

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

Исследование ползучести латуни ЛС59-1 при комбинированном нагружении

Кафедра «Прикладная механика»

Студент: Мильков.А.В.
Научный руководитель: д.т.н., проф. Романов К.И.

Москва, 1999 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	12
1.1. Объект исследования.....	12
1.1.1. Образец.....	12
1.1.2. Материал образца	12
1.1.3. Геометрические размеры образца	14
1.2. Конструкция испытательного стенда.....	14
1.2.1. Назначение стенда	14
1.2.2. Схема нагружения	14
1.2.3. Компоновка испытательного стенда	18
1.2.4. Устройства управления, поддержания и измерения температуры.....	18
1.2.4.1. Нагревающее устройство.....	18
1.2.4.2. Устройство управления нагревом.....	20
1.2.4.3. Контроль температуры	20
1.2.5. Приложение и измерение осевой силы и крутящего момента.....	20
1.2.5.1. Приложение и измерение осевой силы.....	20
1.2.5.2. Приложение и измерение крутящего момента	21
1.2.6. Измерение осевого удлинения и угла поворота образца	21
1.2.6.1. Измерение осевого удлинения	21
1.2.6.2. Измерение угла поворота образца	23
1.2.6.3. Устройство сопряжения датчиков.....	26
1.3. Тарировка каналов измерений.....	28
1.3.1. Поверка средств измерения температуры	28
1.3.2. Тарировка датчика линейных перемещений	30
1.3.3. Тарировка датчика углов поворота	31
1.3.4. Проверка работоспособности каналов нагружения и измерения	31
1.4. Методика проведения испытаний.....	36
1.4.1. Подготовка к испытаниям.....	36
1.4.2. Проведение испытаний	37
1.4.3. Завершение испытаний.....	38
1.5. Программа проведения испытаний на ползучесть.....	40
1.6. Результаты испытаний	40

2. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С АНАЛИТИЧЕСКИМ РЕШЕНИЕМ.	55
2.1. Исследование одноосной ползучести латуни ЛС59-1	55
2.2. Исследование ползучести цилиндрического образца при кручении	59
2.2.1. Решение задачи о ползучести стержня при кручении	59
2.2.2. Сравнение экспериментальных кривых ползучести с кривыми, полученными на основе аналитического решения	60
2.2.3. Кручение трубчатого образца	62
2.3. Исследование ползучести цилиндрического образца при комбинированном нагружении растягивающей силой и крутящим моментом	67
2.3.1. Решение задачи о ползучести стержня при комбинированном нагружении	67
2.3.2. Сопоставление экспериментальных кривых ползучести и кривых, полученных на основе аналитического решения	69
ВЫВОДЫ	71
3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	72
3.1. Задание на технологическую часть	72
3.2. Цель испытаний	72
3.3. Образец для испытаний	72
3.4. Конструкция стенда	72
3.4.1. Назначение стенда	72
3.4.2. Схема испытаний	73
3.4.3. Компоновка стенда	73
3.4.4. Система приложения осевой силы	74
3.4.5. Система приложения крутящего момента	74
3.4.6. Нагревательное устройство	74
3.5. Методика проведения испытаний	75
3.5.1. Подготовка к испытаниям	75
3.5.1.1. Закрепление образца	75
3.5.1.2. Подготовка измерительной системы	76
3.5.1.3. Подготовка устройства нагрева печи	76
3.5.2. Проведение испытаний	76
3.5.2.1. Меры предосторожности	76
3.5.2.2. Разогрев образца	76
3.5.2.3. Стабилизация температуры	77

3.5.2.4. Нагружение образца	77
3.5.3. Завершение испытаний.....	77
3.6. Режимы испытаний и результаты испытаний	77
3.6.1. Режимы испытаний.....	77
3.6.2. Результаты испытаний	79
ВЫВОДЫ	80
4. ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	81
4.1. Определение затрат на разработку темы и проведение эксперимента.....	81
4.2. Планирование НИР.....	81
4.2.1. Определение трудоемкости эксперимента.....	81
4.2.1.1. Метод прямого нормирования	82
4.2.1.2. Метод вероятностных оценок	82
4.2.2. Расчет ленточного графика выполнения НИР	83
4.3. Определение количества экспериментов на основе теории планирования эксперимента.....	85
4.4. Определение затрат на проведение одного эксперимента.....	86
ВЫВОДЫ	88
5. ОХРАНА ТРУДА И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	89
5.1. Требования безопасности при проведении эксперимента	89
5.2. Основные требования охраны труда	89
5.3. Техника безопасности эксперимента	89
5.3.1. Воздух рабочей зоны.....	89
5.3.1.1. Содержание вредных веществ в рабочей зоне	89
5.3.1.2. Микроклимат рабочей зоны	90
5.3.1.3. Защита от источников тепловых излучений	90
5.3.1.4. Расчет ожидаемого лучистого потока в рабочей зоне	91
5.3.1.5. Системы отопления и вентиляции.....	92
5.3.2. Освещение рабочей зоны	92
5.3.3. Пожарная безопасность	93
5.3.3.1. Меры пожарной профилактики	93
5.3.3.2. Меры пожарной защиты	94
5.3.3.3. Средства пожаротушения	95
5.3.4. Защита от травм на рабочем месте	96
5.3.4.1. Электробезопасность	96
5.3.4.2. Защита от ожогов.....	97

5.3.4.3. Защита от механических повреждений	97
5.3.4.4. Организация рабочего места	97
5.4. Экологические требования к проектируемому технологическому процессу	97
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	100

ВВЕДЕНИЕ

Повышение производительности труда при горячей обработке металлов давлением потребовало модернизации технологических процессов. В ряде случаев необходимо снижение деформирующего усилия из-за невозможности осуществить процесс на существующем оборудовании. Это инициировало развитие теории комбинированного нагружения. Особенностью такого вида нагружения является наложение дополнительного силового или кинематического воздействия в сочетании с основным рабочим усилием [1]. В качестве такого дополнительного воздействия, например, может быть крутящий момент, действие которого совместно с основным рабочим усилием приводит к увеличению степени деформации материала и тем самым к повышению производительности процесса [2].

В связи с этим, практический интерес представляют такие технологические процессы, как, например, осадка с кручением (см. рис.I.) и волочение с кручением (см. рис.II). Так, сравнение экспериментальных данных по замерам усилий волочения при обычном безоправочном волочении и волочении с кручением показывает [3], что в последнем случае происходит снижение усилий волочения на 6-8%. При горячей осадке с кручением также показано [4], что осевое усилие деформирования под воздействием крутящего момента уменьшается на 20-40%.

Теоретические исследования комбинированного нагружения в условиях установившейся ползучести рассматривались в ряде работ [5-9]. В частности, в [9] было предложено решение краевой задачи растяжения с кручением стержня круглого поперечного сечения и показано, что приложение крутящего момента приводит к увеличению скорости процесса ползучести с одновременным увеличением затрат по мощности.

Однако, для решения технологических задач с использованием теории комбинированного нагружения необходимо проверить, насколько хорошо уравнения состояния материала согласуются с экспериментальными данными.

Целью настоящего дипломного проекта является:

- экспериментальное исследование комбинированного нагружения растягивающей силой и крутящим моментом цилиндрических образцов из латуни ЛС59-1;
 - сопоставление полученных экспериментальных данных с теоретическим расчетом на основе теории ползучести;
-

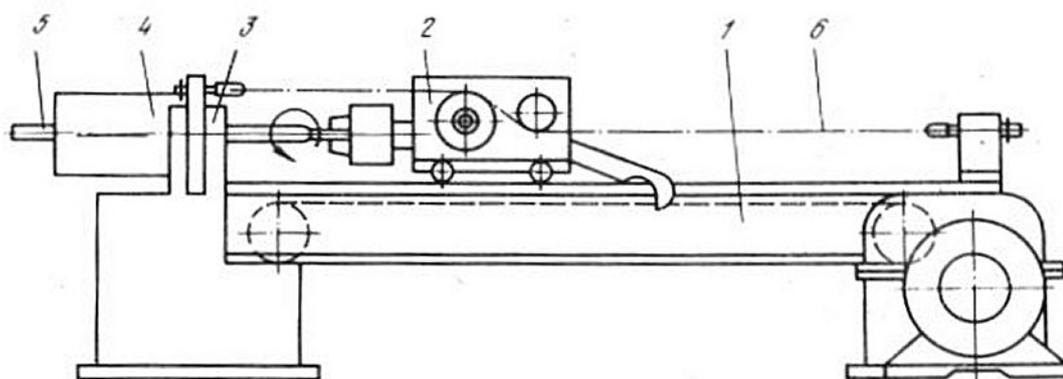


Рис. I. Волочение с кручением

1 – станина; 2 – тележка; 3 – стойка волок; 4 – устройство с профилированными роликами; 5 – заготовка; 6 – цепь.

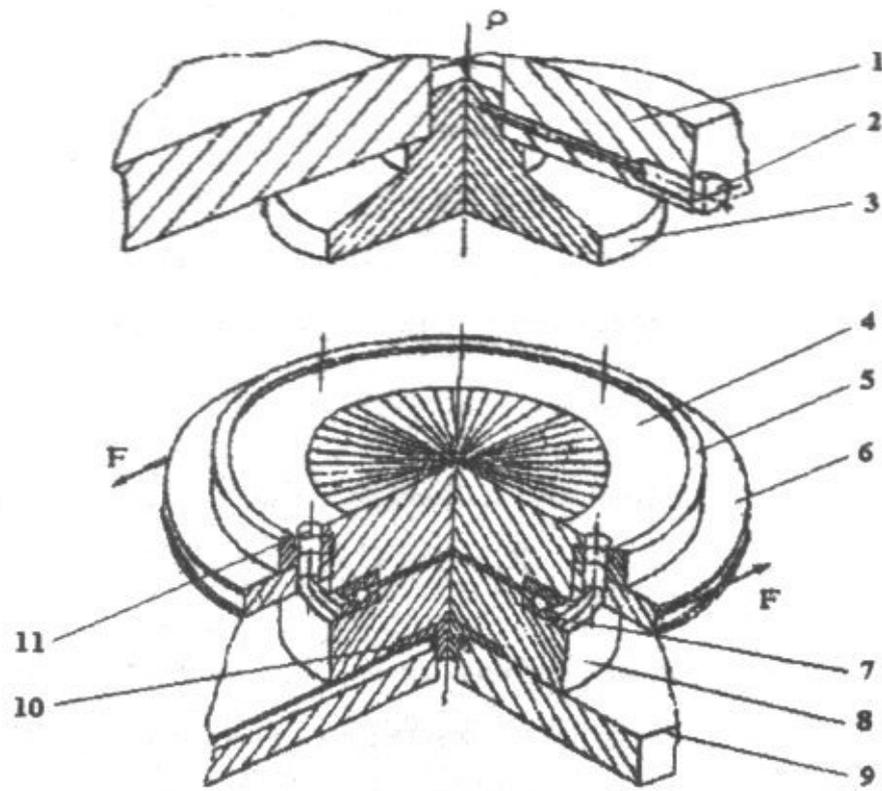


Рис. II. Осадка с кручением

- 1 – траверса реверсора верхняя; 2 – фиксатор; 3 - боек рифленый верхний;
 4 – боек рифленый нижний; 5 – прокладка; 6 – диск; 7 – подшипник опорный;
 8 – пята опорная; 9 – траверса реверсора нижняя;
 10 – фиксатор; 11 – соединение болтовое.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения характеристик ползучести материала при комбинированном нагружении необходимо проведение экспериментальных исследований. Для успешного проведения экспериментов требуется изготовление и отладка ряда устройств испытательной техники, настройка измерительной аппаратуры, разработка методики проведения испытаний.

В данной главе дипломного проекта изложены описание испытательного стенда для проведения испытаний, мероприятия по подготовке измерительной аппаратуры к испытаниям и методика проведения испытаний образцов при комбинированном нагружении в условиях ползучести.

1.1. Объект исследования

1.1.1. Образец

В качестве объекта для исследования использовался образец цилиндрической формы, изготовленный из латуни ЛС59-1. Фотография образца приведена на рис. 1.1.

1.1.2. Материал образца

Выбор в качестве материала для образца латуни ЛС59-1 связан с продолжением ранее начатых работ на кафедре – наличием полученных в работе [10] характеристик ползучести латуни ЛС59-1 при испытаниях на растяжение и сжатие в широком интервале температур. Химический состав латуни свинцовой ЛС59-1 согласно ГОСТ 15527-70 [11] приведен в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Вещество	Массовая доля, %
Состав	
Медь	59 – 61
Свинец	0,8 – 1,9
Примеси	
Железо	0,500
Сурьма	0,010
Висмут	0,003
Фосфор	0,020
Олово	0,300
Всего примесей	0,750

Примечание: Сумма примесей олова и кремния не должна превышать 0,5%.



Рис.1.1. Образец для испытаний

1.1.3. Геометрические размеры образца

Выбор геометрических размеров и формы образца (см. рис.1.2.) обусловлен:

- Необходимостью обеспечить однородное напряженное состояние по длине образца. Этому условию отвечают образцы, отношение длины рабочей части к диаметру которых, согласно ГОСТ 3248-81 [12], определяется зависимостью:

$$l_0 = 5.65 \sqrt{\frac{\pi d_0^2}{4}} \quad (1.1)$$

где l_0 - начальная длина рабочей части;

d_0 - начальный диаметр образца.

- Концентрация напряжений в галтелях образца, а также местах крепления головок образца в захватах минимальна [13].

1.2. Конструкция испытательного стенда

1.2.1. Назначение стенда

Для проведения испытаний образцов при комбинированном нагружении осевой растягивающей силой и крутящим моментом в условиях ползучести был разработан испытательный стенд. Общий вид стенда приведена на рис.1.3.

Конструкция стенда позволяет производить комбинированное нагружение испытываемых образцов осевой растягивающей силой и (или) крутящим моментом в условиях нагрева образцов в диапазонах:

- Температур от 0 до 1100 °С;
- Осевых усилий от 90 до 500 Н;
- Крутящих моментов от 0,4 до 16 Н м;
- Удлинений от 0 до 50 мм;
- Углов поворота от 0 до 1250 град (3,4 оборота).

1.2.2. Схема нагружения

Разработанный стенд позволяет производить нагружение образцов осевой силой, крутящим моментом и их совместным действием. Осевая растягивающая сила прикладывается к образцу через нижний захват, а крутящий момент – через верхний захват. Схема нагружения приведена на рис.1.4.

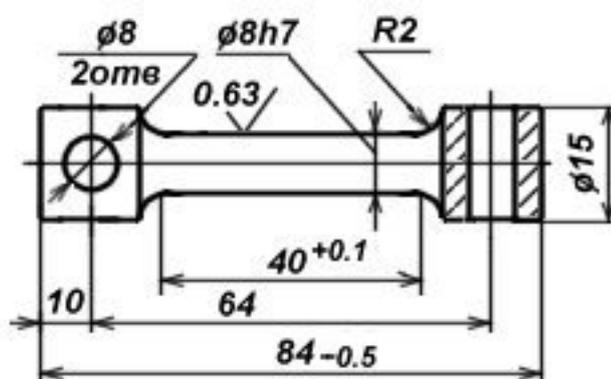


Рис.1.2 Геометрия образца

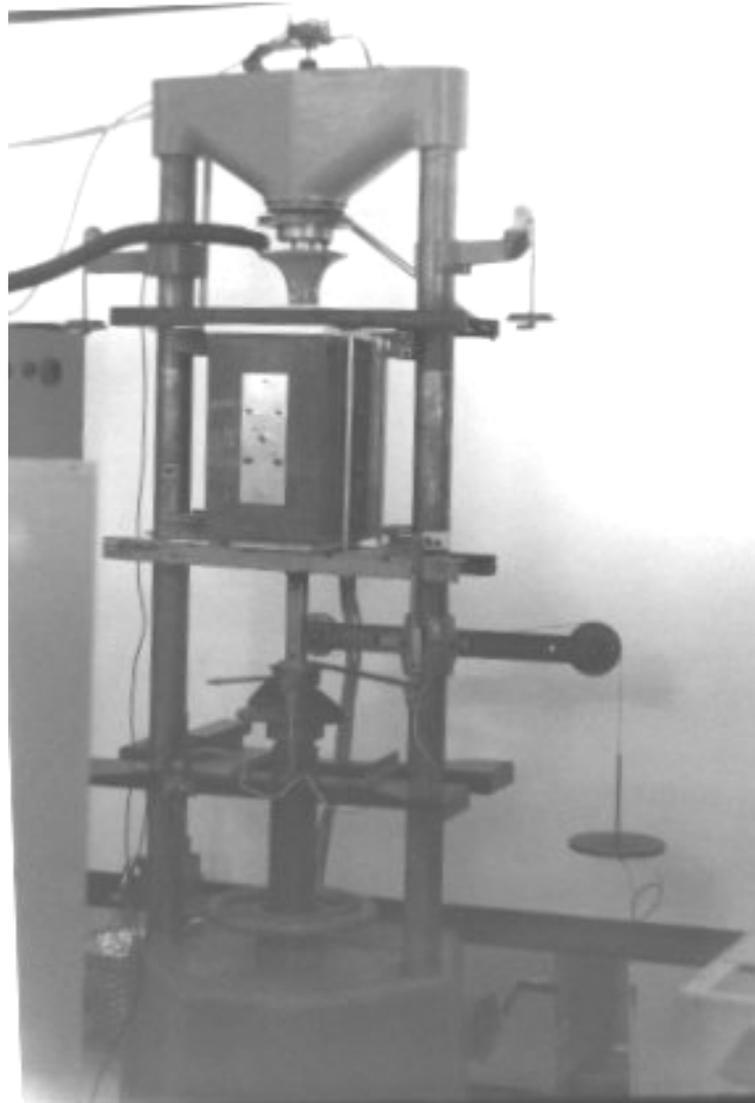


Рис.1.3. Общий вид испытательного стенда

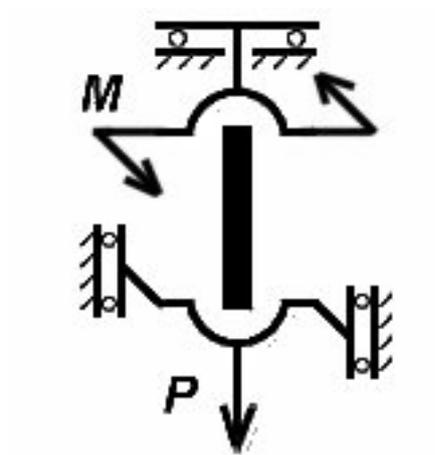


Рис. 1.4. Схема нагружения

1.2.3. Компоновка испытательного стенда

Стенд создан на базе испытательной машины КМ-50. Компоновка стенда приведена на рис. 1.5.

Стенд представляет собой жесткую раму, образованную чугуном основанием 1, двумя стальными колоннами 2 и верхней поперечиной 3. В верхней части на поперечине 3 в подшипниках закреплен верхний захват 4 со шкивом 5. Крутящий момент прикладывается к образцу 6 посредством грузов на подтарельниках 7, соединенных со шкивом 5 с помощью тросов 8, перекинутых через ролики 9.

Осевое усилие прикладывается к образцу 6 через нижний захват 10, приводящийся в движение посредством грузов на подтарельнике 11. Осевое усилие передается от грузов посредством троса 12, проходящего через систему роликов 13.

Поворот нижнего захвата в процессе нагружения крутящим моментом исключается за счет упоров 14, по которым нижний захват 10 перекачивается на подшипниках 15, закрепленных на крестовине 16. Упоры 14 жестко связаны с ходовым винтом 17, высота подъема которого на основании 1 регулируется с помощью колеса 18.

Для нагрева образца 6 служит нагревательное устройство - печь 19. Печь 19 закрепляется с помощью шпилек 20 между верхней 21 и нижней 22 подвижными траверсами, которые благодаря наличию роликов 23 имеют возможность перемещаться вверх-вниз по колоннам 2. Для подъема печи используется домкрат 24, установленный на неподвижной траверсе 25. Для фиксации печи в положении для испытаний служат две тяги 26, закрепленные одним своим концом на верхней поперечине 3, а другим – на верхней подвижной траверсе 21.

1.2.4. Устройства управления, поддержания и измерения температуры

1.2.4.1. Нагревающее устройство

Для нагрева образца при испытаниях служит двухсекционное нагревающее устройство – электропечь сопротивления, представляющее собой неразъемную камеру с центральным отверстием диаметром 90мм. В качестве нагревательного элемента служит ТЭН, закрепленный на керамической изоляции.

Камера имеет следующие габаритные размеры:

- Высота – 360мм;
- Ширина – 300мм;
- Глубина – 230мм.

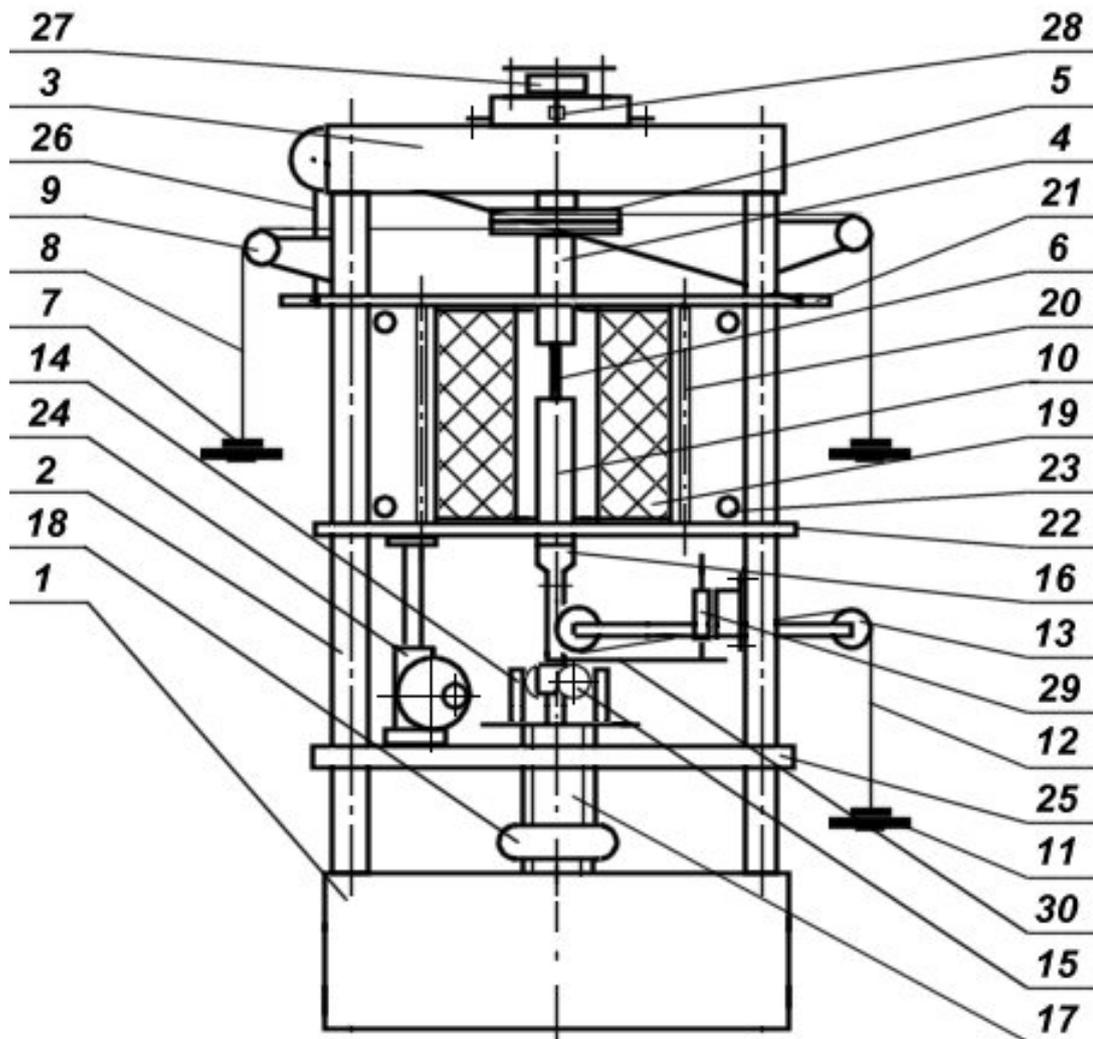


Рис 1.5. Компонка испытательного стенда

1 – основание; 2 – колонны; 3 – верхняя поперечина; 4 – верхний захват; 5 – шкив; 6 – образец; 7, 11 – подтарельники; 8, 12 – тросы; 9, 13 – системы роликов; 10 – нижний захват; 14 – упоры; 15 – подшипники; 16 – крестовина; 17 – ходовой винт; 18 – колесо; 19 – печь; 20 – шпильки; 21, 22 – подвижные траверсы; 23 – ролики; 24 – домкрат; 25 – неподвижная траверса; 26 – тяги; 27 – датчик углов поворота; 28 – муфта; 29 – датчик перемещений; 30 – консоль.

При закреплении образца печь 19 свободно перемещается вдоль захватов вверх-вниз, а затем закрепляется на тросах 26, устанавливается на верхней поперечине 3.

Для исключения утечки тепла и повышения равномерности нагрева образца зазоры между захватом и внутренней полостью камеры закрываются сверху и снизу теплоизолирующим керамическим материалом на основе нитрида кремния

Для исключения перегрева верхнего захвата и связанного с ним опорного подшипника, размещенного в верхней поперечине, в конструкции предусмотрен алюминиевый отражатель, закрепляемый на верхнем захвате и охлаждаемый воздухом из шланга, соединенного с вентилятором (на рис 1.5 не показан).

1.2.4.2. Устройство управления нагревом

Для управления нагревом и поддержания требуемой температуры печи применялось устройство, позволяющее независимо регулировать напряжение на обмотках верхней и нижней секций печи. Устройство представляет собой два силовых трансформатора, подключенных к сети переменного тока 220В, 5А. Для регулировки напряжения служат два реохорда, а для контроля – два вольтметра. Все узлы устройства собраны в стойке.

1.2.4.3. Контроль температуры

Контроль температуры на образце осуществлялся двумя хромель-алюмелевыми термопарами, подключенными к многоканальному электронному потенциометру типа КСП-4 (модификация 41.440.80.003)[14].

Выбор хромель-алюмелевых термоэлектрических преобразователей (ТХА) связан с тем, что в диапазоне температур 600-1000°С, они являются наиболее распространенными термопреобразователями. Зависимость ТЭДС от температуры у ТХА в этом диапазоне температур близка к линейной, чувствительность составляет в среднем 40 мкВ/К [15].

Термопары крепились к образцу в областях его верхней и нижней галтели. В целях предотвращения непосредственного воздействия излучения ТЭН печи на головки термопар, они закрывались стеклотканью.

1.2.5. Приложение и измерение осевой силы и крутящего момента

1.2.5.1. Приложение и измерение осевой силы

Осевая сила прикладывается к нижнему захвату 10 через трос 12, перекинутый через систему блоков 13 и соединенный с подтарельником 11 (см. рис.1.5). Масса подтарельника и троса составляет 400 г.

При испытаниях на растяжение, а также при комбинированной нагрузке на неподвижной траверсе 25 закрепляются специальные опоры, которые на период

разогрева печи подводятся под подшипники 15, и исключают тем самым действие веса захвата и крестовины на образец до начала испытаний. Конструкция опор учитывает эффект расширения образца и нижнего захвата в процессе разогрева, что дает возможность избежать поджатия образца при его нагреве до приложения нагрузки. При испытаниях на растяжение и комбинированной нагрузке масса нижнего захвата 10, крестовины 16, подтарельника 11 и троса 12 является минимальной реализуемой нагрузкой на образец и суммарно составляет 9000 г.

1.2.5.2. Приложение и измерение крутящего момента

Крутящий момент прикладывается к верхнему захвату через тросы 8, перекинутые через ролики 9 и соединенные с подтарельниками 7 (см. рис.1.5.). Масса подтарельника и троса составляет 250 г.

Для разгрузки образца на период разогрева печи при испытаниях на кручение используется цилиндрическая пружина, которая компенсирует массу образца 6, нижнего захвата 10 и крестовины 16. Пружина располагается внутри ходового винта 17. До начала приложения крутящего момента, шкив 5 фиксируется стопором клиновидной формы. Это исключает действие крутящего момента на образец до начала испытаний.

1.2.6. Измерение осевого удлинения и угла поворота образца

1.2.6.1. Измерение осевого удлинения

Измерение осевого удлинения образца производилось с помощью датчика перемещений, общий вид которого представлен на рис.1.6. Датчик относится к классу резисторных потенциометров [16] и представляет собой резистор постоянного сопротивления R_n , по которому перемещается скользящий электрический контакт. Этот контакт механически соединяется с деталью, перемещения которой он должен передавать; скользящий контакт потенциометра электрически изолируется от контролируемой детали. Величина сопротивления R между скользящим контактом и одним из концов резистора является функцией, с одной стороны, положения скользящего контакта и, следовательно, подвижной детали, положение которой измеряется, и, с другой стороны, конструкции резистора. Если резистор имеет однородную конструкцию, то потенциометр линеен, так как существует соотношение прямой пропорциональности между величиной R и положением скользящего контакта.

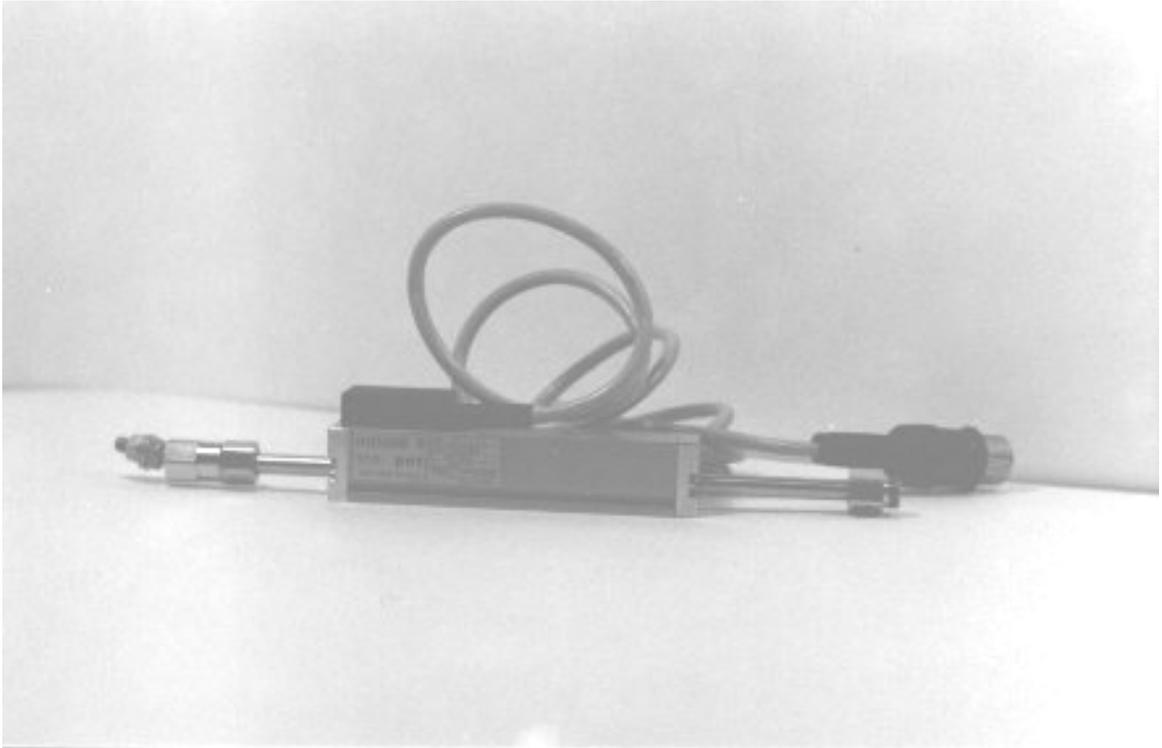


Рис.1.6. Датчик линейных перемещений

Датчик перемещений относится к типу потенциометров линейного перемещения. Зависимость сопротивления R от положения скользящего контакта (см. рис.1.7а) имеет вид:

$$R(l) = \frac{l}{L} R_n \quad (1.2)$$

Датчик перемещений 29 устанавливался на правой колонне 2 и был связан с нижним захватом 10 через консоль 30, жестко закрепленную на крестовине 16 (см. рис.1.5).

Датчик перемещений, применяемый в данной работе, имеет следующие характеристики:

- Габаритные размеры – 200x30x18 мм;
- Рабочий ход (база) – 50 мм;
- Номинальное сопротивление – 5 ± 0.5 кОм;

1.2.6.2. Измерение угла поворота образца

Измерение угла поворота образца производилось с помощью датчика углов поворота, общий вид которого представлен на рис.1.8. Датчик относится к классу резисторных потенциометров [16] и принцип действия его аналогичен принципу действия датчика линейных перемещений.

Датчик углов поворота относится к типу потенциометров углового перемещения и зависимость сопротивления R от положения скользящего контакта (см. рис.1.7б) имеет вид:

$$R(l) = \frac{\alpha}{\alpha_M} R_n \quad (1.3)$$

Датчик углов поворота 27 крепился на верхней поперечине 3 и был связан с верхним захватом 4 с помощью муфты 28, которая компенсировала несоосность крепления датчика по отношению к верхнему захвату.

Датчик углов поворота, применяемый в данной работе, имеет следующие характеристики:

- Габаритные размеры – 65x65x34 мм;
- Диапазон измеряемых углов – 0..330 град;
- Номинальное сопротивление – 2.5 ± 0.25 кОм;

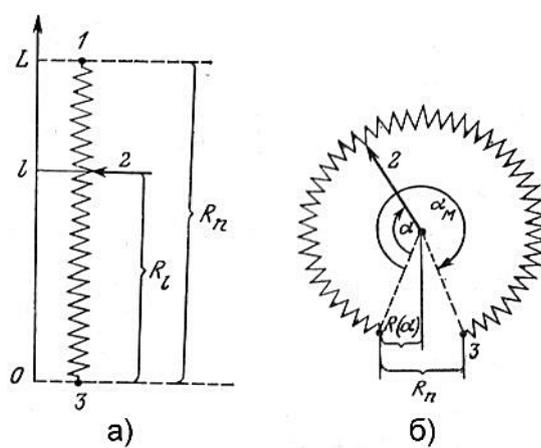


Рис.1.7. Принцип действия резисторных потенциометров



Рис.1.8. Датчик углов поворота

1.2.6.3. Устройство сопряжения датчиков

Для записи показаний датчиков перемещений и углов поворота на электронном потенциометре типа КСП-4 (модификация 41.130.80.039) было разработано специальное устройство сопряжения.

Принципиальная схема каждого канала устройства представляет собой полумостовую схему и приведена на рис. 1.9.

Преимуществом полумостовой схемы включения датчиков является линейность зависимости напряжения на КСП ($U_{\text{КСП}}$) от положения движка сопротивления датчика (r), которая определяется формулой [17]:

$$U_{\text{КСП}} = \frac{U}{R1 + R\delta} \left(\frac{(R2 + r3) \cdot (R1 + R\delta)}{R2 + r3 + R4} - R1 - r \right), \quad (1.4)$$

где $U_{\text{КСП}}$ - напряжение на КСП, В;

U - выходное напряжение источника питания, В;

$R\delta$ - номинальное сопротивление датчика, кОм;

$R1, R2, R4$ - номинальные сопротивления резисторов по схеме, кОм;

$r3$ - положение движка подстроечного резистора $R3$, кОм;

r - положение движка датчика, кОм.

Величины номинальных сопротивлений резисторов $R1, R2, R3, R4, R\delta$ для каждого канала сведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Номер канала	Резистор	Номинальное сопротивление, кОм
1 угол поворота	R1	2,5
	R2	2,0
	R3 - подстроечный	1,0
	R4	2,5
	R δ - датчик	2,5
2 перемещение	R1	5,0
	R2	4,5
	R3 - подстроечный	1,0
	R4	5,0
	R δ - датчик	5,0

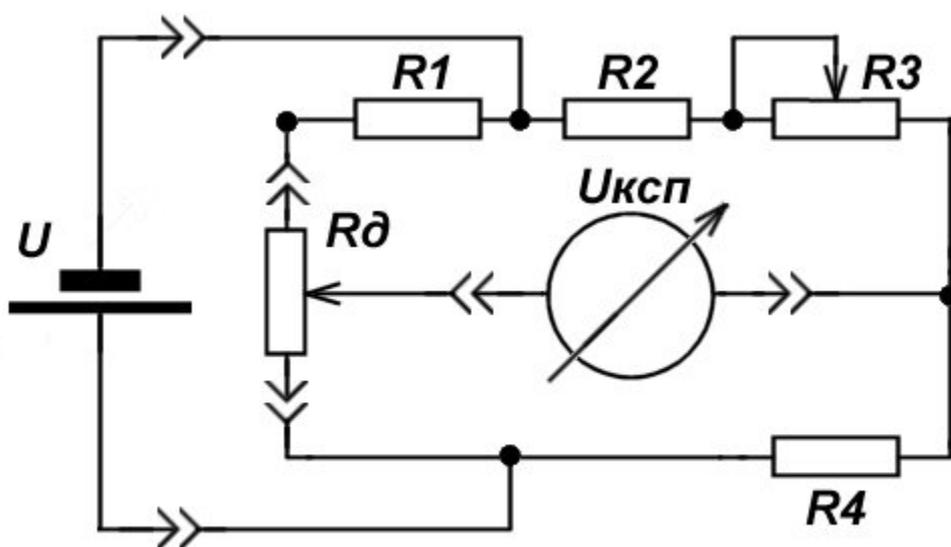


Рис. 1.9 Принципиальная схема канала опроса датчика

Питание устройства производилось от двух источников бесперебойного питания Б5-47 и Б5-44. Характеристики источников питания сведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Выходная величина	Диапазон изменения		Шаг изменения	
	Б5-44	Б5-47	Б5-44	Б5-47
Напряжение, В	0 – 30	0 – 30	0.5	0.5
Сила тока, А	0 – 1	0 – 3	0,01	0,01

Для уменьшения величины выходного сопротивления схемы, разъемы подключения КСП были зашунтированы резисторами сопротивлением по 150 Ом для каждого канала.

Для обеспечения соответствия ходу датчика полной развертки КСП, которая составляла 100 мВ, на источниках питания были заданы следующие величины выходных напряжений и сил тока (см. таблицу 1.4).

Таблица 1.4

Номер канала	Напряжение, В	Сила тока, А
1 – угол поворота	1.3	0.01
2 – перемещение	2.5	0.01

Устройство сопряжения, общий вид которого представлен на рис.1.10, включает в себя плату, на которой собрана электрическая схема, представленная на рис.1.9. Плата смонтирована в пластмассовом корпусе с разъемами для подключения датчиков, потенциометров типа КСП-4 и источников постоянного напряжения и содержит два независимых канала для опроса датчиков линейных перемещения и углов поворота.

1.3. Тарировка каналов измерений

1.3.1. Поверка средств измерения температуры

Для регистрации показаний термопар использовался многоканальный электронный потенциометр типа КСП-4 (модификация 41.440.80.003), в основу работы которого положен компенсационный метод измерения. Шкала потенциометра проградуирована в диапазоне от 0 до 1100°C для работы с хромель-алюмелевыми термопарами. В конструкции потенциометра предусмотрена компенсация изменения температуры свободных концов термопар возникающей при изменении комнатной температуры. Поверка технического состояния прибора была произведена в соответствии с ГОСТ 8.280-78 [18] метрологической службой МГТУ им. Н.Э. Баумана.

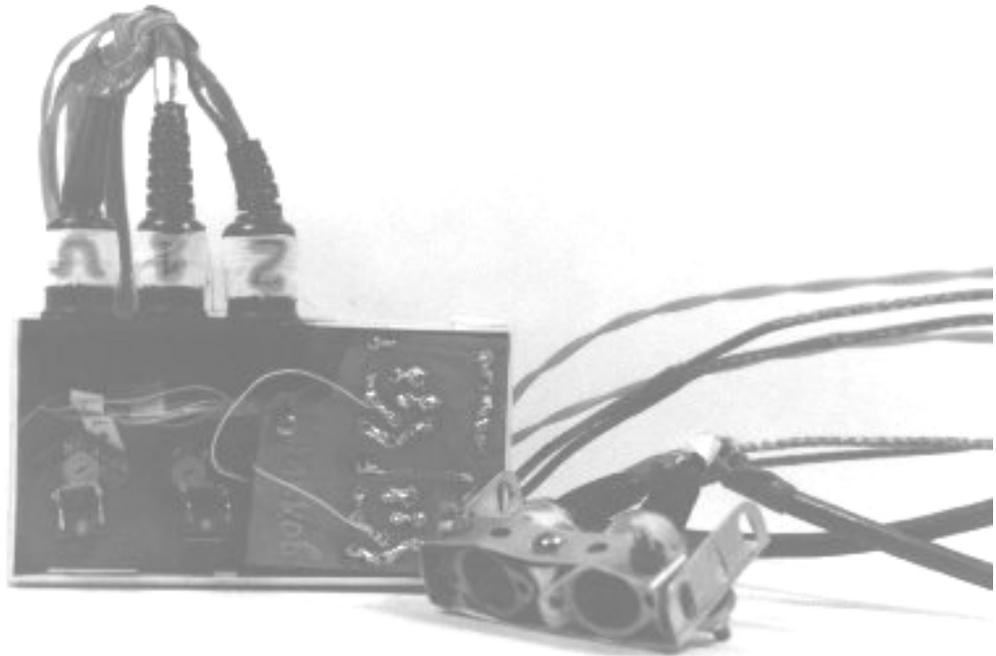


Рис.1.10 Устройство сопряжения датчиков

Хромель-алюмелевые термопары с толщиной проводов 0.5 мм и длиной 2.7 м были получены из пирометрической лаборатории ОАО «НИТС» после их поверки по ГОСТ 8.338-78 [19].

1.3.2. Тарировка датчика линейных перемещений

Тарировка датчика линейных перемещений производилась с помощью специального тарировочного приспособления представляющий собой жесткую раму с соостными валами, образующую «разрезанный» образец для испытания, к которому крепился датчик. Один вал через шаровую опору был связан с микрометрическим винтом с полным ходом 25 мм. Надежный контакт шаровой опоры вала с торцем микрометрического винта обеспечивался за счет прижима винтовой пружины. Другой вал был жестко заделан в раме. Общий вид тарировочного приспособления с закрепленным на нем датчиком представлен на рис.1.11.

Датчик, закрепленный в тарировочном устройстве, был подключен к КСП-4 через устройство сопряжения (см. п.1.2.6). Микрометрический винт был переведен в нулевое положение. После этого с шагом 2 мм микрометрическим винтом задавалось перемещение скользящего контакта датчика. Каждый шаг выдерживался в течение нескольких секунд, при этом на диаграммной бумаге получался ступенчатый график. По достижении полного (25 мм) хода винта, микрометрический винт переводился в нулевое положение, а крепление датчика перемещалось относительно валов тарировочного устройства таким образом, чтобы новому «нулю» винта соответствовала отметка в 25 мм на диаграммной ленте. После этого перемещение винта продолжалось до прохождения полного хода датчика - 50 мм. Затем описанные выше действия производились в обратном порядке для тарировки обратного хода. В результате на диаграммной ленте был получен ступенчатый график для прямого и обратного хода скользящего контакта датчика.

Для построения тарировочного графика – зависимости хода датчика от показаний КСП, соответствующие значения, взятые со ступенчатого графика, были сведены в таблицу, по которой с помощью программной среды Microsoft Excel, был построен график, аппроксимирующий тарировочную кривую.

Таблица и тарировочный график датчика линейных перемещений приведены на рис.1.12. Как видно из графика, зависимость хода датчика от показаний КСП не является линейной функцией, что объясняется, в частности неточностями в подборе номинальных сопротивлений схемы сопряжения (см. п.1.2.6), сопротивлениями соединительных проводов, и, возможно, слабой нелинейностью характеристики собственно датчика. Тем не менее, аппроксимирующая кривая описывается полиномом второй степени с известными коэффициентами, что дает возможность легко производить пересчет показаний КСП в ход датчика.

1.3.3. Тарировка датчика углов поворота

Тарировка датчика углов поворота производилась по шкале, которой снабжен датчик (см. рис.1.13).

Датчик был выдержан в комнатных условиях в течение 24 часов. По истечении этого времени он был подключен к КСП-4 через устройство сопряжения (см. п.1.2.6). После этого с шагом 15 град задавалось перемещение скользящего контакта датчика. Каждый шаг выдерживался в течение нескольких секунд, при этом на диаграммной бумаге получался ступенчатый график. После достижения полного рабочего оборота (330 град) описанные действия были произведены в обратном порядке для тарировки обратного хода. В результате на диаграммной ленте был получен ступенчатый график для прямого и обратного поворота скользящего контакта датчика.

Построение тарировочного графика – зависимости угла поворота датчика от показаний КСП, проводилось аналогично построению для датчика линейных перемещений. Таблица и тарировочный график датчика углов поворота приведены на рис.1.14.

1.3.4. Проверка работоспособности каналов нагружения и измерения

Для проверки работоспособности каналов нагружения и измерения, были проведены тестовые испытания с использованием образца-имитатора, представляющего собой отрезок резинового жгута круглого поперечного сечения диаметром 15 мм и длиной 80 мм.

Образец-имитатор был закреплен в захватах и затем нагружен различными комбинациями осевой растягивающей силы и крутящего момента. Нагрев печи не производился. Удлинение образца-имитатора составило 60%, угол закручивания – 500 град.

В результате испытаний образца-имитатора была проверена работоспособность как каналов нагружения – растягивающей силы и крутящего момента, так и каналов измерений – записи линейных перемещений и углов поворота.

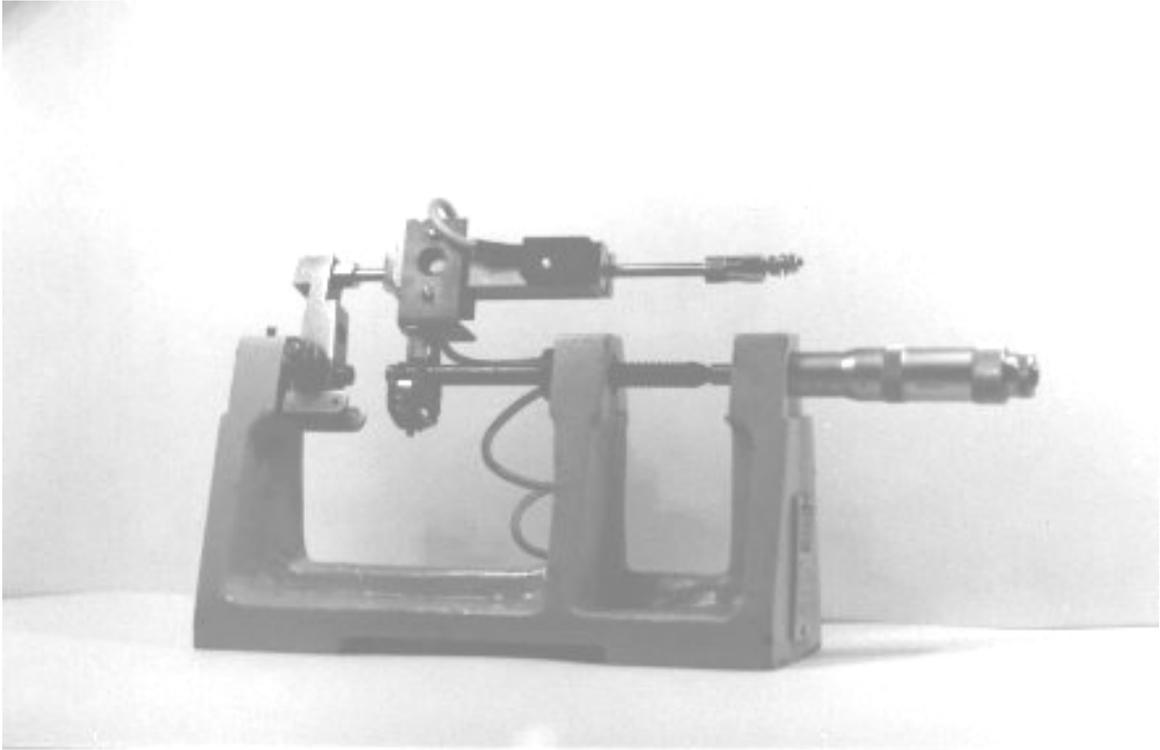


Рис.1.11. Приспособление для тарировки датчика перемещений

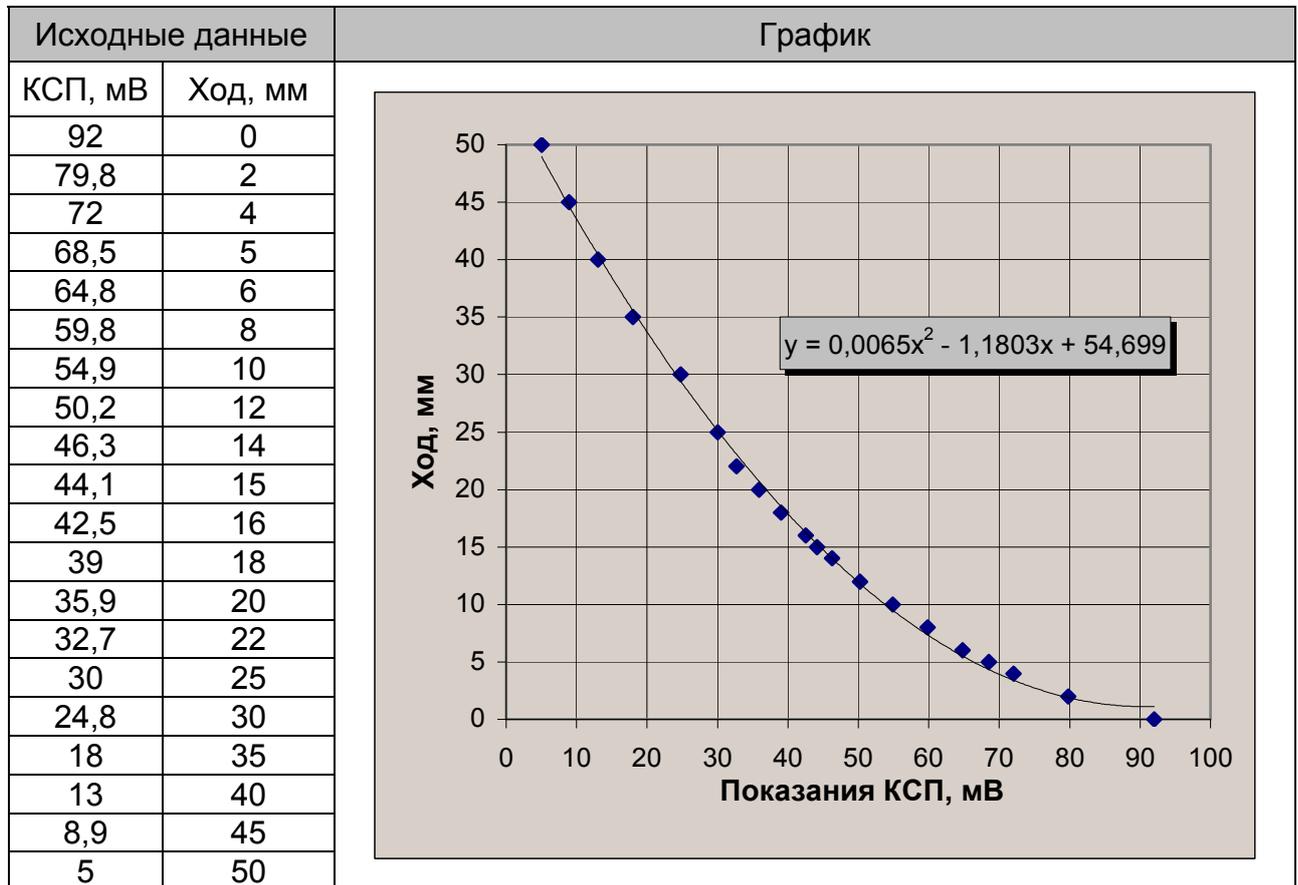


Рис 1.12. Тарировочный график датчика перемещений

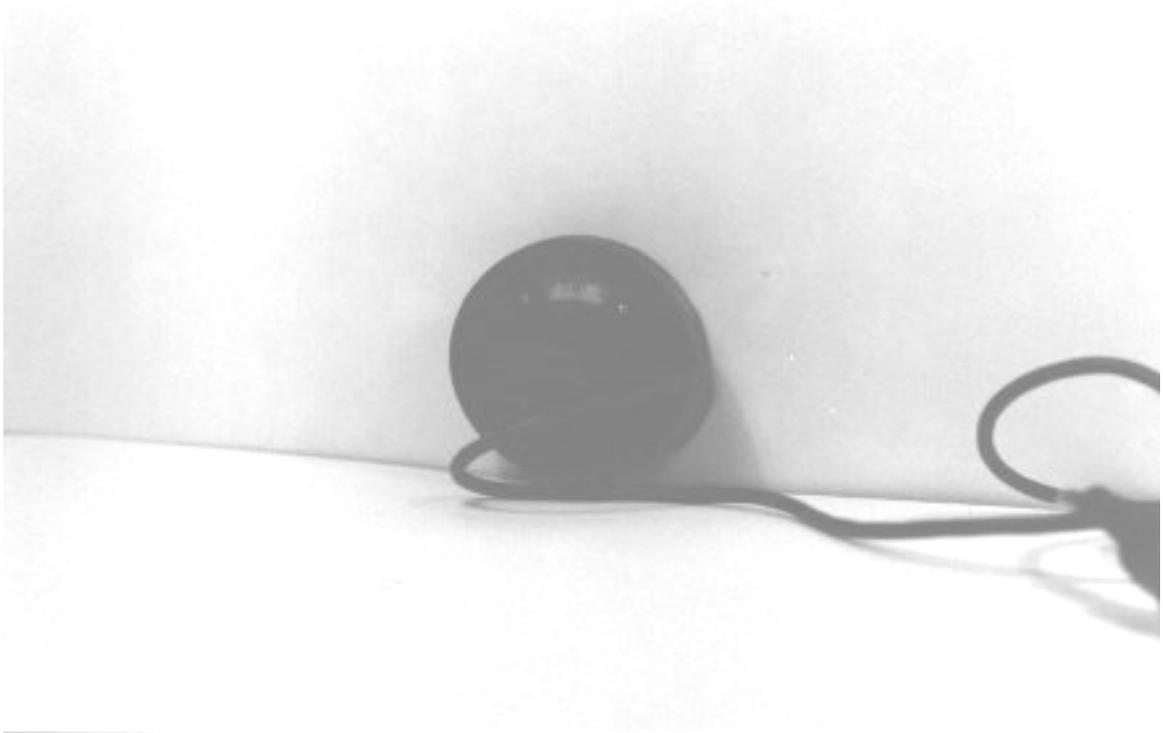


Рис.1.13. Тарировка датчика углов поворота

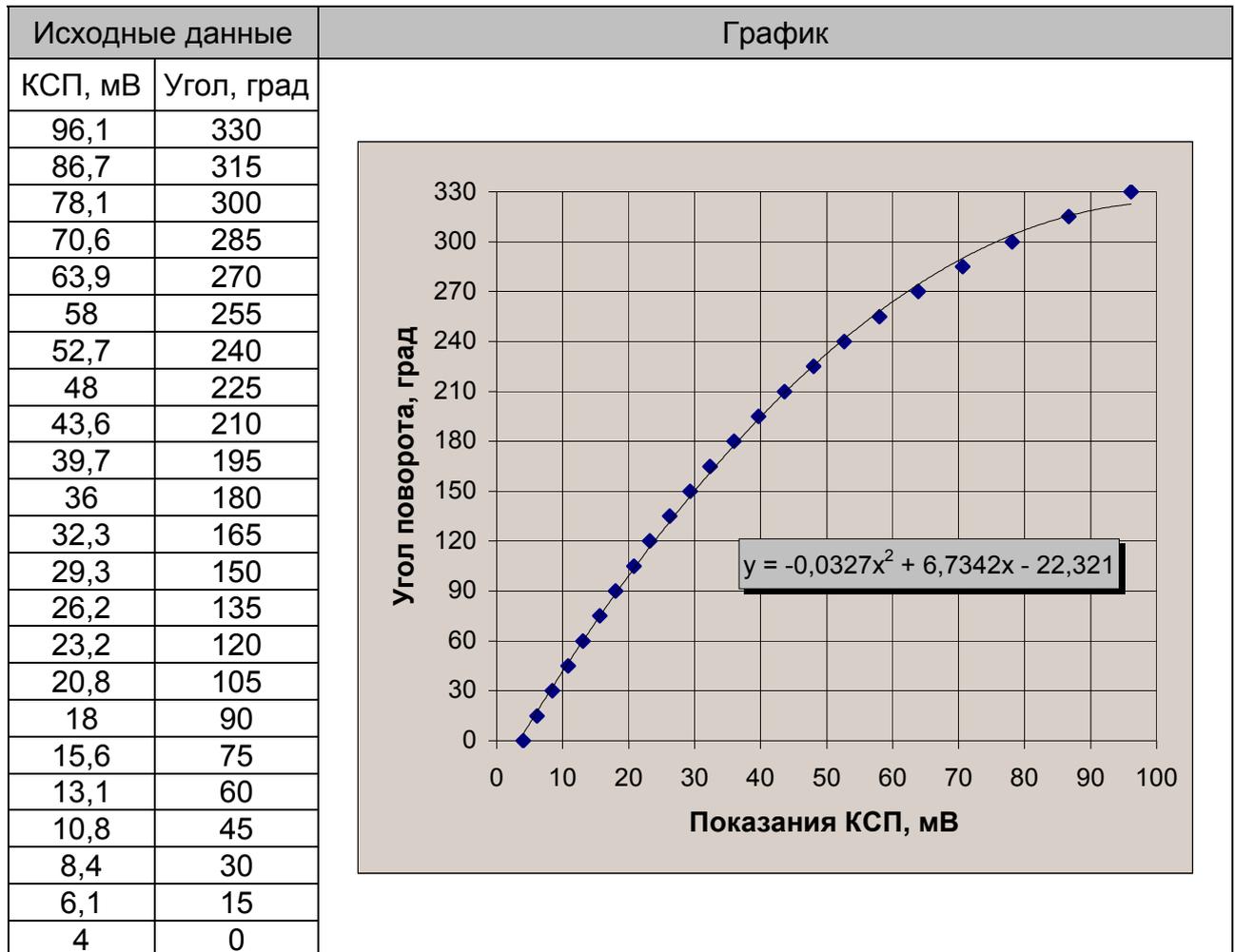


Рис.1.14 Тарировочный график датчика углов поворота

1.4. Методика проведения испытаний

Для проведения испытаний образцов при комбинированном нагружении в условиях ползучести была разработана методика испытаний. В соответствии заданием на технологическую часть настоящего дипломного проекта она представлена в разделе 3. Ниже приведены только основные ее положения.

1.4.1. Подготовка к испытаниям

Подготовка к проведению испытаний заключается в выполнении мероприятий изложенных ниже.

- Перед установкой образца в захваты испытательного стенда, необходимо правильно установить крестовину 16 в отверстие ходового винта 17 (см. рис.1.5). В зависимости от вида проводимых испытаний, эта процедура имеет определенные особенности. При проведении испытаний на кручение в отверстие ходового винта предварительно должна быть вставлена пружина, компенсирующая вес нижнего захвата, и только после этого в отверстие может быть вставлена крестовина. При испытаниях на растяжение, а так же при комбинированной нагрузке, пружина должна быть вынута из ходового винта.
- Образец закрепляется в нижнем захвате. В областях верхней и нижней галтелей к образцу привязываются термпары. После этого образец с нижним захватом устанавливается на крестовину. Затем с помощью колеса 18 крестовина с нижним захватом поднимается, и образец закрепляется в верхнем захвате. Образец установлен в захватах.
- Для облегчения процедуры установки образца, печь 19 может перемещаться вверх-вниз с помощью домкрата 24, обеспечивая свободный доступ к образцу и захватам.
- После установки образца, печь поднимается в штатное положение при испытаниях и фиксируется двумя тягами 26. После этого крестовина и нижний захват скрепляются штифтом. На крестовине закрепляется трос 12 с подтарельником 11 предназначенный для приложения к образцу осевой растягивающей силы.
- При подготовке измерительной системы к работе на испытательном стенде устанавливаются датчики линейных перемещений и углов поворота. На стойке с потенциометрами закрепляется устройство

сопряжения датчиков. Общий вид стойки приведен на рис.1.15. К устройству сопряжения подключаются источники питания, одноканальные потенциометры КСП-4 и датчики. К многоканальному потенциометру подключаются две термопары, закрепленные на образце.

- Потенциометры включаются на прогрев; проверяется наличие чернил в чернильницах одноканальных КСП-4 и фетрах барабана многоканального КСП-4.
- Зазоры между верхним захватом и камерой печи закрываются заглушками из теплоизолирующего материала. К верхнему захвату подводится шланг для подачи холодного воздуха.
- Шкив верхнего захвата фиксируется стопором. Под подшипники крестовины подводятся специальные опоры, после чего ходовой винт отводится вниз для обеспечения хода нижнего захвата во время испытаний.
- Стенд готов к проведению испытаний.

1.4.2. Проведение испытаний

Проведение испытаний заключается в выполнении мероприятий изложенных ниже.

- Включается многоканальный потенциометр КСП-4 для записи показаний термопар. Включается вентилятор для охлаждения верхнего захвата.
- Включается устройство управления нагревом. На обмотках секций печи устанавливаются напряжения: 170 В и 150 В для верхней и нижней секций соответственно.
- Разогрев печи до температуры испытаний, равной 650°C, проходит с указанными выше напряжениями на обмотках в течении 60-80 минут, при этом показания термопар фиксируются на диаграммной бумаге.
- При достижении температуры образца 630-640°C, устройство нагрева переключается в режим стабилизации, при этом на верхней и нижней обмотках секций печи устанавливаются напряжения 150В и 140В соответственно.

- Режим стабилизации проходит в течение 30-40 минут, при этом напряжения на обмотках секций печи могут слабо корректироваться для достижения равномерности распределения температур по длине образца. В соответствии с ГОСТ 3248-81 [12], отклонения от температуры испытаний (650°C) не превышают $\pm 4^\circ\text{C}$, то есть показания КСП-4 находятся в пределах 646 - 654°C.
- После того, как температура на образце выровнялась, можно переходить к нагружению образца. Для этого одноканальные КСП-4 включаются на запись показаний датчиков линейных перемещений и углов поворота (при испытаниях на комбинированное нагружение, приборы включаются синхронно).
- После этого на подтарельники навешиваются грузы. От шкива верхнего захвата отводится стопор, а из-под подшипников крестовины отводятся опоры (при испытаниях на комбинированное нагружение стопор и опоры отводятся одновременно).
- Осевая растягивающая сила или (и) крутящий момент начинают действовать на образец. Удлинение и угол скручивания образца фиксируются на одноканальных приборах КСП-4.

1.4.3. Завершение испытаний

По завершению испытаний, проводятся мероприятия, изложенные ниже:

- Выключается устройство управления нагревом печи. Выключаются приборы измерительной системы. Выключается вентилятор системы охлаждения. Открывается верхняя заглушка печи для выхода горячего воздуха.
- После охлаждения печи и захватов, образец извлекается в порядке, обратном, указанному в п.1.4.1.



Рис.1.15 Стойка регистрирующей аппаратуры

1.5. Программа проведения испытаний на ползучесть

В работе [10] были проведены испытания латуни ЛС59-1 при растяжении постоянной во времени силой при температуре 650°C. На основании проведенных испытаний были получены характеристики ползучести латуни и построены кривые ползучести для данной температуры.

В настоящем дипломном проекте также были проведены повторные испытания цилиндрических образцов из латуни ЛС59-1 на растяжение постоянной во времени силой при температуре 650°C для сопоставления с кривыми ползучести, полученными в работе [10].

Для установления возможности использования характеристик ползучести латуни на растяжение и сжатие, полученных в работе [10], для описания ползучести в условиях кручения, в настоящей работе были проведены испытания цилиндрических образцов из латуни ЛС59-1 на кручение постоянным во времени моментом.

Для изучения процесса неодноосной ползучести, было проведено испытание цилиндрического образца из латуни ЛС59-1 при комбинированном нагружении постоянными растягивающей силой и крутящим моментом.

Программа испытаний образцов в данной представлена режимами:

- Режим испытаний на растяжение постоянной во времени силой был выбран: $P = 200 \text{ Н}$ – 2 образца.
- Режимы испытаний на кручение постоянным во времени моментом были выбраны: $M_1=405 \text{ Н мм}$; $M_2=810 \text{ Н мм}$; $M_3=3240 \text{ Н мм}$ – всего 3 образца.

Дополнительно был выбран режим испытания трубчатого образца на кручение постоянным во времени моментом: $M = 810 \text{ Н мм}$.

- Режим испытаний на комбинированное нагружение постоянными во времени растягивающей силой и крутящим моментом был выбран: $P=200 \text{ Н}$, $M = 810 \text{ Н мм}$.

1.6. Результаты испытаний

Записи показаний датчиков линейных перемещений и углов поворота, были получены на диаграммной ленте электронных потенциометров для всех режимов испытаний, приведены в Приложении 3. Там же полученные кривые представлены в табличном виде.

С учетом тарифовочных графиков, приведенных в п.п.1.3.2 и 1.3.3, табличные экспериментальные данные были обработаны в программной среде Microsoft Excel. В результате обработки данных были получены таблицы, по которым построены кривые ползучести для каждого режима испытаний. Алгоритм обработки представлен на рис.1.16.

На рис 1.17 приведены кривые ползучести латуни при растяжении. Характерной особенностью этих кривых является отсутствие заметных участков упрочнения. С самого начала нагружения начинается накопление повреждений материалом, скорость деформаций постоянно нарастает в процессе испытаний вплоть до разрушения. Деформация при разрушении составляет 105-110%. Образец №1 показанный на рис 1.18. при нагружении в течение 400 секунд не был разрушен, удлинение образца составило 106%. Образец №1 был изогнут, что объясняется несоосностью верхнего и нижнего захватов. Этот недостаток был устранен при испытаниях образца №2, о чем свидетельствует фотография на рис.1.19. Этот образец при испытаниях был разрушен. Время до разрушения составило 390 сек., удлинение образца составило 110%.

На рис.1.20 приведены кривые ползучести латуни при кручении. Характерной особенностью этих кривых является их линейный характер. Это можно связать с малой скоростью накопления материалом повреждений в процессе испытаний его на кручение. Скорость угловых деформаций (углов закручивания) в процессе испытаний остается практически неизменной. Такой характер кривых ползучести наблюдается при всех трех режимах нагружения. Образец №3 после испытаний показан на рис.1.21. При испытаниях он не был разрушен. Угол закручивания образца №3 составил 640 градусов (1,78 оборотов). Образец №4 после испытаний показан на рис.1.22. При испытаниях он не был разрушен. Угол закручивания образца №4 составил 1200 градусов (3,33 оборотов). Образец №5 после испытаний показан на рис.1.23. При испытаниях он был разрушен. Угол закручивания образца №5 составил 4200 градусов (11,67 оборотов). В силу конструктивных особенностей испытательного стенда для этого образца была записана диаграмма деформирования только первых 1200 градусов (3,33 оборотов). Дальнейшее деформирование производилось после 3-х кратного перематывания троса на шкиве верхнего захвата. В результате этого удалось оценить угол закручивания образца №5 до разрушения. Следует заметить, что образец №5 разрушился в месте крепления к нему термомпары.

Во всех испытаниях на кручение был отмечен эффект укорочения образцов и связанную с этим их раздучу. Величина укорочения составляла для образца №3 - 3%, для образца №4 - 5%, для образца №5 - 11%.

На рис.1.24. приведена кривая ползучести трубчатого образца из латуни при кручении. Трубчатый образец №6 был изготовлен из стандартного сплошного

образца, приведенного на рис.1.1., сверлением в нем осевого отверстия диаметром 4мм, таким образом, толщина стенок составила 2 мм. Кривая ползучести этого образца также является близкой к линейной. Образец №6 после испытаний приведен на рис.1.25. При испытаниях он не был разрушен. Угол его закручивания составил 1120 градусов (3,11 оборотов). Характерной особенностью испытаний является потеря устойчивости, что объясняет винтовую структуру деформированного образца.

На рис.1.27. приведены кривые ползучести латуни при комбинированном нагружении растягивающей силой и крутящим моментом. Характерной особенностью этих кривых является очевидное наличие на них двух участков. Первый – начальный участок является практически линейным как для кривой осевой деформации, так и для угловой деформации. Это можно связать с небольшой скоростью накопления повреждений на начальном этапе нагружения. Скорости как осевой, так и угловой деформации на этом участке остаются практически постоянными. Продолжительность участка - 150 секунд. Второй участок – ползучесть, сопровождаемая быстрым накоплением повреждений и приводящая к разрушению. Образец №7 после испытаний, приведенный на рис.1.28 при нагружении был разрушен, время до разрушения составило 175 секунд, удлинение составило 112%, угол закручивания составил 1200 градусов (3,33 оборотов). Следует отметить, что из-за конструктивных особенностей стенда, запас хода по углу поворота был исчерпан на 165-ой секунде, раньше, чем образец разрушился. Об этом свидетельствует скачок на кривой осевой деформации.

Во всех опытах наблюдалось окисление образцов в процессе испытаний. Толщина окисной пленки зависела от времени нахождения образца в печи. Очевидно, что из-за кратковременного характера испытаний наличие окисной пленки незначительно сказывается на полученных результатах.

Проведенные испытания позволили установить:

- Удлинения и угол закручивания при разрушении образцов;
- Долговечность образцов;

Кроме того, испытания позволили получить необходимые данные при кручении и комбинированном нагружении цилиндрических образцов для сравнения их с результатами аналитического исследования.

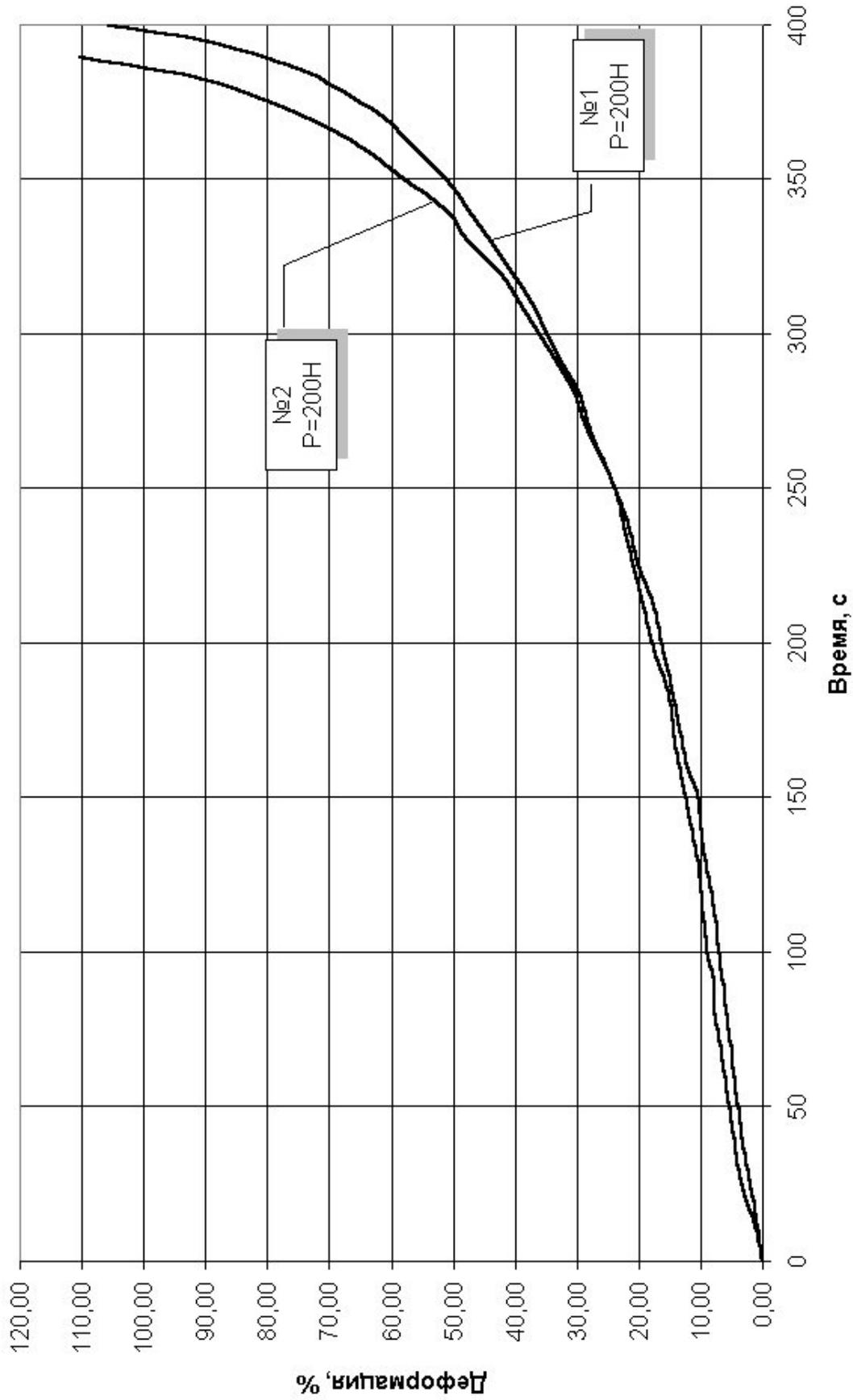


Рис.1.17. Кривые ползучести при растяжении

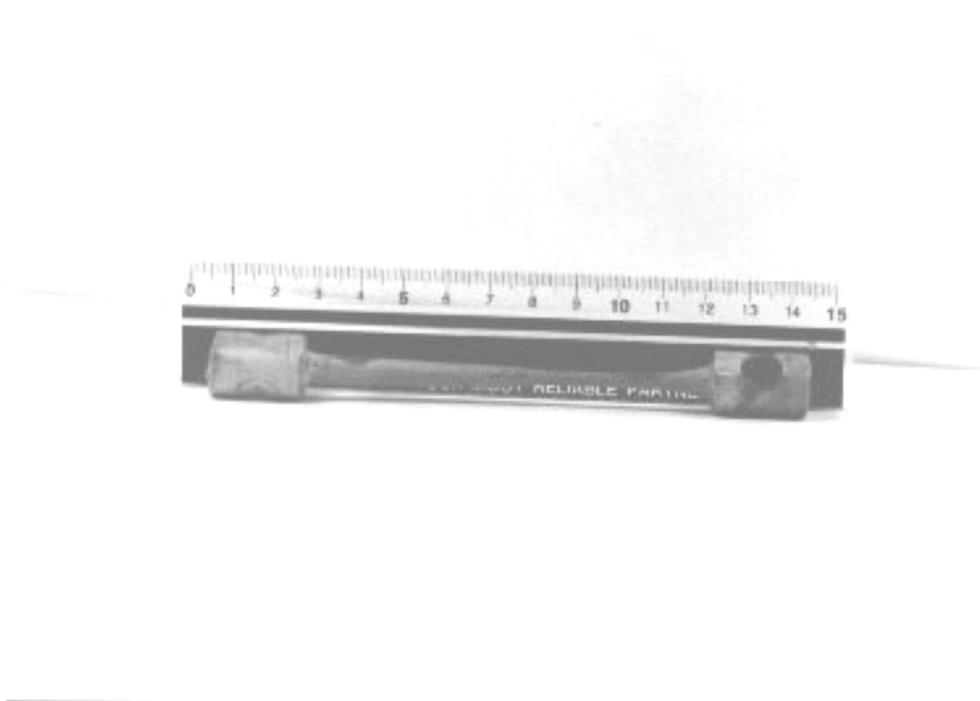


Рис.1.18 Образец №1 после испытаний



Рис.1.19. Образец №2 после испытаний

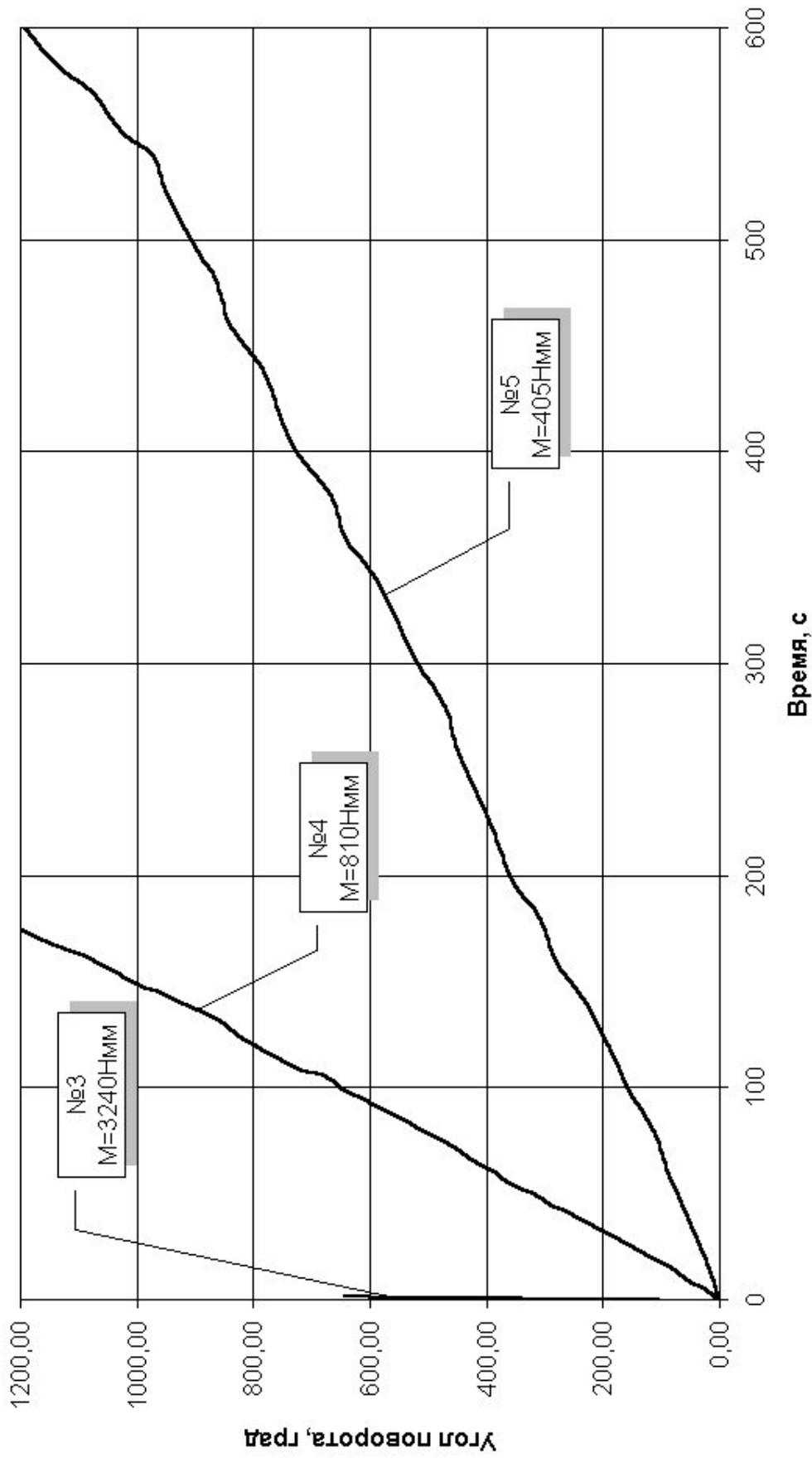


Рис.1.20. Кривые ползучести при кручении

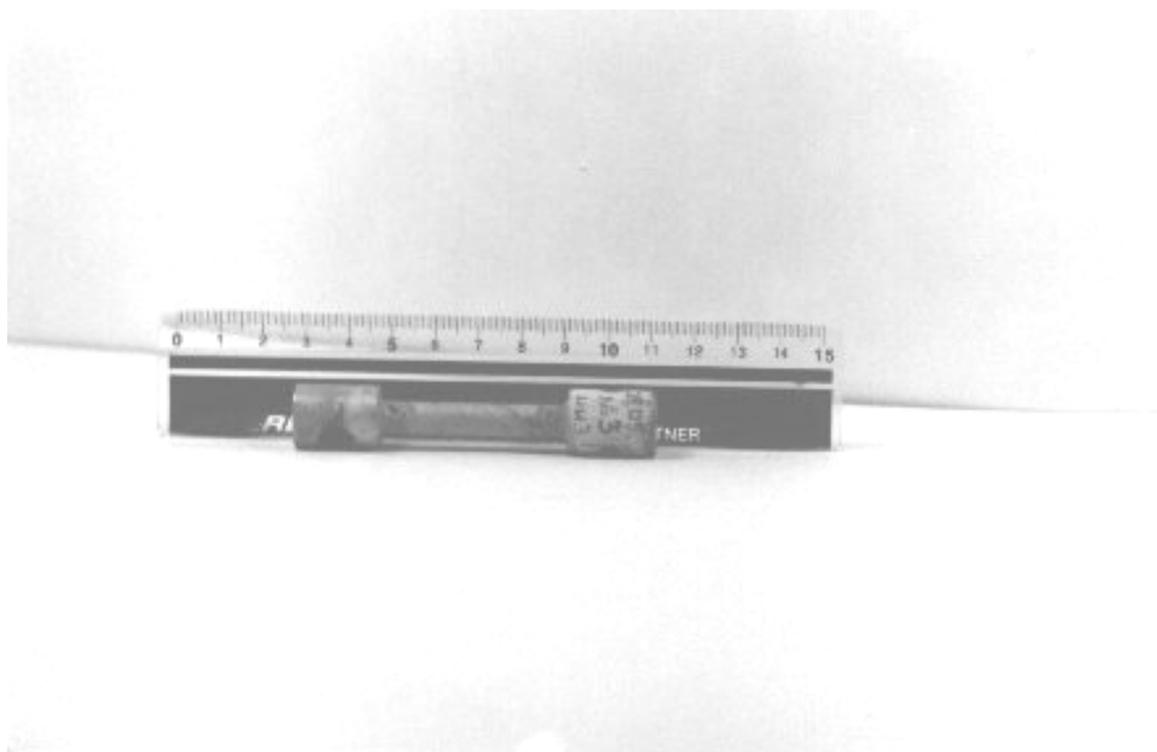


Рис.1.21. Образец №3 после испытаний

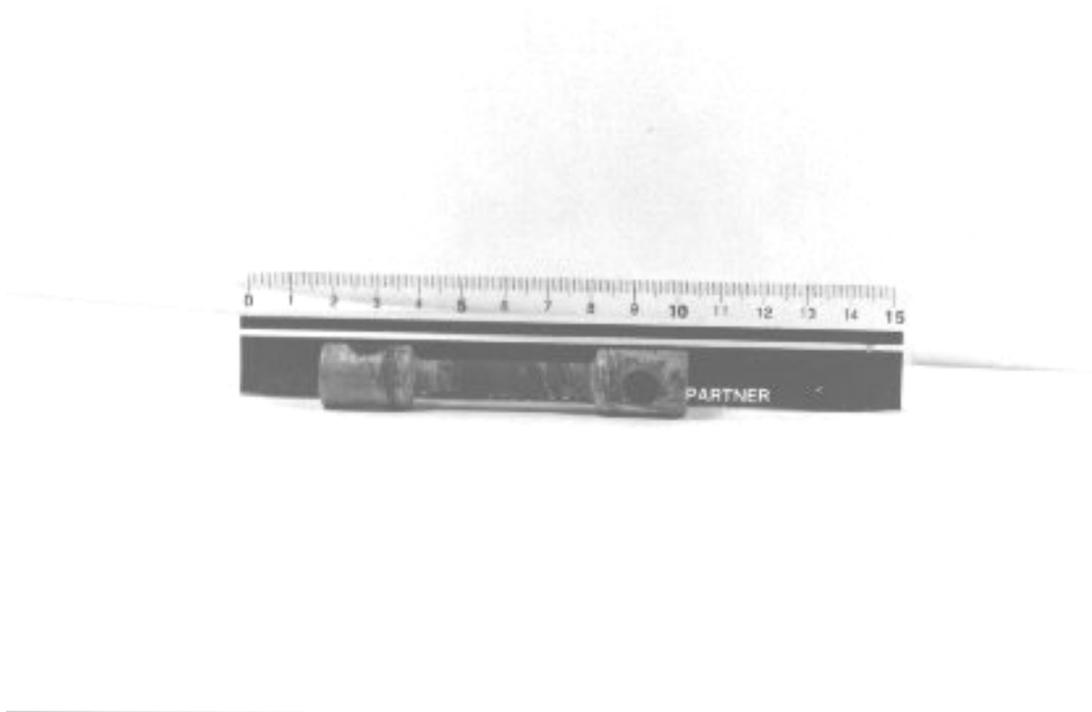


Рис.1.22. Образец №4 после испытаний

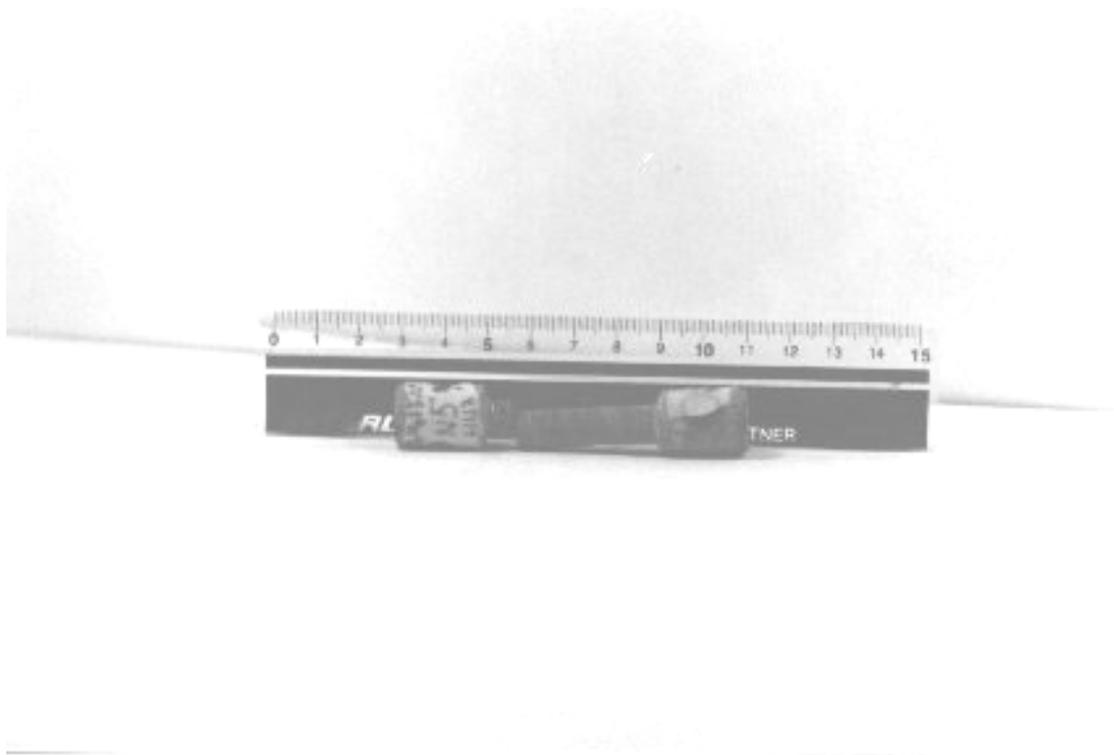


Рис.1.23. Образец №5 после испытаний

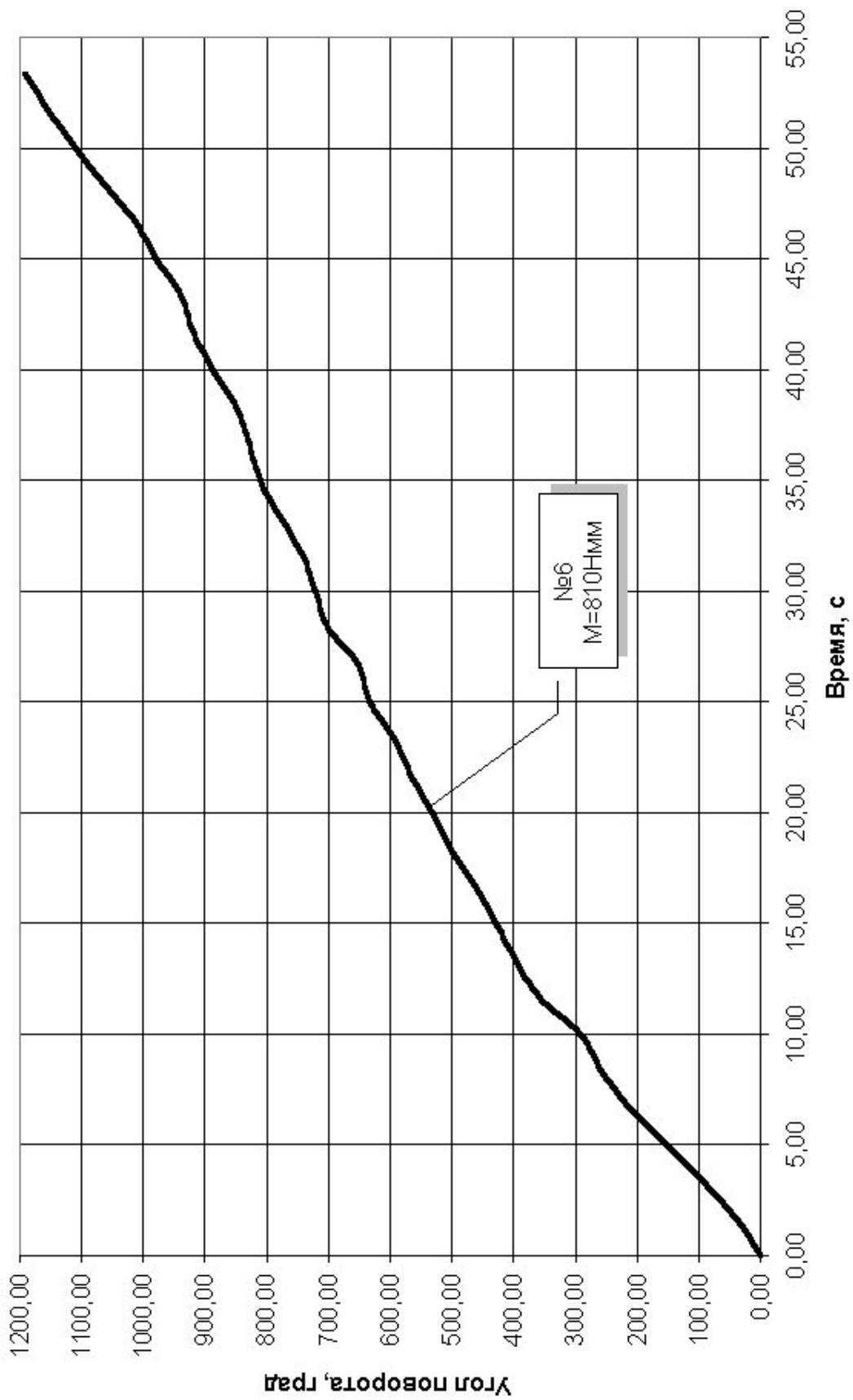


Рис.1.24. Кривая ползучести трубчатого образца

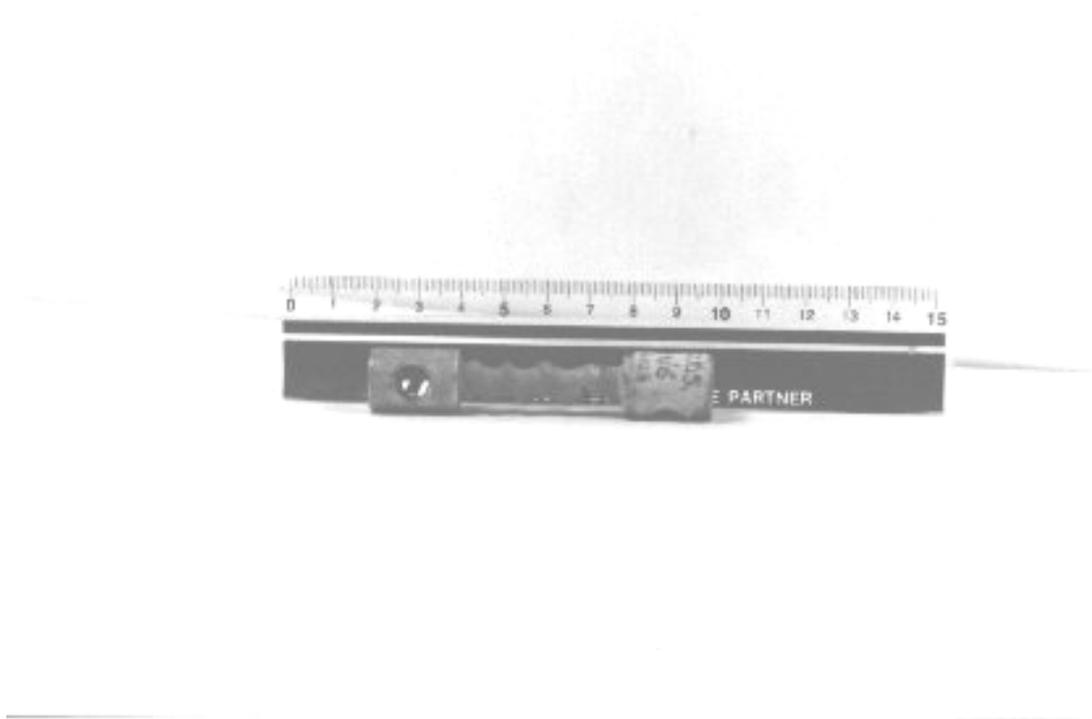


Рис.1.25. Образец №6 после испытаний

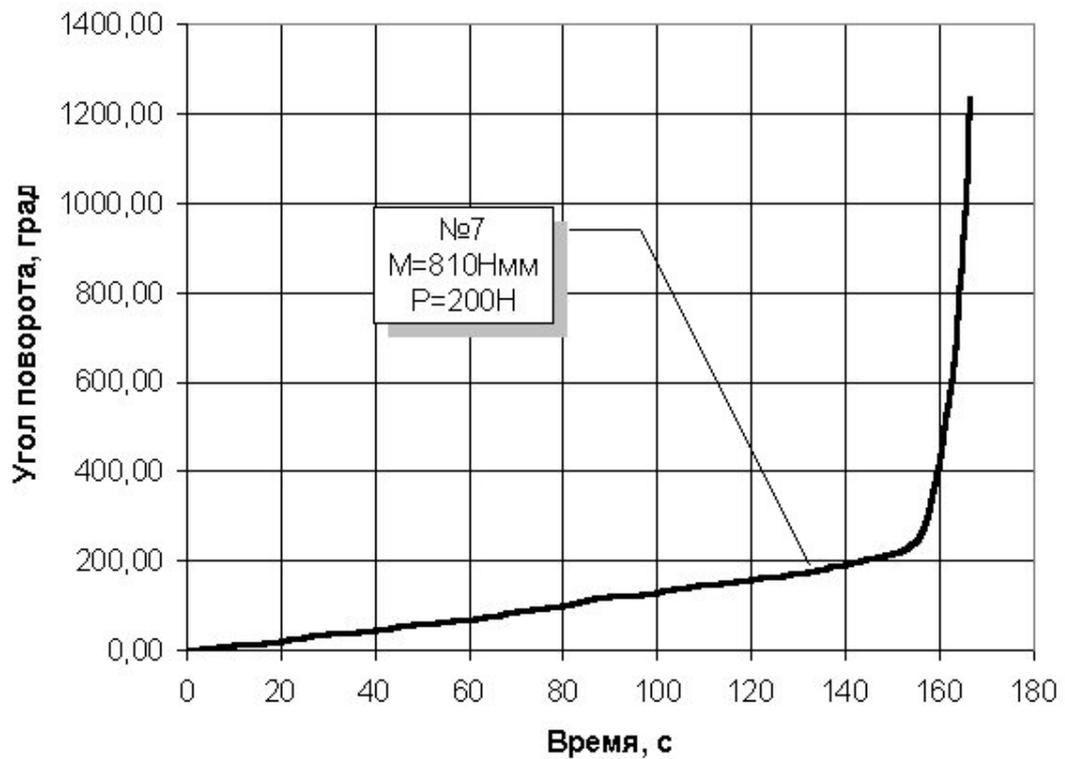
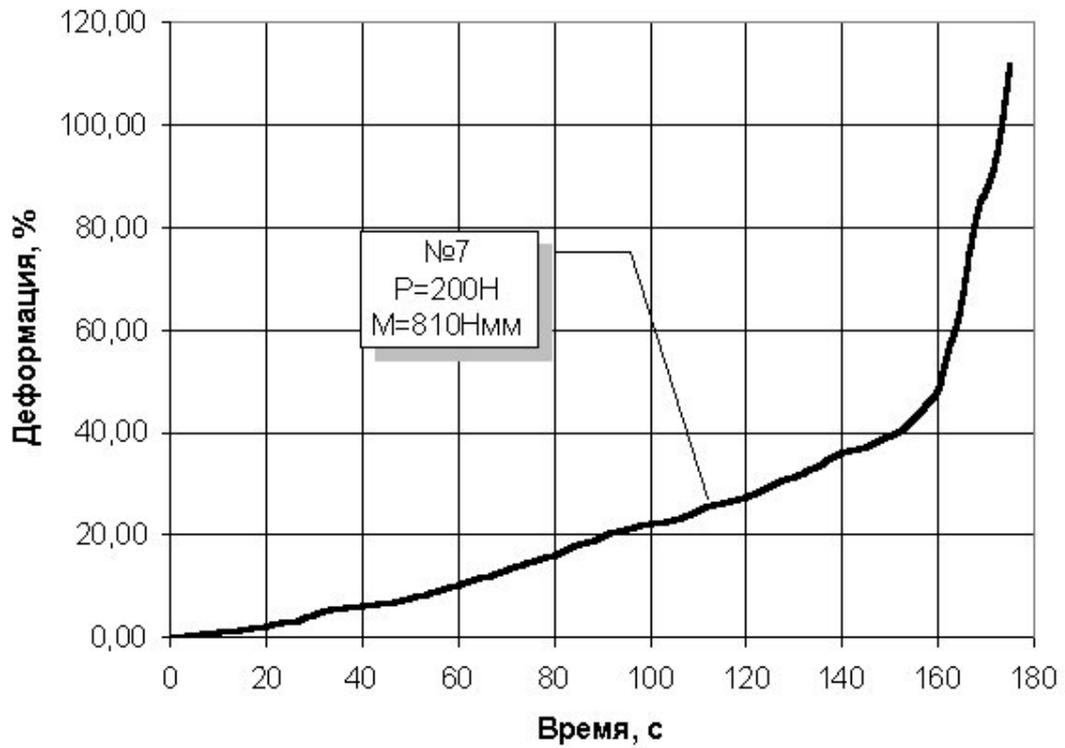


Рис.1.26. Кривые ползучести при комбинированном нагружении

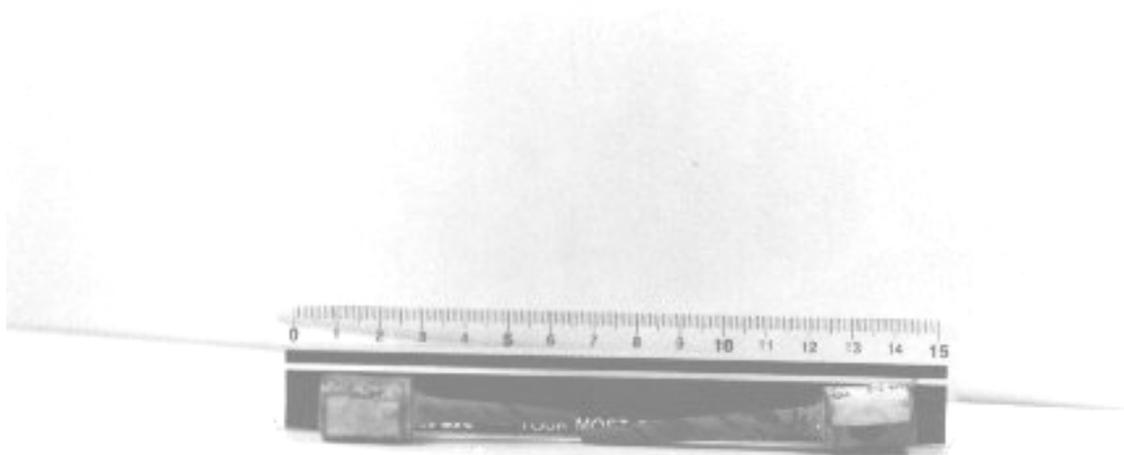


Рис.1.27. Образец №7 после испытаний

2. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С АНАЛИТИЧЕСКИМ РЕШЕНИЕМ.

2.1. Исследование одноосной ползучести латуни ЛС59-1

Заметим, что проводимые ранее экспериментальные исследования ползучести латуни ЛС59-1 на растяжение и сжатие при температуре 650°C были изложены в работе [10]. Для описания процесса ползучести в работе [10] использовались следующие кинетические уравнения:

- Растяжение описывалось моделью с накоплением повреждений уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \frac{k\sigma^n}{(1-\omega)^m} \\ \dot{\omega} = \frac{k\sigma^n}{(1-\omega)^m} \cdot \frac{1}{\bar{\varepsilon}_*} \end{cases} \quad (2.1)$$

где $\dot{\xi}$ - скорость деформации ползучести;

σ - действительное напряжение;

ω - параметр поврежденности;

$\bar{\varepsilon}_*$ - логарифмическая деформация образца к моменту разрыва;

k, n, m - постоянные материала для заданной температуры.

- Сжатие описывалось моделью без накопления повреждений уравнениями:

$$\dot{\xi} = k\sigma^n \quad (2.2)$$

где $\dot{\xi}$ - скорость деформации ползучести;

σ - действительное напряжение;

k, n - постоянные материала для заданной температуры.

В результате обработки экспериментальных данных были получены значения констант k, n, m, ε_* для растяжения и k, n для сжатия при температуре 650°C. Константы сведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Вид испытаний	Константы материала			
	k	n	m	$\bar{\varepsilon}_*$
Растяжение	$1,15 \cdot 10^{-5}$	2,95	0,3	0,92
Сжатие	$1,40 \cdot 10^{-5}$	2,40	—	—

Аналитические аппроксимации кривых ползучести на растяжение и сжатие для различных значений начального напряжения σ_0 , полученные в работе [10], показаны на рис.2.1 и рис. 2.2. соответственно сплошными линиями.

Экспериментально полученные в работе [10] кривые ползучести на растяжение и сжатие представлены на рис.2.1 и рис.2.2 соответственно и показаны точками (•).

Экспериментально полученные в настоящей работе кривые ползучести на растяжение представлены на рис.2.1 и показаны крестиками (+).

Как видно на рис.2.1, экспериментальные кривые, полученные в настоящей работе, хорошо согласуются с экспериментальными кривыми и их аналитической аппроксимацией, полученными в работе [10].

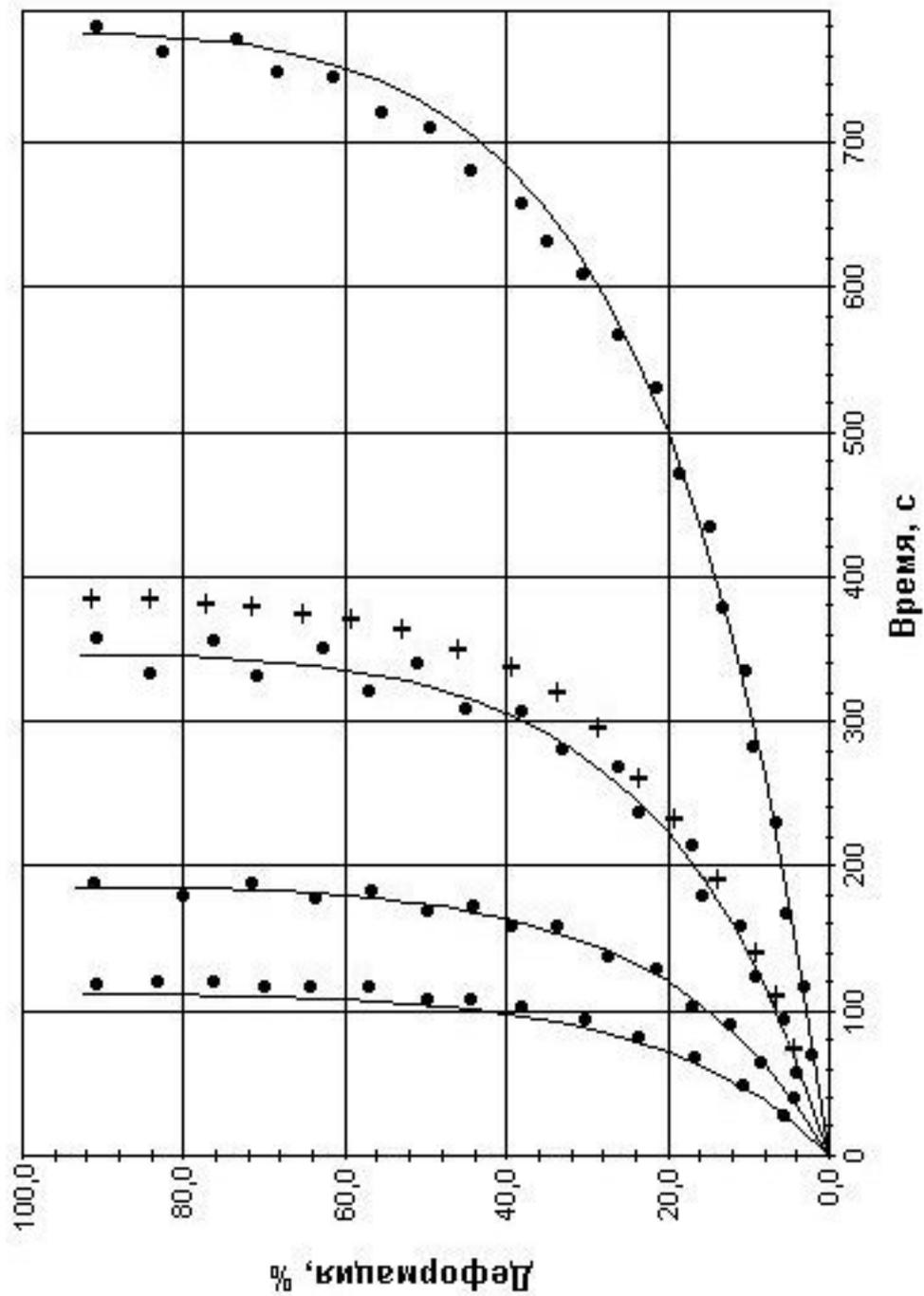


Рис.2.1 Кривые ползучести на растяжение
 --- - аналитическая аппроксимация [10]; • - данные из работы [10]; + - настоящая работа.

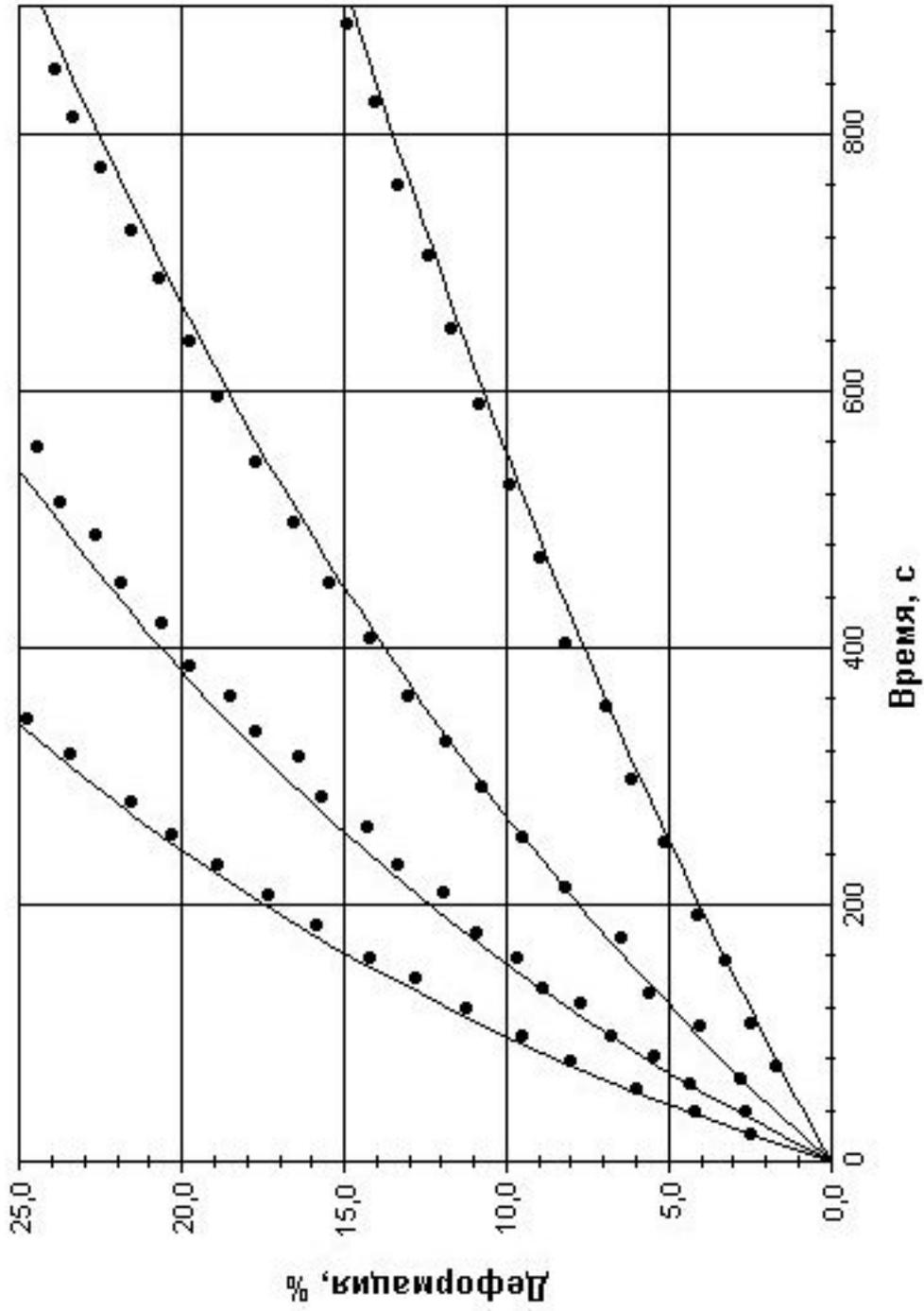


Рис.2.2 Кривые ползучести на сжатие
— - аналитическая аппроксимация [10]; • - данные из работы [10].

2.2. Исследование ползучести цилиндрического образца при кручении

2.2.1. Решение задачи о ползучести стержня при кручении

Рассмотрим задачу о кручении стержня, поперечное сечение которого представляет собой круговое кольцо с наружным диаметром D и внутренним диаметром d [20]. Будем считать, что поперечные сечения стержня остаются плоскими, а радиусы прямолинейными. Найдем зависимость угла закручивания от времени.

Уравнение состояния примем в виде:

$$\xi_e = k \sigma_e^n \quad (2.3)$$

где ξ_e - эквивалентная скорость деформации;
 σ_e - эквивалентное напряжение;
 k, n - постоянные материала для заданной температуры

Скорость угловой деформации $\dot{\gamma}$ определяется формулой:

$$\dot{\gamma} = \dot{\phi} \frac{r}{l} \quad (2.4)$$

где $\dot{\gamma}$ - скорость угловой деформации;
 $\dot{\phi}$ - скорость закручивания стержня;
 r - текущий радиус;
 l - длина стержня.

Эквивалентные напряжение и скорость деформации ползучести имеют вид:

$$\sigma_e = \tau \sqrt{3}, \quad \xi_e = \frac{\dot{\gamma}}{\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

где σ_e - эквивалентное напряжение;
 τ - касательное напряжение в стержне;
 ξ_e - эквивалентная скорость деформации;
 $\dot{\gamma}$ - скорость угловой деформации.

Подставим (2.4) и (2.5) в (2.3), и, выразив τ , получим:

$$\tau = 3^{-\frac{n+1}{2n}} \left(\frac{1}{kl} \right)^{\frac{1}{n}} r^{\frac{1}{n}} \quad (2.6)$$

Запишем выражение для крутящего момента:

$$M = 2\pi \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} \tau r^2 dr \quad (2.7)$$

Подставляя (2.6) в (2.7) и производя интегрирование, с учетом (2.4) получим выражение для скорости закручивания стержня $\dot{\varphi}$:

$$\dot{\varphi} = 3^{\frac{n+1}{2}} lk \left(\frac{M}{J_{ПП}} \right)^n \quad (2.8)$$

Назовем $J_{ПП}$ обобщенным полярным моментом инерции кольцевого поперечного сечения. $J_{ПП}$ будет вычисляться по формулам:

- Для кольцевого поперечного сечения:

$$J_{ПП} = 2^{\frac{2n+1}{n}} \frac{\pi n}{3n+1} D^{\frac{3n+1}{n}} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^{\frac{3n+1}{n}} \right] \quad (2.9)$$

- Для круглого поперечного сечения:

$$J_{ПП} = 2^{\frac{2n+1}{n}} \frac{\pi n}{3n+1} D^{\frac{3n+1}{n}} \quad (2.10)$$

Зависимость угла закручивания от времени можно, проинтегрировав (2.9) с начальным условием, что при $t=0$, $\varphi=0$. Получим:

$$\varphi = 3^{\frac{n+1}{2}} lk \left(\frac{M}{J_{ПП}} \right)^n t \quad (2.11)$$

2.2.2. Сравнение экспериментальных кривых ползучести с кривыми, полученными на основе аналитического решения

В настоящем дипломном проекте были проведены испытания на кручение цилиндрических образцов в условия ползучести. Экспериментальные кривые ползучести, полученные для различных значений крутящего момента, показаны на рис.2.3, 2.4, 2.5 точками (♦).

На основании аналитического решения задачи о кручении стержня в условиях ползучести, полученного в п.2.2.1, по формуле (2.11) для различных значений крутящего момента были построены кривые ползучести. При построении

аналитических кривых, в формулу (2.11) подставлялись постоянные k , n , полученные как из опытов на растяжение, так и из опытов на сжатие (см. Таблицу 2.1). В результате для каждого значения крутящего момента была построена пара аналитических кривых. Кривые показаны на рис.2.3, 2.4, 2.5 пунктирными линиями, причем кривые, полученные при подстановке в (2.11) постоянных на сжатие выделены синим цветом, растяжение – красным цветом.

Как видно из рис.2.3, 2.4, 2.5, аналитические кривые ползучести, построенные по постоянным на растяжение идут выше экспериментальных кривых. Это можно объяснить тем, что постоянные на растяжение, как было отмечено ранее, получены с учетом накопления материалом повреждений, и, следовательно, величины скоростей деформаций для этих кривых имеют большие значения.

Кривые, построенные по константам на сжатие, идут ниже экспериментальных кривых. Это также можно связать с тем, что так как постоянные на сжатие получены без учета накопления материалом повреждений, то величины скоростей деформаций имеют меньшие значения.

Решение, полученное в п.2.2.1 описывает кручение стержня без учета накопления материалом повреждений. На самом деле накопление повреждений при кручении происходит, но с меньшей интенсивностью, чем при растяжении[20], что подтверждается большим числом оборотов образца до разрушения.

Таким образом, можно сделать вывод, что характер расположения аналитических и экспериментальных кривых, приведенных на рис.2.3, 2.4, 2.5 закономерен. Кроме того очевидно некоторое различие характеристик ползучести материала k , n при растяжении и сжатии. В связи с этим, для дальнейшего описания процессов ползучести было предложено использовать усредненные значения постоянных k , n :

$$\begin{aligned} k &= \frac{k^+ + k^-}{2} \\ n &= \frac{n^+ + n^-}{2} \end{aligned} \tag{2.12}$$

где k^+, n^+ - характеристики материала, полученные из испытаний на растяжение;

k^-, n^- - характеристики материала, полученные из опытов на сжатие.

Аналитические кривые ползучести, построенные по формуле (2.11) с использованием постоянных k , n , определяемых (2.12), построены для различных значений крутящего момента и показаны на рис.2.3, 2.4, 2.5 сплошными линиями.

Как видно из рис.2.3, 2.4, 2.5, кривые, построенные по усредненным постоянным (2.12) хорошо согласуются с экспериментальными данными.

2.2.3. Кручение трубчатого образца

В настоящей работе были проведены испытания на кручение трубчатого образца в условиях ползучести. Экспериментальная кривая ползучести приведена на рис.2.6 и показана точками.

На основании аналитического решения, полученного в п.2.2.1, по формуле (2.11) с использованием усредненных постоянных (2.12) построены аналитическая кривая ползучести, показанная на рис.2.6 сплошной линией.

Как видно из рис.2.6, экспериментальная кривая хорошо согласуется с аналитической на начальном участке при углах закручивания до 50-70 градусов. Дальнейшие расхождения могут быть объяснены потерей трубчатым образцом устойчивости, исследование которой в настоящей работе не производилось.

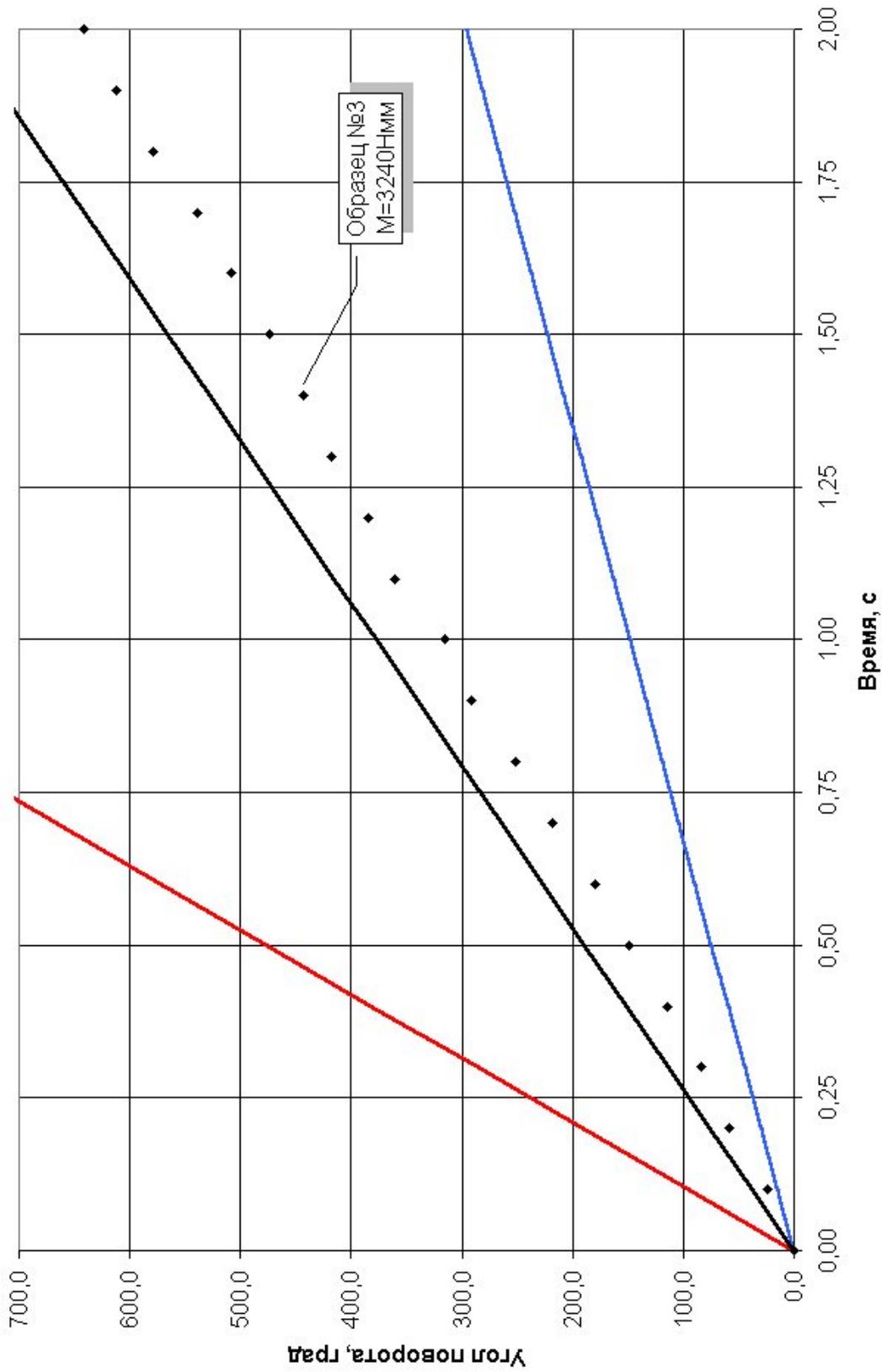


Рис.2.3 Кривая ползучести цилиндрического образца при кручении

◆ - Образец №3; — по постоянным сжатия; — по постоянным растяжения; — по усредненным постоянным.

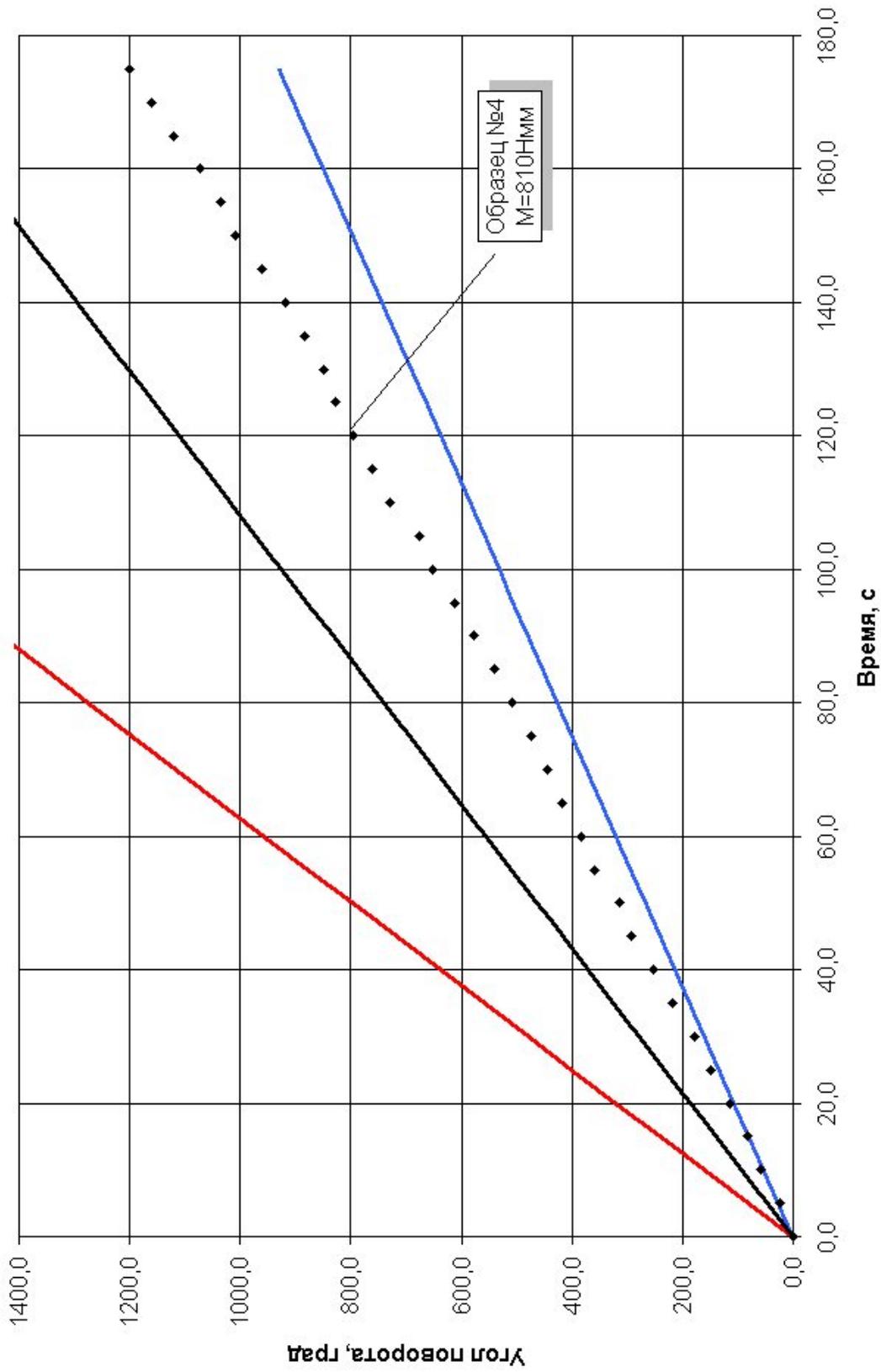


Рис.2.4 Кривая ползучести цилиндрического образца при кручении

◆ - Образец №4; — - по постоянным сжатия; — - по постоянным растяжения; — - по усредненным постоянным.

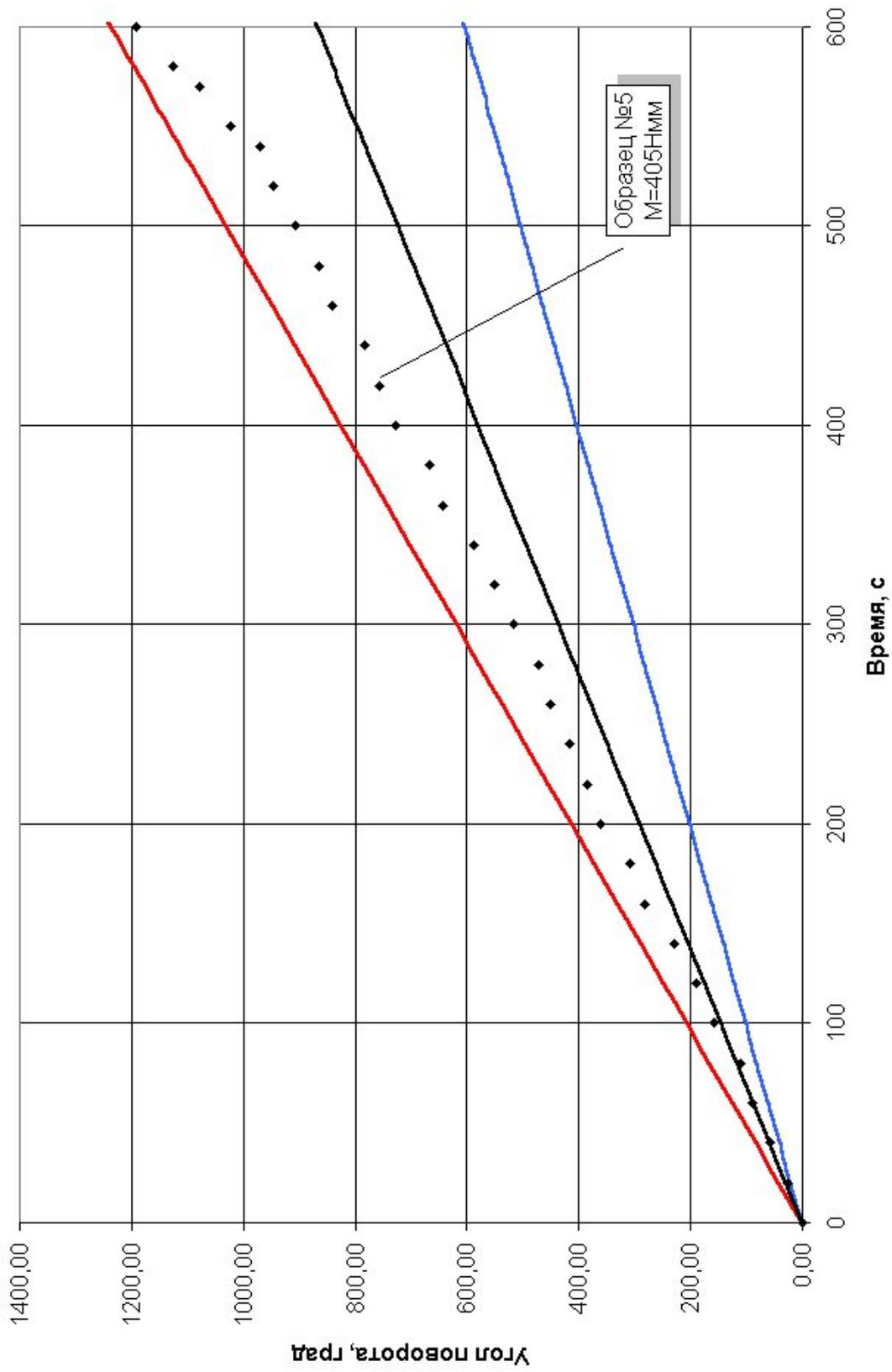


Рис.2.5 Кривая ползучести цилиндрического образца при кручении

◆ - Образец №5; — — по постоянным сжатия; — — по постоянным растяжения; — — по усредненным постоянным.

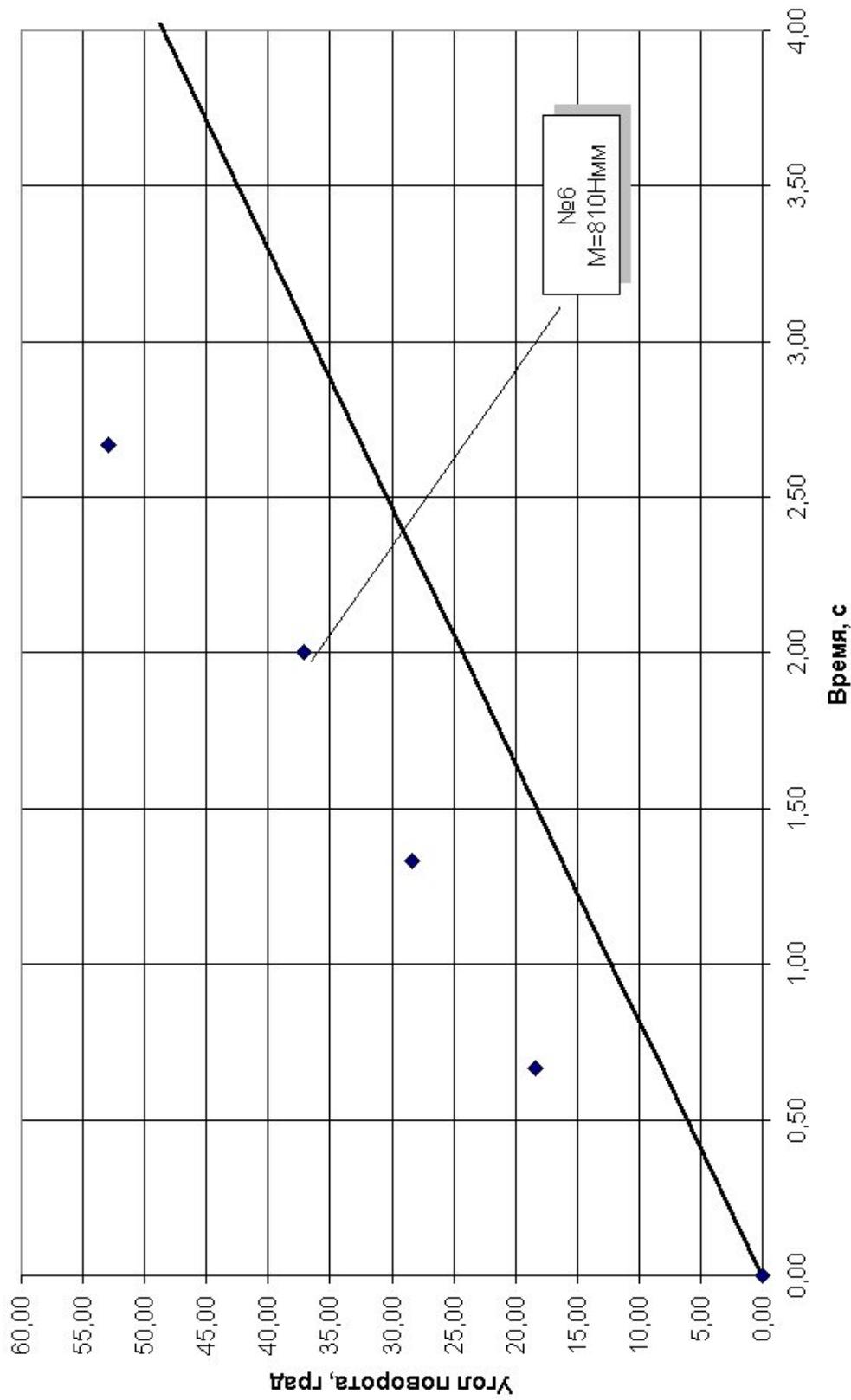


Рис.2.6 Кривая ползучести трубчатого образца при кручении
 ◆ - Образец №6; — - по усредненным постоянным.

2.3. Исследование ползучести цилиндрического образца при комбинированном нагружении растягивающей силой и крутящим моментом

2.3.1. Решение задачи о ползучести стержня при комбинированном нагружении

Рассмотрим решение задачи о ползучести стержня круглого поперечного сечения при комбинированном нагружении растягивающей силой и крутящим моментом. Найдем зависимости осевой деформации и угла поворота стержня от времени.

Уравнения состояния примем в виде:

$$\sigma_e = \alpha \xi_e^m \quad (2.13)$$

где ξ_e - эквивалентная скорость деформации;

σ_e - эквивалентное напряжение;

$m = n^{-1}$, $\alpha = k^{-m}$;

k , n - постоянные материала для заданной температуры

Принимая гипотезу плоских сечений, скорости осевой и угловой деформаций стержня связаны со скоростями растяжения и закручивания следующими зависимостями:

$$\xi = \frac{v}{l}, \quad \eta = \frac{r\omega}{l}, \quad (2.14)$$

где ξ - скорость осевой деформации стержня;

η - скорость угловой деформации стержня;

v - скорость растяжения стержня;

ω - скорость скручивания стержня;

r - текущий радиус стержня ($0 \leq r \leq R$, R – радиус стержня);

l - длина стержня.

Эквивалентная скорость деформации для стержня имеет вид:

$$\xi_e = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{3\xi^2 + \eta^2}, \quad (2.15)$$

Определяющие уравнения Сен-Венана-Леви-Мизеса для стержня имеют вид:

$$\xi = \frac{\xi_e}{\sigma_e} \sigma \quad \eta = \frac{3\xi_e}{\sigma_e} \tau, \quad (2.16)$$

где σ - осевое напряжение;

τ - касательное напряжение.

Выразив в (2.16) σ и τ через ξ и η и, подставив их в уравнение состояния (2.13), учитывая выражение для эквивалентной скорости деформации (2.15), получим выражения для напряжений в стержне:

$$\begin{cases} \sigma = \alpha \left(\frac{\nu}{l} \right)^m \left(1 + \frac{1}{3} \frac{\omega^2}{\nu^2} r^2 \right)^{\frac{m-1}{2}} \\ \tau = \frac{\alpha}{3} \left(\frac{\nu}{l} \right)^{m-1} \frac{\omega}{l} \left(1 + \frac{1}{3} \frac{\omega^2}{\nu^2} r^2 \right)^{\frac{m-1}{2}} r \end{cases} \quad (2.17)$$

Осевое усилие P и крутящий момент M , приложенные к стержню, вычисляются по уравнениям равновесия:

$$P = 2\pi \int_0^R \sigma \cdot r \cdot dr \quad M = 2\pi \int_0^R \tau \cdot r^2 \cdot dr, \quad (2.18)$$

Учитывая, что скорости растяжения ν и закручивания ω не являются функциями текущего радиуса r стержня и, подставляя выражение для напряжений (2.17) в (2.18), после интегрирования получим:

$$\begin{aligned} P &= \frac{6\pi\alpha}{(m+1)} \left(\frac{\nu}{l} \right)^m \left(\frac{\nu}{\omega} \right)^2 \left[\left(1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\omega}{\nu} \right)^2 R^2 \right)^{\frac{m+1}{2}} - 1 \right] \\ M &= \frac{2\pi\alpha}{(m+1)(m+3)} \left(\frac{\nu}{l} \right)^m \left(\frac{\nu}{\omega} \right)^3 \left[\left(1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\omega}{\nu} \right)^2 R^2 \right)^{\frac{m+1}{2}} \left(\left(\frac{\nu}{\omega} \right)^2 R^2 (m+1) - 6 \right) + 6 \right] \end{aligned} \quad (2.19)$$

Выражение (2.19) представляет собой систему двух уравнений с двумя неизвестными ν и ω . Для решения этой системы введем обозначения:

$$P_1 = \frac{P(m+1)}{6\pi\alpha \cdot l^2}, \quad M_1 = \frac{M(m+1)(m+3)}{2\pi\alpha \cdot l^3}, \quad C_1 = \frac{R^2}{l^2}, \quad x = \xi = \frac{\nu}{l}, \quad y = \omega, \quad z = \frac{y}{x} \quad (2.20)$$

Разделим второе уравнение на первое и после преобразований получим:

$$\left(1 + \frac{1}{3}C_1z^2\right)^{\frac{m+1}{2}} \left[\frac{M_1}{P_1}z - C_1z^2(m+1) + 6 \right] - \frac{M_1}{P_1}z - 6 = 0$$
$$x = \left[\frac{P_1z^2}{\left(1 + \frac{1}{3}C_1z^2\right)^{\frac{m+1}{2}} - 1} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (2.21)$$

Как видно из (2.21), первое уравнение этой системы зависит только от z , а второе является выражением x через z . Решение первого уравнения системы (2.21) было найдено численно с помощью программной оболочки Maple V. При решении в уравнения были подставлены усредненные постоянные материала в соответствии с (2.12). Распечатка программы по вычислению корней уравнения приведена в Приложении 1.

Зависимости осевой деформации и угла поворота стержня от времени выражаются через найденные значения x и y следующими формулами:

$$\varepsilon(t) = x \cdot t, \quad \varphi(t) = y \cdot t \quad (2.22)$$

2.3.2. Сопоставление экспериментальных кривых ползучести и кривых, полученных на основе аналитического решения

В настоящем дипломном проекте были проведены испытания на комбинированное нагружение цилиндрических образцов растягивающей силой и крутящим моментом в условиях ползучести. Экспериментальные кривые ползучести приведены на рис.2.7 и показаны точками.

На основании аналитического решения, приведенного в п.2.3.1, по формуле (2.22) построены аналитические кривые ползучести, которые показаны на рис.2.7 сплошными линиями.

Как видно из рис.2.7, экспериментальные и аналитические кривые и хорошо согласуются в области малых деформаций, в которой справедливо решение, полученное в п.2.3.1.

На основании этого можно сделать вывод, что использование осредненных (2.12) постоянных материала k , n позволяет достаточно близко описать процесс ползучести цилиндрического стержня при комбинированном нагружении.

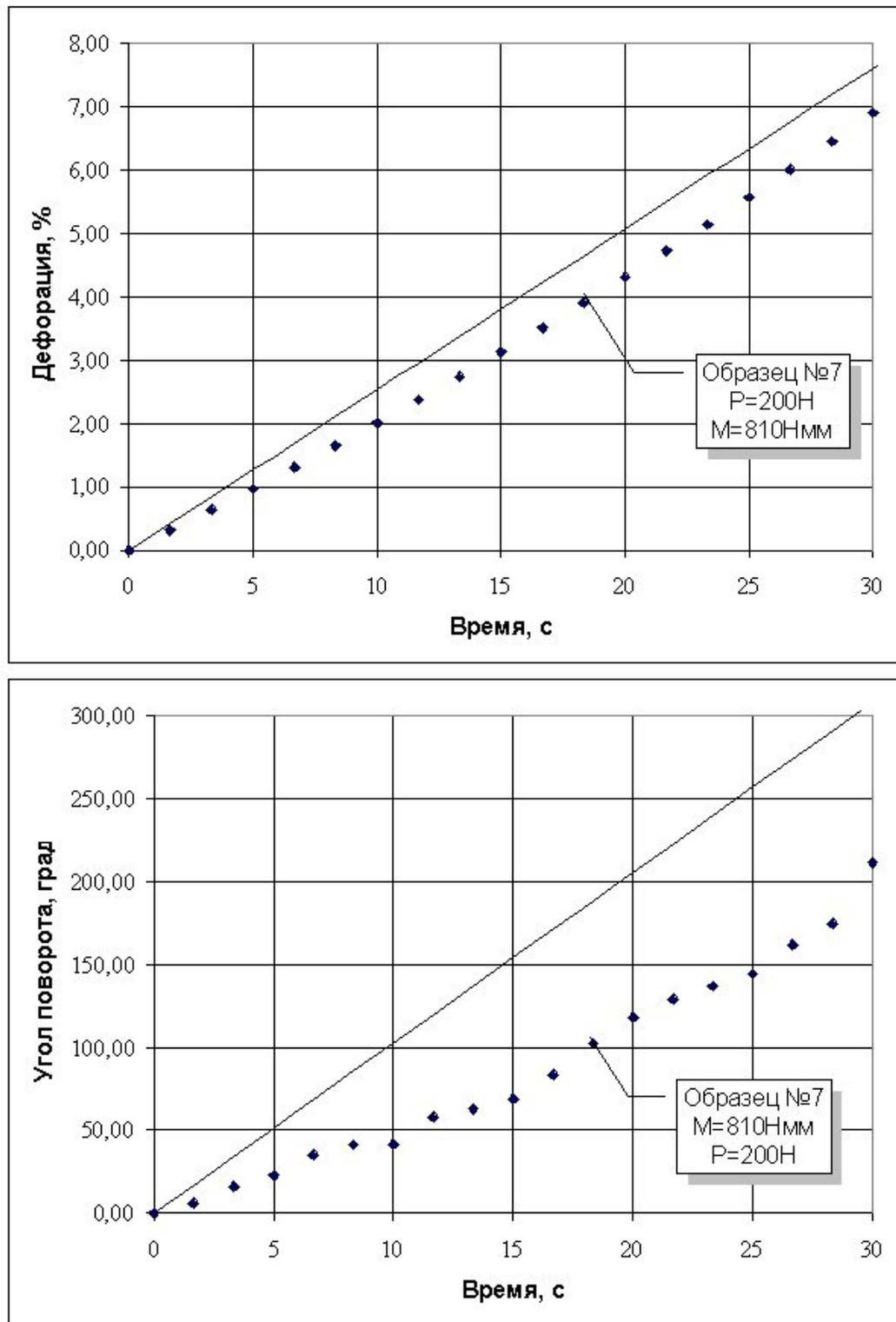


Рис.2.7. Кривые ползучести цилиндрического образца при комбинированном нагружении растягивающей силой и крутящим моментом

◆ - Образец №7; — - по усредненным постоянным.

ВЫВОДЫ

1. Разработан ряд устройств и приспособлений, позволивших модернизировать стенд для испытаний цилиндрических образцов на комбинированное нагружение растягивающей силой и крутящим моментом в условиях ползучести.
2. Разработана методика проведения испытаний цилиндрических образцов из латуни ЛС59-1 на растяжение, кручение и комбинированное нагружение растягивающей силой и крутящим моментом в условиях ползучести.
3. Проведены испытания цилиндрических образцов из латуни ЛС59-1 на растяжение, кручение и комбинированное нагружение растягивающей силой и крутящим моментом в условиях ползучести.
4. Показана удовлетворительная сходимость результатов испытаний цилиндрических образцов из латуни ЛС59-1 на растяжение, кручение и комбинированное нагружение растягивающей силой и крутящим моментом в условиях ползучести с теоретическим расчетом.

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1. Задание на технологическую часть

Разработать конструкцию стенда для испытаний и методику проведения эксперимента по исследованию кратковременной ползучести цилиндрических образцов при комбинированном нагружении осевой растягивающей силой и крутящим моментом.

3.2. Цель испытаний

Целью испытаний является получение зависимостей осевого удлинения или (и) угла закручивания образцов от времени в условиях повышенной температуры при испытаниях на:

- растяжение постоянной во времени осевой силой;
- кручение постоянным во времени крутящим моментом;
- комбинированное нагружение постоянными во времени осевой растягивающей силой и крутящим моментом.

3.3. Образец для испытаний

Для проведения испытаний использовались образцы цилиндрической формы, изготовленные из латуни ЛС59-1. Образец приведен на рис.2.2.

3.4. Конструкция стенда

3.4.1. Назначение стенда

Разработанный стенд предназначен для испытаний цилиндрических образцов в условиях двухосной ползучести.

Конструкция стенда позволяет производить комбинированное нагружение испытываемых образцов осевым растягивающим усилием и (или) крутящим моментом в условиях нагрева образцов в диапазонах

- Температур от 0 до 1100 °С;
- Осевых усилий от 90 до 500 Н;
- Крутящего момента от 0,4 до 16 Н м;
- Удлинения от 0 до 50 мм;
- Углов поворота от 0 до 1250 град.

3.4.2. Схема испытаний

Разработанный стенд позволяет производить нагружение образцов осевой силой, крутящим моментом и их совместным действием. Осевая растягивающая сила прикладывается к нижнему захвату образца, а крутящий момент – к верхнему захвату. Схема приложения нагрузки приведена на рис.1.4.

3.4.3. Компоновка стенда

Стенд создан на базе испытательной машины КМ-50. Компоновка стенда приведена на рис. 1.5.

Стенд представляет собой жесткую раму, образованную чугуном основанием 1, двумя стальными колоннами 2 и верхней поперечиной 3. В верхней части на поперечине 3 в подшипниках закреплен верхний захват 4 со шкивом 5. Крутящий момент прикладывается к образцу 6 посредством грузов на подтарельниках 7, соединенных со шкивом 5 с помощью тросов 8, перекинутых через ролики 9.

Осевое усилие прикладывается к образцу 6 через нижний захват 10, приводящийся в движение посредством грузов на подтарельнике 11. Осевое усилие передается от грузов посредством троса 12, проходящего через систему роликов 13.

Поворот нижнего захвата в процессе нагружения крутящим моментом исключается за счет упоров 14, по которым нижний захват 10 перекатывается на подшипниках 15, закрепленных на крестовине 16. Упоры 14 жестко связаны с ходовым винтом 17, высота подъема которого на основании 1 регулируется с помощью колеса 18.

Для нагрева образца 6 служит нагревательное устройство (печь) 19. Печь 19 закрепляется с помощью шпилек 20 между верхней 21 и нижней 22 подвижными траверсами, которые благодаря наличию роликов 23 имеют возможность перемещаться вверх-вниз по колоннам 2. Для подъема печи используется домкрат 24, установленный на неподвижной траверсе 25. Для фиксации печи в положении для испытаний служат тяги 26, закрепленные одним своим концом на верхней поперечине 3, а другим – на верхней подвижной траверсе 21.

Измерения удлинения и угла закручивания образца производятся с помощью датчиков реохордного типа. Датчик угла поворота 27 закреплен на верхней поперечине 3 и связан с верхним захватом 4 с помощью муфты 28. Датчик удлинения 29 закреплен на правой колонне 2 и связан с нижним захватом 10 через консоль 30, жестко закрепленную на крестовине 16.

3.4.4. Система приложения осевой силы.

Осевая сила прикладывается к нижнему захвату 10 через трос 12, перекинутый через систему блоков 13 и соединенный с подтарельником 11. На подтарельник 11 укладываются грузы массой следующих номиналов:

50г, 100г, 500г, 1000г, 2000г

Масса подтарельника и троса составляет 400 г.

Для разгрузки образца на период разогрева печи при испытаниях на кручение используется цилиндрическая пружина, которая компенсирует массу образца 6, нижнего захвата 10 и крестовины 16. Пружина располагается внутри ходового винта 17.

При испытаниях на растяжение, а также при комбинированной нагрузке пружина не используется. Вместо этого на неподвижной траверсе 25 закрепляются специальные опоры, которые на период разогрева печи подводятся под подшипники 15, исключая тем самым действие веса захвата и крестовины на образец до начала испытаний. Конструкция опор учитывает эффект расширения образца и нижнего захвата в процессе разогрева, что дает возможность избежать поджатия образца до начала испытаний.

При испытаниях на растяжение и комбинированной нагрузке масса нижнего захвата 10, крестовины 16, подтарельника 11 и троса 12 является минимальной реализуемой нагрузкой на образец и суммарно составляет 9000 г.

3.4.5. Система приложения крутящего момента.

Крутящий момент прикладывается к верхнему захвату через тросы 8, перекинутые через ролики 9 и соединенные с подтарельниками 7. На подтарельники 7 укладываются грузы массой следующих номиналов:

50г, 100г, 500г, 1000г, 2000г

Масса подтарельника и троса составляет 250 г.

Перед началом испытаний шкив 5 фиксируется стопором клиновидной формы. Это обеспечивает быстрое приложение нагрузки, что очень важно при испытаниях на ползучесть.

3.4.6. Нагревательное устройство

Для нагрева образца при испытаниях служит двухсекционное нагревательное устройство (печь), представляющее собой неразъемную камеру с центральным отверстием диаметром 90мм.

Камера имеет следующие габаритные размеры:

- Высота – 360мм;

- Ширина – 300мм;
- Глубина – 230мм.

При закреплении образца печь 19 свободно перемещается вдоль захватов вверх-вниз, а затем закрепляется на тягах 26, устанавливается на верхней поперечине 3.

Для исключения утечки тепла и повышения равномерности нагрева образца зазоры между захватом и внутренней полостью камеры закрываются сверху и снизу теплоизолирующим керамическим материалом на основе нитрида кремния.

3.5. Методика проведения испытаний

3.5.1. Подготовка к испытаниям

Перед началом испытаний, необходимо выполнить последовательность действий по подготовке испытательного стенда к работе.

3.5.1.1. Закрепление образца

Перед тем, как закреплять образец в захватах, необходимо установить крестовину в отверстие ходового винта. Для этого производятся следующие действия:

- В зависимости от вида нагружения, в отверстие ходового винта вставляется пружина (только при испытаниях на кручение);
- Печь поднимается с помощью домкрата в положение испытаний и закрепляется на тягах ;
- Ходовой винт опускается с помощью колеса в крайнее нижнее положение;
- Крестовина вставляется в отверстие ходового винта .

После того, как крестовина установлена, образец собирается в нижнем захвате. Затем к образцу в его верхней и нижней части в районе галтелей прикрепляются две термопары. Головки термопар должны быть закрыты стеклотканью во избежании их дополнительного нагрева излучением от спиралей печи. После этого производится установка нижнего захвата с образцом на крестовине. Для этого:

- Печь перемещается в крайнее нижнее положение;
- Нижний захват с закрепленным на нем образцом вставляется через верхнее отверстие печи в крестовину.

- Печь и ходовой винт попеременно перемещаются вверх до тех пор, пока верхняя головка образца не войдет в верхний захват;
- Образец фиксируется штифтом в верхнем захвате;
- Печь поднимается в положение испытаний и закрепляется на тягах.
- Нижний захват соединяется с крестовиной с помощью штифта;
- На крестовине закрепляется трос с подтарельником;
- На колонне закрепляется планка с блоками.

Образец закреплен.

Внимание! При сборке необходимо смазывать все контактные поверхности графитовой смазкой!

3.5.1.2. Подготовка измерительной системы

Перед началом подготовки измерительной системы, на стенде закрепляются датчики угла поворота и удлинения. Датчики с помощью специально сконструированного преобразующего устройства подключаются к двум одноканальным приборам типа КСП 4.

Термопары подключаются к электронному потенциометру типа КСП 4.

3.5.1.3. Подготовка устройства нагрева печи

Устройство нагрева печи представляет собой стойку с двумя трансформаторами, двумя реохордами и двумя вольтметрами для контроля выходного напряжения. Устройство питается от сети переменного тока 220В 50А.

При подготовке стенда к испытаниям, обмотки верхней и нижней секций печи подключаются к соответствующим выводам трансформаторов.

3.5.2. Проведение испытаний

3.5.2.1. Меры предосторожности

Перед началом проведения испытаний необходимо убедиться в исправности всех приборов, наличие надежных контактов в электрической схеме, надежного заземления приборов и устройства нагрева печи, надежного крепления печи на верхней поперечине.

3.5.2.2. Разогрев образца

Перед началом разогрева печи, шкив 5 должен быть зафиксирован с помощью клиновидного стопора, а крестовина (при испытаниях на растяжение и комбинированном нагружении) должна быть подперта опорами.

После этого включается электронный потенциометр для регистрации температуры. Затем включается устройство нагрева и, с помощью реохорд, выставляются необходимые значения выходных напряжений на обмотках верхней и нижней секций печи.

После этого выходные напряжения корректируются по мере нагрева печи на основе показаний прибора, регистрирующего температуру. Время разогрева образца до температуры испытаний (650°C) составляет около 60 минут.

3.5.2.3. Стабилизация температуры

Перед началом нагружения необходимо выровнять температуру по высоте образца. Это осуществляется варьированием напряжений на обмотках верхней и нижней секций печи. Разброс температур по ГОСТ 3248-81 [12] не должен превышать 4°C . Время стабилизации температуры приблизительно 30 минут.

3.5.2.4. Нагружение образца

После того, как температура выровнялась по высоте образца можно приступить к нагружению образца. Перед началом нагружения, необходимо включить регистрирующие приборы, повесить грузы на подтарельники и затем убрать стопор со шкива и (или) отвести специальные опоры из-под крестовины.

3.5.3. Завершение испытаний

После того как испытания завершены, необходимо выключить регистрирующие приборы и устройство нагрева печи. Затем, дождавшись, пока печь и захваты остынут, разобрать захваты, в порядке, обратном изложенному в п. 3.5.1.

3.6. Режимы испытаний и результаты испытаний

3.6.1. Режимы испытаний

На спроектированном испытательном стенде реализуемы следующие режимы нагружения образцов:

- Постоянной во времени растягивающей силой (рис.3.1а.);
- Постоянным во времени крутящим моментом (рис.3.1б.);
- Комбинированное нагружение постоянными во времени растягивающей силой и крутящим моментом (рис.3.1в.).

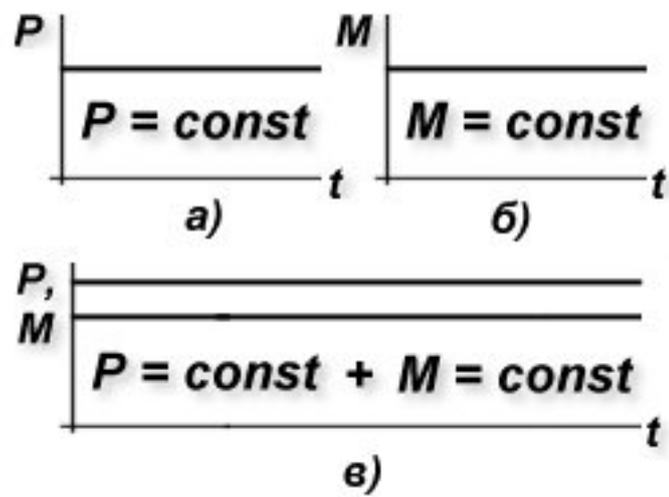


Рис.3.1. Режимы испытаний

3.6.2. Результаты испытаний

В результате испытаний с помощью регистрирующих приборов были получены следующие зависимости (см. рис.3.2.):

- Осевое удлинение от времени - $\Delta l(t)$;
- Угол закручивания от времени - $\varphi(t)$.

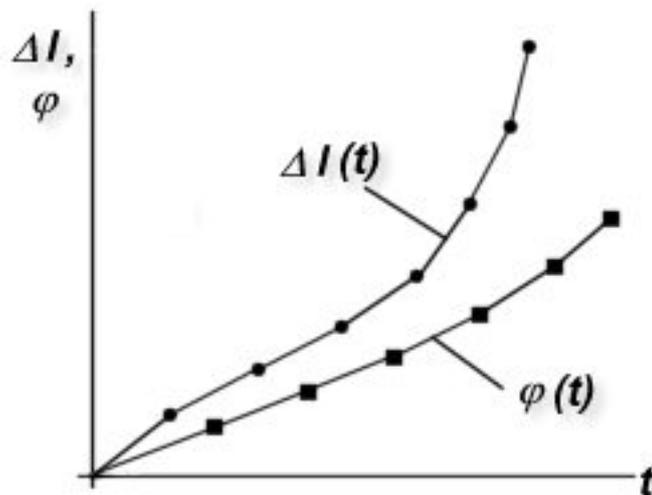


Рис. 3.2. Результаты испытаний

ВЫВОДЫ

1. Разработана конструкция стенда, позволяющая производить нагружение образцов осевой растягивающей силой, крутящим моментом и их совместным действием в условиях повышенной температуры.
2. Разработана методика проведения испытаний цилиндрических образцов при нагружении их осевой силой, крутящим моментом и их совместным действием в условиях повышенной температуры.
3. Произведены испытания цилиндрических образцов при нагружении их осевой силой, крутящим моментом и их совместным действием в условиях повышенной температуры.
4. Получены зависимости осевого удлинения и угла закручивания образцов от времени при нагружении их осевой силой, крутящим моментом и их совместным действием в условиях повышенной температуры.

4. ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

4.1. Определение затрат на разработку темы и проведение эксперимента

Научное исследование, вне его зависимости от масштабов, должно носить программно-целевой характер, отличаться новизной, выполняться на современном оборудовании с использованием последних достижений в области научной методологии и обеспечивать высокую экономическую эффективность. При этом научный результат должен быть получен в заданные сроки с минимальными материальными, энергетическими, денежными и трудовыми затратами, что в большей мере зависит от надлежащей организации планирования и управления исследованиями.

По существующей в настоящее время классификации к научно-исследовательским работам (НИР) относятся работы поискового (проблемного) и прикладного (экспериментального) характера, которые проводятся в целях расширения, углубления, систематизации знаний по определенной научной проблеме.

Исследования, проведенные в настоящем дипломном проекте относятся к работам прикладного характера. Работы прикладного характера проводятся с целью получения более конкретных научных результатов. В результате проведения этих работ проверяются теоретические расчеты и выводы, а также экспериментальные данные для последующих разработок.

4.2. Планирование НИР

Планирование НИР определяет последовательность и состав этапов НИР, трудоемкости, длительности и календарных сроков их выполнения.

Разработка графика выполнения темы осуществляется на основе ленточных или сетевых графиков.

При небольшом количестве этапов и исполнителей основным документом планирования является ленточный график Ганта. Для планирования исследований, выполненных в настоящем дипломном проекте, такой график наиболее приемлем, так как в процессе подготовки и проведения экспериментов присутствует постоянный по составу и небольшой коллектив, а этапы исследований выполняются последовательно.

4.2.1. Определение трудоемкости эксперимента.

Определим трудоемкость эксперимента двумя методами: методом прямого нормирования и методом вероятностных оценок [21].

4.2.1.1. Метод прямого нормирования

Методом прямого нормирования определяется трудоемкость эксперимента, то есть затраты времени на проведение лабораторных исследований. В общем виде трудоемкость одного эксперимента определяется по формуле:

$$t_3 = (t_Z + t'_B) \left(1 + \frac{\alpha + \beta}{100}\right) + \frac{t_{ПЗ}}{n},$$

где t_3 - время выполнения одного эксперимента;

t_Z - время работы испытательного стенда;

t'_B - вспомогательное время (установка и снятие образца);

$t_{ПЗ}$ - подготовительно-заключительное время для проведения всей серии экспериментов;

α - затраты времени на организационно-техническое обслуживание рабочего места;

β - время на отдых;

n - общее число экспериментов.

Для экспериментов, проводимых в настоящем дипломном проекте, эти параметры имели следующие значения:

$$t_Z = 2\text{ч}, t'_B = 0.5\text{ч}, t_{ПЗ} = 8\text{ч}, \alpha = 10\%, \beta = 4\%, n = 15,$$

$$t_3 = (2 + 0.5) \left(1 + \frac{10 + 4}{100}\right) + \frac{8}{8} = 3.85\text{ч}.$$

4.2.1.2. Метод вероятностных оценок

Суть метода заключается в том, что непосредственный руководитель работ, имеющий достаточный опыт по их проведению, оценивает максимальную и минимальную трудоемкости или длительности проведения экспериментов, то есть τ_{\max} и τ_{\min} , соответственно. На основе этих оценок определяется наиболее вероятная длительность.

$$\tau_{\text{ОЖ}} = \frac{3\tau_{\min} + 2\tau_{\max}}{5}$$

$$\tau_{\max} = 4\text{ч.}, \tau_{\min} = 3\text{ч}.$$

$$\tau_{\text{ОЖ}} = \frac{3 \cdot 3 + 2 \cdot 4}{5} = \frac{17}{5} = 3,4\text{ч}.$$

Трудоемкость общего цикла экспериментов определяется как

$$T_3 = n t_3 + t_{ПЗ} = 8 \cdot 3,85 + 8 = 38,8\text{ч}.$$

4.2.2. Расчет ленточного графика выполнения НИР

Основные этапы выполнения НИР сведены в таблице 3.1.

Таблица 1.

№ этапа	Название этапа	Содержание этапа	Трудоемкость этапа
1	Ознакомление с литературой	Просмотр литературы, составление рефератов	10 чел./дн.
2	Планирование эксперимента	Разработка схем и методик проведения эксперимента, разработка лабораторной технологии экспериментов, планирование экспериментов	8 чел./дн.
3	Отладка оборудования	Выбор испытательной машины, отладка экспериментального оборудования, изготовление специальных приспособлений.	40чел./дн.
4	Проведение экспериментов	Проведение экспериментов, анализ результатов.	8 чел./дн.
5	Обработка результатов экспериментов.	Обработка результатов экспериментов.	4 чел./дн.
6	Оформление отчета	Теоретические расчеты, сравнение результатов теории и экспериментов, выводы. Оформление отчета и плакатов.	30 чел./дн.
Всего			100 чел./дн.

Ленточный график НИР приведен на рис.4.1.

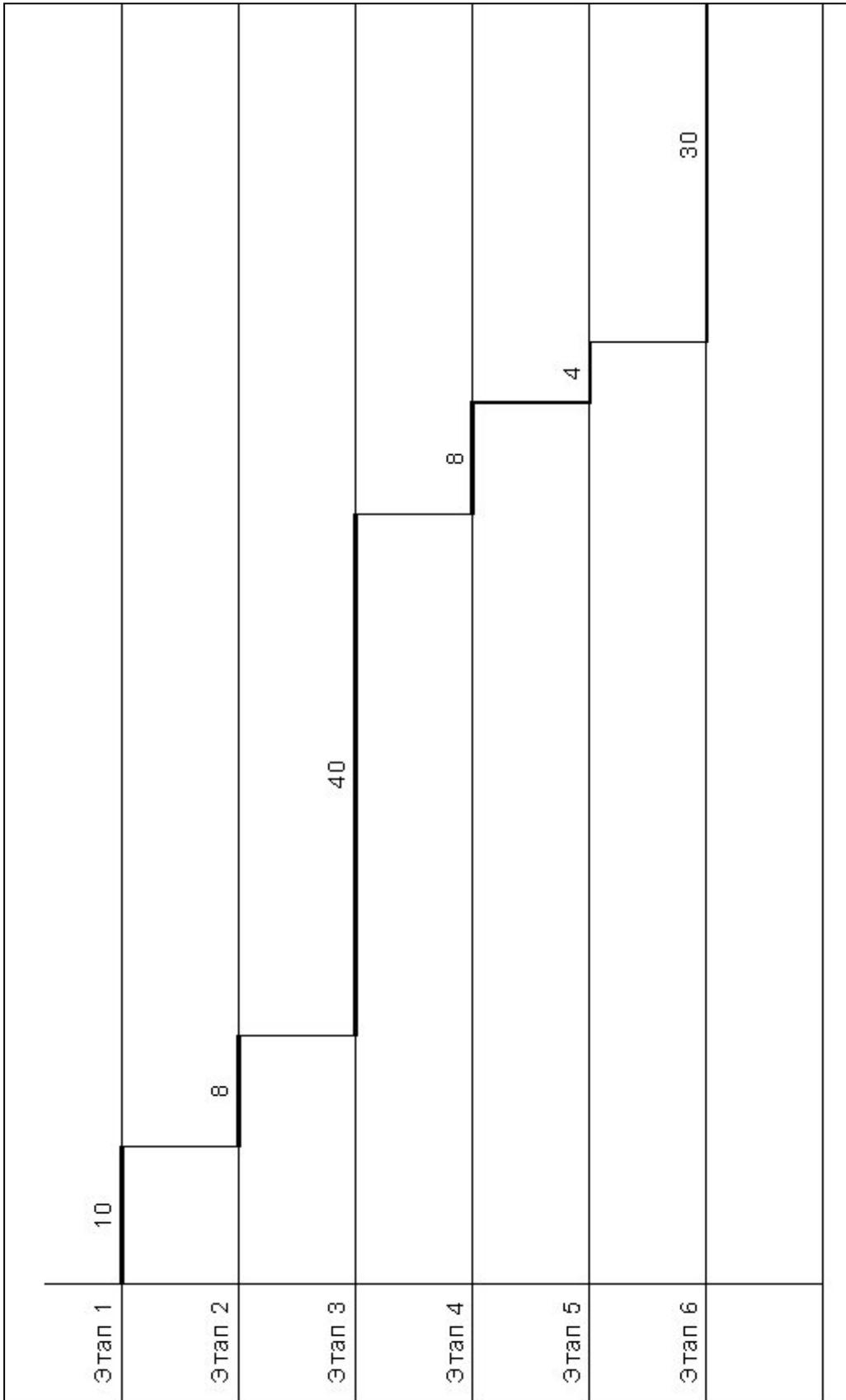


Рис.3.1. Ленточный график НИР

4.3. Определение количества экспериментов на основе теории планирования эксперимента

В настоящее время в подготовке и проведении экспериментальных исследований кроме известных этапов постановки задачи и анализа результатов экспериментов вводится весьма важный этап планирования. Это обусловлено тем, что до сих пор объем эксперимента либо диктовался возможностями производства и допустимыми затратами, либо определяется произвольно. Планирование эксперимента позволяет резко повысить его эффективность, особенно при большом количестве факторов, действующих на систему..

Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью. При этом предполагается ставить опыты так, чтобы варьировать всеми факторами сразу, в отличие от традиционного подхода, при котором исследователь изучает действие каждого фактора в отдельности.

При физическом моделировании часто приходится повторять эксперимент, не изменяя условий его проведения. Это вызывается необходимостью учета влияния случайных ошибок. По такой схеме проводились и наши опыты. Случайные ошибки вызываются большим количеством факторов, эффекты действия которых не могут быть выделены и учтены в отдельности.

При планировании наших исследований мы не проводили непосредственный расчет количества экспериментов, так как у нас необходимо было исследовать до 10 режимов, а образцов мы имели всего 45. Поэтому видно, что расчет нецелесообразен.

Количество экспериментов по каждому режиму мы определяли по ходу исследований по следующим принципам: если после второго дублирующего опыта полученные характеристики совпадали с достаточной точностью, то этот режим больше не повторялся (в целях экономии образцов), если же после второго дубля совпадение результатов было неудовлетворительным, то проводился ее третий дубль, либо ставился многофакторный эксперимент.

Такой подход оправдал себя. Мы получили достоверные экспериментальные характеристики и имеющихся для испытаний образцов нам хватило.

4.4. Определение затрат на проведение одного эксперимента

Затраты на проведение одного эксперимента рассчитываются по следующим статьям:

$$S_{\text{Э}} = S_{\text{ОМ}} + S_{\text{АМ}} + S_{\text{ЭЛ}} + S_{\text{В}} + S_{\text{Т}} + S_{\text{ЭЛЛ}} + S_{\text{КОСВ}}$$

- затраты на основные и вспомогательные материалы ($S_{\text{ОМ}}$);

$$S_{\text{ОМ}} = 50 \text{ р.}$$

- амортизационные отчисления от стоимости оборудования и приборов ($S_{\text{АМ}}$);

$$S_{\text{АМ}} = \sum \frac{k_{\text{Оби}} a_i t_{\text{ОП}}}{100 F_{\text{Д}}}$$

где: $k_{\text{Оби}}$ - стоимость i -го вида оборудования и приборов;

a_i - нормы амортизации i -го вида оборудования;

$t_{\text{ОП}}$ - время проведения одного опыта;

$F_{\text{Д}}$ - эффективный годовой фонд времени;

n - номенклатура применяемого оборудования.

Получаем: $k_{\text{Оби}} = 1000 \text{ р.}$; $a_i = 14\%$; $t_{\text{ОП}} = 3,85 \text{ ч.}$; $F_{\text{Д}} = 2077 \text{ ч.}$; $n = 1$.

$$S_{\text{АМ}} = \frac{1000 \cdot 14 \cdot 3,85}{100 \cdot 2077} = 0,259 \text{ р.}$$

- стоимость топлива, электроэнергии, сжатого воздуха ($S_{\text{Т}}, S_{\text{ЭЛ}}, S_{\text{В}}$);

$$S_{\text{ЭЛ}} = N_{\text{УСТ}} t_{\text{ОП}} \eta_{\text{ЗАТР}} 0,85 \Pi_{\text{КВТ}},$$

где: $N_{\text{УСТ}}$ - установленная мощность,

$\eta_{\text{ЗАТР}}$ - средний коэффициент использования электрооборудования,

$\Pi_{\text{КВТ}}$ - цена 1 кВт/час электроэнергии,

0,85 – коэффициент, учитывающий потери в цепи.

Получаем: $N_{\text{УСТ}} = 5,3 \text{ кВт.}$; $\eta_{\text{ЗАТР}} = 0,5$; $\Pi_{\text{КВТ}} = 0,30 \text{ р.}$

$$S_{\text{н.к}} = 5,3 \cdot 3,85 \cdot 0,5 \cdot 0,85 \cdot 0,3 = 2,6 \text{ р.}$$

- затраты на зарплату исполнителей, косвенные затраты ($S_{КОСВ}$).

В нашем случае, заработная плата исполнителей, участвующих в проведении эксперимента, определяется пропорционально времени проведения эксперимента $t_{ОП}$:

$$S_{ЗПЛ} = 0,006\Phi_{МЕС}t_{ОП}$$

где $\Phi_{МЕС}$ - месячный фонд заработной платы;

0,006 – коэффициент, учитывающий расчет среднечасовой заработной платы;

Получаем: $\Phi_{МЕС} = 1000р.$

$$S_{ЗПЛ} = 0,006 \cdot 1000 \cdot 3,85 = 23,1р.$$

Косвенные расходы принимают пропорционально заработной плате исполнителей в зависимости от организационных условий проведения эксперимента. Для лабораторных условий МГТУ

Получаем:

$$S_{КОСВ} = 0,5 \cdot 23,1 = 11,55р.$$

Таким образом, текущие затраты на проведение одного эксперимента:

$$S_{э} = 50 + 0,259 + 2,6 + 23,1 + 11,55 = 87,5р.$$

ВЫВОДЫ

1. Определена трудоемкость одного эксперимента. Она составила 3.85 часа.
2. Построен ленточный график выполнения НИР.
3. Определены затраты на проведение одного эксперимента. Они составили 87.5 руб.

5. ОХРАНА ТРУДА И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

5.1. Требования безопасности при проведении эксперимента

Темой дипломного проекта является экспериментальное исследование кратковременной ползучести.

Эксперименты проводились в условиях высоких температур (650°C).

Материал образцов - латунь ЛС59-1.

Исследования проводились на модернизированной испытательной машине КМ-50. Принцип действия испытательной машины – гравитационный.

Для нагрева образцов до требуемой температуры была применена электротермическая установка на базе нагревательного устройства и электропечи сопротивления.

5.2. Основные требования охраны труда

Основными требованиями охраны труда, предъявляемыми к испытательному оборудованию являются [22]:

- Безопасность для человека;
- Надежность;
- Удобство эксплуатации.

5.3. Техника безопасности эксперимента

При проведении экспериментов могут возникнуть опасные и вредные производственные факторы.

5.3.1. Воздух рабочей зоны

Одним из необходимых условий здорового и высокопроизводительного труда является обеспечение чистоты воздуха и нормальных метеорологических условий в рабочей зоне помещения.

5.3.1.1. Содержание вредных веществ в рабочей зоне

В связи с тем, что испытания проводились при высокой температуре, необходимо обеспечить безопасный уровень предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ и примесей, входящих в химический состав материала образца, в рабочей зоне. В соответствии с химическим составом латуни ЛС59-1 по ГОСТ 15527-70 [11] и на основании нормативно-технической документации по охране труда, согласно ГОСТ 12.1.005-88 [23], величины ПДК веществ сведены в таблице 1.

Таблица 1

Вещество	ПДК, мг/м ³
Свинец	0,01
Диоксид кремния	0,5
Смесь сероводорода с углеводородами	3
Оксиды железа	4-6
Смесь сероводорода и сернистого ангидрида	10

5.3.1.2. Микроклимат рабочей зоны

Все эксперименты проводились в лаборатории кафедры РК5 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Помещение машинного зала относится к помещениям с незначительным избытком явной теплоты. Проводимые работы можно отнести к категории легких.

По санитарным нормам и правилам СН 245-71 должны выполняться следующие условия, накладываемые на микроклимат помещения (см. таблицу 2):

Таблица 2

Нормируемый параметр	Период года	
	теплый	холодный
Температура воздуха, °С	20-25	19-25
Относительная влажность, %	40-60	не более 15
Скорость движения воздуха, м/с	не более 0,3	не более 0,2

5.3.1.3. Защита от источников тепловых излучений

Лучистый поток теплоты, кроме непосредственного воздействия на рабочих, нагревает пол, стены, перекрытия, оборудование, в результате чего температура воздуха внутри помещения повышается, что ухудшает условия работы. Так как в процессе экспериментов для нагрева образцов использовалась электропечь, встал вопрос о необходимости предусмотреть защиту от теплового потока, излучаемого спиралью. Для этих целей конструкция печи предусматривает защитный теплоизолирующий кожух по боковым сторонам, а также защитные теплоизолирующие экраны из материала с низким коэффициентом теплопроводности сверху и снизу.

5.3.1.4. Расчет ожидаемого лучистого потока в рабочей зоне

Интенсивность облучения $E_{\text{обл}}$ определяется по формуле[24]:

$$E_{\text{обл}} = 5.7 \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - A \right] \varepsilon_{\text{пр}} \varphi_0 \cos(\alpha_0), \quad (5.1)$$

где $E_{\text{обл}}$ - интенсивность облучения, Вт/м²;

T – температура излучающей поверхности, К;

A – эмпирический коэффициент (для кожи человека и хлопчатобумажной ткани $A = 85$, для сукна $A = 110$);

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \quad (5.2)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты.

ε_1 – степень черноты излучающей поверхности;

ε_2 – степень черноты облучаемого человека;

φ_0 – коэффициент облученности, показывающий, какая часть лучистого потока теплоты от излучающего тела попадает на тело человека (при близком расположении человека к источнику $\varphi_0 = 1$);

α_0 – угол между нормалью к излучающей поверхности и направлением от центра этой поверхности к рабочему месту.

При проведении испытаний источником излучения является защитный кожух электропечи, температура которого в процессе испытаний составляла $T = 323 \text{ K}$ ($50 \text{ }^\circ\text{C}$).

Назначим эмпирический коэффициент $A = 85$, что соответствует случаю работы человека в одежде из хлопчатобумажной ткани и (или) с открытыми участками кожного покрова.

Определим величину приведенной черноты из расчета, что и человек и излучатель являются абсолютно черными телами. Это будет соответствовать максимальному значению этой величины. Получим:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1, \quad \varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{2}.$$

В связи с тем, что рабочее место находится в непосредственной близости от излучающей поверхности кожуха электропечи, назначим $\varphi_0 = 1$ и $\alpha_0 = 0$.

Подставив все полученные значения в формулу (1), получим:

$$E_{\text{обл}} = 68 \text{ Вт/м}^2.$$

Сравним полученную величину интенсивности облучения с допустимой величиной. Согласно ГОСТ 12.1.005-88 [23], интенсивность теплового облучения работающих от нагретых поверхностей технологического оборудования нормируется в зависимости от процента поверхности тела подвергающегося облучению и не должна превышать величину, приведенную в таблице 3.

Таблица 3

Допустимая интенсивность облучения, Вт/м ²	Процент поверхности тела, %
35	Более 50
70	От 25 до 50
100	Менее 25

Так как во время испытаний, процент поверхности тела, подвергающийся облучению не превышает 50%, а величина расчетной интенсивность облучения $E_{\text{обл}} = 68 \text{ Вт/м}^2$, меньше допустимой по нормам величины, то необходимости в проведении дополнительных мероприятий по уменьшению действия теплового излучения на рабочее место не возникает.

5.3.1.5. Системы отопления и вентиляции

Для достижения заданных параметров микроклимата и обеспечения надлежащей чистоты воздуха применяются:

- Водяное отопление с естественной циркуляцией воды;
- Механическая общеобменная вентиляция.

Применение общеобменной вентиляции обусловлено тем, что избытки тепла выделяются равномерно по всему помещению, а также при таком виде вентиляции обеспечивается поддержание необходимых параметров воздушной среды во всем объеме помещения.

5.3.2. Освещение рабочей зоны

Основная задача освещения – создание наилучших условий видения для исследователя. В помещении, где проводятся эксперименты, должно применяться комбинированное освещение. Кроме того в помещении должно быть предусмотрено минимальное необходимое по нормам для естественного освещения количество световых проемов в стенах.

Освещение должно соответствовать светотехническим нормам СНиП 23.05-95.

В качестве источников света для помещения машинного зала применяются светильники с люминесцентными лампами, обладающими большими сроками службы, меньшими затратами энергии, большей светоотдачей по сравнению с лампами накаливания. Такие лампы излучают световой поток в широком диапазоне спектра, что приближает освещение к дневному свету. При размещении люминесцентных ламп параллельно стене по окнам, мы получаем возможность включать и выключать их в зависимости от степени естественного освещения.

Освещение должно обеспечивать равномерное распределение яркости на рабочей поверхности и в пределах окружающего рабочее место пространства, следовательно, помещение желательно окрашивать в светлые тона. Кроме того, величина освещенности должна быть постоянной не только в пространстве, но и во времени, в связи с чем в помещении должны отсутствовать резкие поля.

Светильные установки не должны являться причиной пожара, взрыва, поражения током.

В связи с тем, что в помещении, где проводятся эксперименты нормальный уровень влажности и небольшая запыленность, а также в соответствии с изложенными выше положениями, целесообразно применять открытые светильники ЛОУ и ЛСП. При применении светильников этого типа, уровень освещенности при расположении рабочей поверхности на высоте от 0,2 метров от пола должен быть равен 400 лк.

5.3.3. Пожарная безопасность

Пожары представляют большую опасность для работающих и могут причинить огромный материальный ущерб. Пожарной безопасности может быть обеспечена мерами пожарной профилактики и активной пожарной защиты.

5.3.3.1. Меры пожарной профилактики

Понятие пожарной профилактики включает в себя комплекс мероприятий, необходимых для предупреждения пожара или уменьшения его последствий.

Оценка пожарной опасности объектов основывается на данных о пожароопасных свойствах обращающихся на этих объектах веществ и материалов. В НПБ-105-95 приведена классификация, в соответствии с которой помещение машинного зала, в котором проводятся испытания, относится к категории пожароопасности «Г».

Во время работы на испытательном оборудовании может возникнуть пожароопасная ситуация. Это может быть вызвано рядом причин, например, небрежным обращением с электропечью, неисправностью оборудования.

Причина пожаров от электрических машин, аппаратов и сетей происходит в результате проявления теплового и искрового действия электрического тока в условиях, благоприятных для воспламенения горючих материалов, к которым относятся твердые и жидкие изоляционные материалы. Основными причинами пожаров в электроустановках являются перегрузка проводки, короткое замыкание, электрическое искрение.

Ясно, что требуется разработка системы мероприятий по противопожарной защите, по созданию пожаробезопасной обстановки на рабочем месте.

Система предотвращения пожара должна рассчитываться по каждому конкретному объекту из расчета, что нормативная вероятность возникновения пожара принимается равной 0,000001 в год в расчете на отдельный пожароопасный узел данного объекта. Система пожарной защиты должна разрабатываться по каждому конкретному объекту из расчета, что нормативная вероятность воздействия опасных факторов пожара на людей принимается равной 0,000001 в год в расчете на отдельного человека.

Безопасность людей должна быть обеспечена при возникновении пожара в любом месте объекта.

Предотвращение пожара должно достигаться:

- Предотвращением образования горячей среды;
- Предотвращением образования в горячей среде (или внесением в нее) источников зажигания;
- Поддерживанием температуры горячей среды ниже максимально допустимой для горючести;
- Уменьшением определяющей размера горючей среды ниже максимально допустимой по горючести.

5.3.3.2. Меры пожарной защиты

Под активной пожарной защитой понимаются меры, обеспечивающие успешную борьбу с возникающими пожарами или взрывоопасными ситуациями.

Пожарная защита должна обеспечиваться:

- Максимально возможным применением негорючих и трудно горючих веществ и материалов вместо пожароопасных;
- Ограничением количества горючих веществ и их размещением;
- Изоляцией горючей среды;
- Предотвращением распространения пожара за пределы очага;

- Применением средств пожаротушения;
- Эвакуацией людей;
- Применением средств защиты людей;
- Применением средств пожарной сигнализации и средств извещения о пожаре;
- Организацией пожарной охраны.

По обеспечению пожарной безопасности должны быть выполнены следующие мероприятия:

- Организовано обучение рабочих и служащих правилам пожарной безопасности;
- Разработаны и реализованы нормы и правила пожарной безопасности, инструкции о порядке работы с пожароопасными веществами и материалами, о соблюдении противопожарного режима и действиях людей при возникновении пожара;
- Изготовление и применение средств наглядной агитации по обеспечению пожарной безопасности.

5.3.3.3. Средства пожаротушения

В практике тушения пожаров наибольшее распространение получили следующие способы прекращения горения:

- Изоляция очага горения от воздуха или снижение негорючими газами концентрации кислорода до значения, при котором не может происходить горение;
- Охлаждение очага горения ниже температур самовоспламенения, воспламенения, вспышки горючих веществ и материалов;
- Интенсивное торможение скорости химической реакции в пламени;
- Механический срыв пламени в результате воздействия на него сильной струи газа;
- Создание условий огнепреграждения, то есть таких условий, при которых пламя распространяется через узкие каналы.

Часто для тушения пожаров применяется вода. Огнегасительная способность воды обуславливается охлаждающими действиями, разбавлением горючей среды,

образующимися при испарении парами и механическим воздействием на горючее вещество – срывом пламени. Наряду с этим, вода обладает свойствами, ограничивающими область ее применения. Так, например, вода, содержащая различные соли и поданная компактной струей, обладает значительной электропроводностью и поэтому ее нельзя применять для тушения пожаров объектов, оборудование которых находится под напряжением.

Для того чтобы обеспечить тушение пожара в начальной стадии в лаборатории на внутренней водопроводной сети устроены внутренние пожарные краны. Кроме того, в лаборатории для тушения пожара имеются углекислотные огнетушители.

Огнегасительное действие двуокиси углерода заключается в разбавлении воздуха и в снижении в нем содержания кислорода до концентрации, при которой прекращается горение. Огнегасительный эффект обуславливается потерями тепла на нагревание разбавителей и снижением теплового эффекта реакции.

5.3.4. Защита от травм на рабочем месте

При работе на испытательной машине возникает опасность травматизма, обусловленного ожогами от печи, движущимися частями испытательной машины, поражением электрическим током.

5.3.4.1. Электробезопасность

При работе на испытательной машине следует иметь в виду, что все измерительное и нагревательное оборудование питается от сети 220 В. В связи с этим возникает проблема электробезопасности.

Во избежание поражения человека электрическим током следует предусмотреть ряд мер профилактического и защитного характера:

- Перед началом использования, необходимо убедиться, что электрооборудование надлежащим образом подключено к сети переменного тока, а также снабжено исправным защитным заземлением.
- Перед, после и во время использования, необходимо четко соблюдать правила эксплуатации оборудования, а именно последовательность включения, выключения рабочих узлов оборудования, правила работы на включенном оборудовании и правила по уходу за оборудованием.

Соблюдение правил пользования электрооборудованием и правил по уходу за оборудованием позволит уменьшить риск по поражению электрическим током.

5.3.4.2. Защита от ожогов

Во избежании ожогов при неосторожном обращении с электропечью, надлежит предусмотреть защитные ограждения нагретого кожуха печи, а также надевать при работе с печью рукавицы.

5.3.4.3. Защита от механических повреждений

В связи с тем, что в основу работы испытательной машины положен гравитационный принцип нагружения, то есть нагружение образца производится грузами различного номинала, необходимо предусмотреть защиту от возможных повреждений, вызванных подвижными элементами испытательной машины.

Поэтому надлежит предусмотреть:

- защитные ограждения захватов испытательной машины;
- надежные устройства закрепления грузов на подтарельниках испытательной машины;
- места для складирования грузов.

5.3.4.4. Организация рабочего места

В ГОСТ 12.2.032-78 [25] содержатся требования к рабочему месту для выполнения работ в положении сидя.

Конструкция рабочей мебели должна обеспечивать возможность индивидуальной регулировки соответственно росту работающего и создавать удобную позу. Рабочий стол должен регулироваться по высоте в пределах 680-700 мм. Если регулировка невозможна, то его высота должна составлять 720 мм. Оптимальные размеры столешницы 1600 x 900 мм. Под столешницей стола должно быть свободное пространство для ног. Его размеры по высоте не менее 460 мм, по ширине 500 мм и по глубине 650 мм. рабочее кресло должно быть снабжено подъемно-поворотным механизмом, обеспечивающим регулировку высоты сидения и спинки. Высота сидения должна регулироваться в пределах 400 – 500 мм, ширина сидения должна составлять не менее 400 мм, глубина – не менее 300 мм. угол наклона спинки должен изменяться в пределах 80 - 110° с плоскостью сидения.

Средства отображения информации следует располагать в вертикальной плоскости под углом $\pm 30^\circ$ от нормальной линии взгляда и в горизонтальной плоскости $\pm 30^\circ$ от горизонтальной плоскости[26].

5.4. Экологические требования к проектируемому технологическому процессу

Проектируемый технологический процесс – испытания образцов из латуни ЛС59-1 при комбинированном нагружении в условиях ползучести.

Испытания на ползучесть проходят при больших температурах и сопровождаются выделениями газо- и парообразных веществ, вредных для окружающей среды и организма человека.

В соответствии с ГОСТ 15527-70 [11], в состав латуни ЛС59-1 входит свинец. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) в атмосферном воздухе населенных пунктов регламентируются списком Министерства здравоохранения СССР №3086-84, в соответствии с которым, свинец и его соединения причислены к вредным веществам 1 класса опасности с среднесуточной ПДК равной 0.0003 мг/м³.

В связи с этим возникает необходимость в очистке поступающего в систему вентиляции воздуха от газо- и парообразных веществ.

Методы очистки промышленных выбросов от газообразных загрязнителей по характеру протекания физико-химических процессов подразделяются на пять основных групп [27]:

- промывка выбросов растворителями примесей (абсорбция);
- промывка выбросов растворами реагентов, связывающих примеси химически (хемосорбция);
- поглощение газообразных примесей твердыми активными веществами (адсорбция);
- термическая нейтрализация отходящих газов;
- поглощение примесей путем применения каталитического превращения.

Методы абсорбции и хемосорбции, применяемые для очистки промышленных выбросов, называют мокрыми. Преимущество абсорбционных методов заключается в экономичности очистки большого количества газов и осуществлении непрерывных технологических процессов. Основной недостаток мокрых методов состоит в том, что перед очисткой и после ее осуществления сильно понижается температура газов, что приводит в конечном итоге к снижению эффективности рассеивания остаточных газов в атмосфере. Кроме того, оборудование мокрых методов очистки громоздко и требует создания системы жидкостного орошения. В процессе работы абсорбционных аппаратов образуется большое количество отходов, представляющих смесь пыли, растворителя и продуктов поглощения. В связи с этим возникают проблемы обезжиривания, транспортировки или утилизации шлама, что удорожает и осложняет эксплуатацию.

Адсорбция эффективна при удалении больших концентраций загрязняющих веществ (при этом необходима высокая адсорбционная емкость или большая масса адсорбента). В тех случаях, когда концентрации загрязнителей невелики и обработке подвергается большое количество воздуха, адсорбция может оказаться

эффективной для удаления летучих углеводородов и органических растворителей. Этот метод также применим в случаях, когда загрязняющий газ трудно или невозможно сжечь, когда необходима гарантированная рекуперация достаточно ценной примеси, когда нужно удалить пары ядовитых веществ.

Основным недостатком термической нейтрализации является выделение загрязняющих веществ в процессе сжигания. Кроме того, этот метод оправдывает свое применение при очистке больших объемов выбросов.

Осуществление каталитических процессов иногда затрудняется отравлением катализатора некоторыми примесями, содержащимися в газовых выбросах. Присутствие в обрабатываемом газе железа, свинца, кремния и фосфора сокращает срок службы многих катализаторов или подавляет их активность.

Таким образом, для очистки поступающего в систему вентиляции воздуха от газо- и парообразных веществ, образующихся в процессе испытаний необходимо использовать адсорберы.

Конструктивно адсорберы выполняются в виде вертикальных, горизонтальных или кольцевых емкостей, заполненных пористым адсорбентом, через который фильтруется поток очищаемого газа.

Для очистки воздуха в нашем случае необходимо использовать вертикальный адсорбер периодического действия. Это связано с тем, в процессе испытаний объемы выбросов невелики, кроме того, адсорберы периодического действия (слой адсорбента неподвижен) отличаются конструктивной простотой и имеют широкое применение.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчинников А.Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. – М.: Машиностроение, 1983. – 200с.
2. Леванов А.Н. Контактное давление в процессах обработки металлов давлением. – М.: Metallurgy, 1976. – 416с.
3. Савин Г.А. Волочение труб. Учеб. пособие для ПТУ – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallurgy, 1993. – 336с.
4. Кропотов В.А. Разработка технологии штамповки электротехнических изделий из бескислородной меди на основе физического и математического моделирования процессов комбинированного нагружения. – Диссертация к.т.н. – М.: Московский государственный институт сталей и сплавов, 1998. – 103с.
5. Drucker D. Introduction to mechanics of deformable solids, N.Y. McGraw-Hill Book Company, 1967.
6. Piechnik S. Steady - State creep of Solid bar under combined load. Tekniska hogskolan. Stockholm, 1962, №190.
7. Piechnik S. Stationary creep of a solid curcular bar and tube under torsion and tension. Tekniska hogskolan. Stockholm, 1962, №192.
8. Piechnik S. Combined tension-bending creep for a solid bar. Tekniska hogskolan. Stockholm, 1962. №194.
9. Романов К.И., Мильков А.В. Исследование установившейся ползучести стержня при растяжении с кручением. – Научные труды II Международного семинара «Современные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева. Старая Русса: В 2т. – Новгород, 1998. Т.1 – стр. 100-104.
10. Забазарных Н.Д. Исследование латуни ЛС59-1 в условиях кратковременной ползучести в широком спектре температур. – Дипломная работа. Кафедра «Прикладная механика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994.
11. ГОСТ 15527-70. Сплавы медно-цинковые (латуни), обрабатываемые давлением. Марки. М.: Изд-во стандартов, 1970.
12. ГОСТ 3248-81. Металлы. Метод испытания на ползучесть. М.: Изд-во стандартов, 1981.

13. Р. Петерсон Коэффициенты концентрации напряжений. Пер. с англ. - М.: Мир, 1977. – 302с., ил.
14. 3.9026.171.ТО. ГСП. Приборы автоматические следящего уравнивания КСМ4, КСМ4И, КСП4, КСП4И, КСУ4. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.
15. Б.Н. Олейников, С.И. Лаздина, В.П. Лаздин, О.М. Жагулло. Приборы и методы температурных измерений: Учебное пособие для учащихся средних специальных учебных заведений по специальности «Электротеплотехнические измерения». М.: Изд-во стандартов, 1987, 296с., ил.
16. Аш Ж. и соавторы Датчики измерительных систем: в 2-х книгах. Кн. 1. Пер. с франц. – М.: Мир, 1992. – 480с., ил.
17. Измерение деформаций аппаратурой фирмы Брюль и Кьер. Материалы фирмы Брюль и Кьер, 1976.
18. ГОСТ 8.280-78. ГСИ. Потенциометры и уравновешенные мосты автоматические. Методы и средства поверки. М.: Изд-во стандартов, 1978.
19. ГОСТ 8.338-78 ГСИ. Термопреобразователи технических термоэлектрических термометров. Методы и средства поверки. М.: Изд-во стандартов, 1978.
20. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1976. –400с., ил.
21. Учебное пособие по выполнению организационно-экономической части дипломных проектов исследовательского профиля ./ Смирнов С.В., и др. - Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1988 г.
22. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. М.: Изд-во стандартов, 1974.
23. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. М.: Изд-во стандартов, 1988.
24. Охрана труда в машиностроении / Е.Я. Юдин, С.В. Белов, С.К. Баланцев и др. – М.: Машиностроение, 1983, 432 с.
25. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. М.: Изд-во стандартов, 1978.

26. Строкин А.А., Кирикова О.В. Эргономические основы охраны труда операторов и экологической безопасности систем «человек – машина – среда обитания»: Учеб. Пособие. – М: Изд-во МГТУ, 1992. 90 с.
27. Охрана окружающей среды: Учеб. Для техн. спец. вузов/ С.В. Белов, Ф.А. Барбинов, А.Ф. Козьяков и др. Под ред. С.В. Белова. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – 319с.: ил.