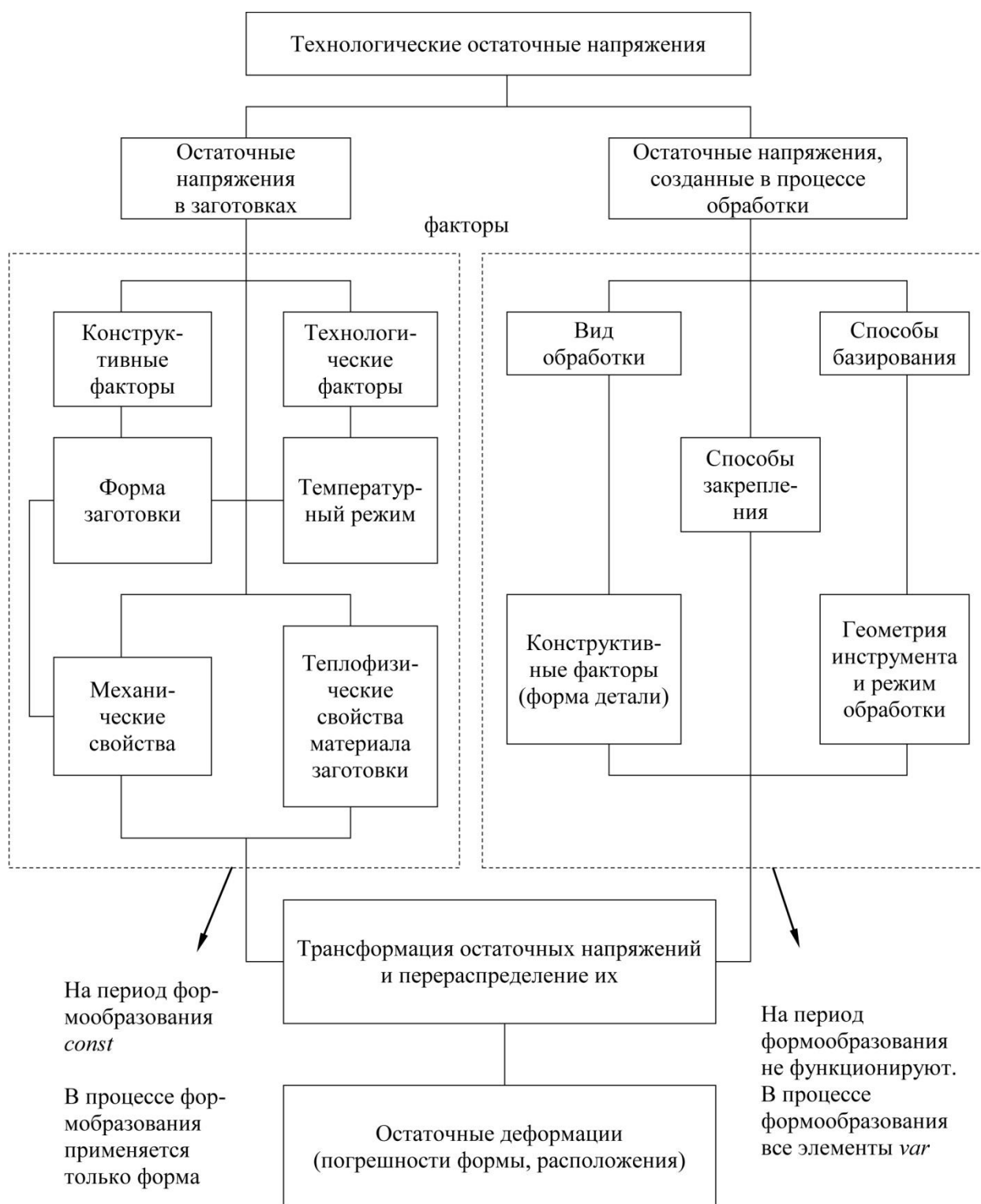


Рисунок 2 – Схема формирования погрешностей обработки от остаточных напряжений

При воздействии внешних нагрузок в процессе дальнейшей эксплуатации или механической обработки остаточные напряжения, суммируясь с напряжениями внешних сил, могут превышать предел упругости, что ведет к пластической неравномерной деформации [6].

При термообработке, предназначенной для снижения остаточных напряжений, могут вызвать деформирование детали. При резком изменении температуры в детали с остаточными напряжениями, может происходить не только искаженность формы и размеров, но и разрушение, особенно опасны при этом напряжения растяжения. Остаточные напряжения снижают прочность изделий при циклических и переменных нагрузках [7].

1.2 Технологические процессы, применяемые для стабилизации размеров и форм маложестких деталей

Распространенные способы снижения остаточных напряжений показаны на рисунке 3.



Рисунок 3 – Методы снижения остаточных напряжений

Вибрационный метод применяется для снятия остаточных напряжений в заготовках, полученных методами пластической деформации, вызванных механической обработкой – строганием, фрезерованием, протягиванием, сверлением шлифованием и т.д.

Термообработка назначается для снятия остаточных напряжений, с целью стабилизации размеров деталей и внутренних напряжений. Этот процесс дает достаточно высокое качество стабилизации и резко снижает уровень остаточных напряжений [8, 9].

Построение традиционного технологического процесса термической обработки требует применение нескольких промежуточных отпусков, что может привести к увеличению стоимости обработки и не обеспечивает высокой производительности. При отпуске, для снятия остаточных напряжений главным механизмом изменения остаточных напряжений является их релаксация, которая протекает более интенсивно при увеличении температуры [10, 11].

Все известные методы снижения остаточных напряжений условно можно разделить на 3 группы, рисунке 4.



Рисунок 4 – Степень изменения остаточных напряжений

1 группа – естественное старение, вибростарение, тепловая обработка при $T=200-300^{\circ}\text{C}$.

2 группа – метод статического нагружения, метод термоударов.

3 группа – отжиг при $T=500-600^{\circ}\text{C}$.

Чтобы устранить пластическую деформацию, необходимо либо увеличить сопротивление металла к пластическому деформированию

(релаксационную стойкость), либо уменьшить действующие напряжения.

Упрочненная пластическим деформированием сталь гораздо лучше противостоит возникновению новой пластической деформации [12, 13].

В последнее время получают развитие методы старения, повышающие релаксационную стойкость материала, с небольшим снижением уровня остаточных напряжений. К ним относятся старение тепловыми ударами, динамическое и статическое нагружение, обработка ультразвуком, вибрационное старение. Однако, из данных методов невозможно добиться равномерности распределения остаточных напряжений без управления ходом данных процессов [14].

Проведенное изучение работ по повышению точности обработки маложестких изделий и управлению параметрами, влияющими на точность обработки, показывает, что используемые в них модели технологической системы недостаточно отражают поведение маложесткой заготовки при термообработке [15].

1.3 Развитие технологий термомеханических и термосиловых видов обработки

В теоретических исследованиях показано, что для минимизации технологической наследственности, передаваемой от операции, необходимо создать равномерное напряженное состояние по всей длине заготовки и снизить уровень остаточных напряжений, что, естественно, приведет к равномерной релаксации напряжений и минимальному короблению готовых изделий при их эксплуатации [16, 17].

Для этой цели была введена в технологический процесс операция термосиловой обработки – ТСО. Трудность управления этим процессом состоит в том, что физико-механические свойства материала, из которого изготавливаются детали, настолько разнообразны, а их поведение зависит от внешних условий, что найти единый закон управления просто невозможно. В

первом приближении определена задача получения тела равного сопротивления, то есть тела, во всех точках которого возникают микроскопические одинаковые напряжения [18, 19].

Более подробное описание и анализ термообработок представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Патентная документация

№	Автор, страна, дата публикации, название	Страна выдачи, номер охранного документа, рубрика МКИ (УДК)	Сущность технического решения и цель его создания
1	2	3	4
1	В.П. Сницарев, В.Ф. Запорожец, И.Е. Блохин, РФ (СССР), 30.07.78г., Станок для термической обработки деталей	РФ (СССР) Авторское свидетельство № 617484, C21D9/28	Исключение коробления деталей с одновременным дополнительным упрочнением закаливаемой поверхности. Станок снабжен соединенным с механизмом прижима, узлом регулирования прижима, состоящим из датчика и регулятора давления, электрически связанных между собой.
2	О.И. Драчев, Г.Г. Палагнюк, В.К. Мазур, Т.Т. Ахмедьянов, РФ (СССР), 07.03.87г., Способ механической обработки нежестких деталей	РФ (СССР), Авторское свидетельство № 1294482	Повышение точности обработки и улучшение эксплуатационных характеристик обработанных деталей, стабилизации остаточных напряжений исключающее влияние технологич. наследственности от предыдущих операций. Базирование детали осуществляют по длине деталей в самоцентрирующихся опорах.
3	М.И. Оленин, Ю.П. Григорьев, А.А. Разгуляев, И.Я. Пухонто, И.Р. Цимбал,	РФ (СССР) Авторское свидетельство № 1018984	Повышение качества правки. Устройство, содержит оправку с фиксаторами, при этом коэффициент термического расширения материалов

продолжение таблицы 1

1	2	3	4
	РФ (СССР), 23.05.83г., Устройство для термической правки изделий		оправки и фиксаторов соответственно больше или меньше коэффициента термического расширения материала заготовки, оправка выполнена секционной, при этом каждая секция в зоне фиксатора имеет выступ, а на фиксаторе выполнена соответствующая ему проточка.
4	О.И. Драчев, В.К. Мазур, А.В. Клементьев, В.В. Акимов, РФ (СССР), 15.10.87г., Способ стабилизации формы осесимметричных деталей	РФ (СССР), Авторское свидетельство № 1344455	Повышение эффективности процесса стабилизации формы осесимметричных деталей. К закрепленной одним концом детали к свободному концу прикладывают переменное по направлению силовое воздействие в виде крутящего момента, частота изменения направления которого равна собственной частоте крутильных колебаний детали, создается равномерное по длине напряженное состояние.
5	В.К. Мазур, О.И. Драчев, РФ (СССР), 07.07.88г., Устройство для закалки валов малой жесткости	РФ (СССР), Авторское свидетельство № 1407969	Уменьшение коробления изделий. Устройство содержит трубу с равномерно расположенными по ее поверхности отверстиями, которая выполнена из материала, не претерпевающего мартенситного превращения и имеющего коэффициент термического расширения, меньший коэффициента термического расширения материала изделия. Соотношение длины и наружного диаметра трубы не менее 8. На концах трубы

продолжение таблицы 1

1	2	3	4
			расположены захваты, при этом один из захватов выполнен в виде разрезной резьбовой втулки с гайкой, торец которой контактирует с торцом трубы.
6	О.И. Драчев, Э.Н. Хенкин, О.И. Иванов, РФ (СССР), 30.01.92г., Способ термической обработки осесимметричных длинномерных деталей	РФ (СССР), Авторское свидетельство № 1708884	Повышение качества обработки деталей путем предотвращения коробления детали. Стапель в сборе с деталью нагревают и держат на постоянной температуре. В период нагрева происходит пластическая осевая деформация за счет разности коэффициентов линейного расширения стапеля и детали. Стапель выполняют многослойным с дополнительным объемом, заполненным материалом с низким коэффициентом теплопроводности, при этом время охлаждения стапеля в несколько раз больше времени охлаждения детали.
7	В.К. Мазур, РФ (СССР), 15.01.93г., Устройство для термической обработки маложестких валов	РФ (СССР), Авторское свидетельство № 1788978	Повышение качества обработки путем уменьшения коробления маложестких валов. Труба выполнена сплошной из металла или сплава с коэффициентом термического расширения материала большим коэффициента термического расширения материала вала, а захваты выполнены в виде колец с коническими отверстиями с расположенными в них вкладышами, при этом один из захватов закреплен на

продолжение таблицы 1

1	2	3	4
			торце станины посредством резьбы.
8	О.И. Драчев, РФ (СССР), 07.01.93г., Способ термической обработки осесимметричных деталей	РФ (СССР), Авторское свидетельство № 1786138	Повышение качества готовых изделий. Способ включает нагрев в многослойном стапеле с заданной пластической деформацией и равномерными растягивающими напряжениями по каждой ступени детали и равномерное охлаждение за счет подбора площади охлаждения радиаторов по периметру и с учетом разности поверхности охлаждения детали. Равное напряжение по ступеням обеспечивается за счет постоянства отношений площадей поперечных сечений секций стапеля и ступеней детали.
9	В.П. Степанов, А.В. Ушаков, М.В. Шкотова, РФ (СССР), 30.01.93г., Способ термо- механической обработки деталей	РФ (СССР), Патент № 1792436	Улучшение качества детали., Включает нагрев под закалку и охлаждение в штампе, при охлаждении фиксируют в штампе только центральную зону детали, а наружную незафиксированную часть охлаждают со скоростью, обеспечивающей образование мартенсита.
10	В.Б. Дементьев, А.А. Сухих, РФ, 10.03.96г., Способ термо- механической обработки сталей	РФ, Патент № 2055911	Повышение характеристик прочности, ударной вязкости, пластичности и снижение анизотропии упрочнения. Включает нагрев до температуры аустенизации, пластическую деформацию, осуществляемую радиальным обжатием, растяжением и

продолжение таблицы 1

1	2	3	4
			кручением, после деформированную выдержку, охлаждение и отпуск. Пластическую деформацию кручением проводят с суммарной степенью 19-25% при отношении степеней деформации кручением в двух взаимоперпендикулярных направлениях равных 1,9-2,1.
11	Д.В. Хван, А.Д. Хван, А.А. Воропаев, С.В. Пустовалов, А.А. Горячев, РФ, 27.11.2003г., Способ улучшения технологических свойств металлов	РФ, Патент № 2217508	Улучшение технологических свойств металлов. Сущность изобретения: удлиняемую трубчатую заготовку подвергают немонотонному деформированию в цикле нагружения «растяжение - кручение – растяжение...». При этом немонотонность деформирования обеспечивают кручением заготовки после каждого этапа ее растяжения в осевом направлении. Использование изобретения в машиностроении позволит получать изделия высокого качества.
12	О.И. Драчев, Д.А. Расторгуев, Д.Ю. Воронов РФ, Устройство для термосиловой обработки	РФ, Патент № 2232198	Повышение надежности и эффективности термосиловой обработки (ТСО) с достижением следующих технических результатов: упрощение конструкции устройства для ТСО путем использования его внутренних ресурсов; повышение стабильности остаточных напряжений и структуры материала по длине детали за счет управления величиной прикладываемого при ТСО

продолжение таблицы 1

1	2	3	4
			усилия. В устройстве для ТСО осесимметричных нежестких валов, содержащим стапель с неподвижным и подвижным захватами, силовой узел и печь, последний выполнен в виде вертикально размещенных телескопически соединенных между собой труб, полости которых заполнены рабочей средой. Донные части труб выполнены с отверстиями. Внутренние трубы подвижные и снабжены обратными клапанами для открывания отверстий при выдвижении труб вверх. Внешние трубы выполнены неподвижными и снабжены выпускными клапанами для открывания отверстий при обратном движении внутренних труб вниз. Рабочая среда – сыпучий материал.
13	О.И. Драчев, Д.А. Расторгуев, Д.Ю. Воронов, РФ, 20.06.2005г., Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей и устройство для его осуществления	РФ, Патент № 2254383	Повышение стабильности размеров и формы длинномерных осесимметричных мало жестких деталей путем устранения направленности осевых остаточных напряжений и направленной текстуры материала заготовки по ее длине. Это достигается за счет использования силового воздействия на заготовку в процессе полного цикла термообработки, причем цикл обработки разделяются на подциклы, в течении каждого из которых

продолжение таблицы 1

1	2	3	4
			силовое воздействие производят в пределах выбранного участка заготовки путем последовательного деформирования в различных направлениях, причем управление пределом производят путем регулирования температурного воздействия на участок заготовки, а длину участка выбирают с учетом гармоник колебаний детали. Устройство для осуществления способа ТСО осесимметричных деталей содержит стапель с фиксаторами заготовки и нагревательный элемент, каждый из фиксаторов выполнен с отверстием для размещения в нем заготовки и содержит клинья, выполненные с возможностью контакта со штоками, снабженными на своих концах гидроцилиндрами, направляющее кольцо, установленное с возможностью свободного вращения в отверстии фиксатора, пневмосистему, а нагревательный элемент разделен на секции теплоизолирующими кольцами.
14	О.И. Драчев, Д.А. Расторгуев, В.А. Гуляев, Д.Ю. Воронов,	РФ, Патент № 2260628	Усовершенствование конструкции устройства для термосиловой обработки, обеспечивающее повышение качества термосиловой обработки. Стапель выполнен

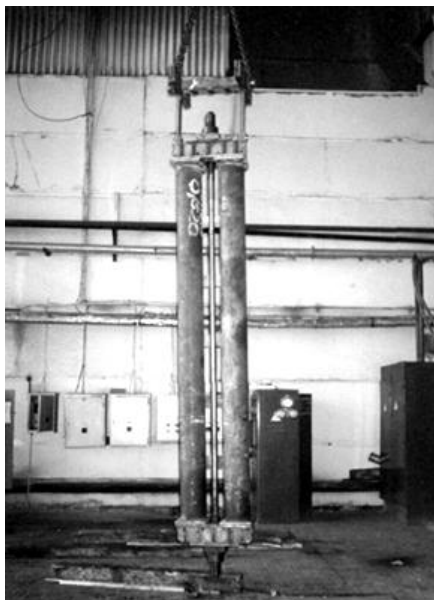
продолжение таблицы 1

1	2	3	4
	РФ, 20.09.2005г., Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей		из двух полых труб. Крышки механизма фиксации имеют коробчатую форму и выполнены с возможностью неразъемного соединения с трубами стапеля с использованием тяги с резьбой на внутренней и наружной поверхности, причем по внутренней резьбе фиксируют заготовку, а по наружной – гайку для силового замыкания.
15	О.И. Драчев, Д.А. Расторгуев, А.О. Драчев, РФ, 10.02.2010г., Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей	РФ, Патент № 2381281	Повышение качества обработки деталей, устройство содержит вертикально установленный стапель, выполненный из материала с коэффициентом линейного расширения большим, чем у детали в виде цилиндрической трубы с фланцами на обоих концах, неразъемно соединенный со стапелем резьбовой механизм фиксации детали с обоих концов в виде двух опорных крышек с отверстиями в центре, в которых установлены цилиндрические тяги с резьбой на внутренней и наружной поверхностях для фиксации по внутренней резьбе детали, а по наружной - гайки для силового замыкания.

Таблица 2 – Оценка преимуществ и недостатков аналогов

№	Показатели положительн. эффекта	Аналоги														
		А.с. № 617484	А.с. № 1018984	А.с. № 1294482	А.с. № 1344455	А.с. № 1407969	А.с. № 1708884	А.с. № 1788978	А.с. № 1786138	Патент № 2055911	Патент № 1792436	Патент № 2232198	Патент № 2217508	Патент № 2260628	Патент № 2254383	Патент № 2381281
		Обеспечивающее достижение цели предполагаемым путем														
1	Повышение стабильности размеров и форм	+1	+1	+2	+4	+1	+3	+2	+2	0	+1	+4	0	+5	+4	+5
2	Повышение качества после обработки путем изменения конструкции установки	+4	+4	+3	+4	+2	0	+5	+5	0	+3	+4	0	+5	+4	+5
3	Повышение качества после обработки путем предотвращения корробления	+5	+3	+2	+3	+5	+5	+3	+2	+3	+4	+3	+1	+5	+4	+5
		Улучшающие, полезные свойства объекта														
1	Долговечность	+2	+3	+3	+4	+3	+3	+3	+2	+4	+5	+4	+4	+4	+4	+5
2	Технологичность	+3	+2	+3	+3	+3	+2	+3	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+5
		Ослабляющие, вредные свойства														
1	Сложность конструкции	-2	-3	-1	0	-2	-3	-3	-2	-1	-2	-1	-1	0	-3	0
Суммарный положительный эффект		13	10	12	18	12	10	13	13	10	15	18	8	23	17	25

Исходя из оценочного анализа аналогов в сфере термомеханической и термосиловой обработки, для дальнейших исследований за основу примем патенты № 2260628, № 2381281.



Патент № 2260628

- нагрев заготовки осуществляется не равномерно;
- позволяет формировать только напряжения растяжения;
- приложение нагрузки осуществляется только в осевом направлении;
- неравномерность охлаждения;
- необходимость значительных усилий при растяжении;
- большие габариты.



Патент № 2381281

- нагрев заготовки осуществляется равномерно;
- позволяет формировать не только напряжения растяжения, но и касательные напряжения;
- осуществляется контроль нагрева в любом сечении;
- температура заготовки остается равномерной в течении всего цикла обработки;
- меньшие габариты.

Таблица 3 – Существенные признаки аналогов

№	Признаки	Патент № 2260628	Патент № 2381281
Обрабатываемые изделия			
1	Осесимметричные длинномерные валы, втулки	+	+
2	Осесимметричные длинномерные ступенчатые валы	—	+
Способы нагружения заготовки при обработке			
1	Растяжение	+	+
2	Кручение	—	—
3	Растяжение, кручение	—	+

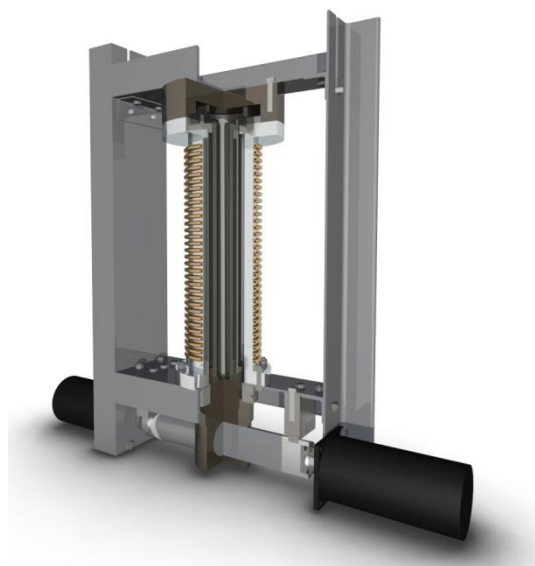
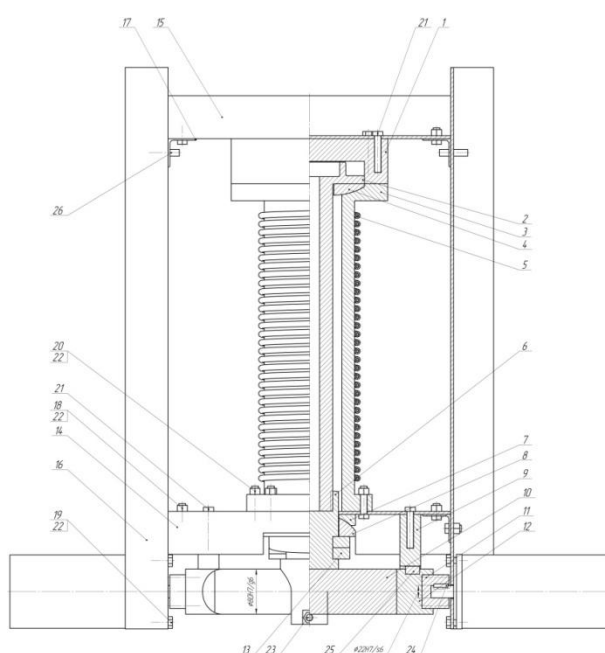


Рисунок 5 – Установка термосиловой обработки с шаговыми двигателями

Драчевым О.И. на кафедре ОТМП создана научная школа в области технологии изготовления деталей малой жесткости. На базе научной школы имеется свыше 30 патентов по данной тематике.

Поданы 2 заявки на изобретение:

№ 2016102936 «Устройство для термосиловой обработки маложестких валов» и № 2016102938 «Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей» (получены уведомление о положительном результате формальной экспертизы, проводятся экспертиза по существу).

1.4 Формулировка цели и задач

Цель работы:

Повышение геометрической точности МЖД за счет снижения остаточных напряжений, деформаций, и повышения однородности деформирования МЖД при термосиловой обработки (ТСО) путем управления волновыми процессами упруго-пластической деформацией.

Задачи:

1. Проведение патентно-литературного обзора технологий, способов и устройств термомеханических и термосиловых видов обработки.
2. Обзор и отработка типовых физико-механических моделей деформируемых сред и возможности их синтеза. Разработка математической модели термосиловой обработки.
3. Обработка результатов экспериментальных исследований по влиянию технологических факторов на стабильность геометрических параметров маложестких деталей.
4. Обзор математических моделей и проведение моделирования на основе принципов волновой механики.

2 ОБЗОР ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СРЕД И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ СИНТЕЗА

2.1 Реологические модели материалов при термосиловой обработке

При расчете коробления заготовок в после операционный период или деталей в эксплуатационный период необходимо описывать процессы, протекающие во времени. Для описания процессов в металле используются различные реологические модели. В простейших моделях отражаются отдельные процессы, протекающие при деформировании упруговязкопластичных материалов. Ниже представлен обзор реологических моделей, описывающих поведение металлов и сплавов.

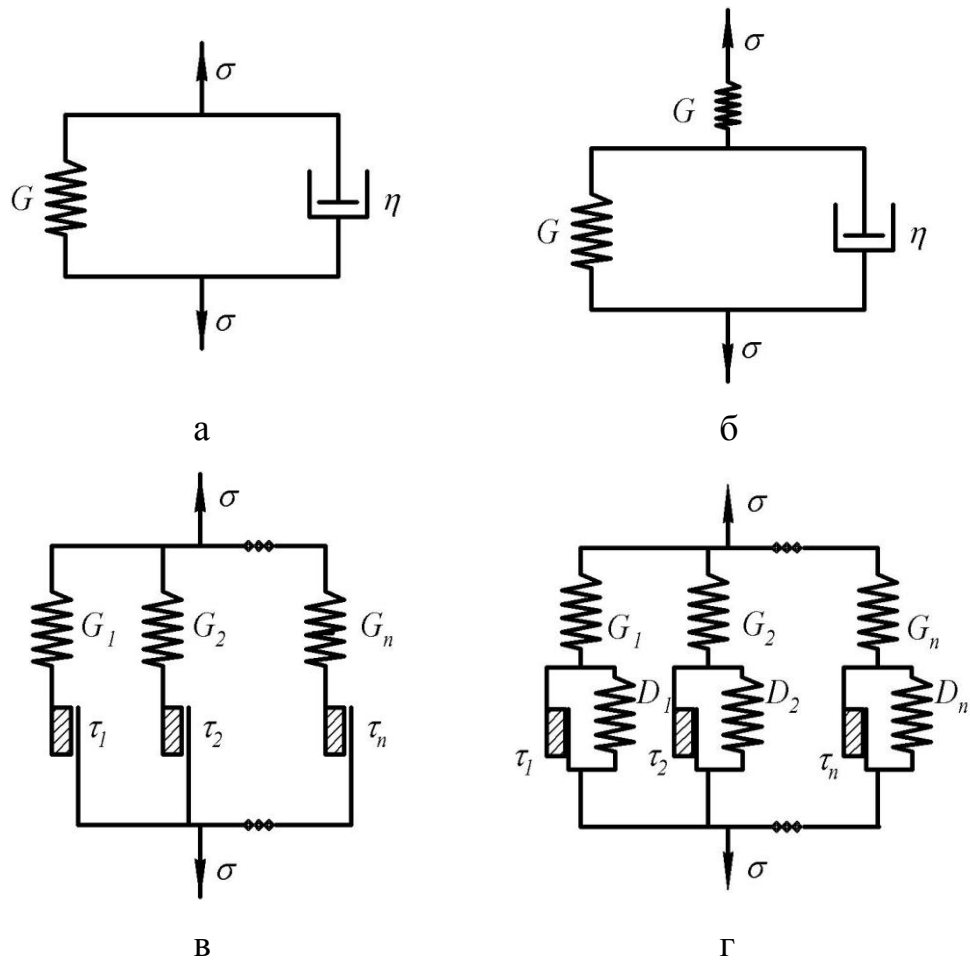
Модели Фойхта и Максвелла это вязкоупругие тела. Для них упругие деформации связаны с действительными напряжениями законом Гука. Для этих моделей полная деформация складывается из упругой и вязкой и описывают они, соответственно, процессы релаксации и ползучести.

Для моделирования деформирования длинномерных деталей используется набор блоков – ячеек, каждый из которых задает преобразование деформация – напряжение на определенном участке изделия [20, 21]. Модель Кельвина – это вязкоупругая модель, состоящая из большого числа блоков, параметры которых имеют статистический характер – обобщенную вероятностную модель Кельвина. Совокупность элементарных моделей описывает среду, обладающую дискретным спектром времен релаксации. Считая, что полная деформация по всему объему одинакова и равна сумме вязкой и упругой деформаций, можно записать:

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^N (\varepsilon_i^V(t) + \varepsilon_i^B(t)), \quad (1)$$

где N – общее число блоков, которое определяется узлами колебаний до 6 гармоники включительно и расположением зон пучностей; $\varepsilon_i^V(t)$ и

$\varepsilon_i^B(t)$ – девиаторы тензоров вязкой деформации и упругой для i -го блока среды Кельвина.



а – Фойхта-Максвелла; б – Кельвина;

в – Ишлинского; г – Ишлинского с упрочнением

Рисунок 6 – Реологические модели

Система реологических уравнений для дискретной среды Кельвина в относительных координатах и изображениях имеет вид:

$$\sigma_i^* = \varepsilon_i^Y, \sigma_i^* = (\lambda_i \cdot S + q) \cdot \varepsilon_i^B, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_i^Y + \varepsilon_i^B, \sigma = \sum_{i=1}^N 2 \cdot G_i \cdot \varepsilon_i^Y \quad (3)$$

где $\sigma_i^* = \frac{\sigma_i}{E_{Yi}}$ – безразмерное напряжение; $\lambda_i = \frac{\eta}{E_Y}$ – время релаксации,

с; $q = \frac{E_C}{E_Y}$ – безразмерный параметр упрочнения; E_C – модуль упрочнения

материала; E_y – модуль упругости; G – модуль сдвига; S – оператор Лапласа; $\varepsilon_i^y, \varepsilon_i^B$ – упругая и вязкая составляющие деформации.

Математическая модель имеет вид:

$$E_y \cdot \varepsilon_1 + \beta \cdot \dot{\varepsilon}_1 = \left(1 + \frac{E_C}{E_y}\right) \cdot \sigma_1 + \beta \cdot \dot{\sigma}_1, \quad (4)$$

где E_C – модуль упрочнения; ε_1 – деформация; β – коэффициент вязкости; $\dot{\varepsilon}_1$ – скорость деформации; E_y – модуль упругости, зависящий от температуры; σ_1 – остаточные напряжения.

Передаточная функция модели Кельвина:

$$W(S) = \frac{E_y (\lambda \cdot S + 1)}{\lambda \cdot S + 1 + q} \quad (5)$$

2.2 Разработка математической модели термосиловой обработки

За основу создания математической модели, было взято реологическое уравнение Ишлинского:

$$\sigma(t) = 2 \cdot G \cdot \left[\varepsilon(t) - \int_0^t \varepsilon_\tau f(\tau) d\tau \right] \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon}_\tau = 0, \quad \sqrt{2(\varepsilon - \varepsilon_\tau) \cdot (\varepsilon - \varepsilon_\tau)} < \tau$$

$$\dot{\varepsilon}_\tau \neq 0, \quad \frac{\tau}{V_\tau} \dot{\varepsilon}_\tau = \varepsilon - \varepsilon_\tau, \quad \text{где } V_\tau = \sqrt{2\dot{\varepsilon}_\tau \cdot \dot{\varepsilon}_\tau} - \text{интенсивность скоростей}$$

пластической деформации.

$$V_\tau = \sqrt{2\dot{\varepsilon}_\tau \cdot \dot{\varepsilon}_\tau} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\dot{\varepsilon}_{\tau 1} - \dot{\varepsilon}_{\tau 2})^2 + (\dot{\varepsilon}_{\tau 2} - \dot{\varepsilon}_{\tau 3})^2 + (\dot{\varepsilon}_{\tau 3} - \dot{\varepsilon}_{\tau 1})^2} = \frac{2}{3}(1 + \nu)^2 \cdot \dot{\varepsilon}_{\tau 1},$$

где $\dot{\varepsilon}_{\tau 1}, \dot{\varepsilon}_{\tau 2}, \dot{\varepsilon}_{\tau 3}$ – скорость пластических деформаций по главным направлениям.

Для простого растяжения-сжатия:

$$\dot{\varepsilon}_{\tau 2} = \dot{\varepsilon}_{\tau 3} = -\nu \cdot \dot{\varepsilon}_{\tau 1} \quad (7)$$

где τ – безразмерный предел текучести; ν – коэффициент Пуассона.

$$\tau = \frac{\sigma_T}{E_Y} = \frac{\tau_{Ti}}{2G_i} \quad (8)$$

$\sqrt{2(\varepsilon - \varepsilon_\tau) \cdot (\varepsilon - \varepsilon_\tau)}$ – интенсивность упругой деформации, где:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_2)^2} = \frac{\sqrt{6}}{3} (1 + \nu)^2 \cdot \varepsilon_1,$$

$$\sigma_u = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2} = \frac{\sqrt{6}}{3} (1 + \nu)^2 \cdot \sigma_1,$$

$f(t)$ – плотность вероятностных распределений безразмерных пределов текучести, которая определяется из опытов на растяжение.

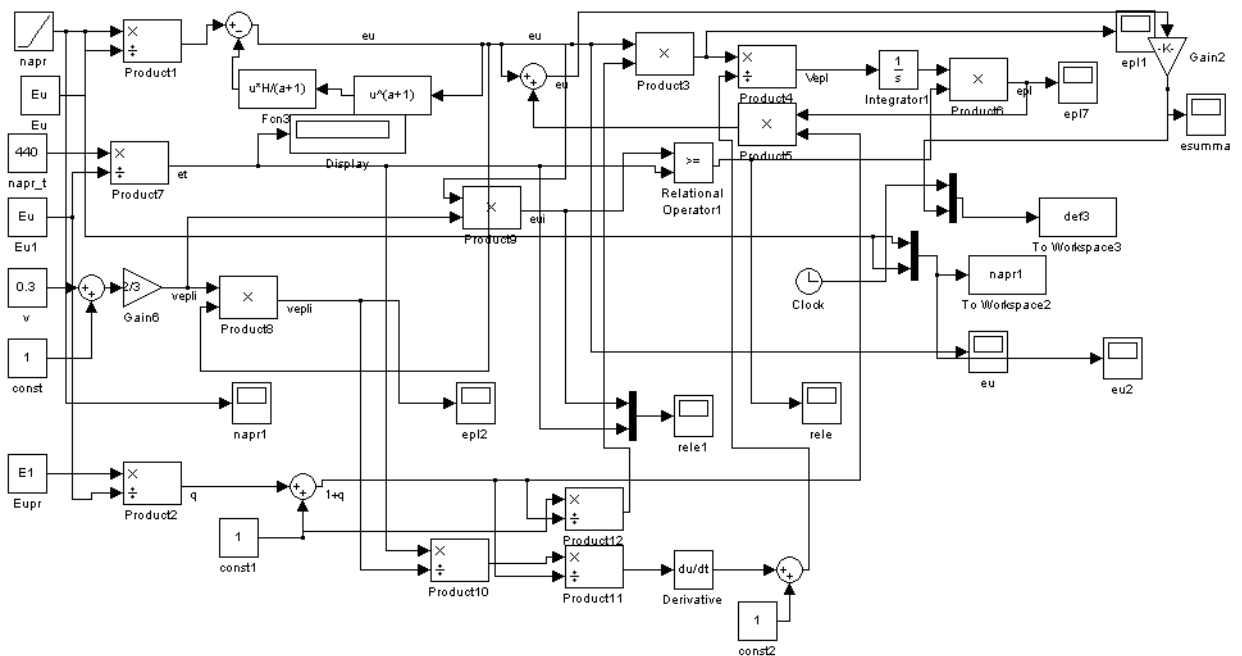


Рисунок 7 – Структурная схема моделирования процесса термосиловой обработки

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗМЕРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И ТОЧНОСТИ МАЛОЖЕСТКИХ ВАЛОВ

3.1 Экспериментальное исследование влияния термосиловой обработки при отпуске на стабильность формы маложестких валов и геометрическую точность

Разработаны новые методы термообработки длинномерных валов, сущность которых заключается в приложении управляемых осевых нагрузок при термообработке. Этот технологический приём назван термосиловой обработкой. В данном разделе приводятся результаты некоторых экспериментальных исследований [22, 23].

Анализ теоретических и экспериментальных исследований по изготовлению длинномерных валов, проведённый в диссертации, показал, что заготовки, имеющие начальные прогибы более 5 мм/м, не могут быть использованы при эксплуатации валов высокой точности – менее 20 мкм/м без применения дополнительных термостабилизирующих операций.

Новая технология изготовления осесимметричных длинномерных деталей включает в себя изготовление изделий, материал которых склонен к упрочнению (например, нержавеющие аустенитные стали типа 12X18H10T). Аустенитно-мартенситное превращение сопровождается увеличением объёма материала, что может привести к созданию внутренних напряжений, к короблению деталей [24, 25].

Во избежание этого, необходимо для решения задачи пластического деформирования аустенита ограничиться малыми степенями деформации ($\varepsilon < 10\%$).

То, что предшествующая пластическая деформация может существенно изменить поведение металла в условиях последующего нагружения, было исследовано ещё Больцманом. Теория упругого последействия в твёрдых телах, предложенная им, получила дальнейшее

развитие в работах Вольтера, который назвал её наследственной теорией, следует отметить, что температурный диапазон достаточно узок, в котором справедлива линейная теория для реальных материалов. Сравнительный анализ результатов, полученных различными исследователями, затруднён, так как в различных работах применялись различные температуры, скорости и схемы деформирования. На результат испытаний оказывают сложное влияние, по крайней мере, факторов семь: режим заключительного отпуска, скорость охлаждения до комнатной температуры, степень деформации, температура деформирования, продолжительность выдержки при температуре деформации, скорость нагрева до температуры деформирования.

Несмотря на некоторые противоречия результатов, полученных различными исследователями, их анализ позволяет произвести выбор диапазона режимов термосиловой обработки.

С целью подтверждения теоретических исследований и новых способов термосиловой обработки были проведены лабораторные исследования.

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с ГОСТ 1497-94 «Металлы. Методы испытания на растяжение». Была поставлена задача экспериментальным путём разработать оптимальные методы термосиловой обработки (ТСО) в функции внешнего силового воздействия и температуры нагрева. Работа проводилась на разрывной машине фирмы AMSLER (Швейцария) с максимальной статической нагрузкой 5 т. Образцы были изготовлены из нержавеющей стали аустенитного класса 12X18H10T. Изготовление образцов осуществлялось по двум следующим технологиям.

1 технология

1. Черновая обточка.
2. Нарезание резьбы плашкой. Крепление детали за средний диаметр вплотную к концу.

3. Шлифование в размер диаметром 10 абразивным кругом 24А 500х50х23.

$$n_{кр} = 2500 \text{ об/мин.}$$

2 технология

1. Точение специальным резцом из стали Р18 в размер.

2. Нарезание резьбы резцом. Крепление образца за средний диаметр вплотную к концу.

3. Полирование на токарном станке шлифовальной шкуркой.

Для выполнения поставленной задачи проведены эксперименты по прилагаемой ниже методике.

Программа-методика

эксперимента для стали 12Х18Н10Т

1. Заготовка в поставке.

2. Образцы по ГОСТ 1497-84. Длина исследуемой части 100 мм, общая длина 170 мм. Диаметр 10 мм.

3. Нанести метки 18 шт. с шагом 5 мм. $\pm 0,01$.

4. Маркировать с торца № 000-016.

5. Провести контроль геометрических параметров заготовки до эксперимента и после через 220 часов и 2120 часов. Занести данные в таблицу 4 (точность измерения 0,001 мм).

6. Образец установить в печь и закрепить в зажимах разрывной машины.

7. Нагреть образец до $T = 200^\circ\text{C}$, замерить скорость нагрева и зафиксировать в стапеле. Дать температурную выдержку 30 мин., и охлаждать до $T = 20^\circ\text{C}$. Относительное удлинение при этом составит:

$$\varepsilon_{200} = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\% = 0,246\%$$

$$\Delta l = \alpha \cdot T^\circ \cdot l = 12,3 \cdot 10^{-6} \cdot 200^\circ \cdot 95\text{мм} = 0,234.$$

8. Нагревать образец до $T = 300^{\circ}\text{C}$, измерить скорость нагрева и зафиксировать в стапеле. Дать температурную выдержку 30 мин., и охладить до $T = 20^{\circ}\text{C}$ вместе с печкой

$$\varepsilon_{300} = 0,3693\%$$

9. Нагреть образец до $T = 300^{\circ}\text{C}$, измерить нагрев и нагрузить осевой силой до относительной деформации $\varepsilon_1 = 0,8\%$ с минимальной скоростью деформации (по паспорту установки) зафиксировать в стапеле и выдержать 30 мин., и охлаждать до $T = 20^{\circ}\text{C}$ вместе с печкой.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{300} + \varepsilon_{\text{def}} = 0,369 + 0,431 = 0,8.$$

10. Повторить п. 9 для $\varepsilon_1 = 1\%, 1,5\%, 2\%$.

11. Повторить п. 10 с максимальной скоростью деформирования (по паспорту установки).

12. Проведя испытания по пп. 9 и 11, записать в самописец диаграмму «Сила-удлинение».

13. Провести микроанализ с образцов ($\varepsilon = 0,2\%, 1\%, 2\%, 4\%, 6\%$).

Шлифы взять с одного конца и середины образца (т.е. 6 шлифов).

14. Выставлять $\varepsilon\%$ на станке с помощью винтов запрещается, только жёсткая фиксация.

15. Провести контроль осевых, остаточных напряжений (травлением или виброобработкой).

В процессе проведения эксперимента были выполнены различные измерения. Эти измерения занесены в карты измерений, составленные для каждого образца 003-016. Общие результаты измерений представлены в таблице 4.

По результатам экспериментов ставилась задача определить, во-первых, соответствие заданной деформации образца фактической. На рисунке 8 графически представлена зависимость $\varepsilon_{\text{факт}}$ при изменении $\varepsilon_{\text{заданное}}$

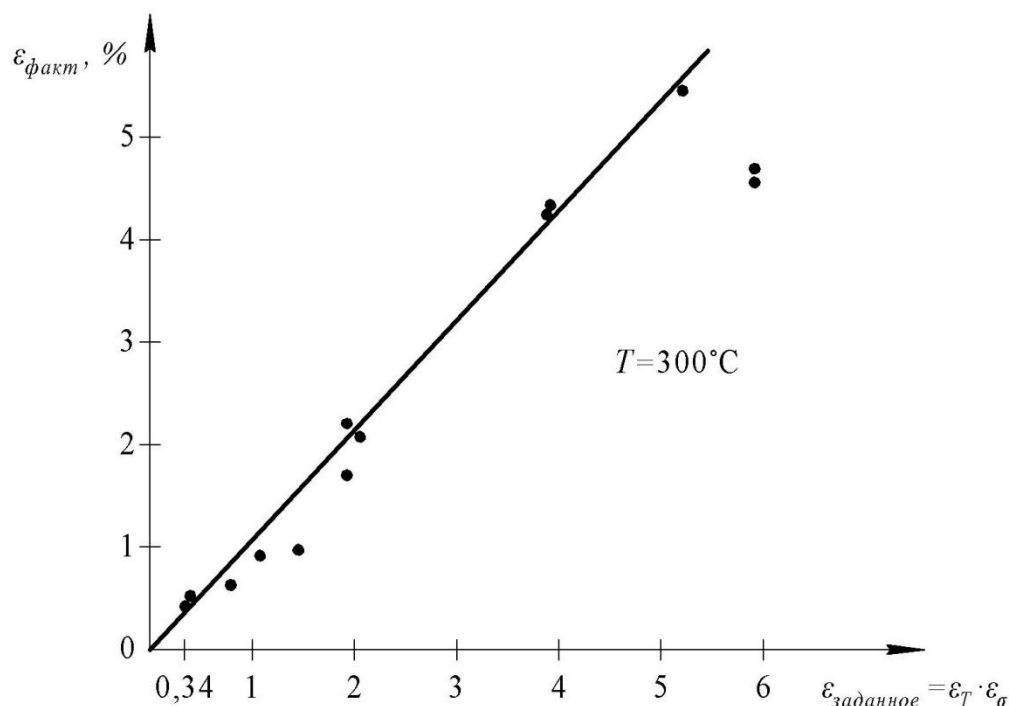


Рисунок 8 – График изменений фактических относительных деформаций от заданных

По графику видно, что мы в результате эксперимента получили ту деформацию образца, которую планировали получить. Это соответствие особенно точное при малых деформациях – до 4 %. Таким образом, жёсткость кинематической схемы машины для растяжения позволяет проводить планируемые нами эксперименты. Основной задачей было рассмотреть вопрос о равномерности растяжения, измерением расстояний между рисками, нанесёнными по длине и измерением диаметра образца в различных сечениях до и после эксперимента. На рисунках 9-20 представлены диаграммы распределения относительной деформации

$$\varepsilon = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%.$$

Таблица 4 – Результаты эксперимента

№ образца	Технология изготовления образца	Температура нагрева, °С	Деформация			Скорость нагружения, мм/с	Показания динамометра			$\varepsilon_{\text{ср}}$	$l = \varepsilon_{\text{max}} / \varepsilon_{\text{ср}}$	$l_{\text{max}} = \varepsilon_{\text{max}} / \varepsilon_{\text{min}}$
			температурная $\varepsilon_{\text{т}}$, мм	от нагрузки $\varepsilon_{\text{с}}$, мм	общая ε , %		после нагружения, Н	после выдержки 30 мин., Н	после охлаждения до 20°С, Н			
001	№ 1	200	0,234	0	0,25	0,053						
002	№ 1	200	0,234	0	0,25	0,053						
003	№ 1	300	0,351	0	0,34	0,053			18000	0,50	2,20	55
004	№ 1	300	0,351	0	0,34	0,053			17600	0,41	2,0	5,13
005	№ 1	300	0,351	0,76	1,1	0,053	9750	5750	18000	0,94	1,33	2,12
006	№ 1	300	0,351	0,41	0,8	0,053	6750	4750	17750	0,79	1,52	2,12
007	№ 1	300	0,351	0,41	0,8	0,053	6250	4750	21500	0,60	3,77	28,25
008	№ 1	300	0,351	1,08	1,5	0,053	14500	12000	21000	1,51	1,93	2,98
009	№ 1	300	0,351	1,08	1,5	0,053	18500	17000	27000	0,99	3,89	16,71
010	№ 1	390	0,351	1,55	2	0,053	16000	13000	21500	2,23	1,94	11,53
011	№ 1	300	0,351	1,69	2,15	0,00457	17000	14000	23500	2,12	2,46	74,57
012	№ 2	300	0,351	1,55	2	0,00457	18000	15000	24000	1,63	1,32	2,15
013	№ 2	300	0,351	3,45	4	0,00457	23500	17000	29500	4,17	1,54	2,45
014	№ 2	300	0,351	3,45	4	0,00457	23500	17000	29000	4,09	1,22	2,11
015	№ 2	300	0,351	5,35	6	0,00457	24000	17000	30000	4,43	1,40	3,39
016	№ 2	300	0,351	5,35	6	0,00457	25000	23000	31000	4,28	1,54	4,25

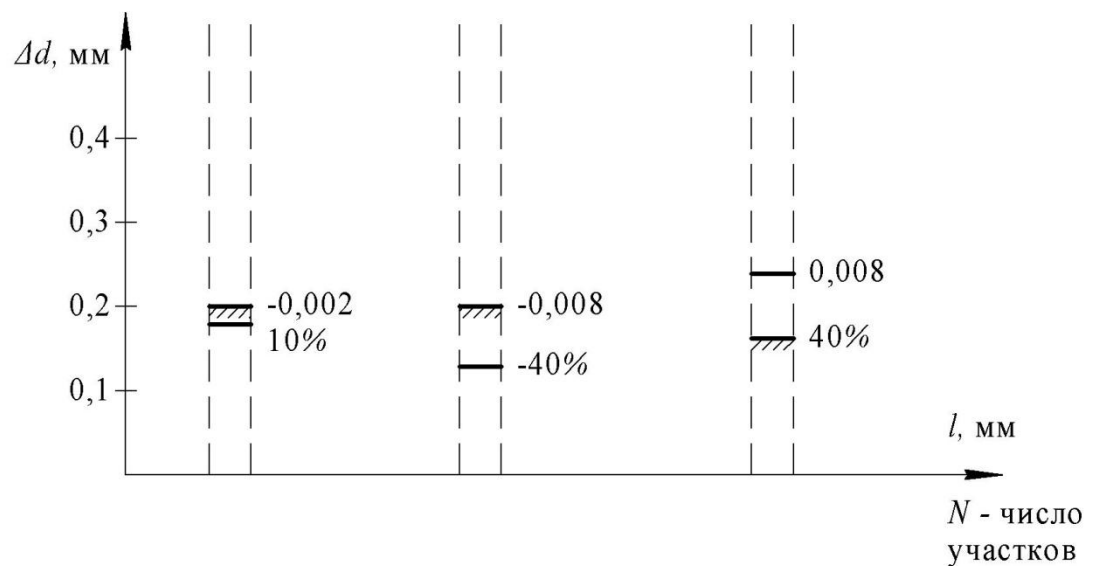
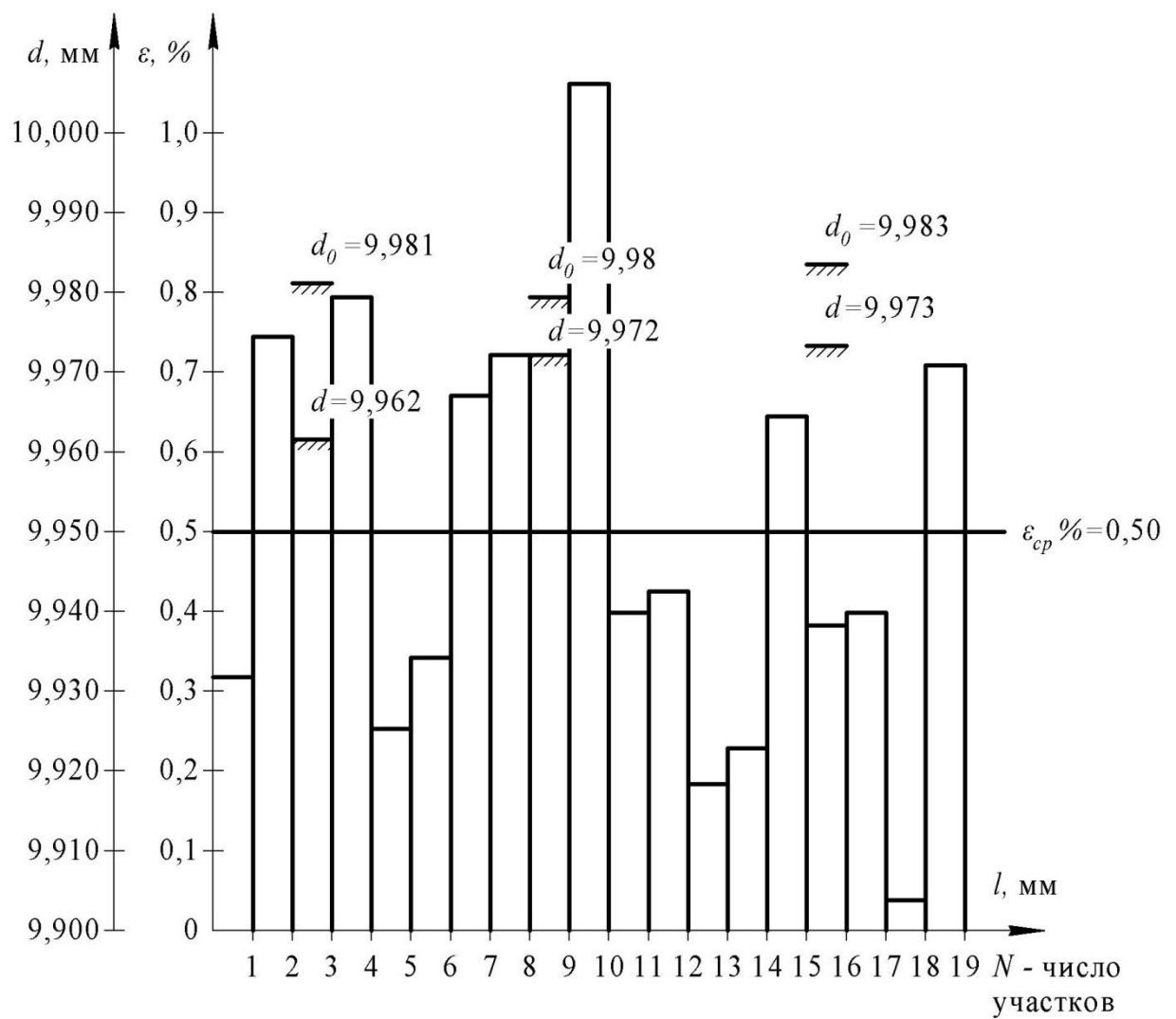


Рисунок 9 – Распределение относительной деформации по длине, средние диаметры и биения образцов на участках № 3, 9, 16 до и после эксперимента (образец 003)

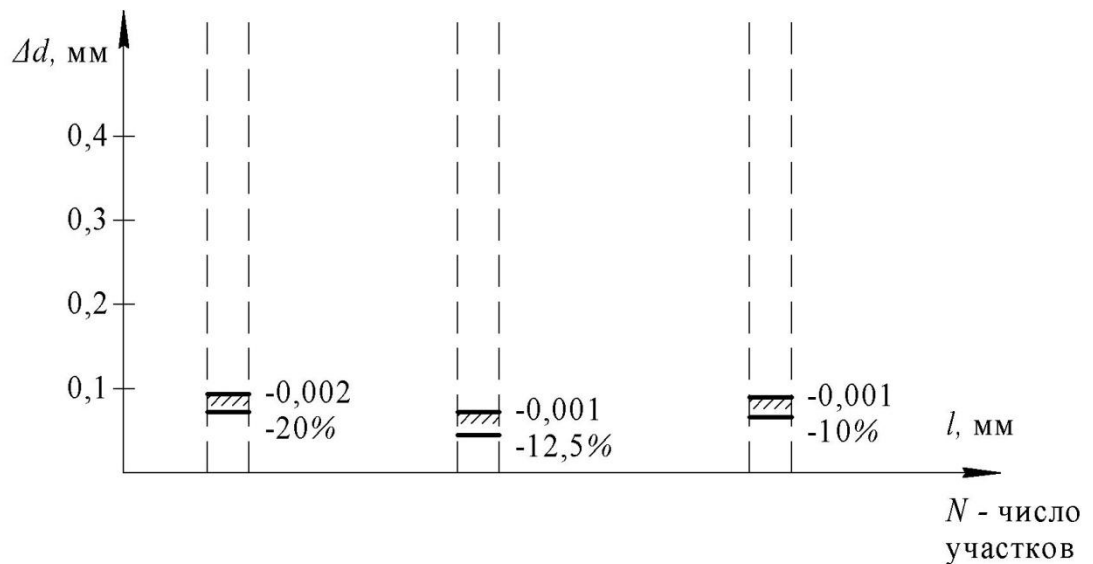
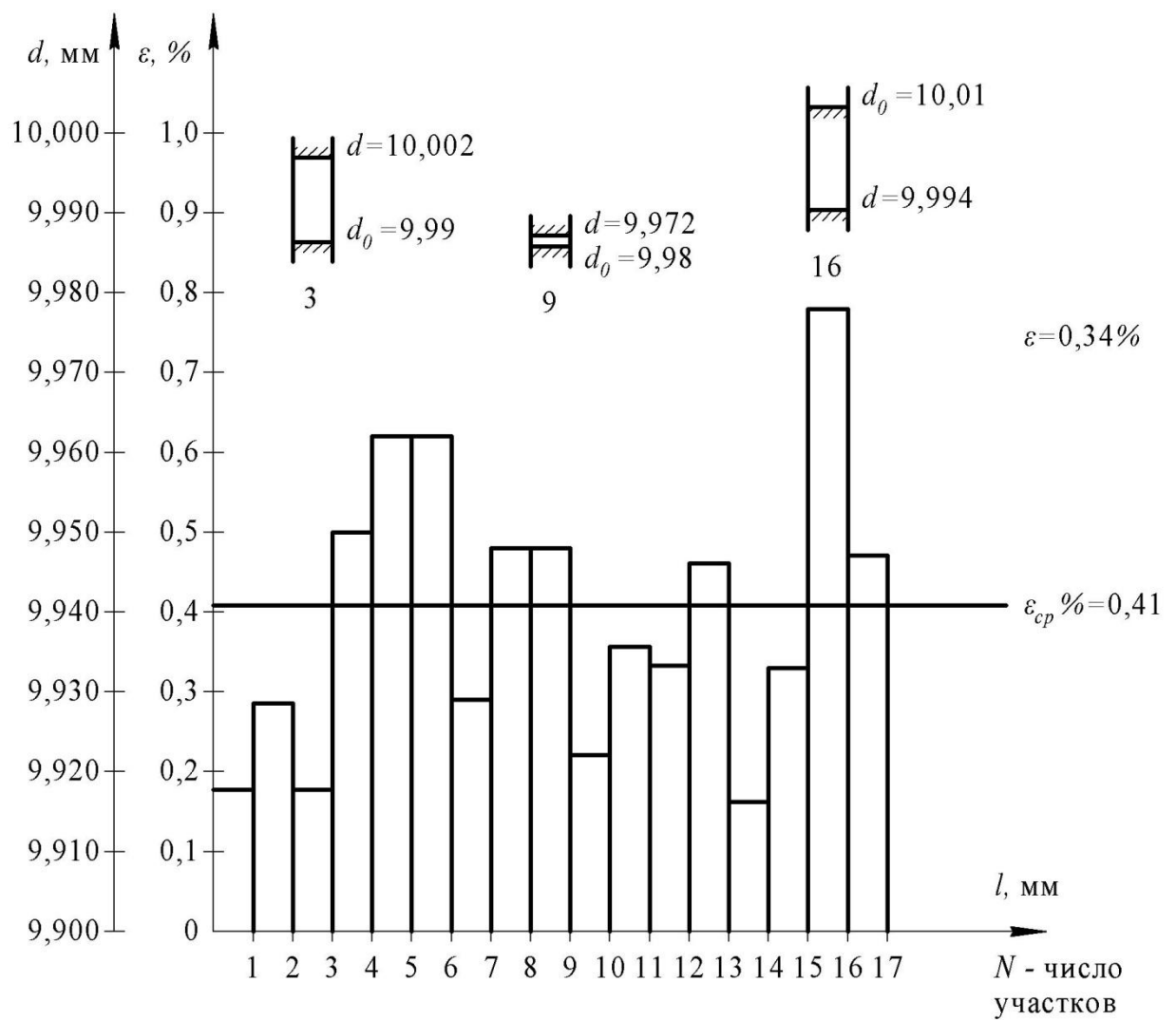


Рисунок 10 – Распределение относительной деформации по длине, средние диаметры и биения образцов на участках № 3, 9, 16 до и после эксперимента (образец 004)

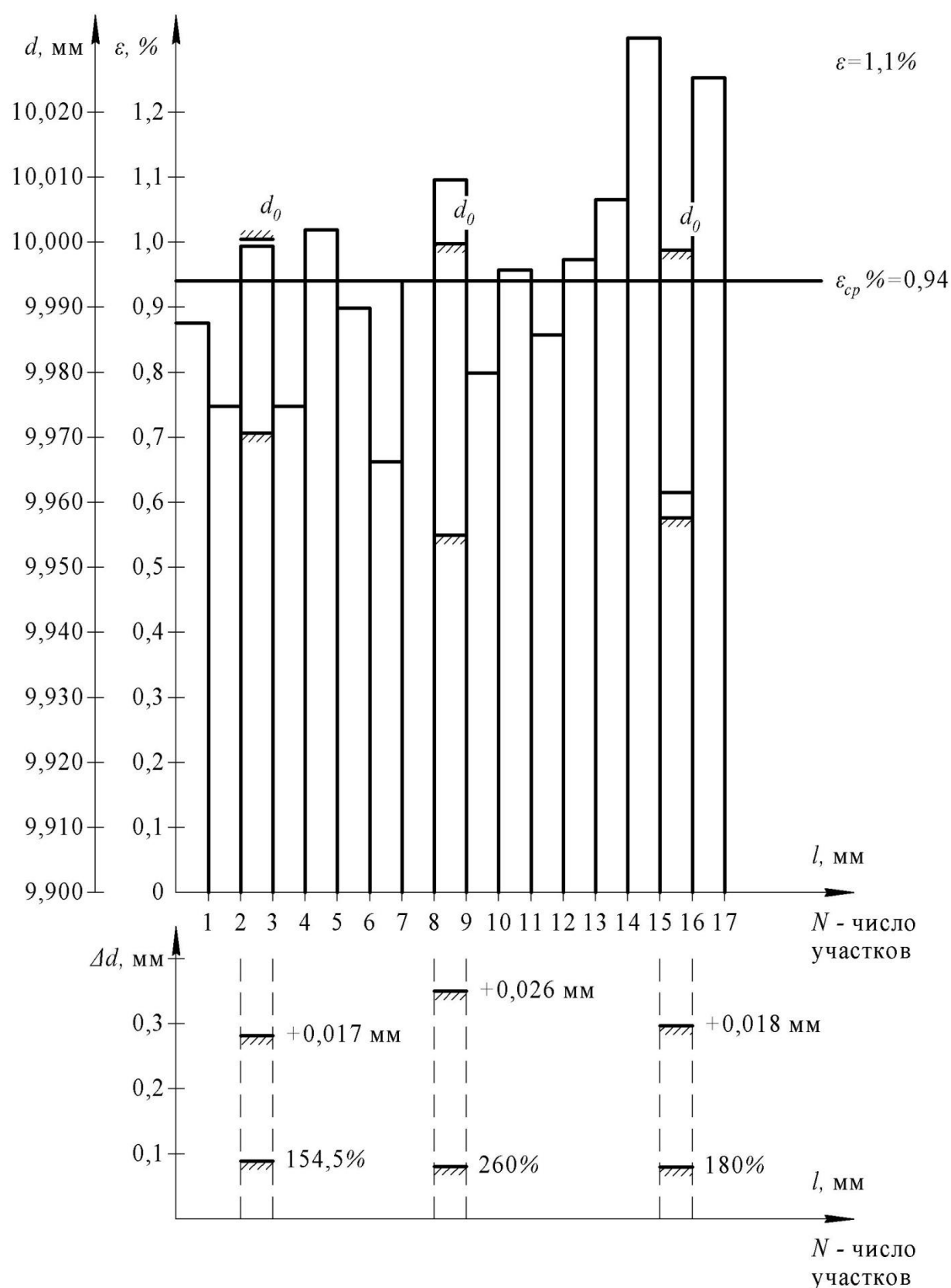


Рисунок 11 – Распределение относительной деформации по длине, средние диаметры и биения образцов на участках № 3, 9, 16 до и после эксперимента (образец 005)

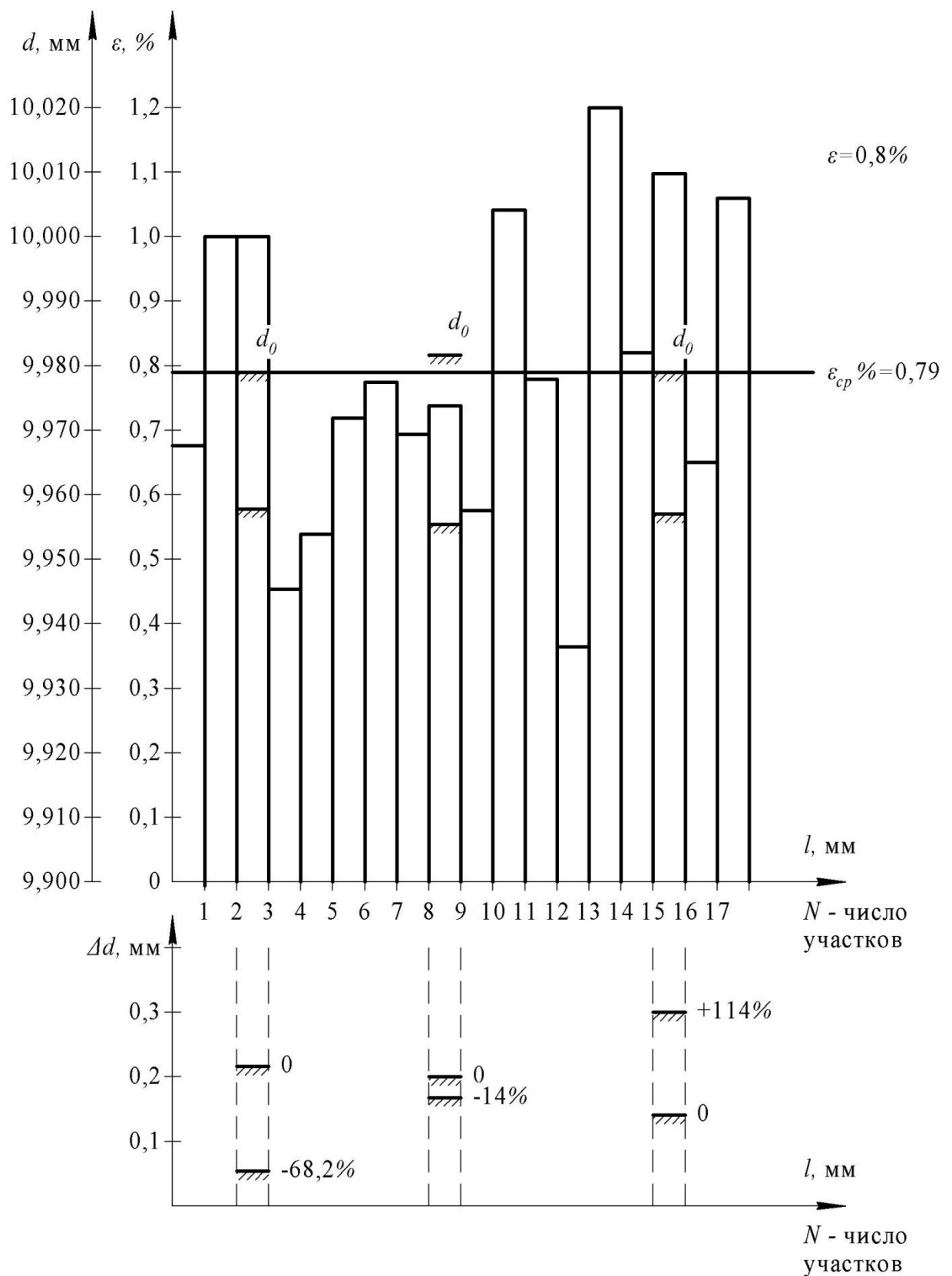


Рисунок 12 – Распределение относительной деформации по длине, средние диаметры и биения образцов на участках № 3, 9, 16 до и после эксперимента (образец 006)

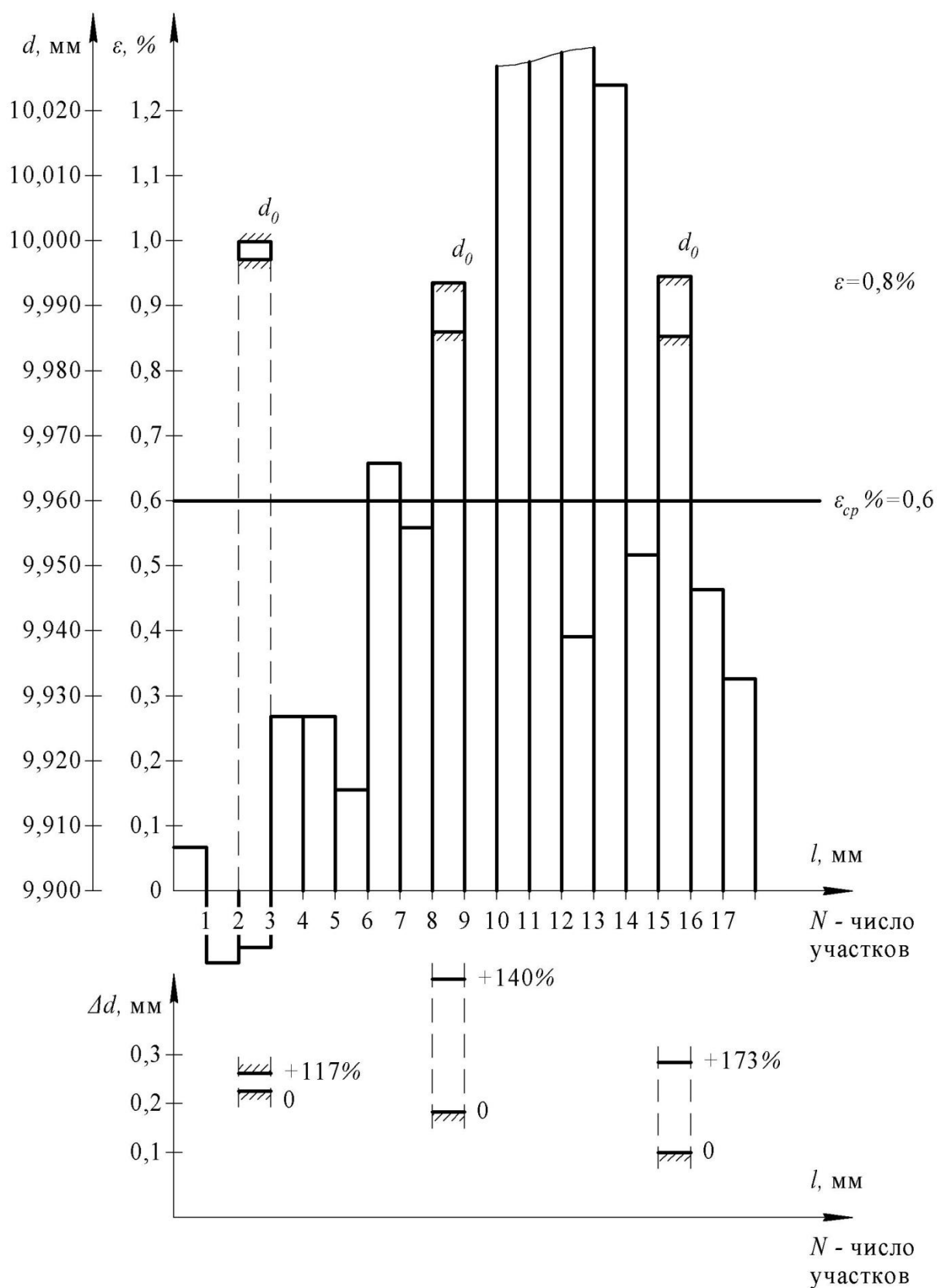


Рисунок 13 – Распределение относительной деформации по длине, средние диаметры и биения образцов на участках № 3, 9, 16 до и после эксперимента (образец 007)

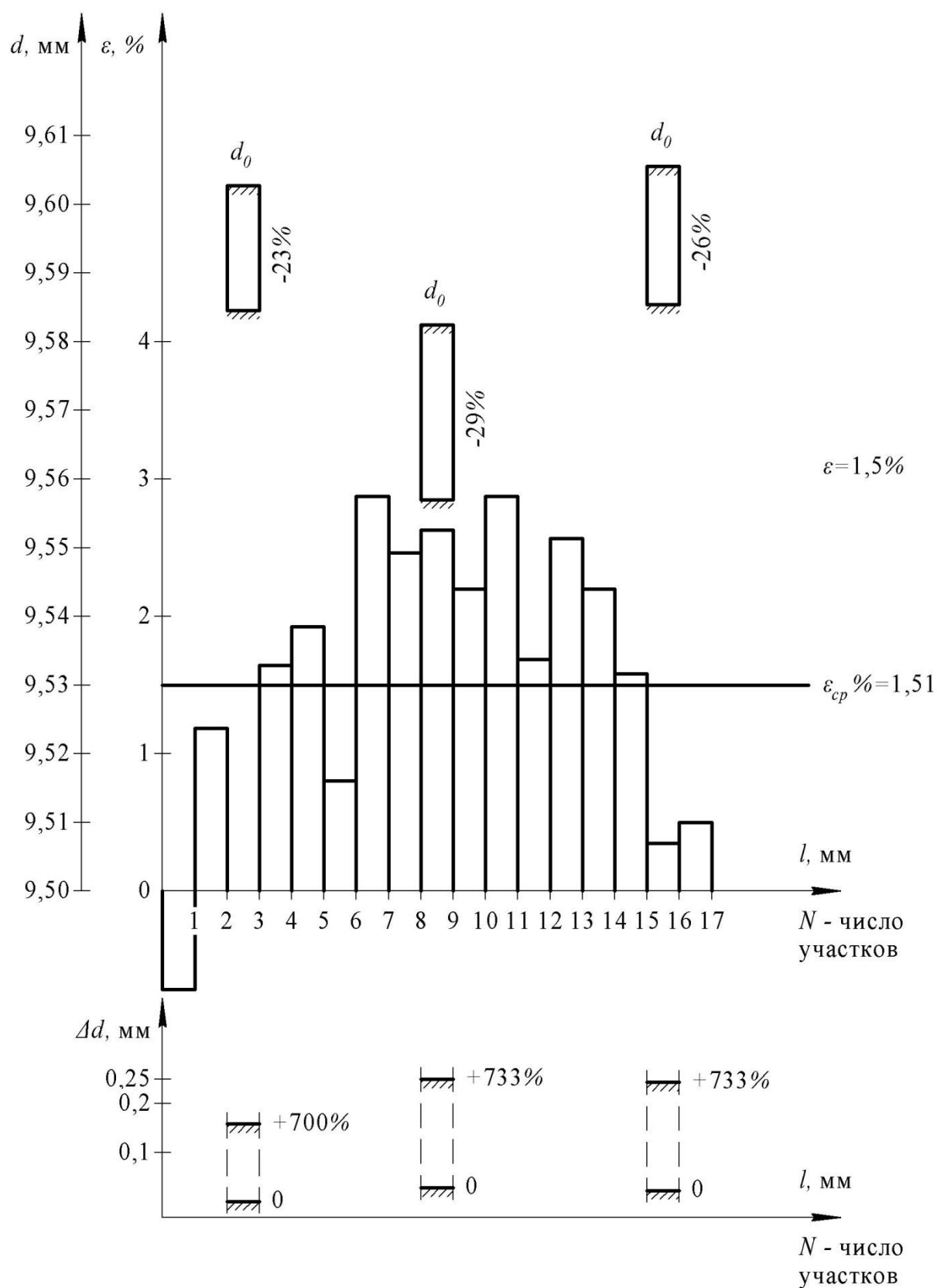


Рисунок 14 – Распределение относительной деформации по длине, средние диаметры и биения образцов на участках № 3, 9, 16 до и после эксперимента (образец 008)

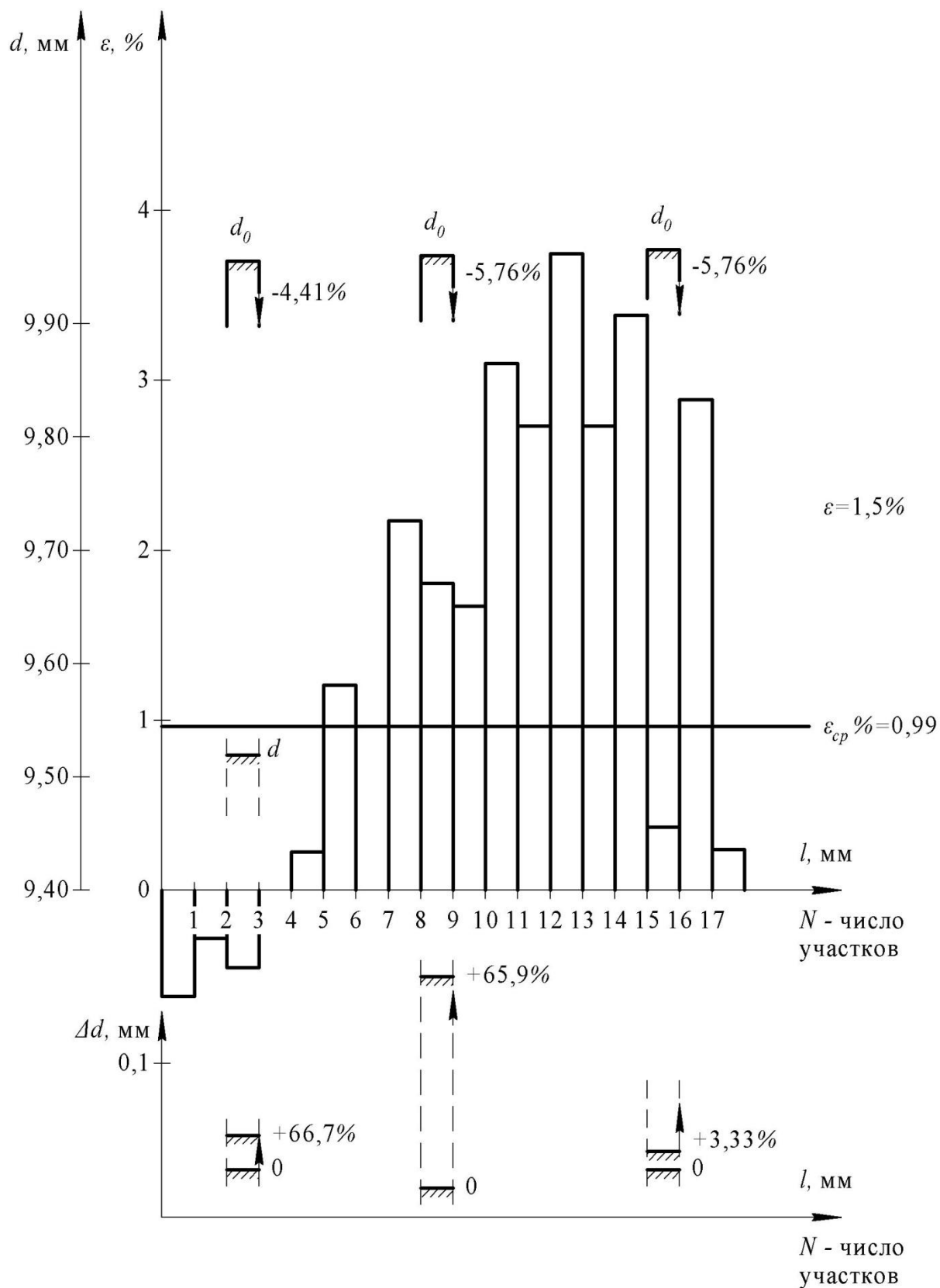


Рисунок 15 – Распределение относительной деформации по длине, средние диаметры и биения образцов на участках № 3, 9, 16 до и после эксперимента (образец 009)

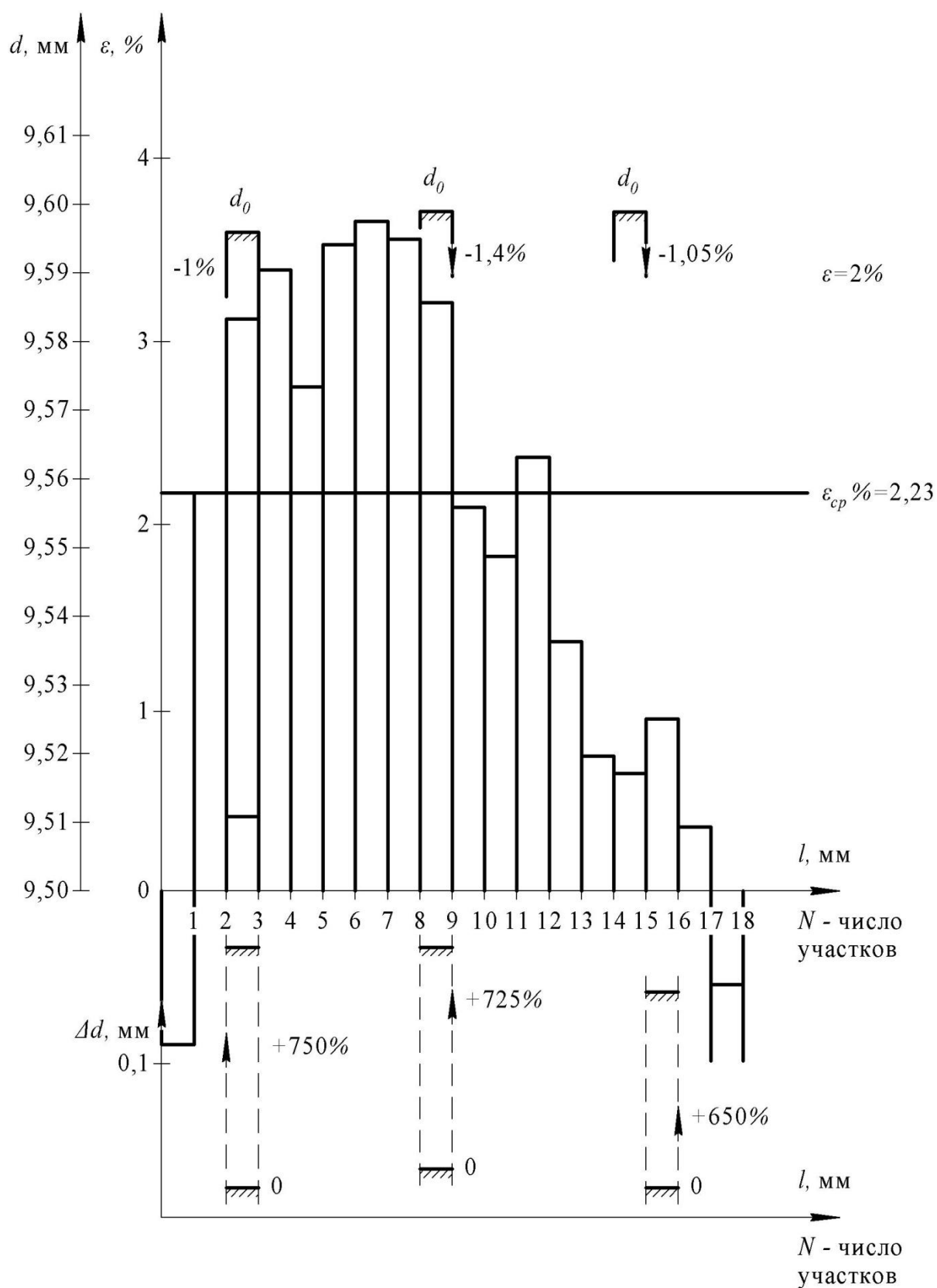


Рисунок 16 – Распределение относительной деформации по длине, средние диаметры и биения образцов на участках № 3, 9, 16 до и после эксперимента (образец 010)

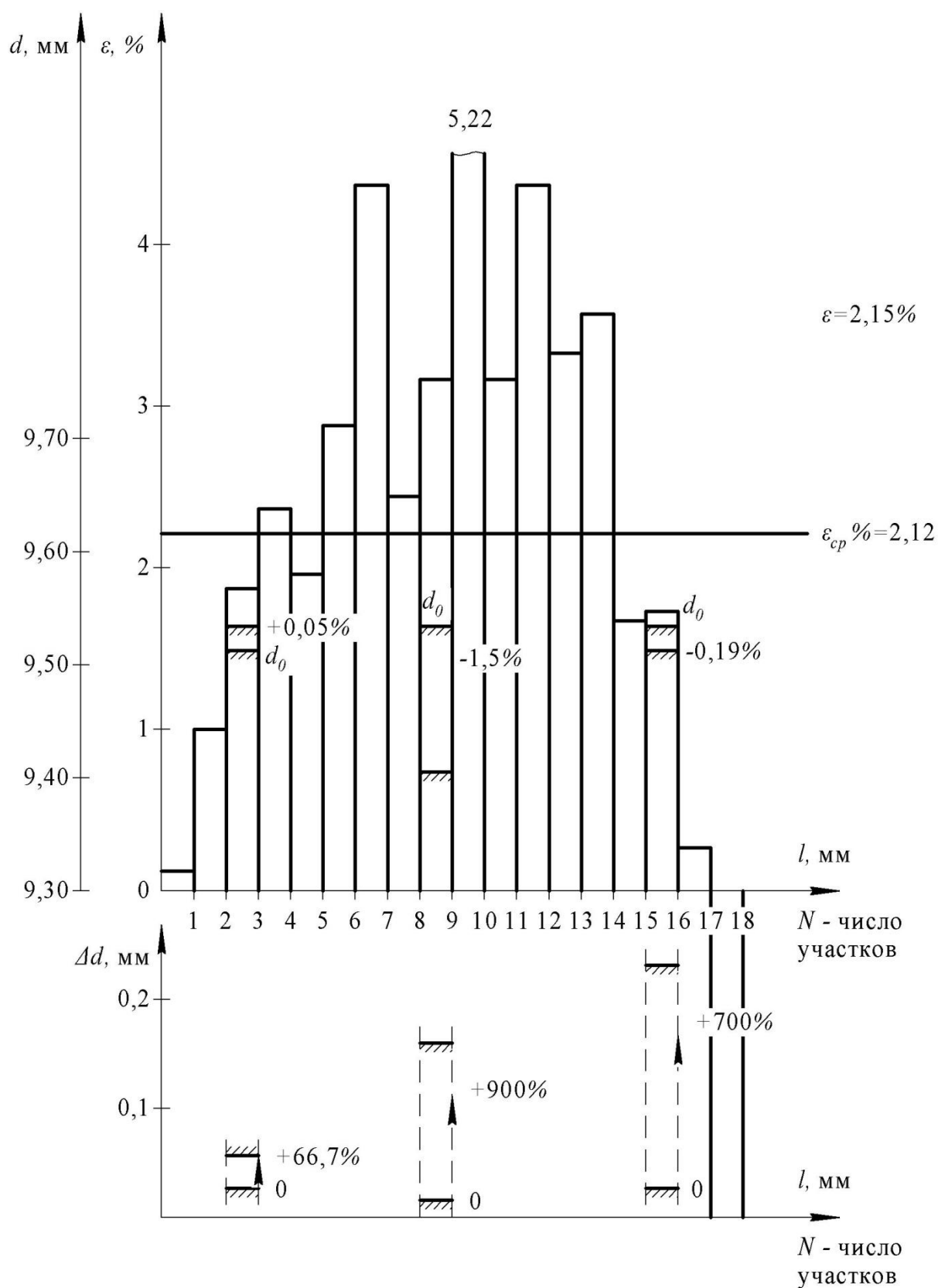


Рисунок 17 – Распределение относительной деформации по длине, средние диаметры и биения образцов на участках № 3, 9, 16 до и после эксперимента (образец 011)

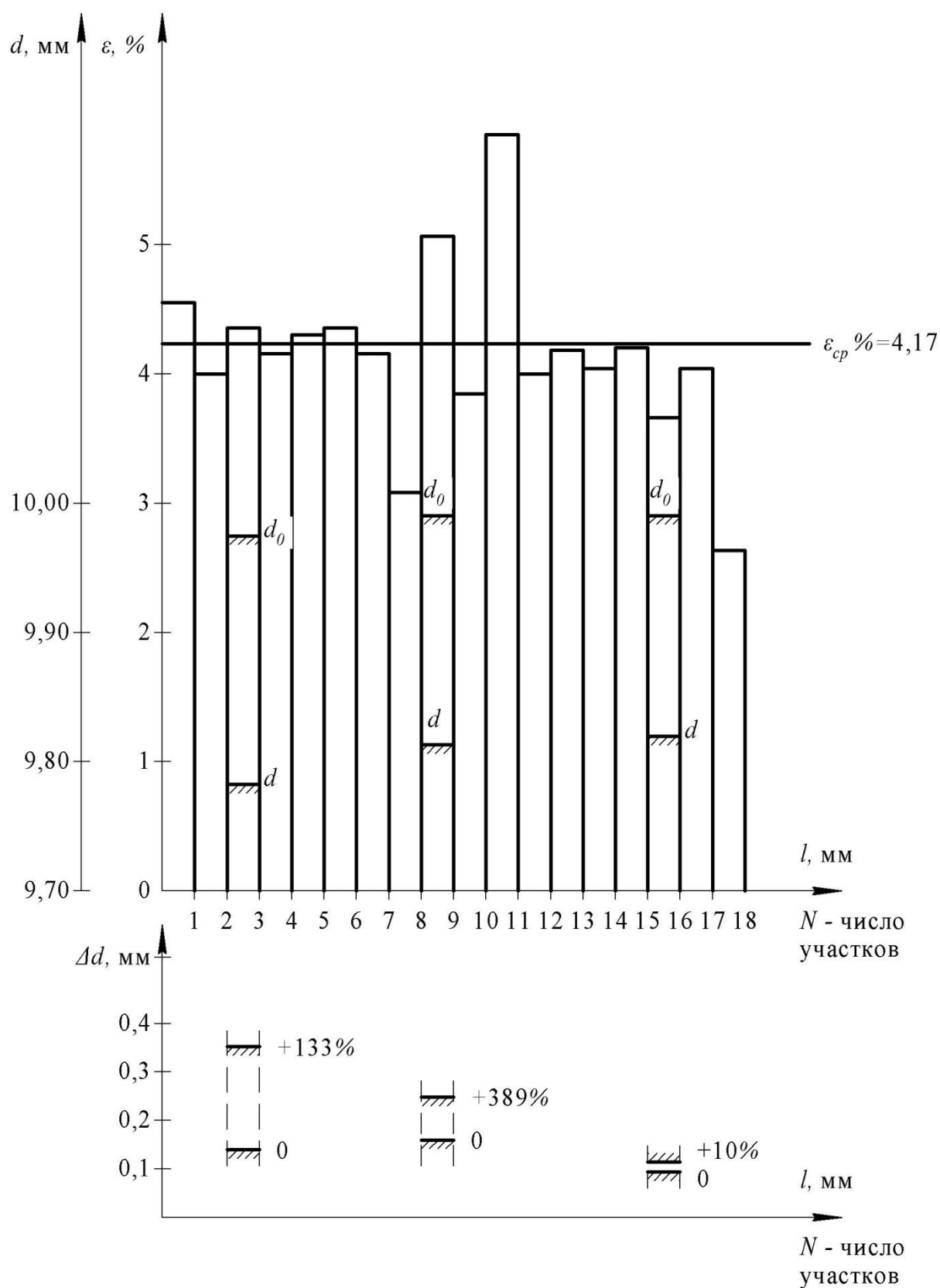


Рисунок 18 – Распределение относительной деформации по длине, средние диаметры и биения образцов на участках № 3, 9, 16 до и после эксперимента (образец 012)

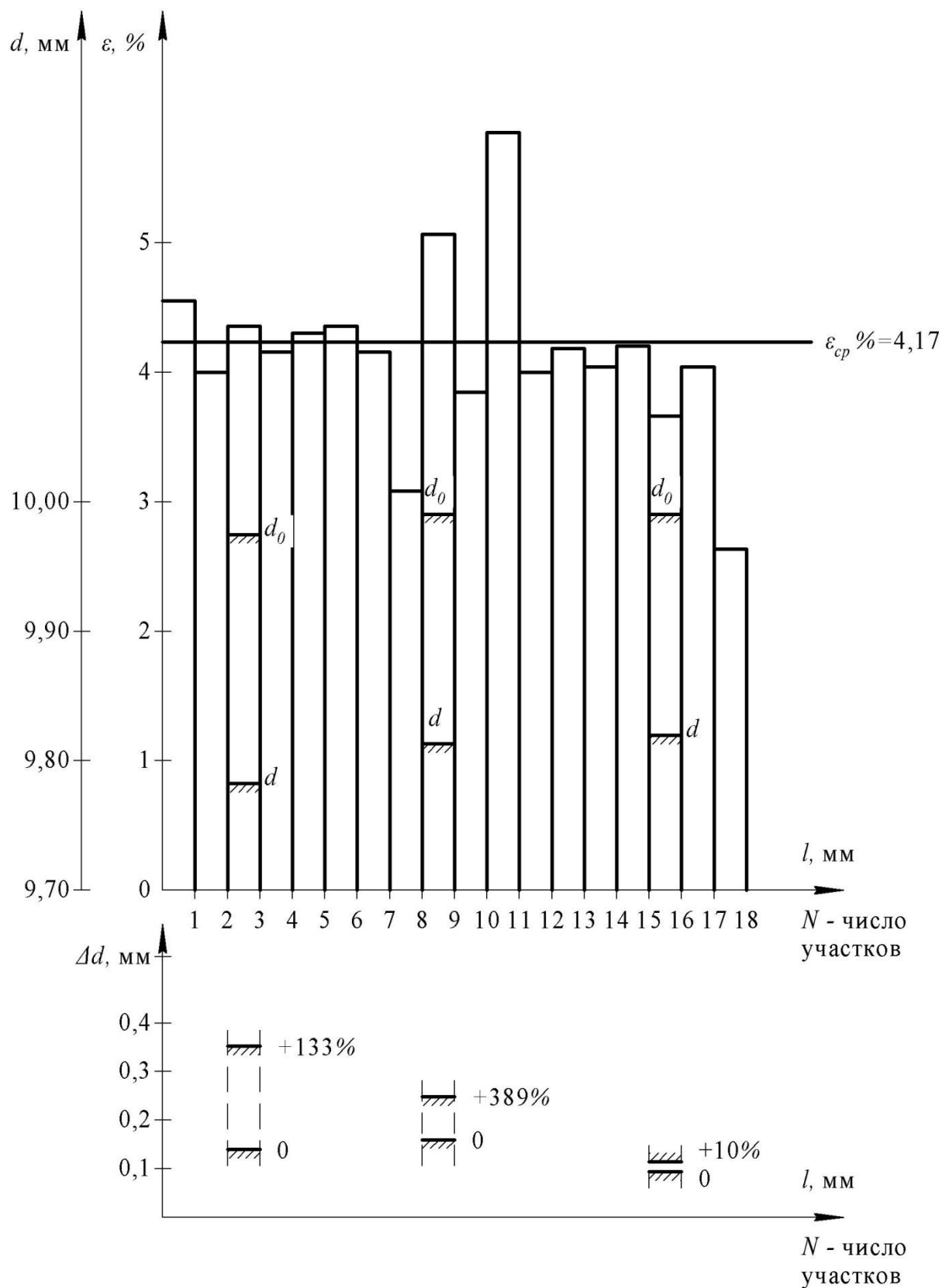


Рисунок 19 – Распределение относительной деформации по длине, средние диаметры и биения образцов на участках № 3, 9, 16 до и после эксперимента (образец 013)

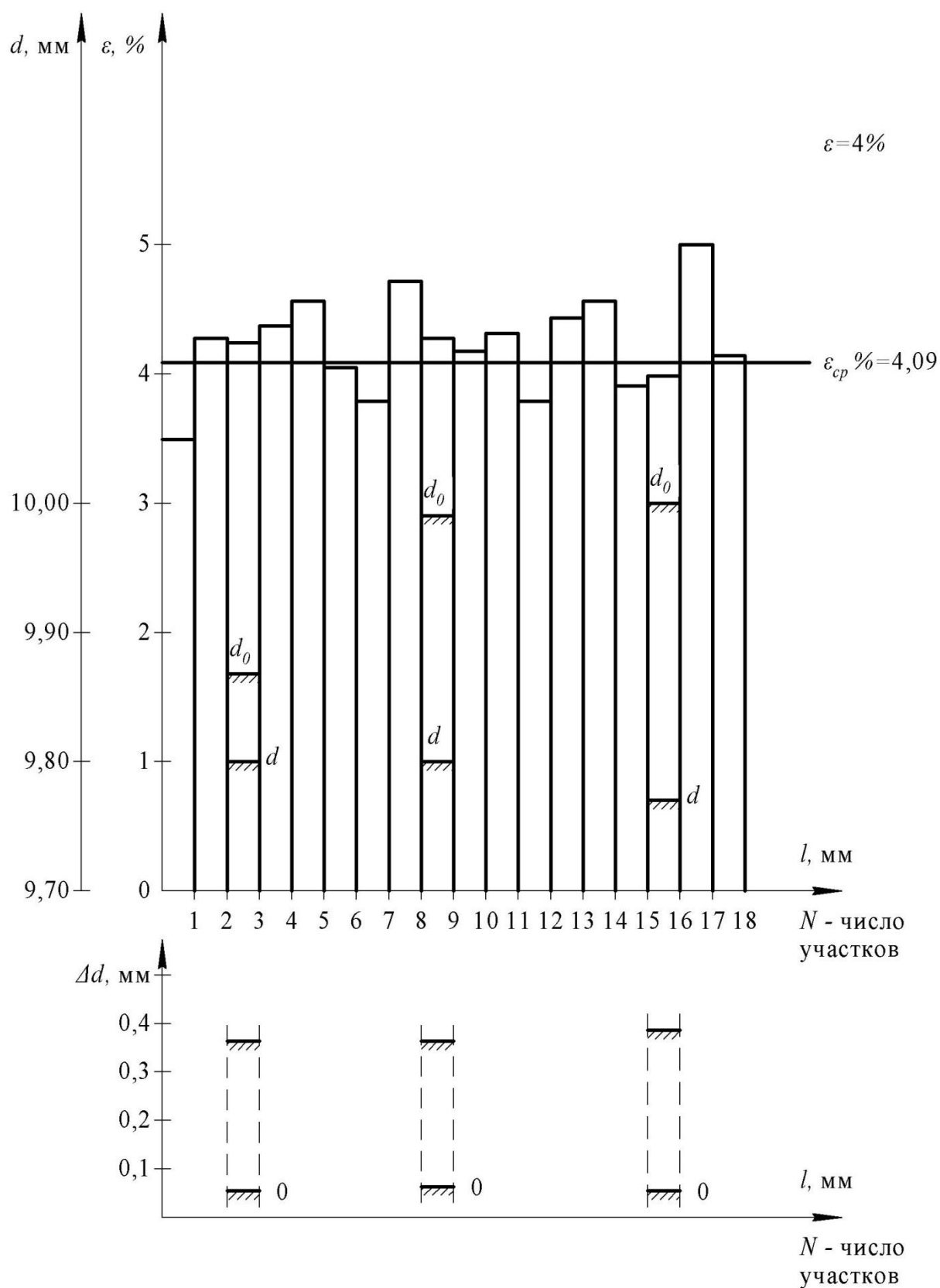


Рисунок 20 – Распределение относительной деформации по длине, средние диаметры и биения образцов на участках № 3, 9, 16 до и после эксперимента (образец 014)

Анализ диаграмм на рисунках 9-20 позволяет сделать вывод о том, что деформация образца происходит по всей длине, а не в некоторых его частях, причём при больших величинах деформации растяжение более равномерно.

Не установлено какой-либо зависимости между удлинением отдельных частей образца и их диаметрами. Исходные диаметры частей практически одинаковы, для этой цели образцы шлифовались, а их удлинение имеет некоторый разброс, очевидно, связанный с внутренними свойствами металла.

Ставилась также задача рассмотреть зависимость прямолинейности оси образца от величины деформации растяжения $\varepsilon\%$ по изменению биения Δd образца в трёх точках по его длине. Никакой зависимости не установлено. Биение, как правило, становилось большим, это, очевидно, связано с релаксацией значительных внутренних напряжений. Чтобы снять большие внутренние напряжения необходимо провести дополнительные эксперименты с большей величиной деформации. При этом образцы необходимо изготовить с более высокими требованиями по точности.

Равномерность пластической деформации определялась по методике И. А. Одингa. Вычислялись характеристики $l_{\max} = \varepsilon_{\max} / \varepsilon_{\min}$, $l_{cp} = \varepsilon_{\max} / \varepsilon_{cp}$ в зависимости от деформации образца $\varepsilon\%$. Эти характеристики представлены графически на рисунках 21 и 22 соответственно. Анализ этих зависимостей показывает, что равномерность пластической деформации при данных условиях эксперимента l_{cp} составляет 1,5-2. Оптимальные результаты получаются при растяжении образца на 4%. На рисунке 23 представлены осциллограммы эксперимента, где показаны зависимости усилия деформации в функции от деформации образца ε мм.

Результаты обработки этих осциллограмм представлены в таблице 4 и в виде графиков на следующих рисунках: на рисунке 24 представлена зависимость $P_{\max}$ от деформации $\varepsilon\%$; на рисунке 25 представлена зависимость снижения усилия ΔP за счёт релаксации остаточных напряжений при температуре 300°C в течение 30 мин., выдержки.

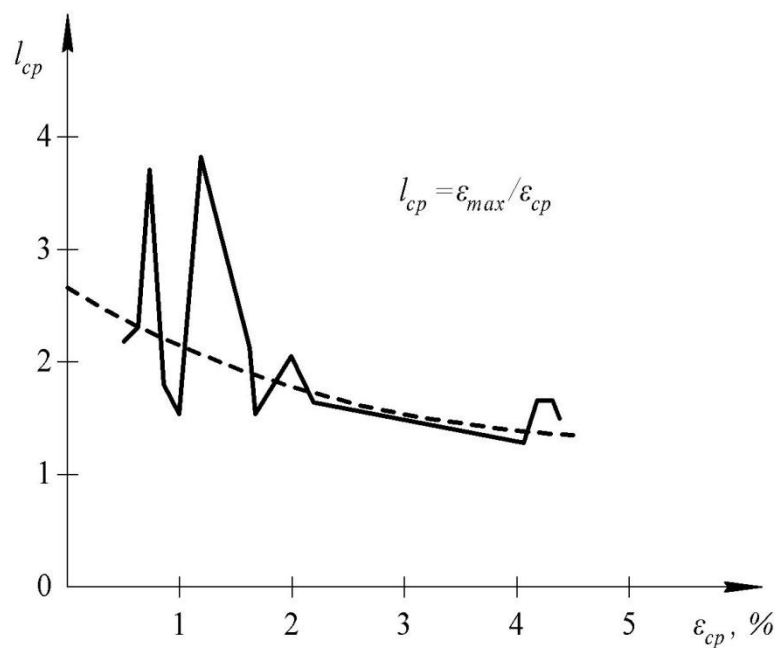


Рисунок 21 – График зависимости l_{cp} от относительной средней деформации

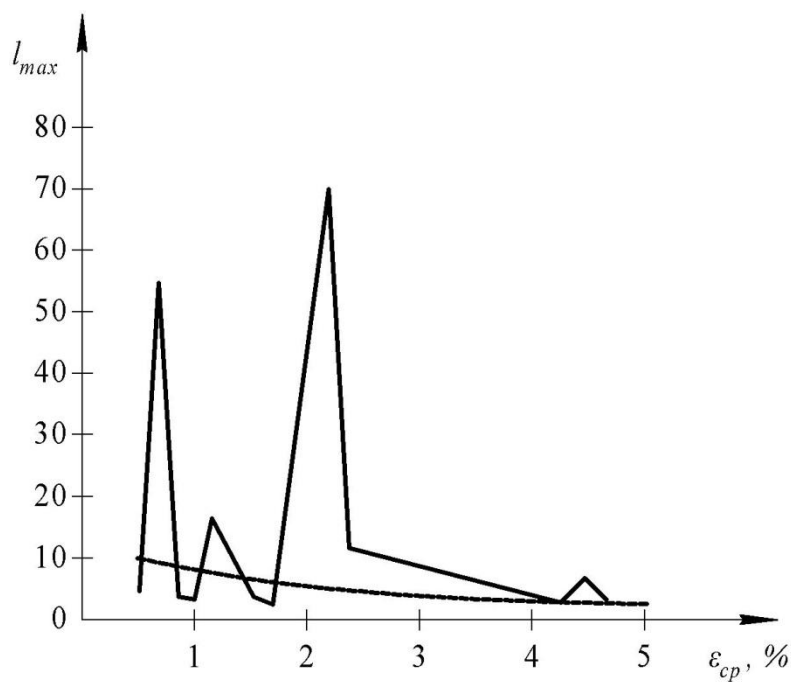


Рисунок 22 – График зависимости l_{max} от средней относительной деформации

Экспериментальные исследования показывают, что величины пластической деформации имеют большие разбросы при различных температурах деформирования, и следовательно, применение традиционной технологии не приведёт к желаемому результату для заготовок из

нержавеющих сталей с отношением $l/d > 10$. В этом случае целесообразно считать оптимальным технологический процесс, в котором осуществляется диагностирование нижеперечисленных параметров, а сам процесс управляется с учётом индивидуальных физико-химических характеристик заготовки.

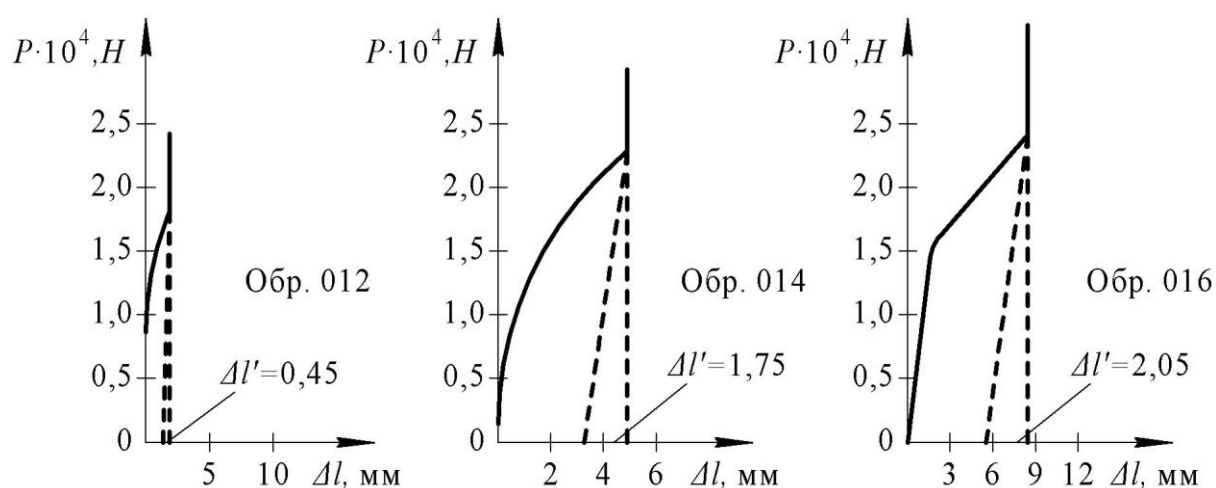


Рисунок 23 – Осциллограммы зависимости усилия деформации в функции от деформации

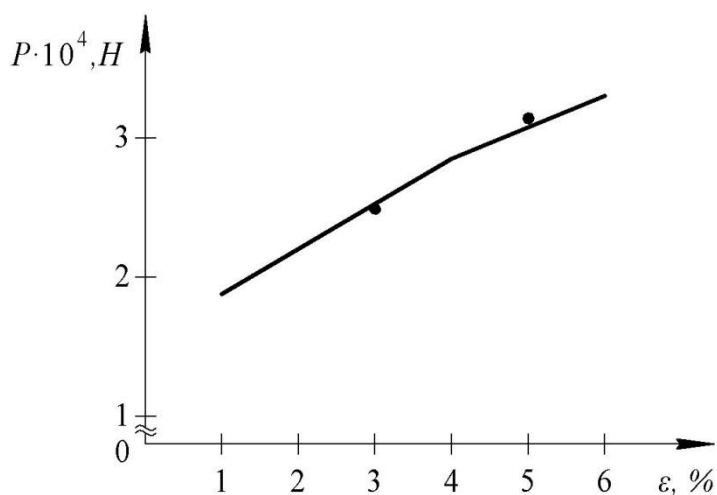


Рисунок 24 – График зависимости $P_{\max}$ от относительной деформации

Анализ результатов, проведённых экспериментов показывает, что необходимо уточнить величины пластической деформации и зависимость температуры на её равномерность. Для этого целесообразно уменьшить

интервалы изменения деформации – до 1%, нагрев до 50°C в интервале температур 190-410°C. Необходимо также проверить равномерность пластической деформации при $\varepsilon = 10\%$ и 15%, что традиционно считается областью больших деформаций.

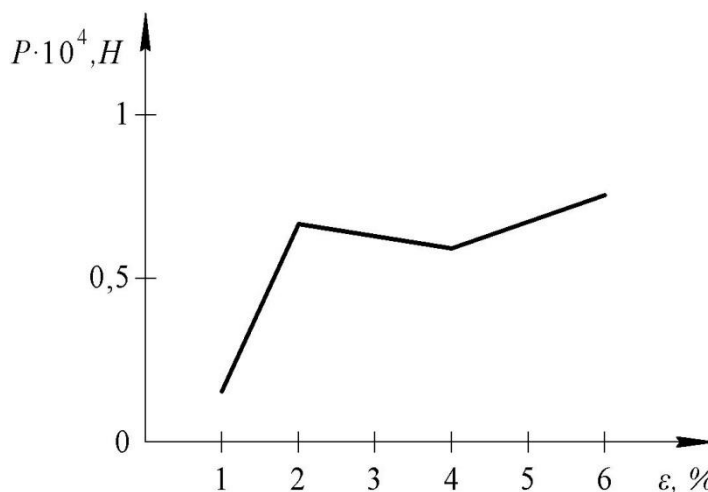


Рисунок 25 – График зависимости усилия растяжения в функции снижения остаточных напряжений при $T = 300^\circ\text{C}$ для выдержки 30 мин.

Для проведения металлографического исследования были выполнены шлифы вдоль оси образцов – в цилиндрической части и в месте разрыва.

Анализ результатов показывает, что зёрна кристаллов вытянуты. Анализ микроструктуры образцов, при температуре 300°C, подвергнутых растяжению на 10%, показывает, что деформация такой величины не вызывает значительных изменений конфигурации зёрен и размеров. Очевидно, уменьшение диаметра и удлинение образца произошло за счёт скольжения между зёрнами металла [26, 27].

Предварительные измерения твёрдости показали, что твёрдость образцов после их растяжения при температурах 600°C, 400°C, 200°C составляет 25-26HRC и одинакова. В зоне разрыва твёрдость составляет 28-32HRC и несколько выше. При температуре 600°C увеличение твёрдости в зоне разрыва составляет 26-27HRC и практически не наблюдается. Максимальное значение твёрдости в зоне разрыва достигается при температуре 400°C. Задачей экспериментальных исследований было

проанализировать влияние геометрических параметров заготовок, оценить пластическую деформацию при термосиловой обработке по длине образца, температурно-силовых режимов на разноразмерность деформации по длине.

Результаты лабораторных исследований на стандартных образцах свидетельствуют о том, что можно обеспечить совместность пластических деформаций за счёт подбора режимов обработки материала, которые находятся в пределах $T^{\circ} = 250-300^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 3-5\%$, $\varepsilon = 1$, $\dot{\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$, равновесное и равномерное распределение остаточных напряжений, критерий локальности от 1,09 до 1,16.

3.2 Экспериментальное исследование термосиловой обработки на равномерность пластической деформации

В задачу исследований, проводимых на опытно-промышленной установке, входило определение влияния режима ТСО на величину биения обрабатываемых валов и на локальность пластической деформации [28, 29].

Исследования проводились на заготовках длиной 1300 мм и диаметром рабочей части 26 мм. При обработке результатов построены диаграммы локальности (рисунок 26-29), графики влияния ТСО на величину биения обрабатываемых валов (рисунок 30-33).

На опытно-промышленной установке был проведён ряд исследований процесса пластической деформации согласно методике, разработанной при проведении аналогичных испытаний на опытных образцах. Степень деформации определяли по известной формуле:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l_{oi}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где ε_i – относительная деформация на i -том участке; l_{oi} – начальная длина i -го участка; Δl_i – изменение длины i -го участка после ТСО.

По результатам исследований составлены таблицы влияния режимов обработки и построены диаграммы локальности $L_{\max}$.

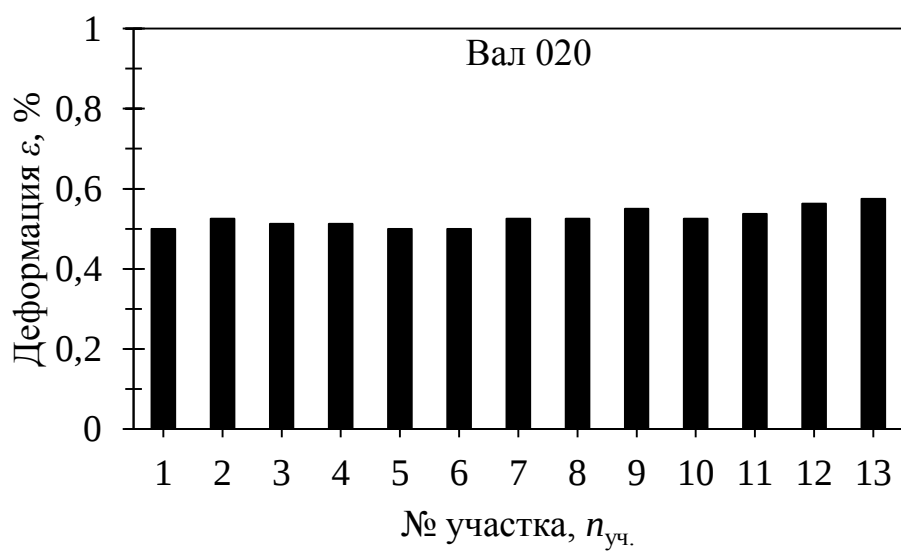
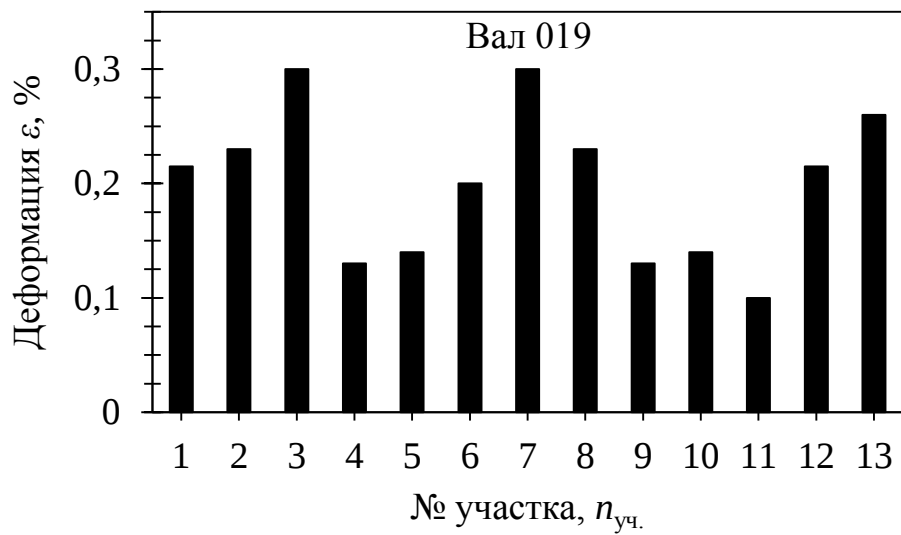
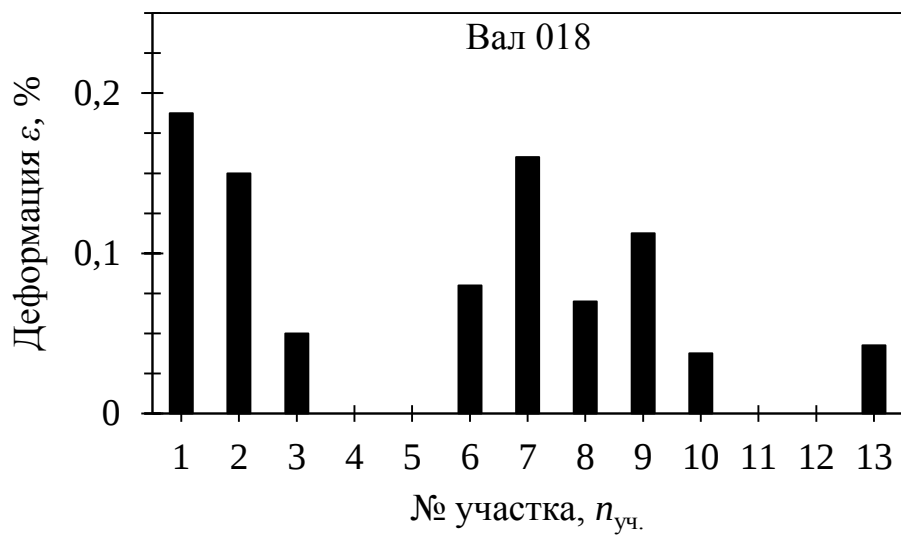


Рисунок 26. Диаграммы локальности:
(обрабатываемые валы 018-020)

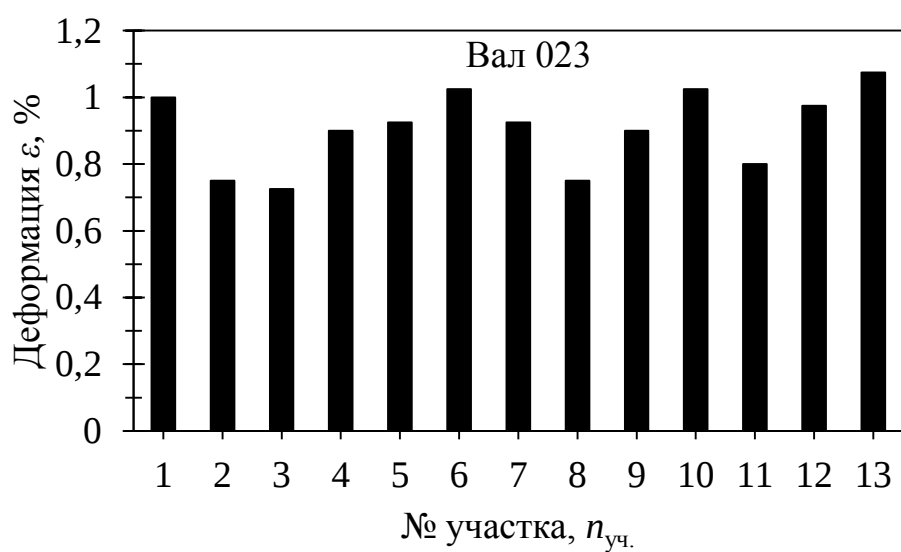
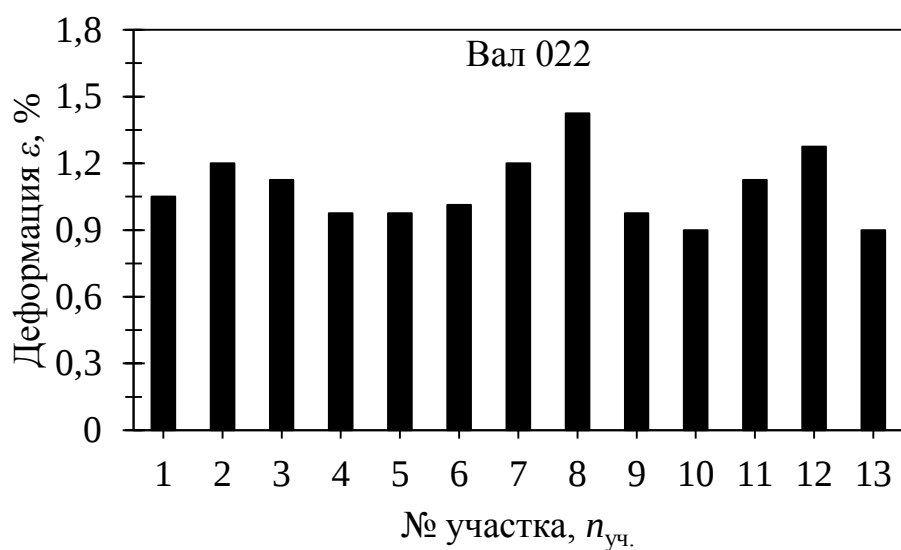
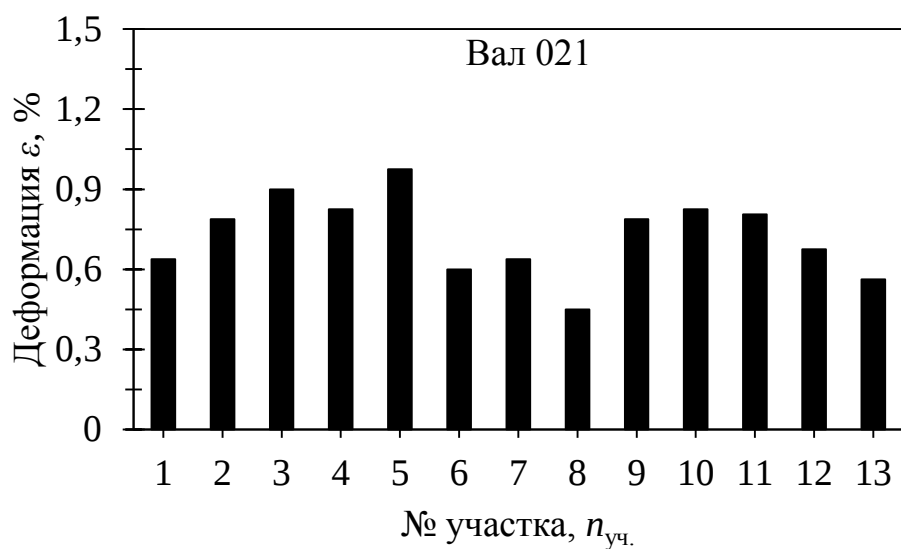


Рисунок 27. Диаграммы локальности:
(обрабатываемые валы 021-023)

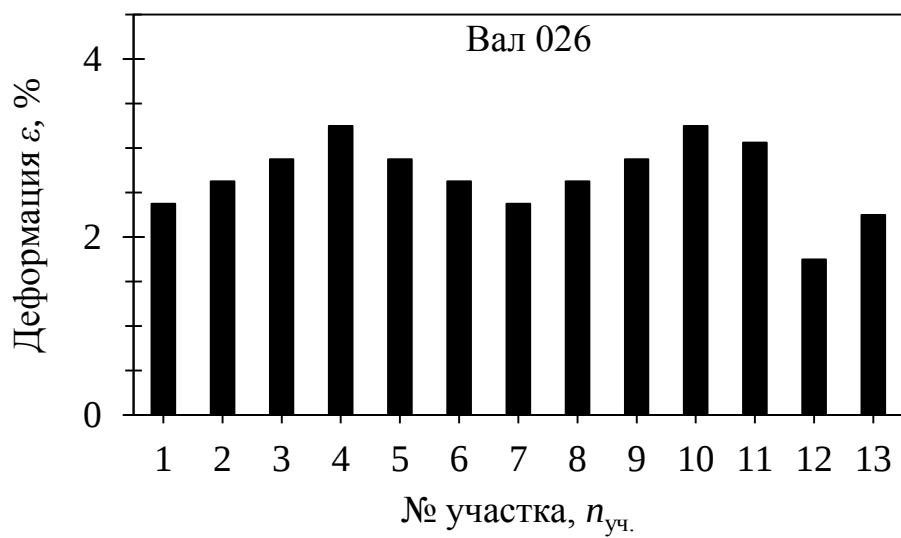
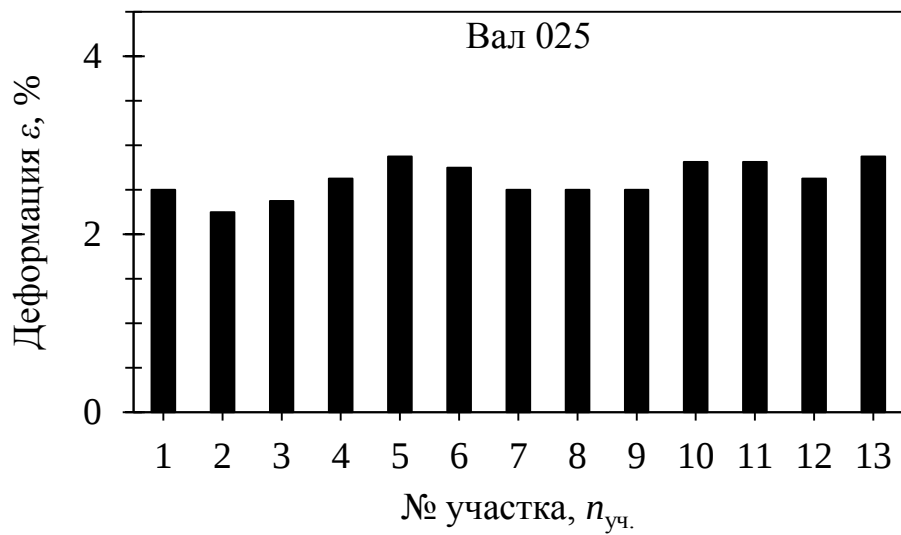
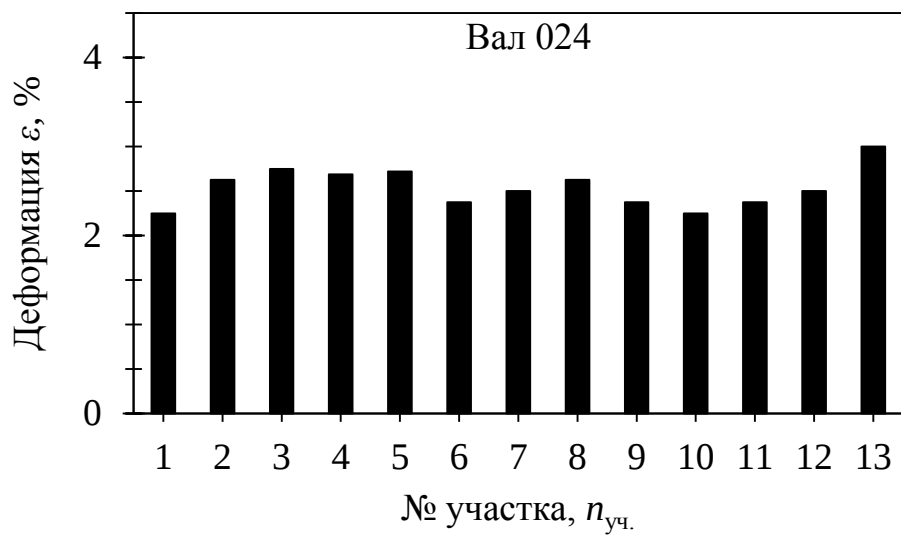


Рисунок 28. Диаграммы локальности:
(обрабатываемые валы 024-026)

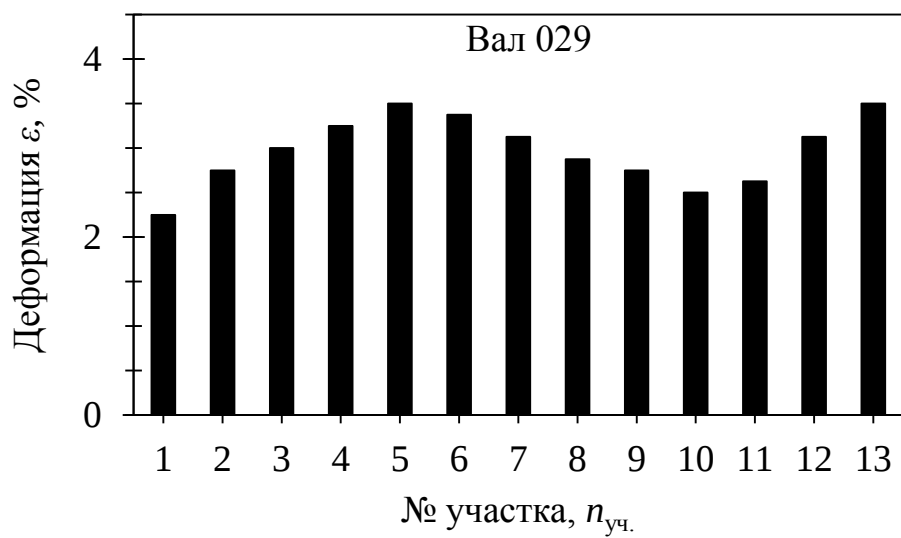
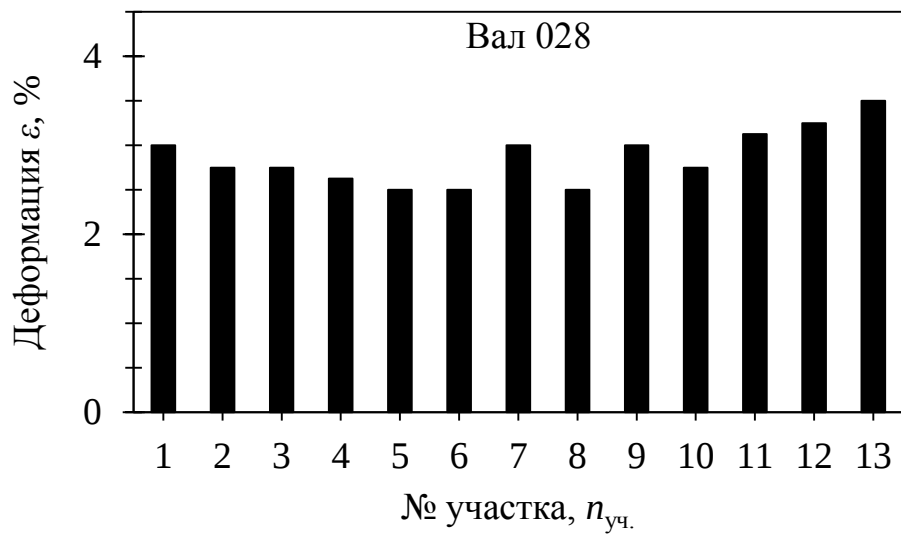
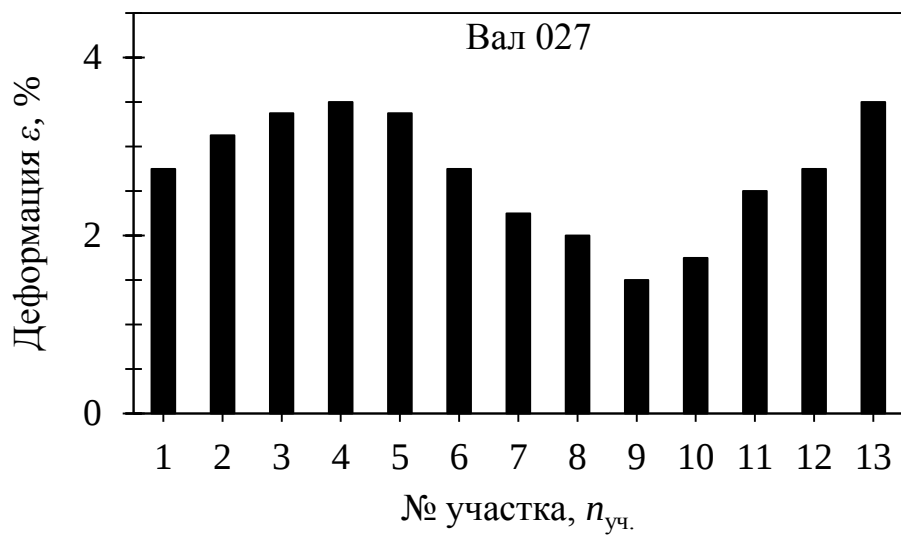


Рисунок 29. Диаграммы локальности:
(обрабатываемые валы 027-029)

Величину значений критериев определяли по формуле:

$$L_{\max} = \frac{\varepsilon_{i\max}}{\varepsilon_{i\min}}, \quad (10)$$

где $L_{\max}$ – максимальный критерий локальности обрабатываемой заготовки; $\varepsilon_{i\max}$ – относительная максимальная деформация участка;

$\varepsilon_{i\min}$ – относительная минимальная деформация.

На основании полученных данных, составлены таблицы влияния температуры обработки, скорости и степени деформации, на равномерность распределения пластической деформации по длине обрабатываемого вала (таблица 5, 6).

Несмотря на некоторые расхождения результатов, в сравнении с полученными при лабораторных исследованиях, можно рекомендовать выбор режима ТСО в следующих интервалах:

$$T^{\circ} = 20-400^{\circ}\text{C}, \varepsilon = 0,8-6\%, \dot{\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}.$$

Таблица 5 – Влияние температуры обработки и скорости деформации на назначение критериев локальности при $\varepsilon = 2,0\%$

Скорость деформации $\dot{\varepsilon}, \text{c}^{-1}$	Критерий локальности, $L_{\max}$					
	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
$5 \cdot 10^1$	2,25	2,25	2,30	2,30	2,30	2,65
$1 \cdot 10^{-2}$	1,30	1,25	1,30	1,30	1,30	1,95

Таблица 6 – Влияние степени деформации на значение критериев локальности при $T = 300^{\circ}\text{C}$, $\dot{\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$

Степень деформации, $\varepsilon \%$	Критерий локальности, $L_{\max}$	Степень деформации, $\varepsilon \%$	Критерий локальности, $L_{\max}$
0,1	3,2	1,0	1,35
0,3	2,2	2,0	1,25
0,6	1,8	4,0	1,15
0,8	1,4	6,0	1,10

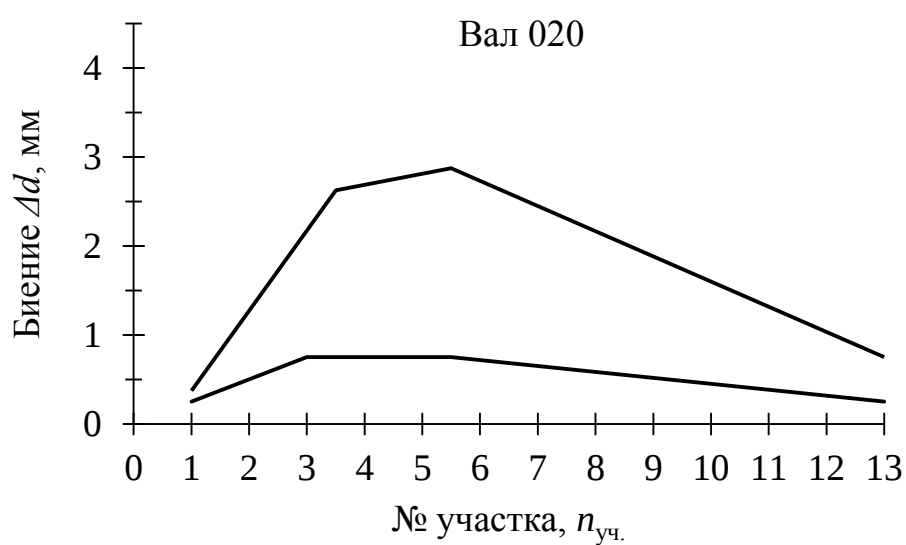
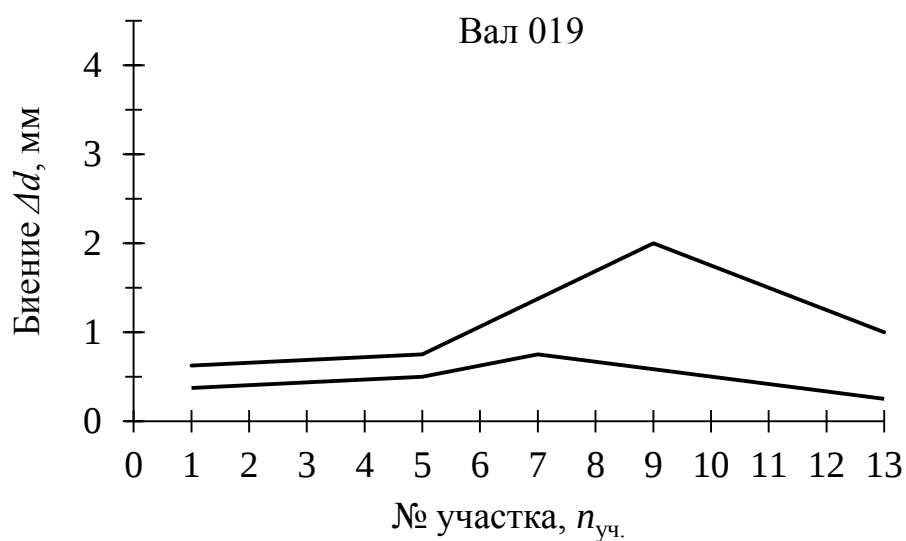
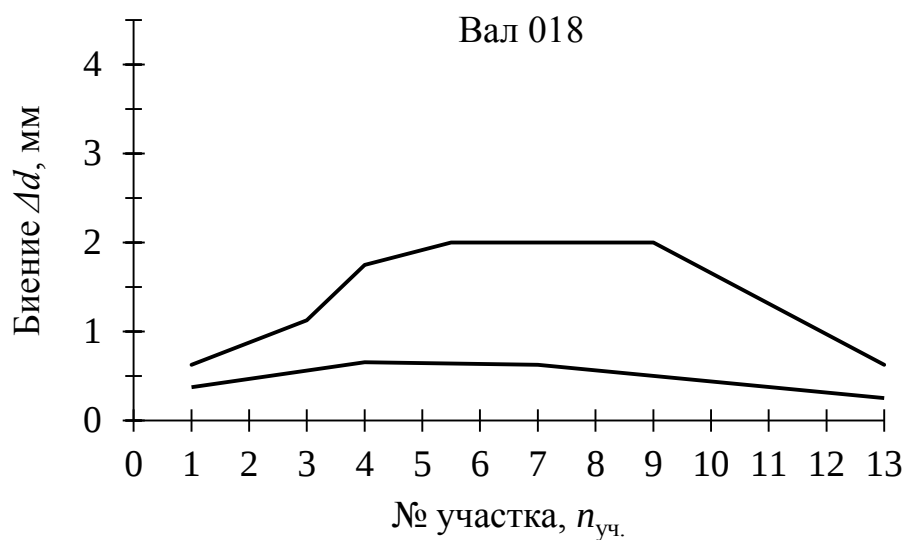


Рисунок 30. Влияние режимов ТСО на величину биения
(обрабатываемые валы 018-020)

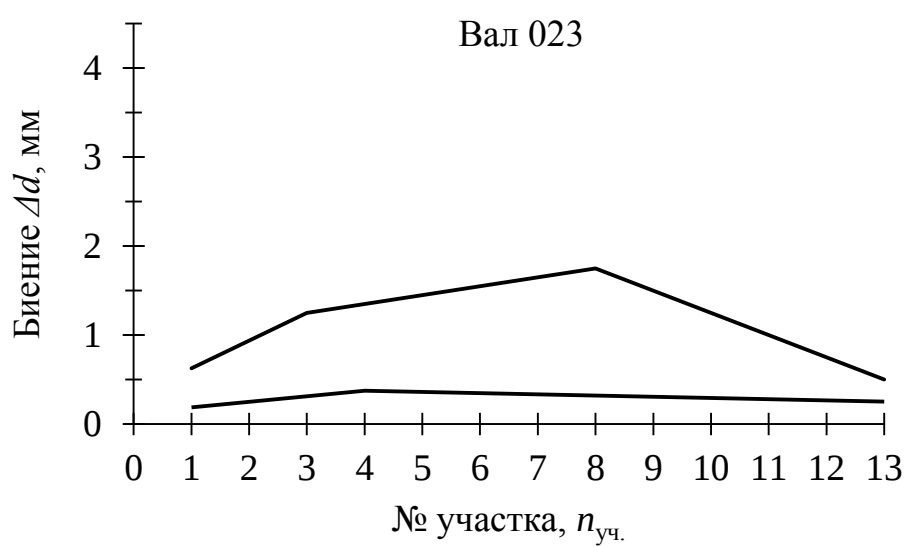
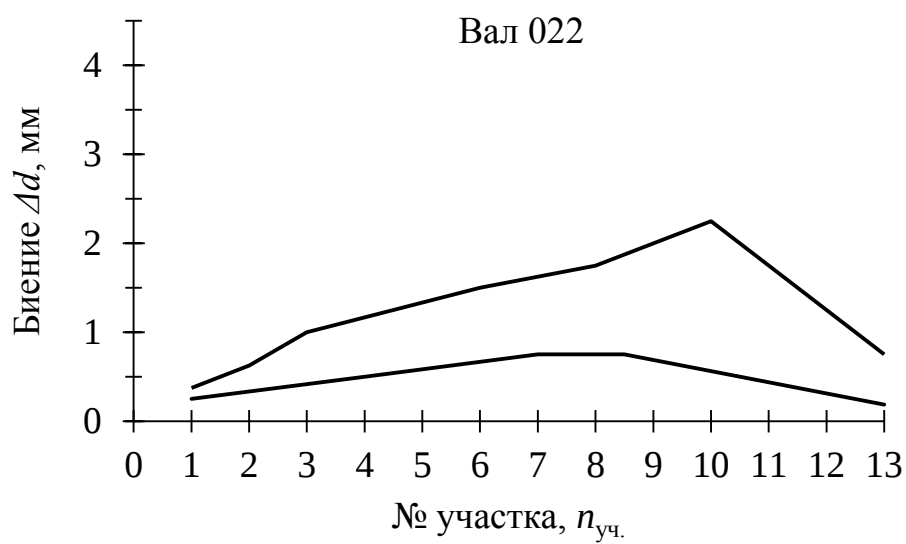
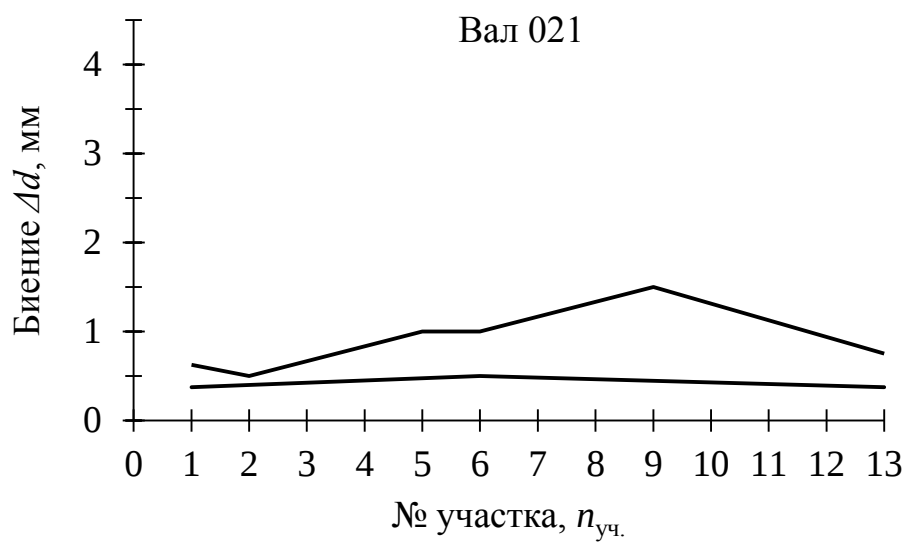


Рисунок 31. Влияние режимов ТСО на величину биения
(обрабатываемые валы 021-023)

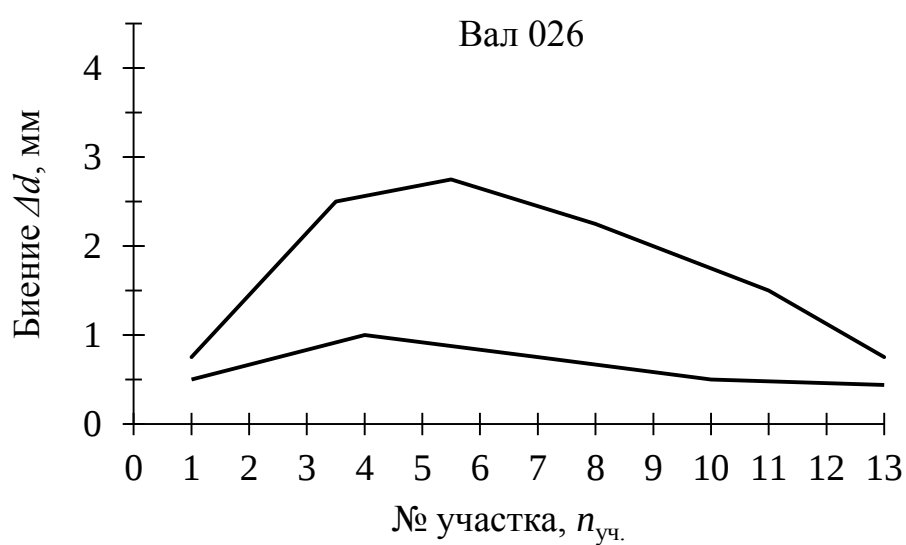
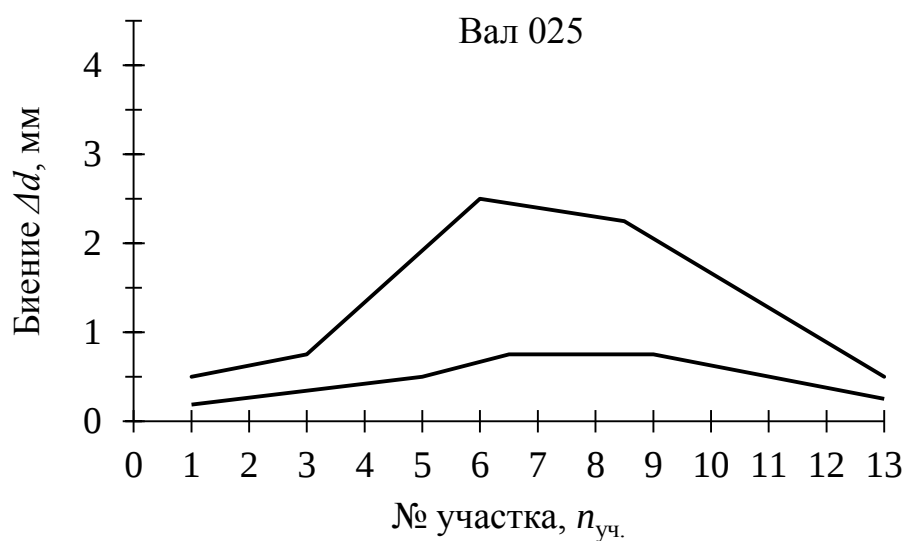
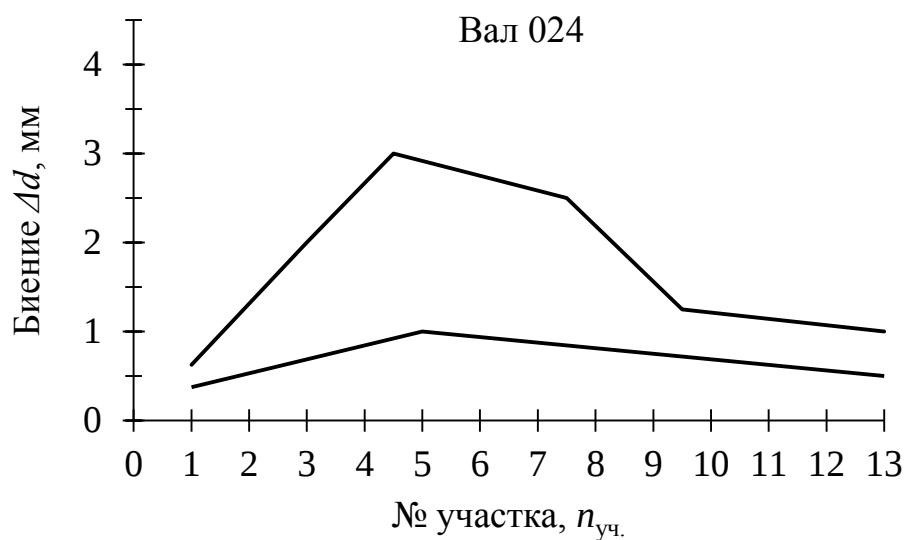


Рисунок 32. Влияние режимов ТСО на величину биения
(обрабатываемые валы 024-026)

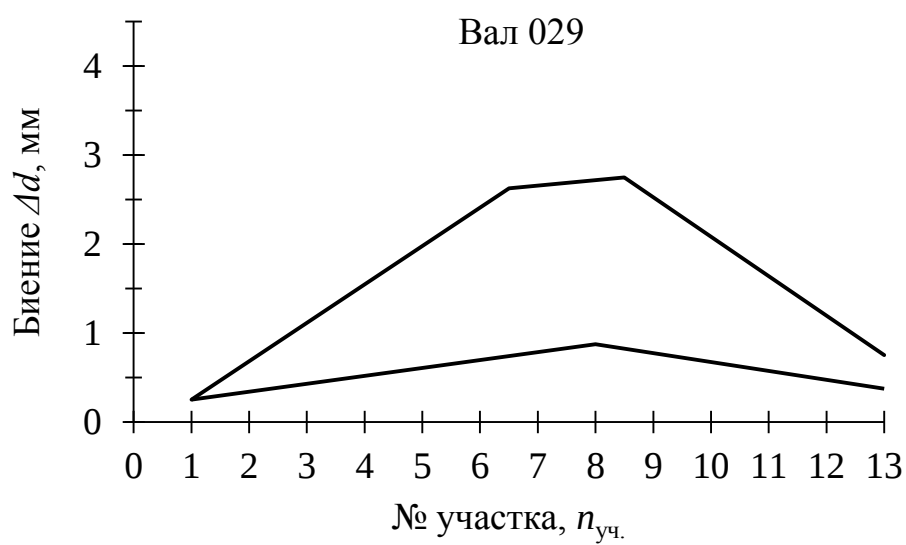
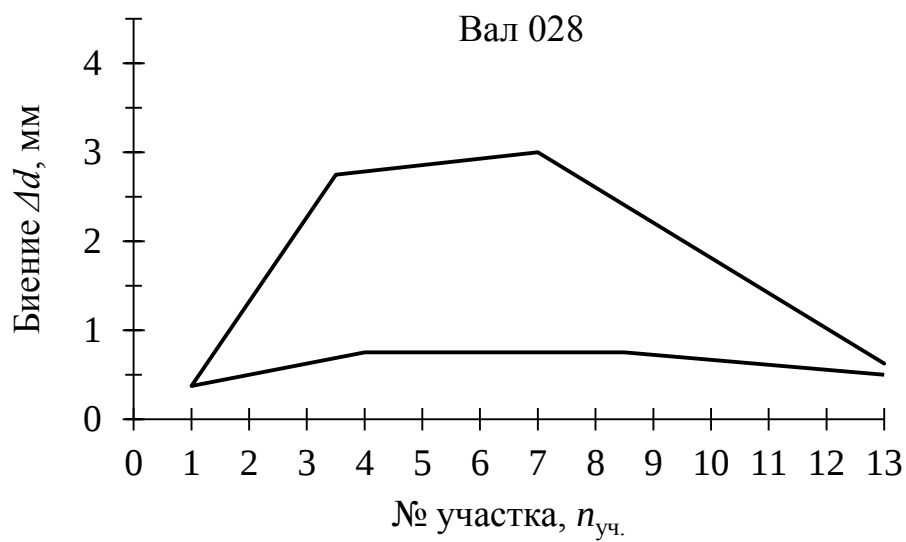
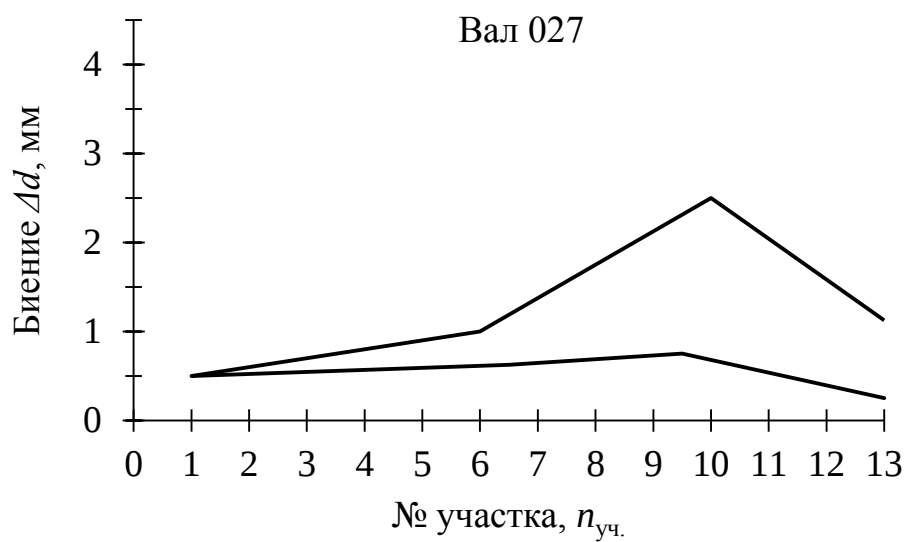


Рисунок 33. Влияние режимов ТСО на величину биения
(обрабатываемые валы 027-029)

Обработка в этом диапазоне обеспечит максимально возможную размерность деформации по объёму металла со значениями критерия локальности $L_{\max} = 1,101,4$.

Работа проводилась по специально разработанной методике. По полученным данным составлены таблицы 7-9 и построены графики изменения величины биения (Δd) по длине заготовки (рисунок 30-33).

При определении влияния режимов обработки на коробление в качестве критерия приняли интенсивность снижения биения (K), величину которого рассчитывали по формуле:

$$K = \frac{\Delta d_3}{\Delta d}, \quad (11)$$

где Δd_3 – максимальное биение заготовки до ТСО; Δd – максимальное биение заготовки после ТСО.

Таблица 7 – Влияние температуры обработки (T), скорости деформации ($\dot{\varepsilon}$) на интенсивность снижения биения (K) при $\varepsilon = 3,0\%$; $\Delta d_3 = 3$ мм

Скорость деформации $\dot{\varepsilon}, \text{с}^{-1}$	Интенсивность снижения биения, K	
	$T = 300^\circ\text{C}$	$T = 400^\circ\text{C}$
$5 \cdot 10^1$	2,3	2,7
$1 \cdot 10^{-1}$	1,5	2,8
$1 \cdot 10^{-3}$	3,0	3,4

Таблица 8 – Влияние деформации (ε) на интенсивность снижения биения (K) в результате ТСО при $T = 400^\circ\text{C}$, $\dot{\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-3} \text{с}^{-1}$, $\Delta d_3 = 3$ мм

Степень деформации, $\varepsilon \%$	Интенсивность снижения биения, K	Степень деформации, $\varepsilon \%$	Интенсивность снижения биения, K
0,1	1,0	1,0	2,8
0,3	1,2	2,0	3,2
0,6	1,8	4,0	3,8
0,8	2,4	6,0	4,6

Таблица 9 – Влияние величины предварительного искривления образца (Δd_3) на интенсивность снижения биения (K) в результате ТСО при $T = 400^\circ\text{C}$, $\dot{\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$, $\varepsilon = 3,0\%$

Начальное биение, Δd_3, мм	Интенсивность снижения биения, K	Начальное биение, Δd_3, мм	Интенсивность снижения биения, K
0,8	2,0	3,0	3,6
1,5	3,1	4,0	3,0
2,0	3,5	5,0	3,1

Полученные данные хорошо согласуются с результатами испытаний при проведении исследований влияния наследственности на коробление деталей, изготовленных из металла другой партии поставки [30, 31].

Проводя оценку результатов исследования, следует отметить, что ТСО обеспечивает выравнивание физико-механических свойств по всему объёму металла за счёт подбора режима обработки, обеспечивающего значения критерия локальности деформации до $L_{\max} = 1,10-1,15$, а эффективность ТСО, с точки зрения уменьшения величины биения, значительно понижается с ростом начального искривления.

4 ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОЙ ОБРАБОТКЕ

Для длинномерных маложестких деталей типа вал, основная трудность при их изготовлении заключается в снижении поперечного коробления в межоперационный и эксплуатационный периоды. Для винтов и ходовых валов, которые относятся к группе валов, помимо поперечной деформации, нерешенной проблемой является обеспечение равномерных физико-механических свойств и геометрии вдоль оси детали [32, 33]. Это связано с жесткими требованиями по шагу резьбы. При релаксации остаточных технологических напряжений происходит деформация вала в продольном направлении, что с неизбежностью приводит к потере точности шага резьбы и снижению кинематической точности изделия в целом. Поэтому при изготовлении деталей данной группы нужно стремиться не только к обеспечению поперечной, но и продольной устойчивости [34, 35].

Релаксационные процессы в материале заготовки ведут к потере точности резьбы по шагу за счет самопроизвольных деформационных процессов в осевом направлении. Степень коробления зависит от характера и интенсивности распределения остаточных напряжений, особенностей геометрии детали и физико-механических свойств ее материала. Чтобы снизить коробление, необходимо либо повысить сопротивление металла пластическому деформированию, т.е. его релаксационную стойкость, либо уменьшить действующие напряжения. В последнее время получают развитие методы старения, повышающие релаксационную стойкость материала с небольшим снижением уровня остаточных напряжений. К ним относятся старение тепловыми ударами, обработка ультразвуком, динамическое и статическое нагружения, вибрационное старение, стабилизация размеров деталей в магнитном поле, обработка электрогидравлическим ударом, облучение рентгеновскими лучами. Существуют способы снижения уровня остаточных напряжений в маложестких деталях в зависимости от физико-

механических свойств их материала: пластическая деформация, отжиг, отпуск и т.д.

К недостаткам традиционной термообработки можно отнести следующее: остаточные напряжения снимаются не полностью в зависимости от длительности выдержки, температуры обработки, массивности изделия, материала; при нагреве и последующем охлаждении заготовка с остаточными напряжениями меняет размеры и свою форму; термообработка осесимметричных длинномерных деталей является трудоемкой, снижающая производительность процесса. Существенное влияние при этом оказывает скорость охлаждения после термической операции, так как при остывании изделий возможно коробление длинномерных заготовок и наведение новых остаточных напряжений [36, 37].

Процесс деформации в протяженных заготовках является неравномерным. Современные представления о характере волнового процесса деформирования производится или для упругой постановки задачи, или для упругопластических тел, но как результат колебаний, вносимых извне, и в основном, рассматриваются вопросы рассеяния энергии в материале. Также рассматривается волновой процесс деформирования для ударных воздействий. Также отмечен феноменологический подход для описания процесса деформирования в виде модели Фойхта для распределенных систем. При этом модель Фойхта ограниченно подходит только для определенных материалов и случаев деформирования [38, 39].

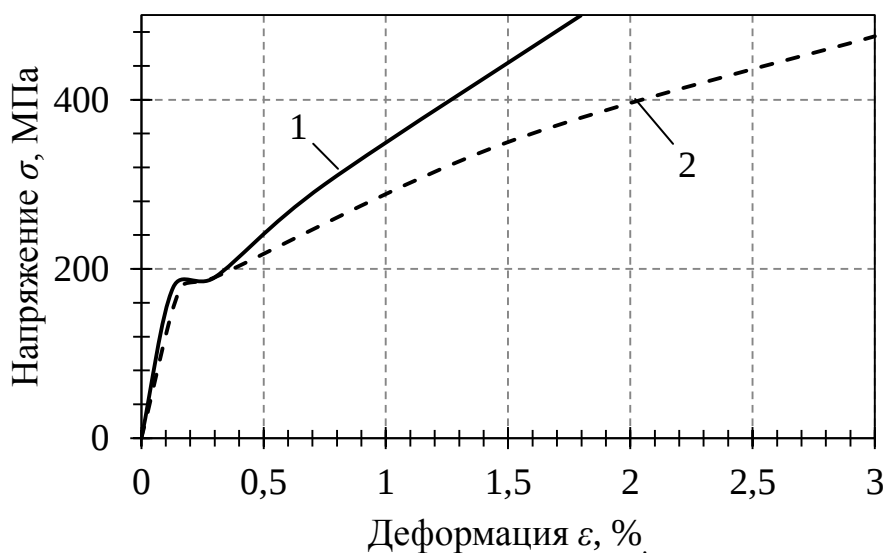
Для обеспечения точности обработки маложестких валов за счет равномерности их деформирования в продольном направлении, сохранения размерной стабильности необходимо формировать напряженно-деформированное состояние заготовки с учетом локализации деформации автоволнового процесса. Для этого разработана технология термосиловой обработки, заключающаяся в одновременном приложении осевой нагрузки и высокой температуры. Целью является стабилизация и минимизация остаточных напряжений в поперечном и продольном направлениях

длинномерной детали с одновременным формированием геометрии заготовки. Усилия (напряжения) прилагаются на уровне, превышающем предел относительной пропорциональности σ_{02} т.е. в зоне пластических деформаций. Для сведения к минимуму коробления (автодеформаций валов) целесообразно обеспечить при термообработке под нагрузкой достаточное развитие пластической деформации. Соответственно, необходимо исследовать распределение упругопластических деформаций, характер их локализации и распределение остаточных напряжений в стержнях на основных формообразующих операциях [40, 41].

Резко выраженная локализация деформации по длине вала наблюдается при больших степенях формоизменения при растяжении в виде шейки. При описании локализации деформации она рассматривается как неравномерность формоизменения, а не закономерный физический процесс. В процессе развития локальной деформации возникают значительные колебания истинных напряжений, которые обусловлены сменой упрочнений и разупрочнений. Данный процесс характеризуется амплитудой и частотами. Локализация деформации происходит после достижения порога предела текучести и проявляется как возникновение и приостановка областей локального течения до появления устойчивой шейки.

Результат моделирования упруговязкопластической деформации на основе реологической модели показан на рисунке 34. Но реальная кривая упрочнения имеет не гладкий характер, а явно выраженные релаксационные возмущения, которые указывают на неравномерный характер деформирования [42, 43].

Приведено сравнение кривых упрочнения, полученных при теоретическом моделировании процесса деформирования и из результатов натурного эксперимента, из которого следует вывод о неустойчивом, колебательном характере деформирования на стадии пластического течения.



1 – с учетом упрочнения; 2 – без учета упрочнения

Рисунок 34 – Кривые упрочнения при 20°C (сталь 12X18H10T)

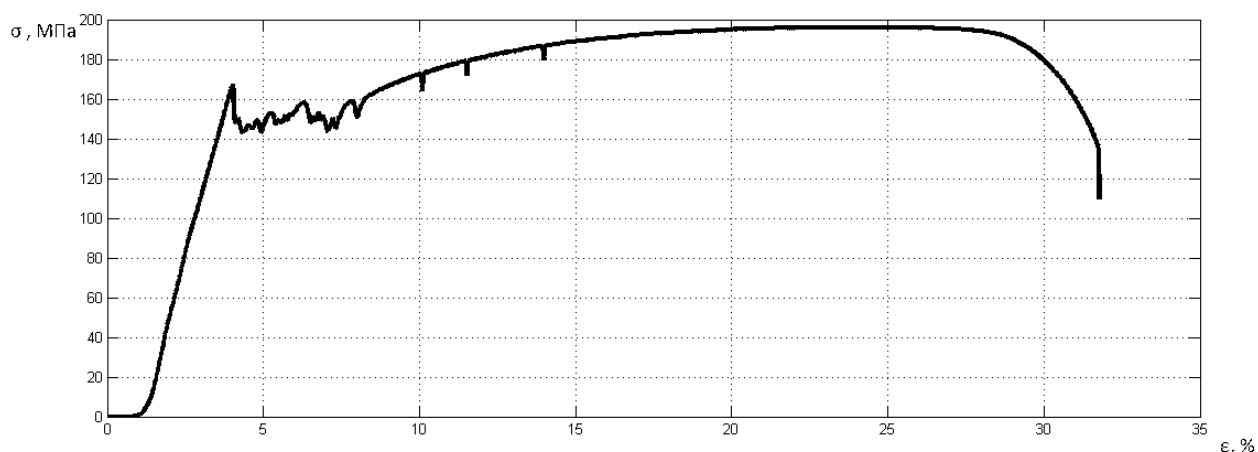


Рисунок 35 – Экспериментальная кривая упрочнения стали 12X18H10T

Результаты экспериментальных исследований, где изучались вопросы локализации деформации с использованием большого объема экспериментальных данных при варьировании технологических факторов (величины деформации, скорости деформирования и температуры нагрева) (пример таких гистограмм на рисунке 26-29) показывают, что неравномерность деформирования по длине может являться не только следствием не равномерности исходных свойств материала, но и волновым характером процесса пластической деформации.

Трудность определения пороговой величины деформации заключается в том, что эта величина зависит от таких параметров как, размер зерна, вид термической обработки, величины скорости деформирования и т.д. В качестве оценки, характеризующей среднюю неравномерность пластических деформаций, взят критерий локальности $K_{\text{ср}} = \varepsilon_{\text{max}} / \varepsilon_{\text{ср}}$.

Значение $K_{\text{ср}}$, близкое к единице, свидетельствует об однородности пластических деформаций материала по всей длине заготовки. При минимальной деформации $\varepsilon \leq 1\%$ наблюдается большое значение коэффициента $K_{\text{ср}}$ (1,5 до 2) на рабочих температурных режимах и значительный разброс данных.

В поликристаллических металлах в условиях однородного напряженного состояния, пластическая деформация характеризуется локальностью протекания. Здесь следует различать микролокальность и макролокальность (неоднородность) пластической деформации. В микрообъемах процесс неравномерности пластической деформации оказывает значительное влияние на критерии прочности и процесс пластического течения в целом, однако количественного влияния микрон неоднородности на макрон неоднородность пластической деформации пока еще сделать не удастся. Неравномерность пластической деформации имеет две фазы протекания. Первая – одновременная, но неравномерная деформация микрообъема металла имеет решающее значение для оценки неоднородности пластических свойств материалов. Поэтому критерий $K_{\text{ср}}$ оказывается чувствителен к изменению структуры металла. Если в результате некачественной термической обработки оказались участки с различными по величине зернами, то величина $K_{\text{ср}}$ резко возрастает.

При ТСО при растяжении вдоль оси вала происходят периодические изменения структуры материала, связанные с колебательным характером изменения размеров дефектных элементов. В ходе экспериментов над образцами из малоуглеродистой стали выявлена логарифмическая

зависимость величины длины пластической волны λ от размеров зерна, линейная – от размера поперечника образца. Скорость же распространения волны пластической деформации v возрастает с увеличением скорости нагружения и не зависит от размеров зерен и размеров вала.

Из различных теорий, связанных с возможностью возникновения волн деформаций при нагружении деталей, в упругой постановке задачи, ударных возмущений для объяснения неравномерности распределения пластических деформаций по длине образца была принята волновая теория распространения упруго-пластических деформаций при статическом нагружении.

Для описания процесса деформирования выбрана модель Фойхта для распределенных систем. При этом модель Фойхта ограниченно подходит только для определенных материалов и случаев деформирования.

На рисунке 26-29 приведены диаграммы локальности, сделаем выборку диаграмм для двух образцов. Для анализа данных диаграмм проведем частотный анализ деформаций по участкам. Результаты моделирования представлены на рисунке 36-38.

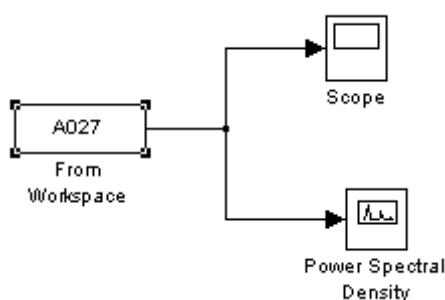


Рисунок 36 – Структурная схема для частотного анализа

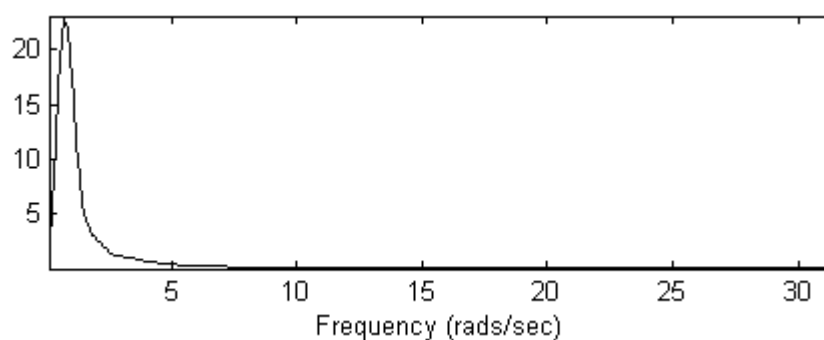


Рисунок 37 – Результаты моделирования для образца №1

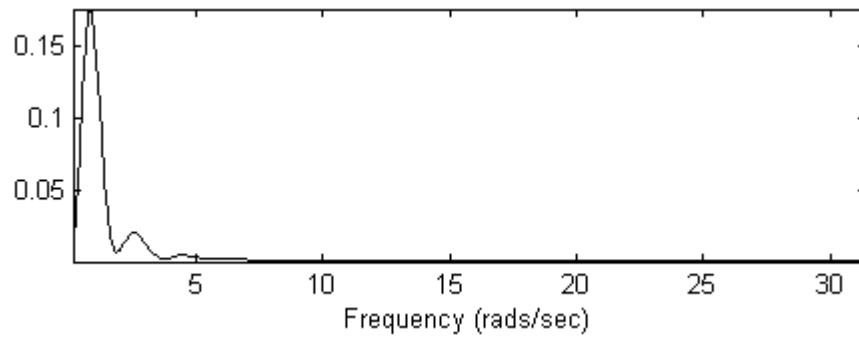


Рисунок 38 – Результаты моделирования для образца №2

Ниже приведены результаты моделирования волнового процесса на основе элементарной реологической модели Фойхта в виде системы уравнений в MatLab:

$$\begin{cases} \sigma' = -\frac{\sigma - \sigma_0}{T} - g \cdot \varepsilon \cdot \sigma, \\ \varepsilon' = -\frac{\varepsilon}{\tau} + \frac{\sigma}{\eta}; \end{cases} \quad (12)$$

где τ – время релаксации деформационных процессов, с; η – динамическая вязкость; σ – напряжения, МПа; σ_0 – уровень напряжений, до которого они релаксируют на концентраторе, МПа; T – время релаксации напряжений, с; g – константа; ε – деформация.

Граничные условия для данной системы:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial \sigma}{\partial r} \Big|_{r=l_0} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \Big|_{r=l_0} = 0$$

где r – линейный размер образца, м; l_0 – длина образца, м.

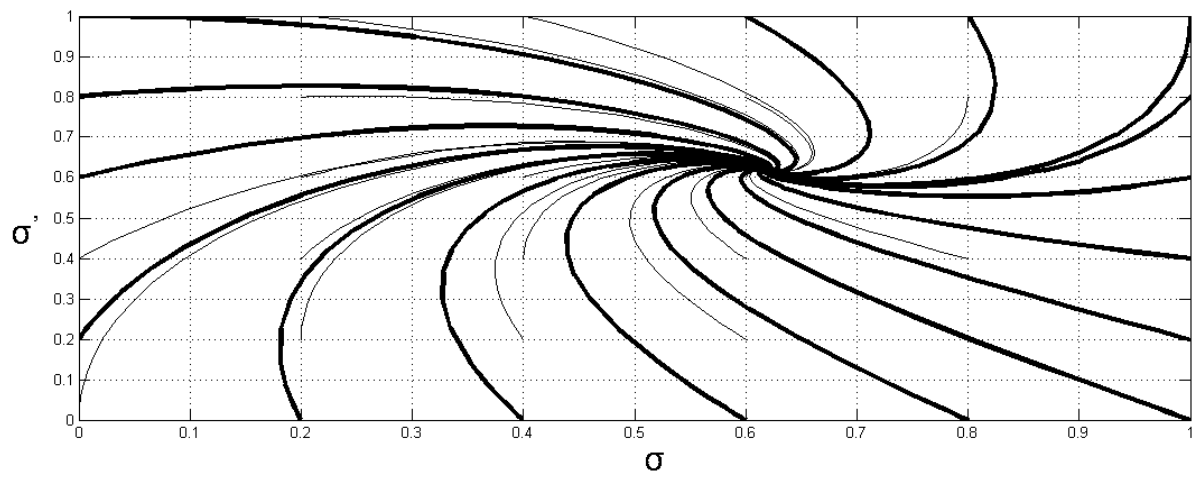
Решение системы:

$$\sigma = \sigma_m e^{pt}; \quad \varepsilon = \varepsilon_m e^{pt}$$

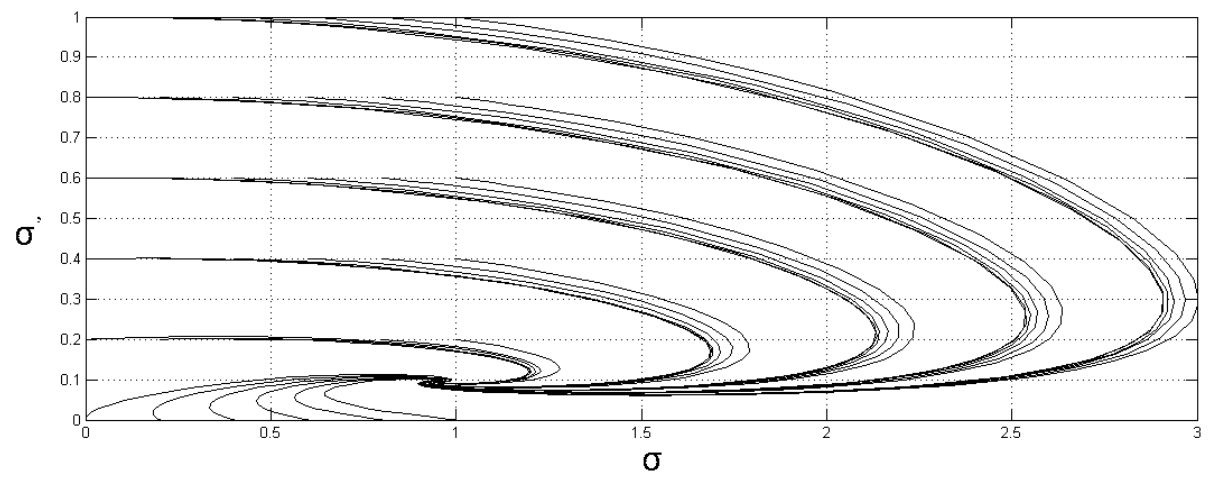
где комплексная частота p деформационного процесса:

$$p^2 + \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{T} + \frac{g\sigma_0 T}{\eta} \right) + \left(\frac{1}{\tau T} + \frac{2g\sigma_0}{\eta} \right) = 0$$

Для определения возможности возникновения автоволновых процессов для системы (12) построим фазовые портреты (рисунок 39).



а



б

а – быстрое затухание в системе; б – медленное затухание в системе

Рисунок 39 – Фазовые портреты системы с различными параметрами модели

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен полный обзор технологий, способов и устройств термомеханических и термосиловых видов обработки. Выявлены основные проблемы, возникающие в процессе термосиловой обработке.

Разработана математическая модель термосиловой обработки, позволяющая управлять такими параметрами как температура, величина и скорость деформации, что делает возможным подобрать такие режимы термосиловой обработки, при которых обеспечивается высокая равномерность деформирования.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований показывают, что неравномерность пластической деформации длинномерных валов при ТСО является результатом действия не только исходной неоднородности физико-механических свойств материала заготовки, его структуры, но и результатом действия собственного волнового процесса пластической деформации.

На основе реологической модели Фойхта, были получены фазовые траектории для различных параметров системы, которые показали возможность реализации в системе затухающих волновых процессов. С учетом этого, для повышения качества ТСО предлагается управлять процессом формирования распределения остаточных деформаций с учетом формирующихся зон узлов и пучностей упруго-пластических деформаций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Драчев, О. И.** Метод снижения коробления мало жестких валов [Текст] / О. И. Драчев, А. В. Бобровский, Д. Ю. Воронов // Машиностроитель. – 2001. – № 6. – С. 20-23.
2. **Драчев, О. И.** Повышение точности и стабильности форм высокоточных не жестких деталей на основе управления температурно-силовым режимом при обработке [Текст] / О. И. Драчев, А. А. Кутин, В. Г. Митрофанов // Вестник машиностроения. – 2000. – № 6. – С. 16-19.
3. **Драчев, О. И.** Концепция современной технологии изготовления осесимметричных деталей малой жесткости [Текст] / О. И. Драчев, О. И. Иванов // Наука – производству. – 2001. – № 9. С. 15-17.
4. **Иванова, Т. Н.** Исследование остаточных напряжений в осесимметричных деталях [Текст] / Т. Н. Иванова, О. А. Чикишева, В. И. Потапов // Естественные и технические науки. – 2015. – С. 257-260.
5. **Лившиц, А. В.** Прогнозирование температурного поля для определения остаточных напряжений возникающих при термообработке алюминиевых сплавов [Текст] / А. В. Лившиц, А. А. Александров // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – С. 36-47.
6. **Мороз, Н. Н.** Определение оптимального диаметра заготовки и силы трения при вытяжке осесимметричных деталей [Текст] / Н. Н. Мороз // Наука та прогрес транспорту. – 2010. – С. 266-269.
7. **Гешелин, Ю. В.** Формирование остаточных напряжений в гильзах гидроцилиндров технологическими методами [Текст] / Ю. В. Гешелин, Э. К. Посвятенко // Повышение эффект. Протягив. – Рига, 1990. – С.75-81.
8. **Драчев, А. О.** Термосиловая обработка ступенчатых осесимметричных деталей [Текст] / А. О. Драчев, О. И. Драчев, Г. В. Тараненко, В. А. Тараненко, А. В. Свиць // Автоматизация: проблемы, идеи, решения : материалы международ. науч.-техн. конф. – 2009. – С. 18-21.
9. **Воронов, Д. Ю.** Обзор существующих и перспективные тенденции

развития технологий изготовления малоожестких длинномерных валов [Текст] / Д. Ю. Воронов, Н. Ю. Логинов, И. В. Шевелев // Научные труды Sworld. – 2012. – т. 8. № 3. – С. 8-12.

10. **Воронов, Д. Ю.** Перспективные тенденции совершенствования технологических процессов изготовления малоожестких деталей [Текст] / Д. Ю. Воронов, К. А. Репин // Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении : сб. науч. тр. ЗАО «ОНИКС». – Ирбит, 2015. – С. 52-60.

11. **Semenov, K. O.** Current state of science in the development of technologies thermo power processing of low-rigid details / K. O. Semenov // International Scientific Review of the Problems and Prospects of Modern Science and Education International : V International Science Conference. – United Kingdom, London. – 2015. – P. 40-44.

12. **Piechnik, S.** Combined tension-bending creep for a solid bar / S. Piechnik // Tekniska hogskolan. – Stockholm, 1962. – №194.

13. **Piechnik, S.** Steady state creep of solid bar under combined load / S. Piechnik // Tekniska hogskolan. – Stockholm, 1962. – №190.

14. **Драчев, О. И.** Определение качества холодноправленных осесимметричных деталей [Текст] / О. И. Драчев, В. Г. Митрофанов, А. Г. Схиртладзе // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2004. – С. 6-8.

15. **Воронов, Д. Ю.** Оборудование для проведения термосиловой обработки и обработки холодом [Текст] / Д. Ю. Воронов, А. В. Попов // Инновации в науке. – 2015. – № 51-1. – С. 172-178.

16. **Семенов, К. О.** Повышение стабильности геометрических параметров малоожестких деталей при термосиловой обработке [Текст] / К. О. Семенов, Д. А. Расторгуев // Научные исследования: от теории к практике: материалы II международной научно-практической конференции. – ЦНС «Интерактив плюс». – Чебоксары, 2015. – С. 196-197.

17. **Сидоренко, А. Д.** Стабилизации параметров длинномерных цилиндрических деталей [Текст] / А. Д. Сидоренко, Е. В. Мухина, А. В. Королев, А. С. Яковишин // Актуальные вопросы современной техники и

технологии : сб. докл. XXI-й Международной научной конференции. – 2015. – С. 32-35.

18. **Драчев, О. И.** Пути технологического воздействия на стабильность форм маложестких осесимметричных заготовок [Текст] / О. И. Драчев, Э. Е. Хенкина // Технол. и Автоматиз. Машиностр. – 1991. – № 48. – С.13-16.

19. **Мальцев, С. А.** Термосиловая стабилизация маложестких валов [Текст] / С. А. Мальцев, О. И. Драчев // Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении : сб. науч. тр. серия «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении». – Краматорск, 2014. – С. 78-84.

20. **Гуляев, В. А.** Методологические аспекты исследования влияния технологических режимов обработки холодом на геометрическую точность маложестких валов [Текст] / В. А. Гуляев, А. О. Кучеров // Новый университет. Серия: Технические науки. – 2014. – № 10 (32). – С. 8-11.

21. **Иванов, О. И.** Модели динамических явлений процесса механической обработки длинномерных осесимметричных деталей [Текст] / О. И. Иванов, О. И. Драчев // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2013. – С. 140-143.

22. **Драчев, О. И.** Моделирование упруго-пластических деформаций при термосиловой обработке [Текст] / О. И. Драчев, Д. А. Расторгуев, М. В. Старостина // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2012. – № 3. – С. 80-85.

23. **Воронов, Д. Ю.** Описание методики экспериментальной обработки маложестких длинномерных деталей и описание устройства для их реализации [Текст] / Д. Ю. Воронов, К. А. Репин, И. В. Шевелев // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства : труды IV международной научно-технической конференции (Резниковские чтения). – 2015. – С. 189-192.

24. **Драчев, О. И.** Повышение эффективности обработки маложестких валов при комбинированном термосиловом нагружении [Текст] / О. И.

Драчев, Д. А. Расторгуев, М. В. Старостина // Металлообработка. – 2012. – № 3 (69). – С. 30-35.

25. **Воронов, Д. Ю.** Система автоматического управления термосиловой обработки многоступенчатых маложестких валов [Текст] / Д. Ю. Воронов, О. И. Драчев // Проблемы проектирования и автоматизации машиностроительных производств, серия «Управление качеством технологических процессов в машиностроении». – Тольятти, 2013. – С. 68-76.

26. **Иванова, Т. Н.** Повышение эффективности работы осесимметричных деталей [Текст] / Т. Н. Иванова, Л. К. Шушкова, О. А. Чикишева // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – С. 194-196.

27. **Семенов, К. О.** Этапы термосиловой обработки маложестких длинномерных деталей [Текст] / К. О. Семенов, Д. А. Расторгуев // Технические науки – от теории к практике : сб. ст. по материалам XLII международной научно-практической конфер. – № 1 (38). – Изд. «СибАК». – Новосибирск, 2015. – С. 30-37.

28. **Воронов, Д. Ю.** Система автоматического управления термосиловой обработкой маложестких длинномерных валов [Текст] / Д. Ю. Воронов, О. И. Драчев, К. А. Репин // Вестник НГИЭИ. – 2016. – № 2 (57). – С. 22-29.

29. **Piechnik, S.** Stationary creep of a solid curcular bar and tube under torsion and tension / S. Piechnik // Tekniska hogskolan. – Stockholm, 1962. – №192.

30. **Бобровский, А. В.** Влияние несоосности при термосиловой обработке на коробление готовых изделий [Текст] / А. В. Бобровский, Д. Ю. Воронов, А. О. Кучеров, А. А. Солдатов // Наука, техника, образование г. Тольятти и Волжского региона : сб. науч. тр. – Тольятти, 2000. – С. 47-50.

31. **Фридман, Я. Б.** Механические свойства металлов [Текст] / Я. Б. Фридман ; М. : Машиностроение. – 1974. – Т.4 – 471 с.

32. **Александров, А. А.** Расчет термических остаточных напряжений в заготовках из алюминиевых сплавов [Текст] / А. А. Александров, А. В.

Лившиц, А. В. Рудых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – С. 52-56.

33. **Чигиринский, Ю. Л.** Повышение эффективности токарной обработки нежестких деталей за счет применения системы адаптивного управления [Текст] / Ю. Л. Чигиринский, П. С. Нестеренко // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2015. – С. 36-39.

34. **Васильевых, Л. А.** Интенсификация процессов обработки нежестких деталей [Текст] / Л. А. Васильевых ; Иркутск, 1990. – 280 с.

35. **Drucker, D.** Introduction to mechanics of deformable solids / D. Drucker ; McGraw-Hill Book Company. – New York, 1967.

36. **Шприпов, Б. У.** Технологическая наследственность состояния поверхностного слоя обработанной детали [Текст] / Б. У. Шприпов // Межвуз. Темат. науч. сб. – Уфа, 1989. – С. 113-122.

37. **Seitz, F.** Physics of metals / F. Seitz ; New York, 1999.

38. **Расторгуев, Д. А.** Формирование распределения упруго-пластических деформаций в стержнях в результате действия волновых процессов» [Текст] / Д. А. Расторгуев, К. О. Семенов // Вектор науки ТГУ. – 2015. – № 3-1 (33-1). – С. 100-105.

39. **Свинин, В. М.** Совершенствование процесса точения нежестких валов в условиях автоколебаний [Текст] / В. М. Свинин, А. В. Самсонов, Д. А. Рычков // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – С. 51-56.

40. **Расторгуев, Д. А.** Нейросетевая модель процесса термосиловой обработки [Текст] / Д. А. Расторгуев // Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении – 2016 : сб. науч. тр. – Ирбит, 2016. – С. 206-216.

41. **Schmid, E.** Plasticity of crystals / E. Schmid, W. Boas ; London, 1992.

42. **Rastorguev, D. A.** Estimation of efforts complex loading at thermopower processing / D. A. Rastorguev, K. O. Semenov // «Applied Sciences and technologies in the United States and Europe: common challenges and

scientific findings» : Papers of the 5th International Scientific Conference. – New York, USA. – 2014. – P. 132-135.

43. **Rastorguev, D. A.** Simulation of deformation at thermal power processing / D. A. Rastorguev, K. O. Semenov //«European Applied Sciences: modern approaches in scientific researches» : Papers of the 8th International Scientific Conference. – Stuttgart, Germany. – 2014. – P. 89-92.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Уведомление о положительном этапе формальной экспертизы заявки на изобретение №2016102936/02(004369)

«Устройство для термосиловой обработки маложестких валов»

ИИП

Федеральная служба по интеллектуальной
собственности
Федеральное государственное бюджетное
учреждение
«Федеральный институт
промышленной собственности»
(ФИПС)
Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993
Телефон (8-499) 240- 60- 15. Факс (8-495) 531- 63- 18

Форма № 91 ИЗ-2015
910,371

На № 16493 от 31.12.2016
(21) Наш № 2016102936/02(004369)
*При переписке просим ссылаться на номер заявки и
сообщить дату получения данной корреспонденции
от 28.04.2016*

ОИСиМИП УИР ТГУ
ул. Белорусская, 14
ГСП
г. Тольятти
Самарская обл.
445667

УВЕДОМЛЕНИЕ о положительном результате формальной экспертизы заявки на изобретение

(21) Заявка № 2016102936/02(004369)

(22) Дата подачи заявки 28.01.2016

(71) Заявитель(и) федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
"Тольяттинский государственный университет", RU

(54) Название изобретения Устройство для термосиловой обработки маложестких валов

По результатам формальной экспертизы заявитель уведомляется о том, что
формальная экспертиза заявки на изобретение, проведенная в соответствии со ст. 1384
Кодекса**, завершена с положительным результатом.

Дополнительно заявитель уведомляется о том, что:

- ходатайство о проведении экспертизы заявки по существу поступило 28.01.2016.
Результаты рассмотрения ходатайства будут сообщены дополнительно.

(см. на обороте)

01	ППД 28.01.2016	200121
----	----------------	--------



Рисунок А.1 – Уведомление о результате формальной экспертизы

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Уведомление о положительном этапе формальной экспертизы заявки на изобретение №2016102938/02(004371) «Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей»

2446

Федеральная служба по интеллектуальной
собственности
Федеральное государственное бюджетное
учреждение
«Федеральный институт
промышленной собственности»
(ФИПС)
Борожковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993
Телефон (8-499) 240-60-15, Факс (8-495) 531-63-18

Форма № 91 ИЗ-2015
910,371

На № 16492 от 31.12.2015
(21) На № 2016102938/02(004371)
При перетиске просим сослаться на номер заявки и
сообщить дату получения данной корреспонденции
от 27.04.2016

ОИСИМИП УИР ТГУ,
ул. Белорусская, 14
ГСП
г. Тольятти
Самарская обл.
445667

УВЕДОМЛЕНИЕ о положительном результате формальной экспертизы заявки на изобретение

(21) Заявка № 2016102938/02(004371)

(22) Дата подачи заявки 28.01.2016

(71) Заявитель(и) федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
"Тольяттинский государственный университет", RU

(51) Название изобретения Устройство для термосиловой обработки осесимметричных
деталей

По результатам формальной экспертизы заявитель уведомляется о том, что
формальная экспертиза заявки на изобретение, проведенная в соответствии со ст. 1384
Кодекса**, завершена с положительным результатом.

Дополнительно заявитель уведомляется о том, что:

- ходатайство о проведении экспертизы заявки по существу поступило 28.01.2016.
Результаты рассмотрения ходатайства будут сообщены дополнительно.

(см. на обороте)

01	ППД 28.01.2016	200121
----	----------------	--------



Рисунок Б.1 – Уведомление о результате формальной экспертизы

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Научная статья, входящая в перечень российских
рецензируемых научных журналов ВАК

ВЕКТОР НАУКИ Тольяттинского государственного университета	Основан в 2008 г. № 3-1(33-1) 2015 Ежеквартальный научный журнал
Учредитель — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тольяттинский государственный университет» Главный редактор <i>Криштал Михаил Михайлович, д.ф.-м.н., профессор</i> Заместитель главного редактора по общим вопросам <i>Коростелев Александр Алексеевич, д.п.н.</i> Заместитель главного редактора по техническому направлению, секция «Машиностроение и машиноведение» <i>Шайкин Александр Петрович, д.т.н., профессор</i> Заместитель главного редактора по техническому направлению, секция «Металлургия и материаловедение» <i>Мерсон Дмитрий Львович, д.ф.-м.н., профессор</i> Заместитель главного редактора по техническому направлению, секция «Химическая технология» <i>Остапенко Геннадий Иванович, д.х.н., профессор</i> Заместитель главного редактора по гуманитарному направлению, секция «Социологические науки» <i>Иванова Татьяна Николаевна, д.соц.н., доцент</i> Заместитель главного редактора по гуманитарному направлению, секция «Языкознание» <i>Тараносова Галина Николаевна, д.п.н., профессор</i> <i>Жданова Елена Юрьевна — ответственный секретарь</i>	Входит в систему «Российский индекс научного цитирования» и перечень российских рецензируемых научных журналов. Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-36741 от 1 июля 2009 г.). Компьютерная верстка: Н.А. Никитенко Технический редактор: Н.А. Никитенко Адрес редакции: 445667, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Белорусская, 14 Тел./факс: (8482) 54-63-64 vektornaukitgu@yandex.ru http:// www.tltsu.ru
© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», 2015	Подписано в печать 30.09.2015. Формат 60х84 1/8. Печать оперативная. Усл. п. л. 19,5. Тираж 500 экз. Заказ 3-365-15. Издательство Тольяттинского государственного университета 445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

Рисунок В.1 – Обложка журнала

ФОРМИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В СТЕРЖНЯХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЕЙСТВИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2015

Д.А. Расторгуев, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

К.О. Семенов, магистрант кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: остаточные напряжения; нежесткий вал; волновая механика; фазовая траектория; реологическая модель; локальность; деформация.

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы обеспечения равномерности деформирования маложестких валов, винтов при одновременном действии продольных нагрузок и нагрева при термосиловой обработке. Однородность остаточных деформаций в продольном направлении обеспечивает выравнивания остаточных технологических напряжений, а это ведет к минимальному короблению в осевом направлении вследствие релаксации напряжений. Особенно актуальны эти вопросы для ходовых винтов, у которых жесткие требования по точности шага. В работе приведены результаты экспериментальных исследований по влиянию основных технологических режимов термосиловой обработки: величины деформации, скорости деформирования и температуры нагрева на равномерность деформирования по длине вала, выражавшейся коэффициентом локальности, который определялся как отношение максимальной деформации одного из участков к средней или минимальной деформации участков. Приведено сравнение кривых упрочнения, полученных при теоретическом моделировании процесса деформирования и из результатов натурного эксперимента, из которого следует вывод о неустойчивом, колебательном характере деформирования на стадии пластического течения. Из различных теорий, связанных с возможностью возникновения волн деформаций при нагружении деталей, в упругой постановке задачи, ударных возмущений для объяснения неравномерности распределения пластических деформаций по длине образца была принята волновая теория распространения упруго-пластических деформаций при статическом нагружении. На основе реологической модели Фойхта были получены фазовые траектории для различных параметров системы, которые показали возможность реализации в системе затухающих волновых процессов. С учетом этого предлагается управлять процессом формирования распределения остаточных деформаций с учетом формирующихся зон узлов и пучностей упруго-пластических деформаций.

ВВЕДЕНИЕ

Для длинномерных маложестких деталей типа вал основная трудность при их изготовлении заключается в снижении поперечного коробления в межоперационный и в эксплуатационный периоды. Для винтов и ходовых валов, которые относятся к группе валов, помимо поперечной деформации, нерешенной проблемой является обеспечение равномерных физико-механических свойств и геометрии вдоль оси детали. Это связано с жесткими требованиями по шагу резьбы. При релаксации остаточных технологических напряжений происходит деформация вала в продольном направлении, что с неизбежностью приводит к потере точности шага резьбы и снижению кинематической точности изделия в целом. Поэтому при изготовлении деталей данной группы нужно стремиться к обеспечению не только поперечной, но и продольной устойчивости.

Релаксационные процессы в материале заготовки ведут к потере точности резьбы по шагу за счет самопроизвольных деформационных процессов в осевом направлении. Степень коробления зависит от характера и интенсивности распределения остаточных напряжений, особенностей геометрии детали и физико-механических свойств ее материала. Чтобы снизить коробление, необходимо либо повысить сопротивление металла пластическому деформированию, т. е. его релаксационную стойкость, либо уменьшить действующие напряжения. В последнее время получают развитие методы старения, повышающие релаксационную стойкость материала с небольшим снижением уровня остаточных напряжений.

К ним относятся статическое и динамическое нагружение, старение тепловыми ударами, вибрационное старение, обработка ультразвуком, стабилизация размеров деталей в магнитном поле, обработка электрогидравлическим ударом, облучение рентгеновскими лучами. Существуют способы снижения уровня остаточных напряжений в маложестких деталях в зависимости от физико-механических свойств их материала: пластическая деформация, отжиг, отпуск и т. д.

К недостаткам традиционной термообработки можно отнести следующее: остаточные напряжения снимаются не полностью в зависимости от температуры обработки, длительности выдержки, материала, массивности изделия; при нагреве и последующем охлаждении заготовка с остаточными напряжениями меняет свою форму и размеры; термообработка длинномерных деталей является трудоемкой операцией, снижающей производительность процесса. Существенное влияние при этом оказывает скорость охлаждения после термической операции, так как при остывании изделий возможно наведение новых остаточных напряжений и коробление длинномерных заготовок.

Процесс деформации в протяженных заготовках является неравномерным. Волновой характер процесса деформирования рассматривается или в задачах для упругой деформации [1; 2], или для упруго-пластической деформации с учетом внешних колебаний. Причем в последнем случае рассматриваются в основном вопросы рассеяния энергии в материале [3; 4]. Также рассматривается волновой процесс деформирования при

ударных воздействиях [5–7]. Также отмечен феноменологический подход для описания волнового процесса упруго-пластического деформирования, в том числе в виде модели Фойхта для распределенных систем [8–11]. При этом модель Фойхта ограниченно подходит только для определенных материалов и случаев деформирования.

Для обеспечения точности обработки маложестких валов за счет равномерности их деформирования в продольном направлении, сохранения размерной стабильности необходимо формировать напряженно-деформированное состояние заготовки с учетом локализации деформации автоволнового характера. Для этого разработана технология термосиловой обработки (ТСО), заключающаяся в одновременном приложении осевой нагрузки и высокой температуры [9–19]. Целью является минимизация и стабилизация остаточных напряжений в продольном и поперечном направлениях длинномерной детали с одновременным формированием геометрии заготовки. Усилия (напряжения) прилагаются на уровне, превышающем предел относительной пропорциональности $\sigma_{0,2}$, т. е. в зоне пластических деформаций. Для сведения к минимуму коробления (автодеформаций валов) целесообразно обеспечить при термообработке под нагрузкой достаточное развитие пластической деформации. Соответственно, необходимо ис-

следовать распределение упруго-пластических деформаций, характер их локализации и распределение остаточных напряжений в стержнях на основных формообразующих операциях.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Резко выраженная локализация деформации по длине вала наблюдается при больших степенях формоизменения при растяжении в виде шейки. При описании локализации деформации она рассматривается как неравномерность формоизменения, а не закономерный физический процесс. В процессе развития локальной деформации возникают значительные колебания истинных напряжений, которые обусловлены сменой упрочнений и разупрочнений. Данный процесс характеризуется амплитудой и частотами. Локализация деформации происходит после достижения порога предела текучести и проявляется как возникновение и приостановка областей локального течения до появления устойчивой шейки.

Результат моделирования упруго-вязко-пластической деформации на основе реологической модели показан на рис. 1 [19]. Но реальная кривая упрочнения имеет не гладкий характер, а явно выраженные релаксационные возмущения, которые указывают на неравномерный характер деформирования (рис. 2).

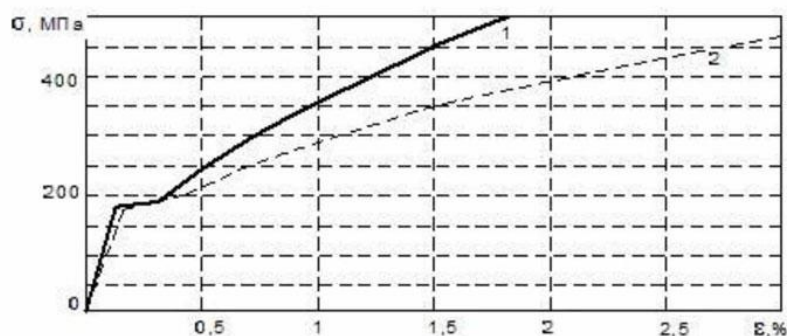


Рис. 1. Кривые упрочнения при 20 °С (сталь 35):
1 — с учетом упрочнения; 2 — без учета упрочнения

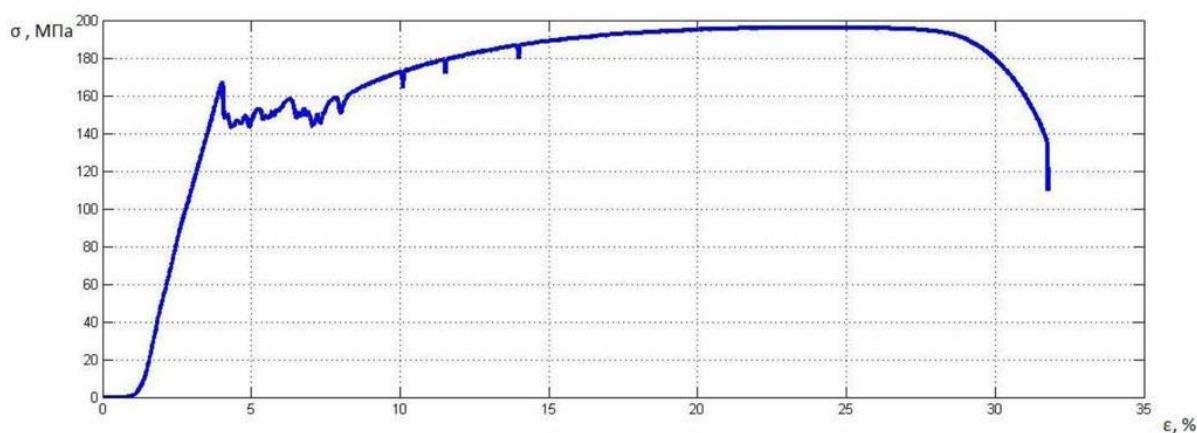


Рис. 2. Экспериментальная кривая упрочнения стали 35

Ниже приведены результаты моделирования волнового процесса на основе элементарной реологической модели Фойхта в виде системы уравнений [8]:

$$\begin{cases} \sigma' = -\frac{\sigma - \sigma_0}{T} - g \cdot \varepsilon \cdot \sigma, \\ \varepsilon' = -\frac{\varepsilon}{\tau} + \frac{\sigma}{\eta}, \end{cases} \quad (1)$$

где τ – время релаксации деформационных процессов, с;
 η – динамическая вязкость;
 σ – напряжения, МПа;
 σ_0 – уровень напряжений, до которого они релаксируют на концентраторе, МПа;
 T – время релаксации напряжений, с;
 g – константа;
 ε – деформация.

Граничные условия для данной системы:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial \sigma}{\partial r} \Big|_{r=l_0} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \Big|_{r=l_0} = 0,$$

где r – линейный размер образца, м;
 l_0 – длина образца, м.

Решение системы:

$$\sigma = \sigma_m e^{pt}; \varepsilon = \varepsilon_m e^{pt},$$

где комплексная частота p деформационного процесса

$$p^2 + \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{T} + \frac{g\sigma_0 T}{\eta} \right) p + \left(\frac{1}{\tau T} + \frac{2g\sigma_0}{\eta} \right) = 0.$$

Для определения возможности возникновения автоволновых процессов для системы (1) построим фазовые портреты (рис. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты экспериментальных исследований [20], где изучались вопросы локализации деформации с использованием большого объема экспериментальных данных при варьировании технологических факторов (величины деформации, скорости деформирования и температуры нагрева) (пример такой гистограммы на рис. 4), показывают, что неравномерность деформирования по длине может являться не только следствием неравномерности исходных свойств материала, но волновым характером процесса пластической деформации.

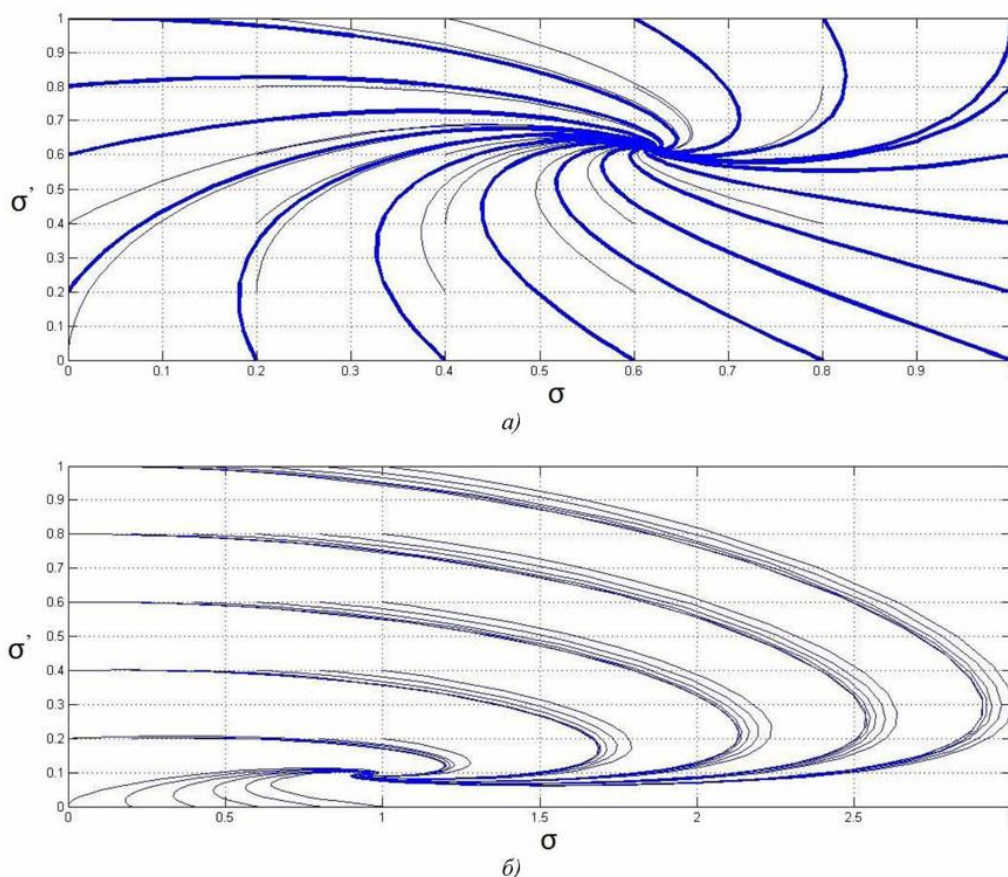


Рис. 3. Фазовые портреты системы (1) с различными параметрами модели:
 а – быстрое затухание в системе; б – медленное затухание в системе

При переходе за предел текучести одновременного охвата пластической деформацией всего объема металла не происходит до тех пор, пока все микрообъемы металла не окажутся охваченными пластической деформацией критической величины. Только после этого возможна одновременная деформация всего объема материала.

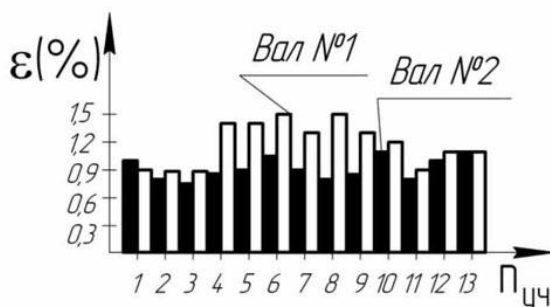


Рис. 4. Распределение деформаций по участкам для экспериментальных образцов

Трудность определения данной пороговой величины деформации заключается в том, что эта величина зависит от таких параметров, как размер зерна, вид термической обработки, величина скорости деформирования и т. д. В качестве оценки, характеризующей среднюю неравномерность пластических деформаций, взят критерий локальности $K_{cp} = \varepsilon_{max} / \varepsilon_{cp}$.

Значение K_{cp} , близкое к единице, свидетельствует об однородности пластических деформаций материала по всей длине заготовки. Из результатов исследований видно, что значение K_{cp} с увеличением средней деформации постепенно уменьшается. При минимальной деформации $\varepsilon \leq 1\%$ наблюдается значительный разброс данных и большое значение коэффициента K_{cp} (от 1,5 до 2) на рабочих температурных режимах.

Пластическая деформация в поликристаллических металлах в условиях однородного напряженного состояния характеризуется локальностью протекания. Здесь следует различать микро- и макролокальность (неоднородность) пластической деформации. Неравномерность пластической деформации в микрообъемах оказывает значительное влияние на процесс пластического течения в целом и на критерии прочности, однако количественного влияния микронеоднородности на макронеоднородность пластической деформации пока еще сделать не удастся. Неравномерность пластической деформации имеет две фазы протекания. Первая — одновременная, но неравномерная деформация микрообъема металла имеет решающее значение для оценки неоднородности пластических свойств материалов. Поэтому критерий K_{cp} оказывается чувствителен к изменению структуры металла. Если в результате некачественной термической обработки оказались участки с различными по величине зернами, то величина K_{cp} резко возрастает.

При ТСО при растяжении вдоль оси вала происходят периодические изменения структуры материала, связанные с колебательным характером изменения раз-

меров дефектных элементов. В ходе экспериментов над образцами из малоуглеродистой стали [12] выявлена логарифмическая зависимость величины длины пластической волны λ от размеров зерна, линейная — от размера поперечника образца. Скорость же распространения волны пластической деформации v возрастает с увеличением скорости нагружения и не зависит от размеров зерен и размеров вала.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты экспериментальных и теоретических исследований показывают, что неравномерность пластической деформации длинномерных валов при ТСО является результатом действия не только исходной неоднородности физико-механических свойств материала заготовки, его структуры, но и результатом действия собственно волнового процесса пластической деформации.

Для повышения качества ТСО необходимо учитывать влияние частотных параметров данной волны на распределение узлов и пучностей зон пластической деформации по длине заготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Работнов Ю.И. Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука, 1977. 350 с.
2. Работнов Ю.И. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.
3. Писаренко Г.С. Обобщенная нелинейная модель учета рассеяния энергии при колебаниях. Киев: Наукова думка, 1985. 236 с.
4. Писаренко Г.С., Богинич О.Е. Колебания кинематически возбуждаемых систем с учетом диссипации энергии. Киев: Наукова думка, 1982. 220 с.
5. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч. 1. Деформация и разрушение. М.: Машиностроение, 1974. 472 с.
6. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.
7. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. М.: Иностранная литература, 1955. 194 с.
8. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 229 с.
9. Зуев Л.Б. О волновом характере пластического течения. Макроскопические волны локализации деформации // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № 3. С. 47–54.
10. Зуев Л.Б., Данилов Л.Б. Медленные волновые процессы при деформации твердых тел // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6. № 1. С. 75–94.
11. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. 1998. Т. 1. № 1. С. 5–22.
12. Драчев О.И., Воронов Д.Ю., Расторгуев Д.А. Новая технология термосиловой обработки малоуглеродистых сталей // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2004. № 1. С. 32–35.
13. Драчев О.И., Воронов Д.Ю., Расторгуев Д.А. Экспериментальная установка для равномерного осевого пластического деформирования малоуглеродистых сталей при термосиловой обработке // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2004. № 9. С. 15–18.

14. Драчев О.И. Технология изготовления маложестких осесимметричных деталей. СПб.: Политехника, 2005. 289 с.
15. Драчев О.И., Ареткин А.В., Драчев А.О., Яшкина Т.Л. Способ и устройство для термосиловой обработки осесимметричных длинномерных деталей : патент РФ № 2235794; заявл. 20.02.2001; опубл. 10.09.2004.
16. Драчев О.И. Управление технологической наследственностью деталей малой жесткости. Ирбит: ОНИКС, 2011. 192 с.
17. Драчев О.И. Повышение точности и стабильности форм нежестких осесимметричных деталей методом термосиловой обработки. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 267 с.
18. Репин К.А., Драчев О.И., Воронов Д.Ю. Новые технологии обработки маложестких длинномерных деталей и описание устройства для их реализации // Механика XXI века: XII Всерос. науч.-техн. конф. Братск: Братский гос. ун-т, 2013. С. 135–139.
19. Драчев О.И., Расторгуев Д.А., Старостина М.В. Моделирование упруго-пластических деформаций при термосиловой обработке // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 3. С. 80–85.
20. Драчев О.И., Расторгуев Д.А., Старостина М.В. Повышение эффективности обработки маложестких валов при комбинированном термосиловом нагружении // Металлообработка. 2012. № 3. С. 30–35.
8. Panin V.E., Likhachev V.A., Grinyaev Yu.V. *Strukturnye urovni deformatsii tverdykh tel* [Structural levels of solid bodies deformation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985, 229 p.
9. Zuev L.B. On the wave character of plastic flow. Macroscopic autowaves of deformation localization. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2006, vol. 9, no. 3, pp. 47–54.
10. Zuev L.B., Danilov V.I. Slow autowave processes in the course of deformation of solid. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2003, vol. 6, no. 1, pp. 75–94.
11. Panin V.E. Foundations of physical mesomechanics. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 1998, vol. 1, no. 1, pp. 5–22.
12. Drachev O.I., Voronov D.Yu., Rastorguev D.A. New technology of thermo-power processing of elastic shafts. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2004, no. 1, pp. 32–35.
13. Drachev O.I., Voronov D.Yu., Rastorguev D.A. Experimental plant for uniform axle plastic deformation of non-hard parts during thermo-power processing. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2004, no. 9, pp. 15–18.
14. Drachev O.I. *Tekhnologiya izgotovleniya malozhestkikh osesimmetrichnykh detaley* [Technology of production of non-hard axisymmetric parts]. S. Petersburg, Politehnika Publ., 2005, 289 p.
15. Drachev O.I., Argetkin A.V., Drachev A.O., Yashkina T.L. *Sposob i ustroystvo dlya termosilovoy obrabotki osesimmetrichnykh dlinnomernykh detaley* [Method and device for thermo-power processing of axisymmetric long parts]. Patent RF no. 2235794, 2004.
16. Drachev O.I. *Upravlenie tekhnologicheskoy nasledstvennostyu detaley maloy zhestkosti* [Control of technological heredity of fragility parts]. Irbit, ONIKS Publ., 2011, 192 p.
17. Drachev O.I. *Povyshenie tochnosti i stabilnosti form nezhestkikh osesimmetrichnykh detaley metodom termosilovoy obrabotki* [The improvement of accuracy and stability of forms of non-hard axisymmetric parts using the method of thermo-power processing]. Stary Oskol, TNT Publ., 2011, 267 p.
18. Repin K.A., Drachev O.I., Voronov D.Yu. New technologies of processing of fragile long parts and description of the device for their implementation. *Materialy XII Vseros. nauchno-tekhn. konf. "Mekhanika XXI veku"*. Bratsk, Bratskiy gos. universitet Publ., 2013, pp. 135–139.
19. Drachev O.I., Rastorguev D.A., Starostina M.V. Modeling of the elastic-plastic deformations at thermal force processing. *Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 3, pp. 80–85.
20. Drachev O.I., Rastorguev D.A., Starostina M.V. Increase of efficiency of processing of low-rigid shaft at the combined thermopower loading. *Metallrobrabotka*, 2012, no. 3, pp. 30–35.

REFERENCES

1. Rabotnov Yu.I. *Elementy nasledstvennoy mekhaniki tverdykh tel* [The elements of hereditary mechanics of solid bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 350 p.
2. Rabotnov Yu.I. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Solid mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 744 p.
3. Pisarenko G.S. *Obobshchennaya nelineynaya model' ucheta rasseyaniiy energii pri kolebaniyakh* [General nonlinear model of energy dissipation evaluation during oscillations]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1985, 236 p.
4. Pisarenko G.S., Boginich O.E. *Kolebaniya kinematically vozbuzhdaemykh system s uchetom dissipatsii energii* [Fluctuations of kinematically induced systems with the account of energy dissipation]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1982, 220 p.
5. Fridman Ya.B. *Mekhanicheskie svoystva metallov. Ch. 1. Deformatsiya i razrushenie* [Mechanical properties of metals. P. 1. Deformation and destruction]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 472 p.
6. Kachanov L.M. *Osnovy teorii plastichnosti* [Foundations of the theory of plasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1969, 420 p.
7. Kolsky G. *Volny napryazheniya v tverdykh telakh* [Stress waves in solid bodies]. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1955, 194 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Научная статья, входящая в сборник научных работ
в рамках зарубежной конференции

**LTD
«OLIMP»**

**PUBLISHING HOUSE
«PROBLEMS OF
SCIENCE»**

INTERNATIONAL SCIENTIFIC REVIEW 2015. № 6 (7)

**V INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND
PRACTICAL CONFERENCE
«INTERNATIONAL SCIENTIFIC REVIEW
OF THE PROBLEMS AND PROSPECTS OF
MODERN SCIENCE AND EDUCATION»**

**LONDON. UNITED KINGDOM
7-8 SEPTEMBER
2015**

ISSN 2410-275X

UDC 08

RESEARCH JOURNAL «INTERNATIONAL SCIENTIFIC REVIEW» PREPARED BY
USING THE V INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE
«INTERNATIONAL SCIENTIFIC REVIEW OF THE PROBLEMS AND PROSPECTS
OF MODERN SCIENCE AND EDUCATION»

RESPONSIBLE FOR RELEASE
EDITOR IN CHIEF RESEARCH JOURNAL
«INTERNATIONAL SCIENTIFIC REVIEW»,
VALTSEV S.

EDITORIAL BOARD

Abdullaev K. (PhD in Economics, Azerbaijan), *Alieva V.* (PhD in Philosophy, Republic of Uzbekistan), *Alikulov S.* (D.Sc. in Engineering, Republic of Uzbekistan), *Anan'eva E.* (PhD in Philosophy, Ukraine), *Asaturova A.* (PhD in Medicine, Russian Federation), *Askarhodzhaev N.* (PhD in Biological Sc., Republic of Uzbekistan), *Bajtasov R.* (PhD in Agricultural Sc., Belarus), *Bakiko I.* (PhD in Physical Education and Sport, Ukraine), *Bahor T.* (PhD in Philology, Russian Federation), *Blejh N.* (D.Sc. in Historical Sc., PhD in Pedagogic Sc., Russian Federation), *Bogomolov A.* (PhD in Engineering, Russian Federation), *Gavrilenkova I.* (PhD in Pedagogic Sc., Russian Federation), *Grinchenko V.* (PhD in Engineering, Russian Federation), *Gubareva T.* (PhD Laws, Russian Federation), *Gutnikova A.* (PhD in Philology, Ukraine), *Demchuk N.* (PhD in Economics, Ukraine), *Divnenko O.* (PhD in Pedagogic Sc., Russian Federation), *Dolenko G.* (D.Sc. in Chemistry, Russian Federation), *Zhamuldinov V.* (PhD Laws, Russian Federation), *Il'inskih N.* (D.Sc. Biological, Russian Federation), *Kajrakbaev A. K.* (PhD in Physical and Mathematical Sciences, Kazakhstan), *Koblanov Zh.* (PhD in Philology, Kazakhstan), *Koval'jov M.* (PhD in Economics, Belarus), *Kravcova T.* (PhD in Psychology, Kazakhstan), *Kuz'min S.* (D.Sc. in Geography, Russian Federation), *Kurmanbaeva M.* (D.Sc. Biological, Kazakhstan), *Kurpajanidi K.* (PhD in Economics, Republic of Uzbekistan), *Maslov D.V.* (PhD in Economics, Russian Federation), *Matveeva M.* (PhD in Pedagogic Sc., Russian Federation), *Macarenko T.* (PhD in Pedagogic Sc., Russian Federation), *Nazarov R.* (PhD in Philosophy, Republic of Uzbekistan), *Ovchinnikov Ju.* (PhD in Engineering, Russian Federation), *Petrov V.* (D.Arts, Russian Federation), *Rozyhodzhaeva G.* (Doctor of Medicine, Republic of Uzbekistan), *San'kov P.* (PhD in Engineering, Ukraine), *Selitrenikova T.* (PhD in Pedagogic Sc., Russian Federation), *Sibircev V.* (D.Sc. in Economics, Russian Federation), *Skripko T.* (PhD in Economics, Ukraine), *Sopov A.* (D.Sc. in Historical Sc., Russian Federation), *Strekalov V.* (D.Sc. in Physical and Mathematical Sciences, Russian Federation), *Subachev Ju.* (PhD in Engineering, Russian Federation), *Sulejmanov S.F.* (PhD in Medicine, Republic of Uzbekistan), *Fedos'kina L.* (PhD in Economics, Russian Federation), *Cuculjan S.* (PhD in Economics, Russian Federation), *Chiladze G.* (Doctor of Laws, Georgia), *Shamshina I.* (PhD in Pedagogic Sc., Russian Federation), *Sharipov M.* (PhD in Engineering, Republic of Uzbekistan), *Shevko D.* (PhD in Engineering, Russian Federation).

Phone: +7 (910) 690-15-09.

<http://scienceproblems.ru>

e-mail: admbestsite@yandex.ru

© «INTERNATIONAL SCIENTIFIC REVIEW»
© PUBLISHING HOUSE «PROBLEMS OF SCIENCE»

**Current state of science in the development of technologies
thermo power processing of low-rigid details
Semenov K. (Russian Federation)**

**Современное состояние науки в развитии технологий
термосиловой обработки маложестких деталей
Семенов К. О. (Российская Федерация)**

*Семенов Кирилл Олегович / Semenov Kirill – магистрант,
кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»,
Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти*

Аннотация: в статье рассмотрены основные проблемы, возникающие при изготовлении маложестких деталей типа «вал», приведены методы и способы для повышения геометрической точности и качества деталей. Проведен сравнительный анализ технологий термосиловой обработки.

Abstract: the article considers the main problems arising at production of low-rigid details type «shaft», shows a methods and modes for increase of geometrical accuracy and qualities of details. Held comparative analysis of technologies thermo power processing.

Ключевые слова: термообработка, термосиловая обработка, остаточные напряжения, деформация, маложесткие детали.

Keywords: heat treatment, thermo power processing, residual tension, deformation, low-rigid details.

Введение

Во многих современных агрегатах, машинах и приборах применяются маложесткие детали (МЖД) типа «вал». Непрерывный рост объема производства МЖД обусловлен совершенствованием прочностных расчетов, оптимизацией форм деталей и конструкций, постоянным снижением металлоемкости изделий и возрастающим выпуском прецизионных машин.

Диспропорции в конструктивных параметрах МЖД создают серьезные технологические трудности в производстве, основные причины которых: значительные упругие и пластические деформации; коробление заготовок, вызванное неравномерными остаточными напряжениями, вносимыми на всех стадиях обработки.

В большинстве случаев такие детали работают в условиях действия больших знакопеременных нагрузок и испытывают значительные упругие деформации растяжения, изгиба и кручения. При больших скоростях вращения и малой жесткости, даже весьма незначительная величина коробления приводит к нарушению технологических баз, погрешностям формы и размеров деталей, поверхностным дефектам, ограничению режимов резания, что, в конечном счете, ведет, к снижению эксплуатационной надежности МЖД.

Анализ производственного опыта изготовления МЖД в индивидуальном и мелкосерийном и серийном производствах показал, что традиционные способы обработки маложестких длинномерных осесимметричных деталей малоэффективны, и поэтому вопросы их изготовления на практике решаются ограничением режимов обработки. Такой путь существенно увеличивает трудоемкость обработки и не гарантирует требуемое качество изделий.

Поэтому совершенствование технологических процессов изготовления МЖД является важной задачей, повышающей эффективность производства и качества продукции машиностроения.

Остаточные напряжения в технологическом процессе изготовления маложестких деталей

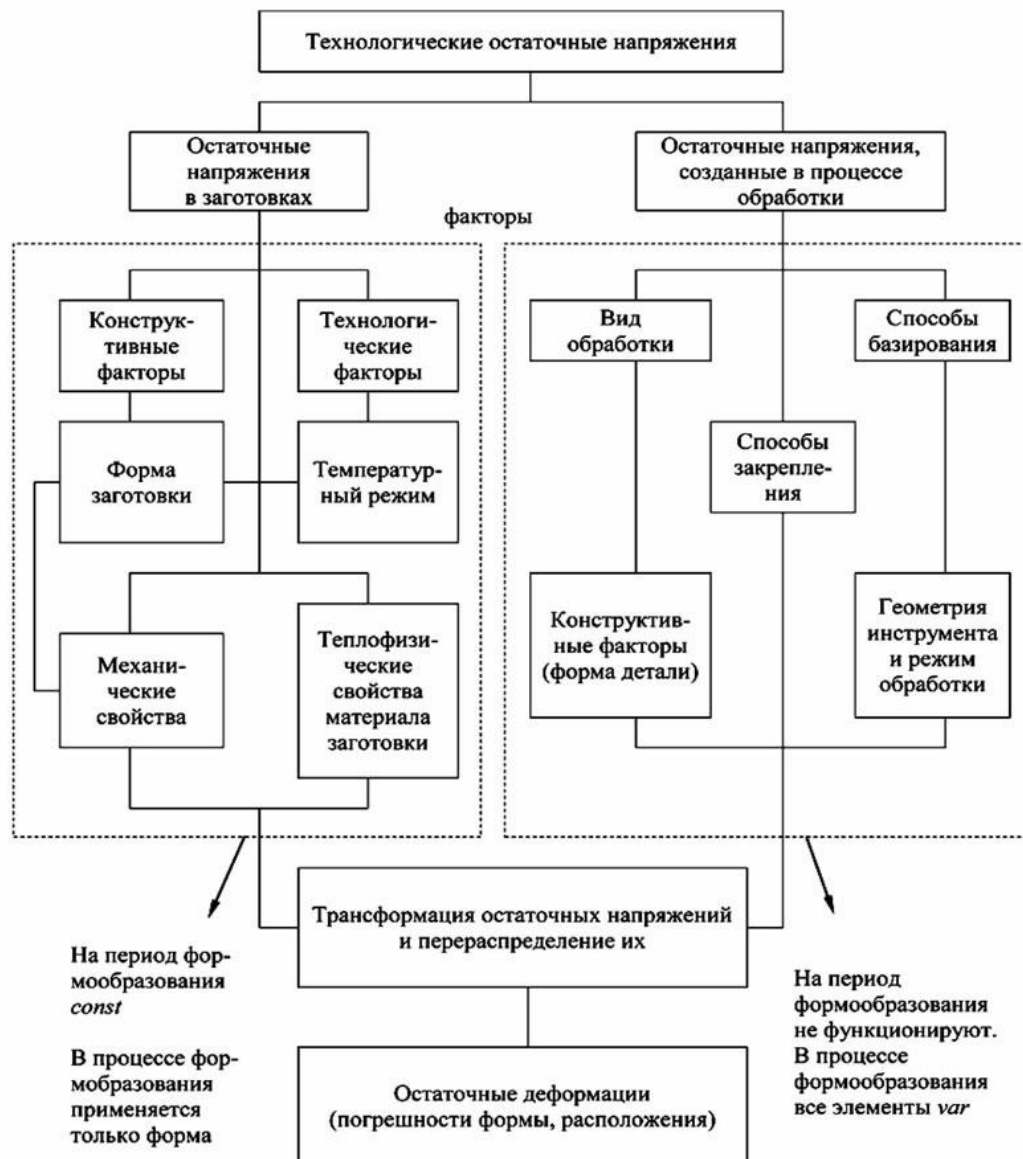


Рис. 1. Схема формирования погрешностей обработки от остаточных напряжений

Остаточные напряжения возникают почти при всех технологических процессах термической, механической обработки, обработке металлов давлением и многих других видах обработки. Причины образования остаточных напряжений многообразны (неоднородность пластической деформации, неоднородность температурного поля, фазовые превращения).

При воздействии внешних нагрузок в процессе дальнейшей механической обработки или эксплуатации, остаточные напряжения, суммируясь с напряжениями от внешних сил, могут превысить предел упругости, что приводит к неравномерной пластической деформации.

При термообработке, предназначенной для уменьшения остаточных напряжений, они могут вызвать деформирование изделия. При резком изменении температуры в изделии с остаточными напряжениями может произойти не только искажение размеров и формы, но и разрушение, особенно опасны при этом растягивающие напряжения. Остаточные напряжения снижают прочность изделий при переменных и циклических нагрузках [1].

Технологические процессы, применяемые для стабилизации форм и размеров маложестких деталей



Рис. 2. Методы снижения остаточных напряжений

Вибрационный метод применяется для снятия остаточных напряжений в заготовках, полученных методами пластической деформации, вызванных механической обработкой – фрезерованием, строганием, шлифованием, протягиванием, сверлением и т. д.

Термообработка назначается для снятия остаточных напряжений, с целью стабилизации внутренних напряжений и размеров деталей. Этот процесс резко снижает уровень остаточных напряжений и дает достаточно высокое качество стабилизации.

Построение традиционного технологического процесса термической обработки требует применение нескольких промежуточных отпусков, что не обеспечивает высокой производительности и может привести к увеличению стоимости обработки.

При отпуске, для снятия остаточных напряжений основным механизмом изменения остаточных напряжений является их релаксация, которая протекает более быстро при повышении температуры.

Чтобы устранить пластическую деформацию, необходимо либо повысить сопротивление металла пластическому деформированию, т. е. его релаксационную стойкость, либо уменьшить действующие напряжения.

В последнее время получают развитие методы старения, повышающие релаксационную стойкость материала, с небольшим снижением уровня остаточных напряжений. К ним относятся статическое и динамическое нагружение, старение тепловыми ударами, вибрационное старение, обработка ультразвуком. Однако ни одним из данных методов невозможно добиться равномерного распределения остаточных напряжений без управления ходом данных процессов.

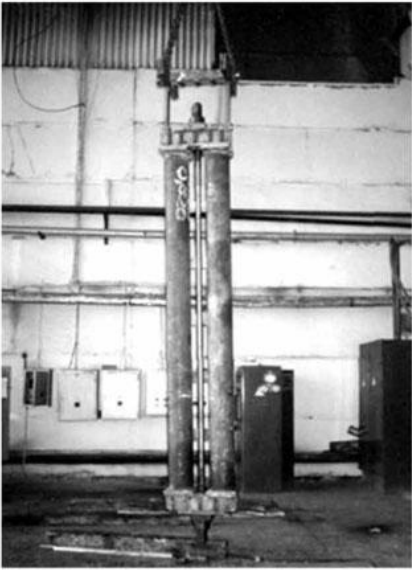
Проведенный анализ работ по повышению точности обработки маложестких деталей и управлению параметрами, влияющими на точность обработки, показывает, что используемые в них модели технологической системы недостаточно полно отражают поведение маложесткой заготовки при термообработке.

В теоретических исследованиях показано, что для минимизации технологической наследственности, передаваемой от операции, необходимо снизить уровень

остаточных напряжений и создать равномерное напряженное состояние по всей длине заготовки, что, естественно, приведет к равномерной релаксации напряжений и минимальному короблению готовых изделий при их эксплуатации.

Для этой цели была введена в технологический процесс операция термосиловой обработки – ТСО. Трудность управления этим процессом состоит в том, что физико-механические свойства материала, из которого изготавливаются детали, настолько разнообразны, а их поведение зависит от внешних условий при их эксплуатации, что найти единый закон управления просто невозможно. В первом приближении ставится задача получить тело равного сопротивления, то есть тело, во всех точках которого возникают одинаковые микроскопические напряжения [2, 3].

Таблица 1. Основные методы реализации технологий ТСО и их описание

Патент № 2260628	
	• нагрев заготовки осуществляется не равномерно; • позволяет формировать только напряжения растяжения; • неравномерность нагрева и охлаждения; • большие габариты
Патент № 2381281	
	• нагрев заготовки осуществляется равномерно; • позволяет формировать не только напряжения растяжения, но и касательные напряжения; • температура заготовки остается равномерной в течение всего цикла обработки; • меньшие габариты

Заключение

Рассмотренные методы повышения качества готовых изделий малой жесткости показывают, что каждый из них применяют в конкретном случае. Их разнообразие подчеркивает отсутствие единой технологии, пригодной для обработки широкой номенклатурой маложестких деталей. При этом ни один из существующих способов не обеспечивает возможности высокопроизводительной и точной обработки, с учетом сохранения форм и размеров маложестких деталей.

Это инициировало развитие теории комплексного нагружения. Особенностью такого вида нагружения является наложение дополнительного силового или кинематического воздействия в сочетании с растяжением. В качестве такого дополнительного воздействия, например, может быть крутящий момент.

Задачей комплексного нагружения является повышение эффективности термосиловой обработки деталей, работающих в условиях действия осевых нагрузок и крутящих моментов, управлению технологической наследственностью, выравниванию остаточных напряжений, которые влияют не только на геометрическую точность в процессе изготовления, но и на эксплуатационную точность и надежность работы машин и механизмов.

Литература

1. Драчев О. И. Технология изготовления маложестких осесимметричных деталей. / О. И. Драчев. – М.: Политехника, 2005. – 289 с.
2. Патент РФ № 2381281, МПК кл. C21D8/00, C21D9/28. Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей. / Драчев О. И., Расторгуев Д. А., Драчев А. О.
3. Патент РФ № 2260628, МПК кл. C21D9/06, Расторгуев Д. А., Драчев О. И., Воронов Д. Ю., Гуляев В. А. Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей. 25.12.2003. Оpubл. 20.09.2005.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Научная статья, входящая в сборник научных работ
в рамках Международной научно-практической конференции

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Чувашский государственный университет
имени И.Н. Ульянова»

Харьковский государственный педагогический университет
имени Г.С. Сковороды

Актюбинский региональный государственный университет
имени К. Жубанова

Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс»

Научные исследования: от теории к практике

Сборник материалов
II Международной научно-практической конференции

Чебоксары 2015

Рисунок Д.1 – Обложка журнала

УДК 001
ББК 72
НЗ4

Рецензенты: **Бережная Светлана Викторовна**, д-р филос. наук, профессор, декан исторического факультета ХНПУ имени Г.С. Сковороды, Украина
Верещак Светлана Борисовна, канд. юрид. наук, заведующий кафедрой финансового права юридического факультета ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»
Иваницкий Александр Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, профессор, декан факультета прикладной математики, физики и информационных технологий ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»

**Редакционная
коллегия:**

Широков Олег Николаевич, главный редактор, д-р ист. наук, профессор, декан историко-географического факультета ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», член общественной палаты Чувашской Республики 2-го созыва.

Абрамова Людмила Алексеевна, д-р пед. наук, профессор ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»

Яковлева Татьяна Валериановна, ответственный редактор, генеральный директор ЦНС «Интерактив плюс»

Шоркина Марина Владимировна, помощник редактора

Дизайн

обложки: **Лаврентьева Анна Владимировна**

НЗ4 Научные исследования: от теории к практике : материалы II Междунар. науч.–
практ. конф. (Чебоксары, 12 февр. 2015 г.) / редкол.: О. Н. Широков [и др.]. –
Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – 306 с.

ISBN 978-5-906626-61-5

В сборнике представлены материалы участников II Международной научно-практической конференции, посвященные актуальным вопросам науки и образования. Приведены результаты теоретических и прикладных изысканий представителей научного и образовательного сообщества в данной области. Предназначен для широкого круга читателей.

ISBN 978-5-906626-61-5

УДК 001

ББК 72

© Коллектив авторов, 2015

© Центр научного сотрудничества

«Интерактив плюс», 2015



Семенов Кирилл Олегович

магистрант

Расторгуев Дмитрий Александрович

канд. техн. наук, доцент

ГОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет»

г. Тольятти, Самарская область

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАЛОЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОЙ ОБРАБОТКЕ

Аннотация: в статье описывается новая технология термосиловой обработки мало- жестких деталей. Авторами приводится разработанная на основе математической моде- ли структурная схема процесса термосиловой обработки.

Ключевые слова: термосиловая обработка, остаточные напряжения, деформация.

В настоящее время к мало жестким деталям, предъявляют высокие требования по точно- сти и качеству их изготовления. Особое значение имеет термическая обработка мало жест- ких деталей, так как она формирует физико-механические свойства и структуру материала, задает распределение остаточных напряжений, что будет определять геометрическую точ- ность в после операционные и эксплуатационный периоды.

После механической и термической обработки возникают остаточные напряжения пер- вого рода. Потеря геометрической точности изделия напрямую связана с возникновением остаточных напряжений первого рода, возникающих из-за неравномерности пластических деформаций металла, неоднородности температурного поля заготовки в процессе охлажде- ния, разновременности протекания структурных превращений [3].

Для количественного исследования процессов, протекающих при термообработке, и их анализа, необходимо их математическое описание как объектов управления.

Математическая модель упруго-вязкопластической деформации [1] имеет вид:

$$\sigma(t) = 2 \cdot G \cdot \left[\varepsilon(t) - \int_0^{\infty} \varepsilon_{\tau} f(\tau) d\tau \right] \quad (1)$$

На основе математической модели, для повышения точности и стабильности геометри- ческих форм мало жестких деталей разработана новая технология термосиловой обработки, ее схема представлена на рис. 1.

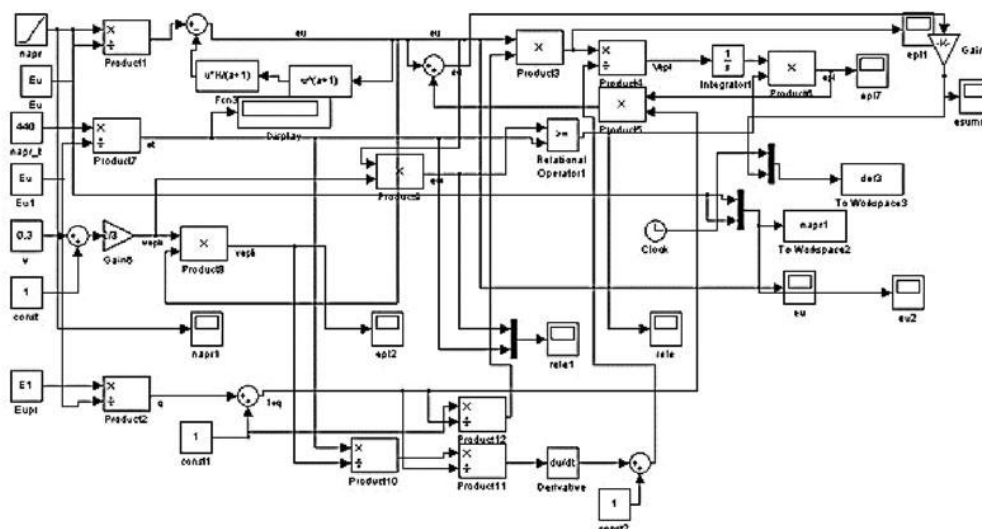


Рис. 1. Структурная схема процесса термосиловой обработки

Суть предлагаемого метода обработки в том, что деформация растяжение прикладываетс к валу при нагреве до температур закалки или отпуска при выдержке и остывании. Усилие может создаваться за счет внешних силовых приводов или создаваться самой технологической системой для термосиловой обработки за счет физических процессов при ее нагреве-охлаждении.

Основная проблема при термосиловой обработке – обеспечение равномерности деформирования заготовки по длине. В связи с неоднородностью поля напряжений пластическая деформация также неоднородна и развивается локализовано в областях концентрации напряжений [2].

Особенностью установки является то, что коэффициент температурного расширения материала, из которого изготовлен вал, меньше коэффициента температурного расширения материала труб стапеля. При нагревании устройства возникает осевое растягивающее усилие, вызванное разницей температурных удлинений стапеля и вала.

При остывании устройства осевое усилие сохраняется за счет того, что изделие – вал – остывает быстрее стапеля, которые имеют большую теплоемкость, сообщая осевое усилие требуемого значения до полного остывания вала.

Пластическая деформация вала происходит при нагревании с заданной скоростью, согласно технологии термообработки. При охлаждении стапеля его скорость остывания в 1,5–2,3 раза меньше скорости охлаждения вала. Это позволяет стабилизировать осевую нагрузку в начале охлаждения и плавно провести разгрузку, т. е. обеспечить совместность деформаций при разгрузке.

В зависимости от условий эксплуатации детали (шток с преимущественно осевой нагрузкой как сжатия, так и растяжения или валы-роторы с нагрузкой в виде крутящих моментов) требуется формирование остаточных напряжений определенного знака. При термосиловой обработке остаточные напряжения могут формироваться как сжимающие, так и растягивающие [3], как равномерные, так и знакопеременные по длине детали. Главное, что напряжения равномерны по поперечному сечению заготовки и за счет технологических режимов этапа разгрузки могут быть сведены к минимуму.

Таким образом, термосиловая обработка позволяет устранить технологическую наследственность от предыдущих операций, стабилизировать уровень остаточных напряжений в сечениях изделия, создавая при этом остаточные напряжения одного знака, одновременно провести правку длинномерных заготовок.

Список литературы

1. Горшков А. Г., Старовойтов Э. И., Тарлаковский Д. В. Теория упругости и пластичности: учеб. для вузов. М.: Физматлит, 2002. 416 с.
2. Григорьев А. К., Колбасников Н. Г., Фомин С. Г. Структурообразование при пластической деформации металлов. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1992. 244 с.
3. Драчев О.И., Расторгуев Д.А., Старостина М.В. Повышение эффективности обработки маложестких валов при комбинированном термосиловом нагружении / Металлообработка. 2012. №3. – С. 30–34.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Научная статья, входящая в сборник научных работ
в рамках Международной научно-практической конференции



ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ

*Сборник статей по материалам
XLII международной научно-практической конференции*

№ 1 (38)
Январь 2015 г.

Издается с октября 2011 года

Новосибирск
2015

Рисунок Е.1 – Обложка журнала

УДК 62
ББК 30
Т 38

Ответственный редактор: Гулин А.И.

Председатель редакционной коллегии:

Ахметов Сайранбек Махсutowич — д-р техн. наук, проф., ректор Казахского университета инновационных и телекоммуникационных систем (КазУИТС), академик РАЕН, действительный член (академик) Национальной инженерной академии Республики Казахстан, заместитель председателя Западно-Казахстанского филиала НИА РК, директор Представительства Казахской академии экологии и безопасности жизнедеятельности» в г. Уральск.

Редакционная коллегия:

Ахмеднабиев Расул Магомедович — канд. техн. наук, доц. Полтавского национального технического университета им. Ю. Кондратюка;

Барштейн Виктор Юрьевич — канд. тех. наук, ст. науч. сотр., заведующий лабораторией Государственного учреждения «Институт пищевой биотехнологии и геномики Национальной академии наук Украины» (ИПБГ НАН Украины).

Елисеев Дмитрий Викторович — канд. техн. наук, доцент, бизнес-консультант Академии менеджмента и рынка, ведущий консультант по стратегии и бизнес-процессам, «Консалтинговая фирма «Партнеры и Боровков»;

Копылов Алексей Филиппович — канд. техн. наук, доц. кафедры Радиотехники Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета;

Романова Алла Александровна — канд. техн. наук, доц. кафедры прикладной физики Санкт-Петербургского государственного экономического университета.

Т 38 Технические науки — от теории к практике / Сб. ст. по материалам XLII междунар. науч.-практ. конф. № 1 (38). Новосибирск: Изд. «СибАК», 2015. 128 с.

Учредитель: НП «СибАК»

Сборник статей «Технические науки — от теории к практике» включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

При перепечатке материалов издания ссылка на сборник статей обязательна.

ISSN 2308-5991

© НП «СибАК», 2015

Рисунок Е.2 – Выходные данные сборника

СЕКЦИЯ 2.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

ЭТАПЫ ТЕРМОСИЛОВОЙ ОБРАБОТКИ МАЛОЖЕСТКИХ ДЛИННОМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Семенов Кирилл Олегович

*магистрант кафедры «Оборудование
и технологии машиностроительного производства»,
Тольяттинский государственный университет,
РФ, г. Тольятти
E-mail: semen-tgu@yandex.ru*

Расторгуев Дмитрий Александрович

*канд. техн. наук, доцент кафедры «Оборудование
и технологии машиностроительного производства»,
Тольяттинский государственный университет,
РФ, г. Тольятти
E-mail: Rast_73@mail.ru*

STAGES OF THERMOPOWER PROCESSING OF LOW-RIGID LENGTHY DETAILS

Semenov Kirill

*undergraduate of the Department "Equipment and technology
of machine-building production", Togliatti State University,
Russia, Togliatti*

Rastorguev Dmitry

*candidate of technical Sciences,
associate Professor of the Department "Equipment and technology
of machine-building production", Togliatti State University,
Russia, Togliatti*

АННОТАЦИЯ

Стабилизация геометрии маложестких деталей является одной из актуальных задач современного машиностроения, в связи с ужесточением точностных требований к ним при постоянном снижении материалоемкости изделий. Эта проблема решается в основном за счет управления остаточными напряжениями. Для снятия остаточных напряжений, их выравнивания по длине используются методы искусственного старения.

ABSTRACT

Stabilization of geometry of low-rigid details is one of actual problems of modern mechanical engineering, in connection with toughening of precision requirements to them at continuous drop of a material capacity of products. This problem is solved generally due to steering of residual tension. For removal of residual tension, their alignments on length are used methods of artificial aging.

Ключевые слова: термосиловая обработка; остаточные напряжения.

Keywords: thermopower processing; residual tension.

Процесс ТСО разделяется на три этапа — нагрузка-нагрев, выстой и разгрузка-охлаждение. Каждый этап требует своей модели управления. В первой модели управление осуществляется по температуре $T^\circ(t)$, а через нее напряжением $\sigma(t)$, контролируется при этом выходная величина — $\varepsilon(t)$. Во второй: деформация поддерживается постоянной $\varepsilon = \text{const}$ при постоянной температуре. Выход — напряжение $\sigma(t)$. В третьей модели напряжение $\sigma(t)$ уменьшается в функции изменения температуры $T^\circ(t)$ остывания.

Для описания процесса ТСО, заготовки в термоупругопластическом состоянии необходима статическая характеристика объекта управления. Она представлена (рис. 1) в координатах «сила-перемещение» для сталей 40 и 12X18H10T, из которых следует, что объект ведет себя и как упруго-вязкая, и как упруго-вязкоупрочняющая среда при превышении предела текучести [1; 2].

В фазе нагрева — нагружения к заготовке прикладывается напряжение $\sigma(t)$, которое создается за счет разницы тепловых удлинений стапеля Δu_{CT} и заготовки $\Delta u_{ЗАГ}$, $\Delta u = \Delta u_{CT} - \Delta u_{ЗАГ}$ или в относительных деформациях с учетом коэффициентов теплового расширения $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{CT} - \varepsilon_{ЗАГ} = (\alpha_{CT} - \alpha_{ЗАГ})T^\circ$.

С учетом жесткости стапеля (его цилиндрической части, и большей частью, контактной жесткости в стыках захватов и опорных элементов стапеля) данная разница удлинений приводит к возникновению силы $F_{удл} = K \cdot \Delta y = K \cdot L \cdot \Delta \varepsilon$, где K – суммарный коэффициент контактной жесткости стыков элементов, фиксирующих заготовку в стапеле, и жесткости опор стапеля; L – длина деформируемой части заготовки. Если процесс упруго-пластической деформации начать рано, когда еще не достигнуто желаемое распределение температуры, то ухудшается процесс пластической деформации (большая неравномерность по длине) и время обработки увеличивается.

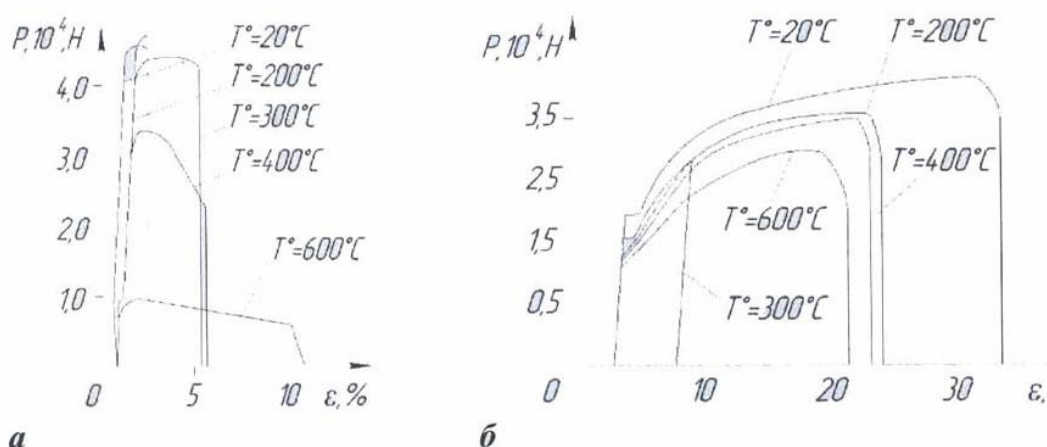


Рисунок 1. Статические характеристики процесса осевого деформирования: а — сталь 40Х; б — сталь 12Х18Н10Т

Для обеспечения запаздывания начала процесса деформирования при увеличении температуры при закреплении заготовки предусматриваются зазоры, которые выбираются с ростом температуры за счет разницы тепловых деформаций стапеля и заготовки. Поэтому:

$$\begin{aligned} F_{удл} &= K \cdot \Delta y = K \cdot L \cdot \Delta \varepsilon \text{ при } L \cdot \Delta \varepsilon \geq \delta_0, \\ F_{удл} &= 0 \text{ при } L \cdot \Delta \varepsilon < \delta_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где δ_0 – начальный зазор. С учетом диаметра заготовки d в ней возникают напряжения σ_H от нагрузки $\sigma_H = F_{удл} / \pi d^2$.

Процесс термдеформации на этапе осевого деформирования, после выхода на заданный температурный режим, описывается уравнениями:

$$\begin{aligned}
E_2 \varepsilon_1 + \beta \dot{\varepsilon}_1 &= (1 + E_2 / E_1) \sigma_{1\Sigma} + \beta / E_1 \dot{\sigma}_{1\Sigma}; \\
\sigma_1^T &= E \alpha T^0; \varepsilon_{1\Sigma} = \varepsilon_1 + \varepsilon_1^T; \sigma_1 = \sigma_p; \\
\varepsilon_1^T &= \alpha T^0; \varepsilon_2 = -\mu \sigma_1 / E; \sigma_{1\Sigma} = \sigma_1 + \sigma_1^T
\end{aligned} \quad (2)$$

где: E_1 и E_2 — модули упрочнения и упругости, МПа;

β — коэффициент вязкости, МПа·с;

$\varepsilon_{1\Sigma}$ — суммарная деформация;

$\sigma_{1\Sigma}$ — суммарные напряжения, МПа;

σ_p — напряжения растяжения от разницы удлинений стапеля и заготовки, МПа. Параметры модели — модуль упругости, предел текучести являются функцией температуры (рис. 2).

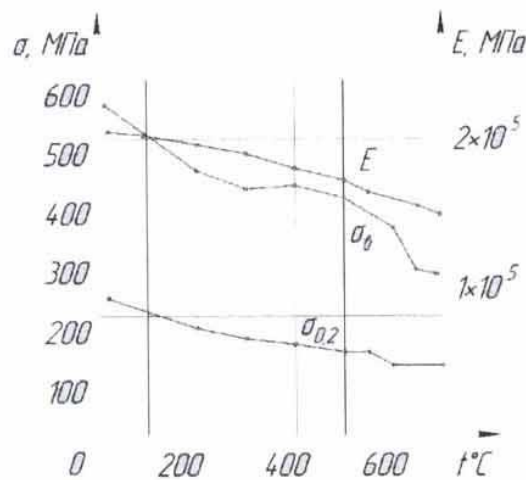


Рисунок 2. Изменение механических свойств стали 12X18H9T в зависимости от температуры

Зависимость модуля упругости от температуры (формула Белла):

$$\begin{aligned}
E(T) &= E(0) \cdot \phi(T), \\
\phi(T) &= \begin{cases} 1 & 0 < T / T_{пл} \leq 0,06 \\ 1,03(1 - T / (2T_{пл})) & 0,06 < T / T_{пл} \leq 0,57 \end{cases}, \quad (3)
\end{aligned}$$

где: $T_{пл}$ — температура плавления;

$E(0)$ — значения модуля при нулевом напряжении, определяется из экспериментов по формуле:

$$G(0) = \frac{G_0}{\varphi(T_0)}, \quad (4)$$

где G_0 – модуль упругости при температуре $T_0 = 20^\circ \text{C}$.

При моделировании методами теории автоматического управления данные уравнения переводятся в операторную форму. Передаточные функции объекта управления для одной ветви примут вид:

$$W_1(S) = \frac{\varepsilon(S)}{\sigma(S)} = \frac{k_1(1+T_2S)}{1+T_1(S)}; \quad W_2(S) = \frac{\varepsilon_1^T(S)}{T^*(S)} = k_2; \quad W_4(S) = \frac{\varepsilon_2(S^1)}{\varepsilon_{1\Sigma}(S)} = \mu = k_4;$$

$$W_3(S) = \frac{\sigma_1^T(S)}{T^*(S)} = E\alpha = k_3; \quad W_5(S) = \frac{\sigma_1^I(S)}{\varepsilon_2(S)} = E/\mu = k_5. \quad (5)$$

где: $T_1 = \beta/E_2$, $T_2 = \beta/E_1E_2$ – постоянные времени, первый коэффициент последствия, с;

$k_1 = (E_1 + E_2)/E_1E_2$, $k_2 = \alpha$, $k_3 = E_1\alpha$, $k_4 = \mu$, $k_5 = E/\mu$ — коэффициенты усиления; μ – коэффициент Пуассона. Входом модели является осевое напряжение и температура, а выходами продольная и поперечная относительные деформации ε_1 и ε_2 .

Поскольку процесс выстоя может достигать 1—2 ч., например при высоком отпуске, необходимо при разработке модели учитывать релаксационные процессы. Прогрев заготовки приводит к выравниванию температурного поля, но геометрия заготовки уже сформирована на первом этапе. Вход на объект управления — суммарная деформация ε_Σ . Переходный процесс $\varepsilon_\Sigma = \varepsilon_{УПР} + \varepsilon_{ПЛ}$ происходит за счет роста пластической деформации при уменьшении упругой, что приводит к равновесному состоянию $\sigma_{РАВНОВЕС}$.

Уравнение (2), выраженное относительно напряжения:

$$\sigma_1 = \alpha_p ET^\circ + E\varepsilon_1; \quad \sigma_2 = 0 \quad (6)$$

На фазе выстоя температура постоянна и температурные напряжения равны нулю. Процесс релаксации, который протекает на данном этапе, описывается формулой:

$$\sigma(t) = E_T \varepsilon_\Sigma \left[1 - \int_0^t T(\tau) d\tau \right], \quad (7)$$

где: E_T – модуль упругости при рабочей температуре;

ε_Σ – конечная суммарная деформация первого этапа;

$T(\tau)$ – ядро уравнения Вольтерры 2-го рода. Для его представления использовалось ядро Ржаницина в виде:

$$T(t) = A \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot t^{\alpha-1} \quad (8)$$

Коэффициент A , показатели степени β , α были получены по результатам релаксационных испытаний. Передаточные функции:

$$W_{10}(S) = \frac{\sigma_y(S)}{\varepsilon_\Sigma(S)} = E_T = \kappa_{10}; \quad W_{11}(S) = \frac{\sigma_P(S)}{\varepsilon_\Sigma(S)} = \frac{1}{S} \kappa_{11}. \quad (9)$$

Этап выстоя в совокупности с первым этапом нагрева-нагружения ТСО позволяет устранить технологическую наследственность от предыдущих операций, стабилизировать уровень остаточных напряжений в сечении и по длине изделия, создавая при этом остаточные напряжения одного знака, одновременно провести правку длинномерных заготовок, если в процессе предыдущих операций изделие покособилось.

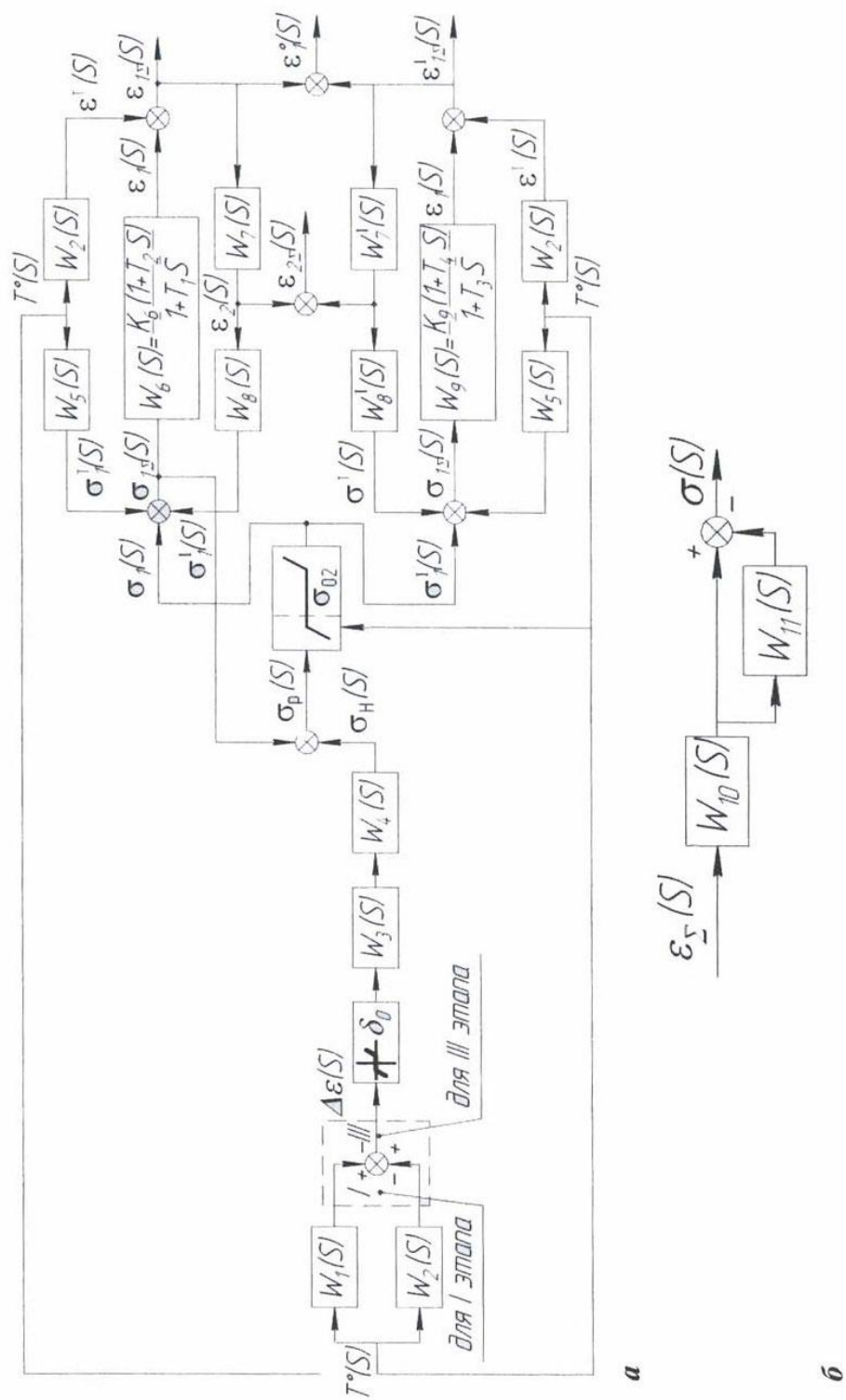


Рисунок 3. Развернутая схема объекта управления TCO:
 а — этап нагрева нагружения и охлаждения-разгрузки;
 б — этап выстоя

На третьем этапе ТСО разгрузке, могут появиться новые остаточные напряжения за счет несовместимости упругих и пластических деформаций. Пределы текучести с понижением температуры резко возрастают, особенно в интервалах $T = (250...20)^\circ\text{C}$. На структурной схеме (рис. 3, а) для третьего этапа меняется знак в блоке, выделенном пунктирной линией. Это связано с тем, что скорость остывания стапеля меньше, чем скорость остывания вала.

Коробление обусловлено неоднородностью температурного поля, пластической деформации. Это приводит к несовместности пластической и упругой деформации при разгрузке. Остаточные напряжения релаксируют не одновременно и неодинаково в продольных и поперечных сечениях.

При охлаждении растянутого вала, закрепленного в стапеле, возникают новые остаточные напряжения — равномерно расположенные по сечению заготовки. Предельный уровень остаточных напряжений определяется зависимостью:

$$\sigma_{\text{ост}} = E(\varepsilon_y + \varepsilon_T) \quad (10)$$

На первом этапе охлаждения вала в стапеле, т. е. когда разность температур вала и стапеля максимальна, величина малых остаточных деформаций вала (изделия) представляет собой сумму упругой ε_y , пластической $\varepsilon_{\text{пл}}$ и температурой деформации ε_T :

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_y + \varepsilon_{\text{пл}} + \varepsilon_T, \quad (11)$$

$$\text{здесь } \varepsilon_T = \int_{T_0}^T \alpha_T(T^\circ) dT^\circ.$$

Рассмотренные модели позволяют провести все необходимо термодеформационные расчеты для маложестких деталей с учетом температурных факторов при разработке операций термосиловой обработки.

Список литературы:

1. Драчев О.И., Расторгуев Д.А., Старостина М.В. Моделирование упруго-пластических деформаций при термосиловой обработке / Вектор науки Тольяттинского государственного университета. — 2012. — № 3. — С. 80—85.
2. Драчев О.И. Технология изготовления маложестких осесимметричных деталей. М.: Политехника, 2005. — 289 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Научная статья, входящая в сборник научных работ
в рамках зарубежной конференции

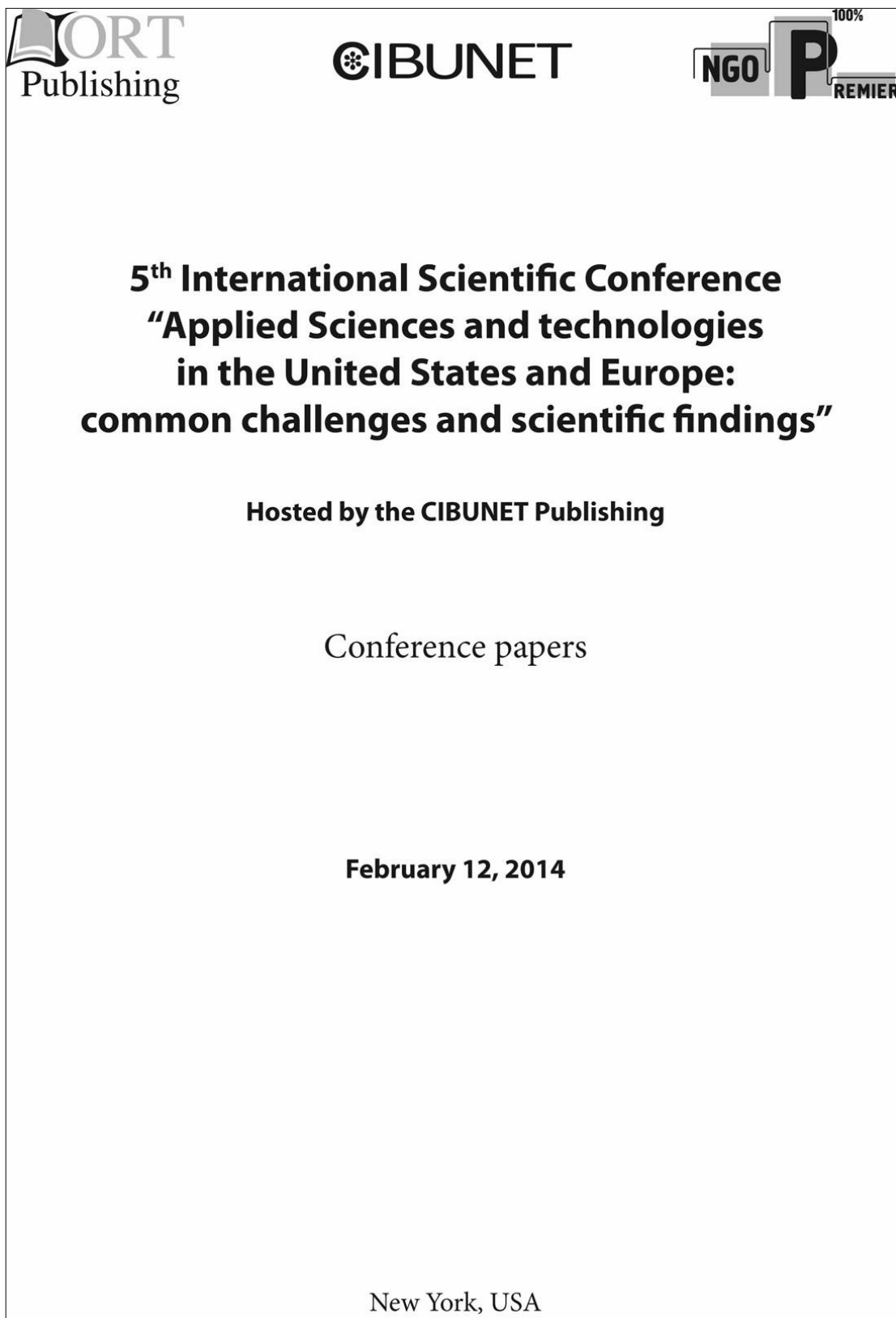


Рисунок Ж.1 – Обложка журнала

“Applied Sciences and technologies in the United States and Europe: common challenges and scientific findings”: Papers of the 5th International Scientific Conference (February 12, 2014). Cibunet Publishing. New York, USA. 2014. 228 p.

Edited by **Ludwig Siebenberg**

Technical Editor: **Peter Meyer**

ISBN 978-1-940260-16-7

Printed in Germany by ORT Publishing (Germany) in association with the Center For Social And Political Studies “Premier” (Russia)
February 2014, 700 copies

ORT Publishing

Schwieberdingerstr. 59
70435 Stuttgart, Germany

CIBUNET Publishing

P. O. BOX 444
Woodlawn, NY 10470

All rights reserved

© CIBUNET Publishing

© ORT Publishing

© All authors of the current issue

ISBN 978-1-940260-16-7

Отсюда можно заключить, что из формованных при высоких давлениях в закрытой пресс-форме прессовках газы не могут удалиться и они там зажимаются под высоким давлением. Зажата под высоким давлением «металлическая губка» после снятия давления создает большое упругое последствие и это в свою очередь приводит к ослаблению межчастичной связи и даже в некоторых случаях их разрушению и образованию микротрещин. Основной причиной сохранения газов в парах прессовки под высоким давлением, является технологическая смазка, которая закрывает межпоровые каналы, зазоры в пресс-форме.

При теплом прессовании с паузой положение изменяется в противоположном направлении. Так, при температуре теплового прессования технологическая смазка еще больше пластифицируется, адсорбированный на поверхности металлических частиц его слой утончается, и следовательно такой тонкий слой не может занимать каналы между порами и после прессования, когда дается пауза происходит максимальное удаление газов из пресс-формы, а повторное прессование приводит к дополнительному уплотнению прессовок. При повторном прессовании контакты частиц, имеющих чистые поверхности, входят во взаимодействие между собой и в некоторых ювенильных (оголенных участках) не исключается повреждение холодной сварки.

Таким образом, полученные результаты показывают, что по сравнению с обычным прессованием при теплом прессовании с паузой спеченные железные образцы обладают достаточно высокой прочностью (близко к прочности компактного железа) и пластичностью. Установлено, что при давлении прессования 1000 МПа с паузой общая пористость спеченных заготовок составляет всего 4%. Эти результаты подтверждают перспективность разработанного нового метода прессования.

Список литературы:

1. Мамедов А. Т., Иманова Р. А., Алиев А. Г. Новые разработки в области холодного прессования порошковых материалы // Ученые записки АзТУ, 2001, № 2, с. 7–12.
2. Bocchini G. F. The warm Compaction process. Basic, Advantages and Limitation [text] / C. F. Bocchini // SAE Transactions, Society of Automotive Engineers. – 1998. – Vol. 107. – P. 225–236.
3. Мустафаев С. М. и др. Влияние стеарата цинка на микроструктуру порошковых изделий. Нефть и газ. 1990, № 34, с. 93–96.
4. Лихтман В. Н., Ребиндер П. А. Применение активных смазок в металлокерамической технологии. — Вестник машиностроения, 1991, № 3, с. 56–62.
5. Мамедов А. Т., Алиев Н. А. Спекание порошковых материалов в атмосфере эндотермического газа. АЗНИИТИ, № 4, 1986, 2 с.
6. Namazov S. N., N. Krivij, H. W. Gudenau and e. t. c Antifriction materials on the base of the shaving waste products cast-iron. Journal of Metallurgy (Revista de Metallurgia), Vol. 39, 2003, Madrid, Spain, pp. 164–171.

*Rastorguev Dmitry Aleksandrovich, Togliatti State University, Russia,
Ph.D, associate Professor of the Department «Equipment and technology
of machine-building production»*

*Semenov Kirill Olegovich, Togliatti State University, Russia,
Student of the Department «Equipment and technology
of machine-building production»*

*Расторгуев Дмитрий Александрович, Тольяттинский государственный
университет, Россия, к. т. н, доцент кафедры «Оборудование и технологии
машиностроительного производства»*

*Семенов Кирилл Олегович, Тольяттинский государственный
университет, Россия, студент кафедры «Оборудование и технологии
машиностроительного производства»*

Estimation of efforts complex loading at thermopower processing

Расчет усилий комплексного нагружения при термосиловой обработке

Для повышения стабильности размеров и форм маложестких валов спроектирована установка для термосиловой обработки¹. Особенность технологического способа обработки заключается в том, что осевая растягивающая сила и крутящий момент, прикладываемые к заготовке, создаются за счет разницы коэффициентов линейного расширения стапеля и заготовки.

Устройство для термосиловой обработки (ТСО) (рис. 1). Для фиксации заготовки 1 с резьбовыми концами содержит тяги 2 и 3. Нижняя тяга 2 выполнена с возможностью поджима через сферическую шайбу 4 гайкой 5 к опорной крышке 6, и фиксируемая на ней осью 7 для исключения поворота относительно нее. Нижняя тяга 2 выполнена с возмож-

¹ Патент РФ № 2381281, МПК кл. C21D8/00, C21D9/28 Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей / Драчев О. И., Расторгуев Д. А., Драчев А. О.; Патент РФ № 2381281, МПК кл. C21D8/00, C21D9/28 Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей / Драчев О. И., Расторгуев Д. А., Драчев А. О., Расторгуева О. А.

ностью поджима через сферическую шайбу 4 гайкой 5 к опорной крышке 6, и фиксируемая на ней осью 7 для исключения поворота относительно нее. Опорная крышка 6 винтами 8 закреплена на стапеле 9, вокруг которого намотана нагревательная проволока 10 в керамических изоляторах 11. Тяга 3 соединена с опорной крышкой 12 через гайку 13. От прокручивания относительно тяги 3 гайка 13 зафиксирована штифтом 14, а относительно опорной крышки 12 — штифтами 15. Опорную крышку 12 через ось 16 упирают в профильную поверхность 17 стапеля 9, имеющего угол наклона α , который выбирают исходя из заданного угла закручивания заготовки 1, предельных сил трения по контактирующим поверхностям. Для силового размыкания оси 7 в продольном направлении и тяга 2 и опорная крышка 6 имеют продольный паз 18.

Устройство для ТСО работает следующим образом. После фиксации заготовки 1 вала в тягах 2 и 3, ее помещают в стапель 9, где в нижней опорной крышке 6 тягу фиксируют в крутильном направлении осью 7, после чего затягивают гайку 5 через сферическую шайбу 4. На тягу 3 накручивают гайку 13. В заданном положении эта гайка фиксируется штифтами 14 и 15, после предварительной установки опорной крышки 12 осью 16 на выступ 17. Далее производят нагрев проволоки 10. В начале процесса обработки, ось 16 упирается в вершину выступа профильной поверхности 17 стапеля 9. За счет большего коэффициента линейного расширения стапеля 9 при нагреве происходит пластическая деформация заготовки 1 в осевом направлении. При осевом деформировании заготовки 1 вследствие сдвиговых процессов происходит ее естественное закручивание. За счет профильной поверхности 17 ось 16 закручивает опорную крышку 12, а вместе с ней заготовку 1 по закону, задаваемому профилем 17.

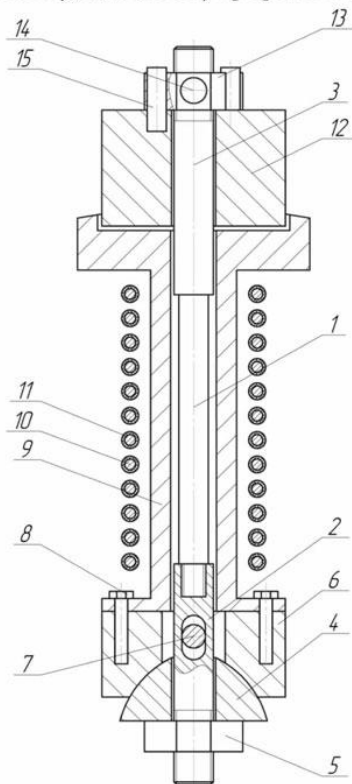


Рисунок 1. Эскиз стапеля

Минимальный угол наклона скоса α (рис. 2) выбирается исходя из недопустимости самоторможения в контактирующей паре ось 16 — профильная поверхность 17. Для экспериментальной установки угол наклона скоса принят равным $\alpha \geq 7^\circ$ при угле трения в паре сталь по стали $5'70'$. При одновременном растяжении и кручении для возникновения пластических деформаций в заготовке должно выполняться условие: смещения и закручивания.

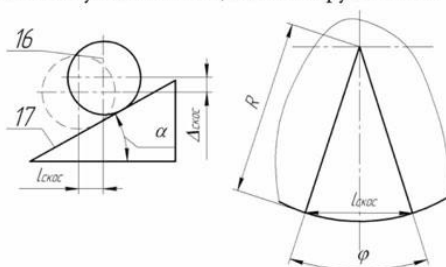


Рисунок 2. Схема для расчета осевого

$$\sigma_i = \phi \sqrt{\varepsilon^2 + 3\gamma^2} \geq \sigma_T, \quad (1)$$

где ϕ – функция пластичности; ε – относительная продольная деформация;
 γ – деформация сдвига; σ_i – интенсивность напряжений.

Относительная продольная деформация заготовки находится по формуле:

$$\varepsilon = \Delta\varepsilon_T - \varepsilon_{CKOC}, \quad (2)$$

где $\Delta\varepsilon_T$ – разность температурных деформаций стапеля и заготовки;

$$\varepsilon_{CKOC} = \Delta_{CKOC} / L_{ЗАГ}, \quad (3)$$

где Δ_{CKOC} – вертикальное смещение оси 16 при ее смещении по профильной поверхности 17 при закручивании опорной крышки 12 на угол ϕ ; $L_{ЗАГ}$ – длина заготовки.

Деформация сдвига:

$$\gamma = \phi / D_{ЗАГ} \cdot R, \quad (4)$$

где R – радиус заготовки.

Связь между ε_{CKOC} и γ задается уравнением:

$$\alpha = \Delta_{CKOC} / l_{CKOC}, \quad (5)$$

где l_{CKOC} – смещение по профильной поверхности, соответствующее углу закручивания ϕ .

Для расчета необходимых усилий нагружения вала необходимо рассмотреть уравнение равновесия стержня круглого сечения, подверженного совместному действию кручения моментом M_{KP} и растяжения осевой силой N ¹:

$$\left. \begin{aligned} \frac{M_{KP}}{2 \cdot \pi \cdot \tau_T} &= \int_r \bar{\tau} \cdot r^2 dr \\ \frac{N}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T} &= \int_r \bar{\sigma} \cdot r^2 dr \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где r – радиус вала; σ_T – предел текучести на растяжение; τ_T – предел текучести на сдвиг; $\bar{\sigma}$ – относительные напряжения растяжения; $\bar{\tau}$ – относительные напряжения сдвига.

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_T}, \quad \bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_T}; \quad \frac{\sigma_T}{\tau_T} = \sqrt{3} \quad (7)$$

Используя гипотезу о сохранении прямых радиусов плоского сечения при кручении и растяжении, можно написать уравнение для деформации кручения и растяжения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\bar{\gamma}_{\max}}{\bar{\gamma}} &= \frac{1}{\rho} \\ \bar{e}_\rho &= \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $\bar{\gamma} = \frac{\gamma}{\gamma_T}$, $\bar{e}_\rho = \frac{e}{e_T}$, $\left(\frac{e_T}{\gamma_T} = \frac{1}{\sqrt{3}} \right)$ – относительные деформации от кручения и растяжения, соответственно; $\gamma_{\max}$ – максимальная деформация от кручения; $\rho = \frac{r}{R_1}$, где R_1 – радиус сечения стержня.

Используя уравнение (8) и введя относительные усилия $\bar{M}_{KP} = \frac{M_{KP}}{\tau_T \cdot W_K}$ и $\bar{N} = \frac{N}{\sigma_T \cdot F}$, где F – площадь поперечного сечения, а W_K – полярный момент сопротивления сечения, получим уравнения равновесия в форме:

$$\left. \begin{aligned} \bar{M}_{KP} &= 4 \cdot \bar{\gamma}_{\max} \int_{\rho_0}^1 \phi \cdot \rho^3 d\rho \\ \bar{N} &= 2 \cdot \bar{e} \int_{\rho_0}^1 \phi \cdot \rho d\rho \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\text{здесь } \phi = \frac{\bar{\sigma}_i}{\bar{e}_i} = \frac{\sqrt{\bar{\sigma}^2 + \bar{\tau}^2}}{\sqrt{\bar{e}_\rho^2 + \bar{\gamma}^2}}.$$

Имея в виду, что деформация растяжения и сдвига выражаются через параметр и интенсивность деформации $\bar{e}_\rho = \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \cdot \bar{e}_{i\max}$; $\bar{\gamma}_{\max} = \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} \cdot \bar{e}_{i\max}$ после интегрирования получим:

$$\left. \begin{aligned} \bar{M}_{KP} &= J_{Mypr} + \sum_n a_n J'_{Mn\lambda} + \sum_n b_n J''_{Mn\lambda} \\ \bar{N} &= J_{Nyp} + \sum_n a_n J'_{Nn\lambda} + \sum_n b_n J''_{Nn\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

¹ Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие. Изд. 3-е, перераб. и доп. Под ред. С.В. Серенсена. М., «Машиностроение», 1975. 488 с. ил.

здесь

$$J_{Mup} = \frac{(1+x^2)^{\frac{3}{2}}}{e_{imax}^{-3}} \cdot \left[1 - \frac{x^2}{1+x^2} \cdot e_{imax}^{-2} \right]; \quad J'_{Nna} = \frac{2x\sqrt{1+x^2}}{e_{imax}} \cdot (\bar{e}_n - \bar{e}_{n-1})$$

$$J_{Nup} = \frac{x\sqrt{1+x^2}}{e_{imax}} \cdot \left[1 - \frac{x^2}{1+x^2} \cdot e_{imax}^{-2} \right]; \quad J''_{Nna} = \frac{2x\sqrt{1+x^2}}{e_{imax}} \cdot \frac{\bar{e}_n^{-2} - \bar{e}_{n-1}^{-2}}{2};$$

$$J'_{Mna} = \frac{4(1+x^2)^{\frac{3}{2}}}{e_{imax}^{-3}} \cdot \left[\frac{\bar{e}_n^{-3} - \bar{e}_{n-1}^{-3}}{3} - e_{imax}^{-2} \frac{x}{1+x^2} \cdot (\bar{e}_n - \bar{e}_{n-1}) \right]$$

$$J''_{Mna} = \frac{4(1+x^2)^{\frac{3}{2}}}{e_{imax}^{-3}} \cdot \left[\frac{\bar{e}_n^{-4} - \bar{e}_{n-1}^{-4}}{4} - e_{imax}^{-2} \frac{x^2}{1+x^2} \cdot \frac{\bar{e}_n^{-2} - \bar{e}_{n-1}^{-2}}{2} \right].$$

По заданным уравнениям построим графики зависимостей крутящего момента от деформации и между усилиями $\bar{M}_{кр}$ и $\bar{N}$ по параметру e_{imax} для значений относительного модуля упрочнения $\bar{G}_T = 0; 0,1$ и $0,2$, а также зависимость крутящих моментов от деформации при совместном кручении и растяжении.

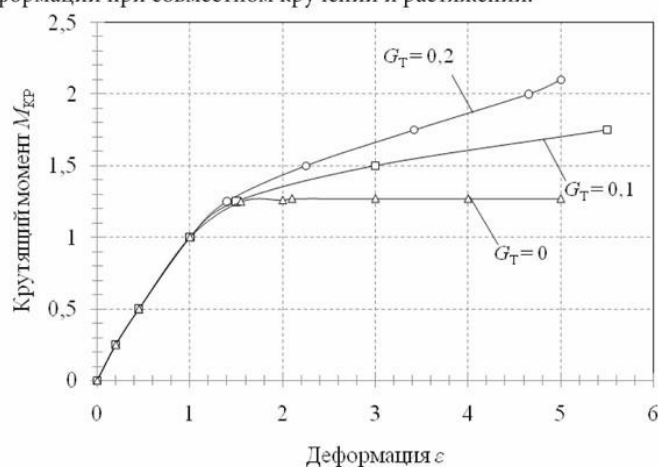


Рисунок 3. Зависимость крутящего момента $\bar{M}_{кр}$ от деформации ε

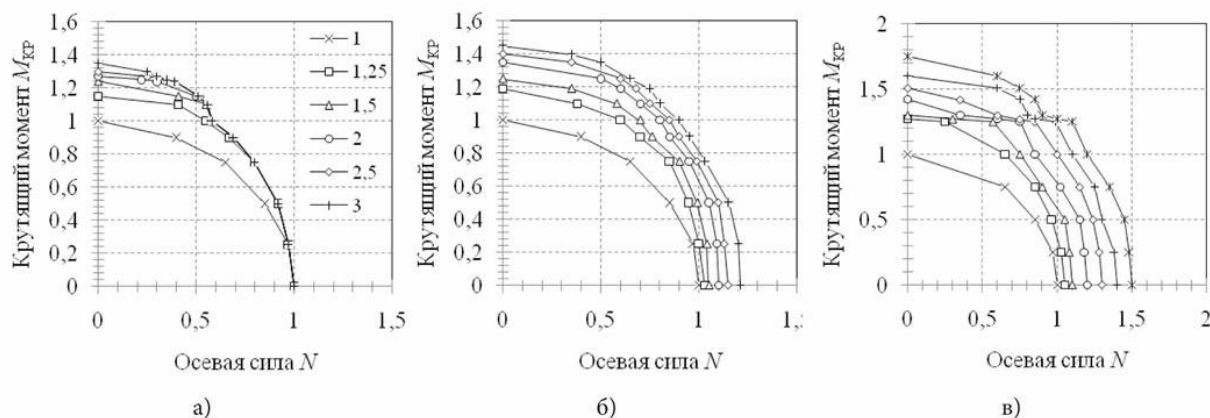


Рисунок 4. Зависимость между усилиями крутящего момента $\bar{M}_{кр}$ и осевой силы $\bar{N}$: а) — при $\bar{G}_T = 0$; б) — при $\bar{G}_T = 0,1$; в) — при $\bar{G}_T = 0,2$.

На основе приведенных зависимостей определяются рабочие усилия при совместном нагружении заготовки осевой силой и крутящим моментом. Необходимое соотношение между ними обеспечивается в установке углом скоса α профильной поверхности.

Список литературы:

1. Патент РФ № 2381281, МПК кл. C21D8/00, C21D9/28 Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей/Драчев О.И., Расторгуев Д.А., Драчев А.О.
2. Патент РФ № 2381281, МПК кл. C21D8/00, C21D9/28 Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей/Драчев О.И., Расторгуев Д.А., Драчев А.О., Расторгуева О.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ И

Научная статья, входящая в сборник научных работ
в рамках зарубежной конференции

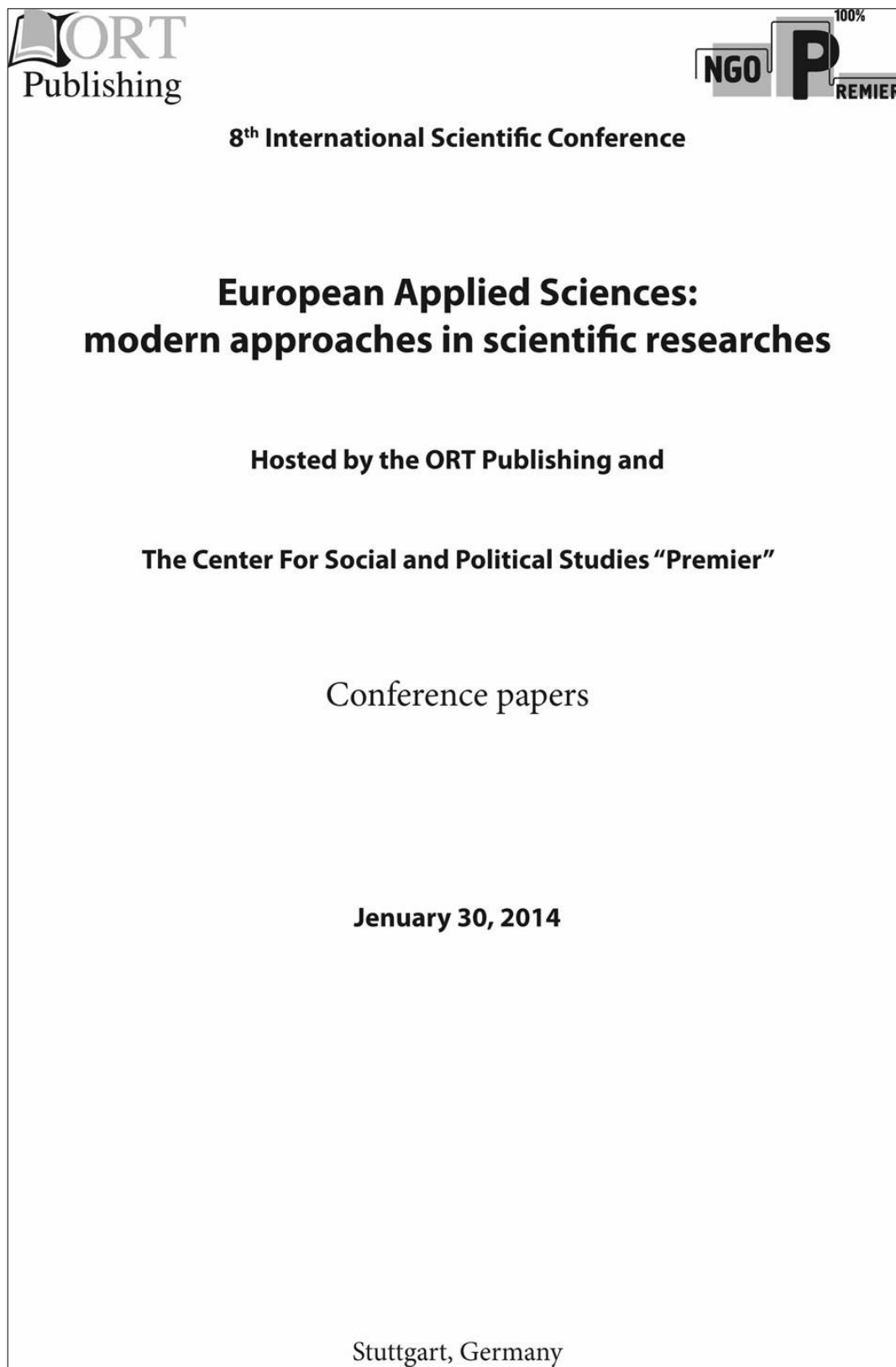


Рисунок И.1 – Обложка журнала

8th International Scientific Conference
"European Applied Sciences: modern approaches in scientific researches":
Papers of the 8th International Scientific Conference. January 30, 2014,
Stuttgart, Germany. 206 p.

Editorial board

Apl.-Prof. Dr. phil. Lutz Schumacher, Germany
Prof. Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp, Germany
Dr. phil. Carsten Knockret, Germany
Dr. rer. soc. Dr. phil. Dietrich Pukas, Germany
Prof. Dr. phil. Kristina Reiss, Germany
Prof. Dr. oec. Susanne Stark, Germany
Prof. Dr. iur. utr. Marina Savtschenko, Russia
Dr. disc. pol. Alexej Kiseljov, Russia
Dr. oec. Saida Bersirowa, Russia

Edited by **Ludwig Siebenberg**
Technical Editor: **Peter Meyer**

ISBN 978-3-944375-31-1

Published and printed in Germany by ORT Publishing (Germany) in association
with the Center For Social And Political Studies "Premier" (Russia)
January 2014, 700 copies

ORT Publishing

Schwieberdingerstr. 59
70435 Stuttgart, Germany
info@ortpublishing.de
www.ortpublishing.de

ISBN 978-3-944375-31-1

All rights reserved
© ORT Publishing
© All authors of the current issue

Как видно из приведенных зависимостей область основного α' -перехода разбивается еще на ряд максимумов (рис. 3). Сам факт увеличения величины разности напряжения возникновения и исчезновения (погасания) ионизационных процессов при температурах релаксационных переходов может свидетельствовать об увеличении при данных температурах химического действия на полимер ионизационных процессов при одной и той же напряженности электрического поля. Данный вывод может иметь практическое значение при разработке методов ускоренного испытания полимерных диэлектриков, методов прогнозирования поведения полимеров в высоких электрических полях.

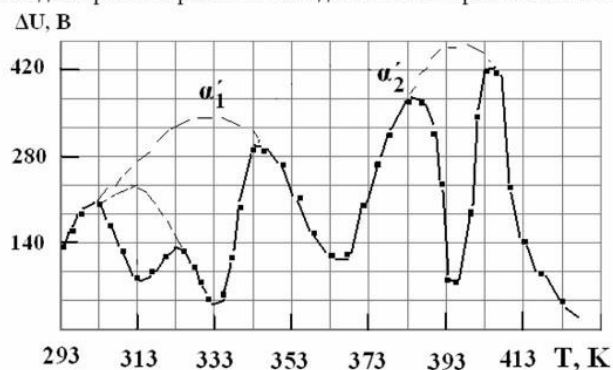


Рис. 3. Температурная зависимость $\Delta U = U_{\text{в}} - U_{\text{н}}$ для ПА в области α' -перехода

Увеличить стойкость полимеров к действию электрических разрядов можно, уменьшив его молекулярную подвижность, например, ориентационной вытяжкой. При этом для жесткоцепных полимеров, одновременно будет увеличиваться и радиационная стойкость.

Список литературы:

1. Багиров М. А., Малин В. П., Абасов С. А. Воздействие электрических разрядов на полимерные диэлектрики. — Баку: ЭЛМ, 1975. — 167 с.
2. Бартенев Г. М. Структура и релаксационные свойства эластомеров. — М.: Химия, 1979. — 287 с.
3. Бойер Р. Ф. Переходы и релаксационные явления в полимерах. — В кн.: Переходы и релаксационные явления в полимерах. М.: Мир, 1968, с. 11–24.
4. Койков С. Н., Цикин А. Н. Электрическое старение твердых диэлектриков и надежность диэлектрических деталей. — Л.: Энергия, 1968. — 186 с.
5. Лаврентьев В. В. Влияние релаксационных процессов на ионизационное старение полимерных пленок//Фундаментальные исследования. — 2007. — № 7 — стр. 50.
6. Цой Б., Лаврентьев В. В. Основы создания материалов со сверхвысокими физическими характеристиками. — М.: Энергоатомиздат, — 2004. — 400 с.
7. Электрические свойства полимеров/Сажин Б. И., Лобанов А. М., Романовская О. С. и др. Под ред. Б. И. Сажина — 3-е изд. перераб. — Л.: Химия, 1986. — 224 с.

*Rastorguev Dmitry Aleksandrovich, Togliatti State University, Russia, Ph.D,
associate Professor of the Department «Equipment and technology of machine-building production»*

*Semenov Kirill Olegovich, Togliatti State University, Russia,
Student of the Department «Equipment and technology of machine-building production»*

*Расторгуев Дмитрий Александрович, Тольяттинский государственный университет,
Россия, к. т. н., доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»*

*Семенов Кирилл Олегович, Тольяттинский государственный университет, Россия,
студент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»*

Simulation of deformation at thermal power processing

Моделирование процесса деформирования при термосиловой обработке

В статье рассматривается моделирование процесса деформации при термосиловой обработке на основе экспериментальной кривой упрочнения, которая аппроксимируется степенной зависимостью. Приведена погрешность расчета зависимости напряжения — деформация при моделировании процесса термосиловой обработки методом конечных элементов от исходной степенной.

Разработаны технологические методы и средства, которые обеспечивают заданное распределение остаточных напряжений по уровню и знаку по всему объему заготовки. Перед механической обработкой формируется ненаправленное поле остаточных напряжений. Для этого разработаны способы одновременного температурного и силового воздействия на заготовку, которые вызывают упруго-пластическую осевую, или как вариант, комплексную осевую-сдвиговую деформацию. Температура термосиловой обработки соответствует температуре отпуска или закалки, что формирует заданную твердость и структуру поверхностного слоя.

При этом за счет силового воздействия происходит правка исходной заготовки с обеспечением высоких точностных требований по отклонению от не прямолинейности оси заготовки¹.

Одним из вариантов термосиловой обработки является вытягивание заготовки в стапеле, который изготовлен из материала с коэффициентом теплового расширения больше коэффициента теплового расширения материала заготовки. Из-за этого, а также из-за разности скоростей тепловой деформации при нагреве и остывании заготовка, зафиксированная в стапеле, подвергается заданной пластической деформации, которая способствует исправлению оси детали, стабилизации геометрических характеристик детали в эксплуатационный период за счет формирования однородной структуры с равномерными физико-механическими свойствами по всему объему заготовки. Стапель изготовлен в виде опытного и промышленного образца.

Процесс термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей базируется на изучении технологической наследственности заготовки, на теории упруго — пластических явлений, происходящих в металле при приложении осевых сил и высоких температур. Известные технологические приемы, связанные с термосиловой обработкой имеют недостатки: бесконтрольная деформация по длине и диаметру заготовки, неоднородность пластической деформации, приводящей к искривлению оси готовых изделий в процессе эксплуатации.

Моделирование упруго-пластических деформаций может быть основано на реологических зависимостях².

Данный процесс может моделироваться методом конечных элементов. Для этого необходимо кривую упрочнения конкретного материала подготовить для исходных данных. Зная физико-механические свойства, по эмпирическим зависимостям, аналитически представим для данного материала идеальную кривую деформирования при растяжении. Ось напряжений σ разбивается на равные отрезки в интервале от предела текучести σ_T до напряжения, соответствующего предельной деформации, после чего в промежуточных точках вычисляются значения деформаций $\varepsilon = f(\sigma)$ по зависимости:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E}, & \text{при } \sigma < \sigma_T \\ \varepsilon_T \left(\frac{\sigma}{\sigma_T} \right)^{\frac{1}{m}}, & \text{при } \sigma \geq \sigma_T \end{cases} \quad (1)$$

где ε_T — деформация, соответствующая пределу текучести σ_T ; m — показатель упрочнения.

Первая область, где деформация действует по закону Гука, упругая.

Вторая область, где деформация действует в неупругой пластической области.

Деформация при напряжении, соответствующем пределу прочности

$$m = 0,75 \times \frac{\ln \left(\frac{S_f}{\sigma_{0,2}} \right)}{\ln \left(\frac{1}{0,2 \cdot 10^{-2} + \frac{\sigma_{0,2}}{E}} \times \ln \frac{100}{100 - \psi_f} \right)}, \quad (2)$$

где ψ_f — относительное сужение.

$$S_f = \sigma_b \cdot \left[1 + 1,4 \cdot \left(\frac{\psi_f}{100} \right) \right] \quad (3)$$

Принимаем, $\sigma_{0,2} = \sigma_T$, тогда для стали 40: $S_f = 925,839$ МПа, $m = 0,1497126$.

Возьмем в неупругой области 5 точек, для наиболее точной передачи формы кривой деформирования, с помощью программного продукта MathCad, произведем расчет деформаций соответствующих своему значению напряжений.

Построим кривую деформирования для стали 40. Результаты расчета показаны на рисунке 1.

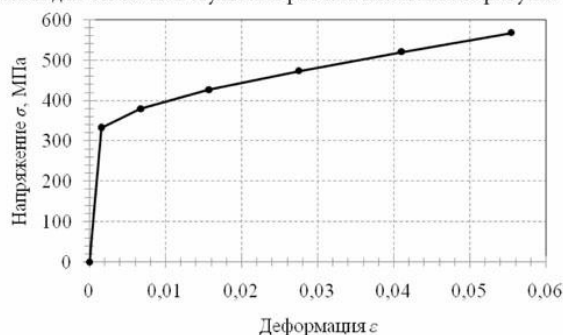


Рисунок 1. Идеальная кривая деформирования для стали 40 при растяжении

Зная физико-механические свойства и идеальную диаграмму деформирования при растяжении, с помощью программного модуля ANSYS Workbench, уточним ошибку аналитического метода расчета и программного, для последующих исследований.

Принципиальная схема исследования представлена на рисунке 2.

¹ Драчев, О. И. Экспериментальная установка для равномерного осевого пластического деформирования маложестких деталей при термосиловой обработке/О. И. Драчев, Д. Ю. Воронов, Д. А. Расторгуев//Известия Волгоградского государственного технического университета. 2004. № 9. С. 15–18.

² Драчев, О.И., Расторгуев Д.А., Старостина М.В. Моделирование упруго-пластических деформаций при термосиловой обработке/О.И. Драчев, Д. А. Расторгуев, М. В. Старостина//Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 3. С. 80–85.

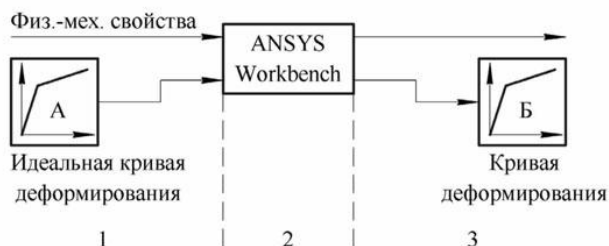


Рисунок 2. Принципиальная схема исследования

1 — препроцессорная подготовка (входные данные);

2 — процесс; 3 — постпроцессорная обработка (выходные данные).

В идеальном варианте, планируется получить соответствие графика А и Б, то есть $A = B$, и определить погрешность вывода результата.

Для того чтобы ввести полученные входные данные, необходимо кривую полной деформации при растяжении пересчитать в кривую пластической деформации, так как пока напряжения не превышают σ_T , деформации будут упругими и будут рассчитываться по закону Гука.

Пересчет диаграммы из полной в пластическую деформацию выполняется по формуле:

$$\varepsilon_{i(\text{ПЛАСТ.})} = \varepsilon_{i(\text{ПОЛН.})} - \varepsilon_{i(\text{УПР.})} \quad (4)$$

Для каждой точки своя упругая деформация $\varepsilon_{i(\text{УПР.})}$, рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{i(\text{УПР.})} = \frac{\sigma_i}{\text{tg}(\alpha)}, \quad (5)$$

где $\alpha = \arctg\left(\frac{\sigma_T}{\varepsilon_T}\right)$.

Построим кривую деформирования для стали 40 без учета упругой деформации (рисунок 3).

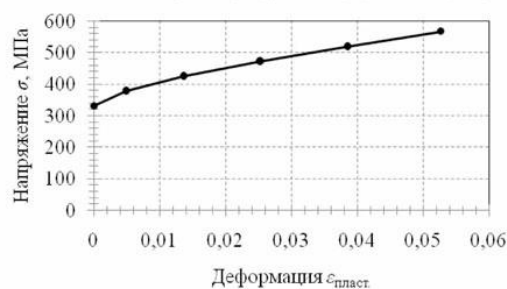


Рисунок 3. Аналитическая кривая деформирования для стали 40 без учета упругой деформации при растяжении

Все необходимые исходные данные для моделирования процесса растяжения известны.

В результате на рисунке 4 представлены кривые упрочнения по аналитической зависимости и по результатам расчета в программе.

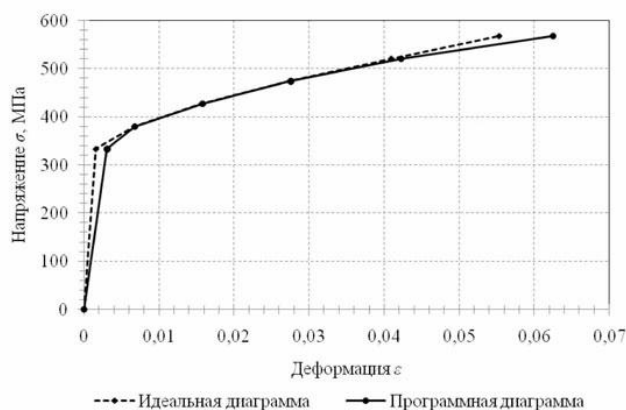


Рисунок 4. Кривые упрочнения стали 40

Как видно при определенных значениях деформации возникает расхождение между аналитической исходной кривой упрочнения и результатами расчета. Причем наибольшее расхождение в области упругих деформаций (ошибка до 30%) и в области больших деформаций (более 10%). Это необходимо учитывать при расчетах упруго-пластической деформации при термической обработке.

Список литературы:

1. Драчев, О. И. Экспериментальная установка для равномерного осевого пластического деформирования маложестких деталей при термосиловой обработке/О. И. Драчев, Д. Ю. Воронов, Д. А. Расторгуев//Известия Волгоградского государственного технического университета. 2004. № 9. С. 15–18.
2. Драчев, О. И., Расторгуев Д. А., Старостина М. В. Моделирование упруго-пластических деформаций при термосиловой обработке/О. И. Драчев, Д. А. Расторгуев, М. В. Старостина//Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 3. С. 80–85.

Rashidi Alashty Hojatollah, Russian State University of Technological «MATI» named after K. E. Tsiolkovsky Graduate student of cybernetics research group and member of the Islamic Azad University queimshahr the Islamic Republic of Iran (Department of Public Administration).

Рашиди Алашти Ходжатоллах, Российский Государственный Технологический Университет «МАТИ» Аспирант кафедры кибернетика и член научной группы Исламского Университета Азад Гоимшахра Исламской республики Иран (кафедра государственного управления).

Life Cycle of ERP systems

Жизненный цикл систем ERP

Для определения модели жизненного цикла системы ERP использована модель, предложенная Естивсом и Пастором (Esteves & Pastor) в 1999 г.¹. Данная модель состоит из нескольких этапов и аспектов. Далее будет описан каждый из этапов.

Первый этап: Принятие решение о выборе.

На этом этапе руководители организаций рассматривают и изучают основания потребности в новой системе ERP и выбирая подход общей информационной системы будут решать важные проблемы деятельности и улучшат организационную стратегию. Этап принятия решения включает в себя определение требований к системе, ее целей и преимуществ и анализ влияния этого решения на деятельность и все уровни организации.

Второй этап: Приобретение или выбор.

Этот этап состоит из выбора продукта, который наилучшим образом соответствует потребностям организации, и который требует минимальных изменений в настройках. На этом этапе выбирается консалтинговая компания для оказания помощи на других этапах жизненного цикла систем ERP, в особенности на этапе внедрения. Такие факторы, как стоимость, обучение и услуги по сопровождению анализируются и определяется контрактное соглашение. На этом этапе также необходимо провести анализ рентабельности инвестиций выбранного продукта.

Третий этап: Внедрение.

Этот этап состоит из настройки или параметризации и адаптации приобретенного пакета ERP в соответствии с потребностями организации. Обычно эта задача выполняется с помощью консультантов, которые предоставляют методологии внедрения, знания и обучение.

Четвертый этап: Использование и сопровождение.

Этот этап включает в себя использование продукта таким способом, чтобы был обеспечен ожидаемый эффект и минимизированы сбои. На этом этапе необходимо знать аспекты, связанные с функциональностью, применимостью и соответствием с организационными и коммерческими процессами. После того как система будет внедрена ее необходимо сопровождать, чтобы были устранены неисправности, удовлетворены запросы на специальную оптимизацию и обеспечены улучшения общей системы.

Задачи поддержки и сопровождения системы часто тесно связаны с тем, как выстроена поддержка ERP системы внутри компании. Чаще всего средние и крупные компании имеют в штате сотрудников, поддерживающих систему. В зависимости от их квалификации компания может сократить или отказаться от сопровождения системы, а также самостоятельно решать вопросы, предназначенные специалистам «горячей линии»².

Четвертый этап: Развитие.

Этот этап отвечает за интеграцию новых возможностей в систему ERP, обеспечивая новые преимущества, такие как продвинутое планирование и распределение, управление цепочкой поставок, управление взаимоотношениями с клиентами, трудовым процессом и расширением фронтов для внешнего сотрудничества с другими партнерами.

Шестой этап: Списание.

Этот этап наступает тогда, когда с появлением новой технологии или несовместимости системы ERP или нового подхода к требованиям деятельности организации управляющие решают заменить систему ERP другими подходами информационной системы, которые более соответствуют с потребностями организации на данный момент.

¹ Esteves, José and Joan Pastor. «An ERP Life-Cycle Cost Model.» Encyclopedia of Information Science and Technology. IGI Global, 2005. 111–116. Web. 10 Nov.

² Горбачев А. М., Сколько на самом деле стоит ERP, Автоматизация в промышленности, сентябрь 2010, стр. 31–35.