Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Донской государственный технический университет**

Кафедра " **Материаловедение и технологии металлов** "

**ОСНОВЫ ФИЗИКИ ПРОЧНОСТИ, МЕХАНИКА**

**И ФРАКТОГРАФИЯ РАЗРУШЕНИЯ**

Методические указания

к лабораторному практикуму

**для студентов 3-го курса очной и заочной формы образования**

**направления 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»**

**профиль подготовки «Материаловедение и технологии материалов в**

**приборостроении и медицинской технике»**

Составитель: д-р техн. наук, профессор

О.В. Кудряков

РостовнаДону, 2023

**ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА И ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТОВ**

Курс «Основы физики прочности, механика и фрактография разрушения» нацелен на формирование знаний о природе пластического и неупругого деформиро­вания материалов в широком диапазоне температур и скоростей нагружения. Основное назначение курса - выработка умения ставить и выполнять оценочные расчёты по влиянию химического состава, структурного состояния материала и температурно-времен­ных параметров нагружения на ха­рактеристики прочности и пластичности, на специфику процессов разрушения.

Лабораторный практикум по курсу «Основы физики прочности, механика и фрактография разрушения» предполагает демонстрацию и закрепление на практике основных положений теории, а также приобретение студентами практических навыков по применению расчетных прочностных моделей и работы с испытательным оборудованием, применяемым при исследовании прочности и трещиностойкости материалов. Собранные в настоящем издании работы раскрывают роль дефектов кристалли­ческого строения металлов в процессах пластичности и разрушения (№1); особенности механических свойств сплавов технически важных металлов (№2); характер влияния исходной структуры и термической обработки на прочность и долговечность конструкционных материалов (№3); закономерности усталостного поведения металлических сплавов в ходе циклического нагружения образцов (№4).

Лабораторный практикум выполняется на приборах и оборудовании лабораторий кафедры «Материаловедение и технологии металлов» (ауд. 167, 265,267). Для полноценного выполнения лабораторного практикума необходима соответствующая теоретическая подготовка, которая наиболее полно дается в лекционном курсе, а в работах лабораторного практикума приводится в сжатом виде. С содержанием теоретического раздела, а также с методической частью работы студенту необходимо ознакомиться заранее. Объем лабораторно-практической части работы не позволяет преподавателю подробно останавливаться на других её разделах, поэтому к выполнению практикума могут быть допущены только подготовленные студенты. С методическим руководством к каждой лабораторной работе можно ознакомиться в читальном зале университета или на кафедре. В работах лабораторного практикума приведены контрольные вопросы, позволяющие студенту проверить свою готовность к выполняемой работе.

При выполнении практикума студент должен соблюдать правила техники безопасности. Инструктаж по технике безопасности проводится преподавателем перед началом курса лабораторных работ.

Отчет по практикуму необходимо выполнять в отдельной тетради, на титульном листе которой пишется:

«Основы физики прочности, механика и фрактография разрушения»

Лабораторный практикум

Студента группы /*наименование группы*/ .

/*Фамилия, имя, отчество*/ .

Допускается оформление отчета на отдельных листах (двойные тетрадные листы в клетку или писчая бумага формата А4). В этом случае первая страница отчета является титульной, она должна иметь следующую форму:

ДГТУ

Кафедры «Материаловедение и технологии металлов»

Лабораторная работа №\_\_\_

*/Название лабораторной работы/ .*

Выполнил студент группы /*наименование группы*/ .

/*Фамилия, имя, отчество студента*/ .

Проверил /*Фамилия, имя, отчество преподавателя*/ .

Ростов-на-Дону,  */год/* .

Отчет по лабораторной работе является документом учебного процесса и должен сохраняться в надлежащем виде до окончания изучения дисциплины (до конца экзаменационной сессии).

Объем отчета по одной работе обычно не превышает 3-4 страниц. Отчет должен соответствовать рекомендуемому содержанию, быть понятным, логичным, лаконичным, информативным, написанным без произвольных сокращений. Текст, иллюстративный и табличный материалы отчета должны соответствовать известным требованиям оформления отчетов о НИР (см., например, ГОСТ 2.105-95 ЕСКД или СТП ДГТУ 01-2001). В случае статистической обработки результатов эксперимента должны быть указаны доверительные интервалы экспериментально полученных значений и приведены графики полученных аппроксимирующих функций. Если аппроксимация экспериментальных зависимостей не проводится, экспериментально полученные значения должны быть соединены прямыми линиями. Отчет должен содержать заключение или выводы по работе.

Результатом выполнения ряда лабораторных работ являются экспериментальные данные. Для достоверности их определения необходимо получить массив измерений, не менее 5, и статистически его обработать, определив среднее значение измеряемой величины , среднеквадратичное отклонение *σX*и доверительный интервал *ΔX* полученного значения *X* по формулам:

|  |  |
| --- | --- |
| ; |  |
| ; |  |
| , |  |

где *Xi* – *i*-тое значение измеряемой величины *X*;

*Р* – заданный уровень надежности (доверительная вероятность);

*t(P,n−1)* – квантиль распределения Стьюдента – нормированное отклонение, зависящее от доверительной вероятности и массива измерений *n*.

При решении научно-технических задач обычно используют *Р*=0,95 или 0,99. Значения для *t*-распределения Стьюдента приведены в таблице:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *n−1* | *Р* | | *n−1* | *Р* | |
| 0,95 | 0,99 | 0,95 | 0,99 |
| 2  3  4  5  6  7  8  9  10  11  12  13  14  15  16 | 4,303  3,182  2,776  2,571  2,447  2,365  2,306  2,262  2,228  2,201  2,179  2,160  2,145  2,131  2,120 | 9,925  5,841  4,604  4,032  3,707  3,499  3,355  3,250  3,169  3,106  3,055  3,012  2,977  2,947  2,921 | 18  20  25  30  35  40  45  50  60  70  80  90  100  ∞ | 2,101  2,086  2,060  2,042  2,090  2,021  2,014  2,009  2,000  1,994  1,990  1,987  1,984  1,960 | 2,878  2, 845  2,787  2,750  2,724  2,704  2,689  2,678  2,660  2,648  2,639  2,632  2,626  2, 576 |

Примечания: 1. Интерполяция допустима только по аргументу *n−1*.

2. Для значений *(n−1)*>100 значения *t(P,n−1)* с точностью до 0,001 можно вычислить по формулам:

*t (0,95; n−1) = 1,960 + 2,4 / (n−1) ;*

*t (0,99; n−1) = 2,576 + 5,0 / (n−1) .*

Лабораторная работа №1

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ**

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение способов определения плотности дислокаций в металлах.

1. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ

Плотность дислокаций − одна из важнейших структурных характеристик сплава, определяющих его прочность и пластичность. Она также является индикатором степени деформации сплава и склонности его к разрушению.

Под плотностью дислокаций *ρ* [м−2] понимается общая (суммарная) протяженность дислокационных линий в единице объема материала:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Чаще в научной литературе для выражения величины плотности дислокаций *ρ* используется несистемная размерность [см−2].

Существует два способа определения :

− по выходам дислокаций (ямкам травления) на поверхность микрошлифа;

− по электронно-микроскопическим изображениям, сделанным на просвет с металлической фольги.

**1.1.** В соответствии с первым способом *ρ* определяют по числу точек выхода *N* дислокаций на поверхность микрошлифа площадью *F*:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

Обычно распределение дислокаций на микрошлифе не бывает равномерным. Для оценки этой неравномерности и для повышения точности измерения *ρ* необходимо использовать статистические методы.

Для этого фотоснимок разбивают на ячейки (клетки) в количестве i=20, 25 или 30. Каждая из них является зоной независимых измерений и в каждой из них проводят измерения в соответствии с формулой (2), определяя *ρi* .

Статистическая оценка включает расчет:

- среднего арифметического :

|  |  |
| --- | --- |
| ; | (2.1) |

- среднего квадратичного  отклонения:

|  |  |
| --- | --- |
| ; | (2.2) |

где *К* – поправочный коэффициент, зависящий от числа независимых измерений n:

 ;

для *n*=20 *К*=1,026; для *n*=25 *К*=1,021; для *n*=30 *К*=1,017; для *n*=50 *К*=1,010.

- дисперсии:

|  |  |
| --- | --- |
| ; | (2.3) |

- коэффициента вариации:

|  |  |
| --- | --- |
| ; | (2.4) |

- график, кривая или гистограмма частот *ν* (или плотности) распределения значений : в идеале должно получиться нормальное (гауссово) распределение по закону:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (2.5) |

Чтобы проверить соответствие экспериментальных данных закону Гаусса, построим выпрямленную кривую частот *ν* в координатах *ν − Δρ* (рис.1)*, где*  . Для этого на горизонтальной оси *Δρ* откладываем отрезок  и делим его на равные части: если *n*=20, то на 5 частей; если *n*=30, то на 6 частей и т.д. По вертикальной оси откладываем частоты *ν*, начиная с наибольшей. Точки середин отрезков полученной таким образом гистограммы соединяем. Если получившийся график (см. рис.1) близок к прямой, то закон распределения экспериментальных значений *ρ* близок к нормальному, а распределение дислокаций по объему металла можно считать относительно равномерным.

Погрешность статистической оценки  рассчитывается по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (2.6) |

где *t* – нормированное отклонение.

Значение *t* рассчитывается (или выбирается) из специальных таблиц в зависимости от доверительной вероятности Р, задающей уровень достоверности.

Обычно в машиностроении задают Р=0,95, которому соответствует t=1,96 (при других заданных уровнях достоверности, например: для Р=0,5 t = 0,6745; для Р=0,9 t = 1, 6449; для Р=0,98 t = 2,3263).

Таким образом, по мере увеличения доверительной вероятности Р (то есть с ужесточением требований точности измерений) погрешность статистической оценки  возрастает!

Единственный способ уменьшить этот ужасный эффект – повышение числа измерений *n* (тогда будет уменьшаться  и *К*).

|  |  |
| --- | --- |
| Лаб1_Рис1 | Рис. 1.  Построение частотной кривой для статистической оценки распределения экспериментальных значений *ρi* |

Если этот метод применяется к электронно-микроскопическому изображению дислокаций в фольге, то на просвет будут видны сразу выходы дислокаций и на верхнюю, и на нижнюю поверхности фольги, поэтому:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

Из всех дислокаций, находящихся в фольге, невидимыми оказываются те, для которых выполняется условие , где  - нормаль к плоскости, от которой получено отражение;  - вектор Бюргерса дислокации. Поскольку  - скалярное произведение векторов, то  → α=90° - угол между векторами .

То есть невидимыми оказываются дислокации, целиком лежащие в плоскости рефлекса (совпадающей с плоскостью поверхности фольги) и не выходящие своими концами на поверхность фольги.

Обычно  принадлежат одному из сильных рефлексов с малыми индексами (hkl). В решетке ОЦК − это рефлексы от семейства кристаллографических плоскостей {110}, {200}; в решетке ГЦК – {111}, {200}, {220}. А  всегда одного типа: в решетке ОЦК - <110>, а в решетке ГЦК - <111>.

Будем считать все сочетания  равновероятными, тогда средняя вероятность  того, что дислокация в данном рефлексе видима, определяется простым перебором комбинаций :

для металлов с решеткой ОЦК:  ;

для металлов с решеткой ГЦК:  .

Тогда действительная плотность дислокаций  будет:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

Из-за невидимых дислокаций, всегда присутствующих в кадре, одного кадра для точного определения  недостаточно (но в разных кадрах, полученных в разных рефлексах, их число будет различным и точно неизвестным).

Для оценки точности измерения  при *М* обработанных кадрах (полученных, например, с разных зерен одной и той же фольги) используется величина:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (5) |

где  - среднее число дислокаций в одном кадре;

Z – число разных векторов Бюргерса в одном зерне: для металлов с решеткой ОЦК z ; для металлов с решеткой ГЦК z .

Задавая значение точности измерения  (например,  = 100%), по выражению (5) можно определить необходимое для этого число независимых (снятых с разных зерен) кадров *М*.

*Этот метод применим для относительно невысокой . При больших значениях  не все точки выхода дислокаций отчетливо видны.*

**1.2.** При значениях плотности дислокаций (*ρ* ≥ 109 см−2) удобнее измерять  не по точкам выхода, а по суммарной длине проекций *L* дислокаций на плоскость фольги:

|  |  |
| --- | --- |
| ;  , | (6) |

где  - суммарная длина дислокаций в объеме *V*;

 и  - геометрические коэффициенты, зависящие от распределения осей дислокаций по направлениям.

Для измерения *L* пользуются методом случайных секущих: на снимке проводят произвольно ориентированные линии с суммарной длиной *Т* и подсчитывают число их пересечений *q* с дислокациями.

Как расположить секущие, чтобы обеспечить достойную точность измерения величины?

Удобнее располагать их в виде сетки с квадратной ячейкой размером *h*, тогда суммарная длина секущих на площади снимка *F* будет равна:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (7) |

Можно доказать, что собственная погрешность метода секущих не будет влиять на измерение  при условии:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (8) |

где *t* – толщина фольги. То есть дальнейшее уменьшение ячейки не повысит точности измерений (т.к. флуктуации числа дислокаций в кадре от этого не уменьшатся), поэтому размер ячейки для сетки секущих выбирается в соответствии с условием (8).

В предположении изотропной ориентировки дислокаций основной расчетной формулой метода секущих является:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |

Таким образом, вся сложность метода сводится к определению величины толщины фольги *t* (которая, впрочем, может быть известна и заранее).

Величину *t* находят из гистограммы распределения видимых длин проекций одиночных дислокаций на плоскость фольги (сплетения дислокаций, характерные для высоких значений , где трудно указать «начало» и «конец» одной и той же дислокации, при этом просто обходятся).

При изотропном распределении дислокаций вероятность найти длину проекции дислокации на плоскость фольги в интервале от х до х+dх описывается выражением:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Это распределение имеет max. при , то есть чаще всего должны встречаться дислокации длиной . Построив гистограмму (рис.2) распределения длин дислокаций *l*, по наиболее частому значению *l0* определяют толщину фольги:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (10) |

При построении гистограммы (пример показан на рис.2) удобно снимать размеры *li* циркулем и откладывать их против острого угла  ( - эта величина по согласованию с преподавателем может быть и больше). Сначала на микрофотографии находится дислокация максимальной длины *l*max. Этот отрезок, помещенный вертикально напротив угла α, определяет максимальный горизонтальный размер гистограммы Λmax. (Λmax.≤10⋅ *l*max.). Затем отрезок Λmax. произвольным образом разбивается на равные участки (обычно на 4-8 участков; на рис.2 показаны 4 участка разбиения, обозначенные цифрами). После того, как все размеры *li* перенесены на гистограмму, выбирается её участок с наибольшей плотностью *li* . Средняя длина дислокации *l* из середины этого участка принимается за величину *l0* в формуле (10).

|  |  |
| --- | --- |
| Лаб1_Рис2 | Рис. 2.  Пример построения гистограммы для нахождения наиболее часто встречающегося значения *l0* длин дислокаций в фольге |

2. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. По микрофотографии построить гистограмму распределения длин свободных дислокаций. Из нее найти по формуле (10) толщину фольги *t*.

2. По выражению (8) найти размер ячейки сетки секущих *h*.

3. Если размер ячейки получается слишком большим или чересчур малым, а плотность измеряемых дислокаций велика (клубки скопления, переплетения и т.п.), выбрать размер ячейки по своему усмотрению и согласовать его с преподавателем.

4. При высокой плотности дислокаций измерить величину *ρ* по методу секущих в соответствии с выражением (9). При невысокой плотности дислокаций на микрофотографии определить величину *ρ* по точкам выхода (4) и по методу секущих (9). Сравнить полученные результаты.

5. В соответствии с выражением (5) определить, какое число кадров *М* необходимо промерить, чтобы величина погрешности *V0* в выражении (5) не превышала 10% (то есть принимаем *V0=10%,* если измерение проводилось по точкам выхода дислокаций).

3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Понятие плотности дислокаций.
3. Способы определения плотности дислокаций и области их применимости.
4. Микрофотография дислокационного строения металла (каждый студент получает микрофотографию от преподавателя в ходе лабораторного практикума; все вспомогательные построения проводятся непосредственно на фотографии и она является неотъемлемой частью отчета).
5. Гистограмма распределения длин свободных дислокаций.
6. Обоснование выбора способа определения *ρ*.
7. Формулы и расчетные значения величин, полученных с помощью этих формул для соответствующего способа определения *ρ*.
8. Выводы о характере распределения дислокаций, их плотности, о степени и стадии деформации металла.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимается под плотностью дислокаций?
2. Какое технологическое состояние металла может быть описано при помощи величины плотности дислокаций?
3. В каких случаях плотность дислокаций определяется по точкам выхода (ямкам травления)?
4. С какой целью проводится разбиение на ячейки при определении плотности дислокаций по точкам выхода?
5. Для чего строится гистограмма и кривая частот *ν (Δρ)* при использовании метода точек выхода?
6. В чем заключаются особенности определения плотности дислокаций по точкам выхода при работе с электронно-микроскопическим изображением дислокаций в фольге?
7. Почему недостаточно одного кадра для точного определения  по электронно-микроскопическому изображению металлической фольги?
8. Когда целесообразно использовать для определения плотности дислокаций метод случайных секущих?
9. Какое расположение случайных секущих является наиболее рациональным?
10. Какой параметр определяет оптимальный размер ячейки сетки секущих?
11. С помощью какого графического способа определяется величина толщины фольги?
12. В чем причина неравномерного распределения дислокаций в металле?
13. Какое технологическое состояние металла можно описать на основе величины плотности дислокаций и как все это связано с понятиями прочности и разрушения?

### РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков И.И. Дефекты кристаллического строения металлов. М.: Металлургия, 1975. 280 с.
2. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч.1: Дефекты решетки. М.: Металлургия,1982. 286 с.
3. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1975. – 272 с.
4. Электронномикроскопические изображения дислокаций и дефектов упаковки: Справочное руководство / Под ред. В.М.Косевича и Л.С.Палатника. М: Наука. 1976. 224 с.

Лабораторная работа №2

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА УПРУГОСТИ ПРИ ИЗГИБЕ ЛЕНТОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ**

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Изучение поведения металлических материалов в области упругих деформаций.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Сопротивление металлического материала малым деформациям характеризуется пределом упругости . За предел упругости принимается такое напряжение, которое после разгрузки даст остаточную деформацию образца Σ*ОСТ ≈ 10−4…10−2 %*.

Сопротивление малым пластическим деформациям (ниже предела текучести ), которое характеризуется значением , - важная характеристика пружинно-рессорных материалов и упругих элементов машин и механизмов. Повышение предела упругости, как правило, сопровождается снижением неупругих эффектов.

На практике измерение  применяется для исследования структурных и фазовых превращений. Такие «тонкие» явления, как полигонизация, ближний порядок, сегрегации Коттрелла и Сузуки, обнаруживаются по изменениям предела упругости.

Для измерения  наиболее удобно пользоваться нагружением материала по схеме изгиба, т.к. прогиб, в общем случае, легче измерить и он, как правило, значительно больше, чем величина  при других схемах (растяжение, кручение и др.).

Общее выражение для упругой области  (где *Е* – модуль упругости) в случае изгиба записывается как:

 при Σ*УПР*>> Σ*ОСТ*.

Величина относительной деформации  для изогнутых тонких образцов рассчитывается сложным образом при решении дифференциальных уравнений с использованием эллиптических интегралов. Для того, чтобы можно было воспользоваться этими готовыми решениями необходимо, чтобы выполнялся ряд условий:

1)  при *h* = 0,1-0,5 мм, где *L* и *h* – длина и толщина образца;

2) поскольку *σУПР / E =* Σ*УПР ≈* 0,3−0,8%, то Σ*ОСТ ≤* 0,05−0,1*%* - если эти значения превышаются, то деформация становится не упругой, а пластической;

3) схема нагружения должна быть следующей (рисунок):

|  |  |
| --- | --- |
| Лаб2_Рис1 | Схема изгиба ленточного образца под нагрузкой :  *А* – шарнирно закрепленный конец образца; *В* − точка максимального прогиба; *С* – подвижный конец образца;  *RВ* – радиус кривизны в точке *В* |

4) очень важно качество образца: недопустим какой-либо изгиб образца до испытания; правку можно делать только до термической обработки, т.к. она проходит заведомо за пределом текучести  и определение *σУПР* после правки лишено смысла, как и повторное измерение *σУПР* на том же образце после дополнительной термообработки.

2. НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ОБРАЗЦЫ:

1. Микротвердомер ПМТ-3.
2. Приспособление для изгиба образцов на микротвердомере ПМТ-3.
3. Микрометр для измерения толщины образцов.
4. Штангенциркуль для измерения габаритных размеров образцов.
5. Образцы с размерами (100…150)×5×(0,2…0,5) мм: прямые (без общей кривизны и локальных изгибов); термически обработанные на высокую упругость (рекристаллизационный отжиг после деформации; закалка + средний отпуск; и т.п.); двух или трех разных толщин в пределах 0,2…0,5 мм.
6. Миллиметровая бумага формата А3 для построения диаграмм деформации образцов.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ:

1. Проверив качество образца (прямизну и отсутствие заусенцев, которые могут служить ребрами жесткости), измерить его толщину *h* с помощью микрометра. Измерение провести в трех точках (посредине образца и на 1,5−2 см от середины в каждую сторону). Вычислить среднее значение *h* для каждого образца с точностью до 0,01мм.

2. Построить для полученного значения *h* шкалу перемещений и прогибов fОСТ, пользуясь следующими выражениями:

, (1)

где *L* – длина образца;

 - величина перемещения каретки;

*Е* и *К* – полные эллиптические интегралы с аргументом *k* ( *Е* и *К* – определяются по таблице А).

Максимальное удлинение в наружном волокне образца:

, (2)

где *RВ* – радиус кривизны в верхней точке max. прогиба образца.

В таблице А вместо аргумента *k* дано:  .

Соответствие между  и *k* можно найти с помощью калькулятора.

2.1. Построить зависимость (графическую) Ф (), задавая значения  через каждые 50С в интервале от 00 до 400 и определяя для этих  соответствующие значения Ф () и ():

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0,007625 | 0,137235 |
| 10 | 0,0302 | 0,274774 |
| 15 | 0,067455 | 0,4135883 |
| 20 | 0,118765 | 0,55404 |
| 25 | 0,18302 | 0,6968674 |
| 30 | 0,26002 | 0,8434 |
| 35 | 0,34531 | 0,993016 |
| 40 | 0,440676 | 1,148555 |
| 45 | 0,54312 | 1,311034 |

2.2. Задавая  = 1, 2, 3, 5, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35 мм, найти по выражению (1) значения Ф; по графику Ф () определить соответствующие значения , а по ним из выражения (2) найти  для данного значения толщины *h*.

2.3. Взять в качестве вертикальной оси  (в масштабе: 0,1% − 50мм), параллельно ей провести ось  в соответствующем масштабе (из п.п. 2.2).

В качестве горизонтальной оси взять  (в масштабе: 0,01%-100мм).

Значения  вычисляются по выражению:

 , (3)

где  - остаточный прогиб, измеряемый микротвердомером ПМТ-3 [мм] /прибор позволяет измерять остаточные прогибы до 2,2мм, что при *L*=100мм дает погрешность не более 0,3%/.

При вычислении  значения  задаются через каждые 0,1мм.

Шкала  наносится параллельно оси  (вторая горизонтальная ось).

3. Измерить  на ПМТ-3 после подачи на = 1,2,3,5,8,10,12,15,20,25,30,35мм (подробный порядок измерения прогиба приведен ниже).

4. Построить диаграмму деформации, используя заготовленные по п.2 шкалы (с двойными вертикальными и двойными горизонтальными осями ). Экспериментальные данные  и  свести в таблицу 1.

Таблица 1.

### Экспериментальные и расчетные данные

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  образца | Параметры | Заданные значения подачи , мм | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 5 | 8 | 10 | … |
| 1 | , мм |  |  |  |  |  |  |  |
| ,% |  |  |  |  |  |  |  |
| ,% |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 | , мм |  |  |  |  |  |  |  |
| ,% |  |  |  |  |  |  |  |
| ,% |  |  |  |  |  |  |  |
| … | … |  |  |  |  |  |  |  |

5. Для значений  = 0,005; 0,01 и 0,02% определить  и найти предел упругости *σ*0,005 , *σ*0,01 и *σ*0,02 по выражению:

, (4)

где *Е* – модуль упругости (для малоуглеродистой стали *Е*=200 ГПа).

6. Свести результаты определения предела упругости, полученные для всех образцов, в таблицу 2.

Таблица 2.

### Упругие свойства образцов

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  образца | Характеристи-ка материала образца | *h*, мм | *L*, мм | Предел упругости, МПа | | |
| *σ*0,005 | *σ*0,01 | *σ*0,02 |
| 1 |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |
| … |  |  |  |  |  |  |

7. Сделать выводы по работе.

4. ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЯ ПРОГИБА :

1. Придать ленточному образцу, вставленному в приспособление ПМТ-3, строго горизонтальное положение путем тонкой регулировки микровинта приборного столика.
2. Опустить тубус микроскопа ПМТ-3 винтом тонкой настройки до отказа вниз, установив винт на «0».
3. Сфокусировать микроскоп винтом грубой настройки примерно посредине образца (навести резкость изображения, НЕ касаясь винта тонкой настройки).
4. Развернуть столик с образцом так, чтобы прогиб образца вверх осуществлялся свободно.
5. Микровинтом приборного столика придать необходимый прогиб образцу, перемещая микровинт на нужное расстояние по шкале микровинта.
6. Разгрузить образец, вернув его в горизонтальное положение с помощью того же микровинта приборного стола.
7. Развернуть предметный столик так, чтобы образец стал под микроскоп (объектив, тубус) ПМТ-3.
8. Винтом тонкой настройки сфокусировать микроскоп на поверхности образца.
9. Записать прогиб  в мм, складывающейся из полных оборотов винта тонкой настройки (1 оборот = 0,1мм) и отсчета по барабану винта (1 деление = 0,002мм; 1 оборот = 50 делений).
10. Можно не возвращать винт тонкой настройки в исходное положение, а после каждого нового изгиба «доворачивать» его вверх до получения резкого изображения, прибавляя «накрученные» деления барабана винта к предыдущему измерению.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Понятие предела упругости.
3. Формулы для расчета напряжений в области упругой и малой пластической деформации.
4. Схема нагружения (изгиба) экспериментальных образцов
5. Размерная (условие 1) и визуальная (условие 4) проверка образцов (на выполнение условий для применения готовой расчетной модели).
6. Таблица экспериментальных и расчетных данных (табл.1).
7. Диаграмма деформации образцов (для упругой и малопластической областей), построенная по данным таблицы 1 на миллиметровой бумаге.
8. Расчет упругих свойств образцов *σ*0,005 , *σ*0,01 и *σ*0,02 (заполненная таблица 2 с расчетными данными).
9. Выводы об уровне упругих свойств материалов, использованных в эксперименте.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимается под пределом упругости материала?
2. Каков порядок величины остаточной деформации металлических материалов на границе упругой и пластической областей?
3. Какой способ нагружения образцов применяется при изучении упругих деформаций и почему?
4. Как количественно связаны напряжение и деформация в упругой области?
5. Почему при проведении работы целесообразно использовать ленточные образцы?
6. Какой прибор служит основой экспериментальной установки в лабораторной работе и почему выбран именно он?
7. Какие параметры в работе являются практическими (варьируемыми и фиксируемыми), а какие расчетными?
8. Можно ли отождествлять остаточный прогиб образцов с остаточной деформацией, поясните ответ.
9. При каком структурном состоянии металлического материала (на примере стали) следует ожидать высокие упругие свойства?
10. Если в эксперименте получаются низкие значения предела упругости, каковы возможные причины этого результата?

### РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч.2. Деформация. - М.: МИСиС, 1997. - 527 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. - М.: Металлургия, 1979. - С.31-85.
3. Штремель М.А. Лабораторный практикум по спецкурсу «Прочность сплавов». Ч.1. - М.: МИСиС, 1969. - С.36-55.

Лабораторная работа №3

ДЕФОРМАЦИОННОЕ СТАРЕНИЕ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение изменения диаграммы растяжения малоуглеродистой стали в результате деформационного старения.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Деформационным старением называют упрочнение пластически деформированного сплава при низкотемпературном отжиге, обусловленное осаждением сегрегаций или включений второй фазы на дислокациях.

После деформационного старения общая плотность дислокаций не меняется, но плотность дислокаций, способных к движению, падает на несколько порядков.

Пока плотность подвижных дислокаций низкая, нет независимого зарождения скольжения во всех зернах – вместо этого происходит эстафетная передача сдвига от зерна к зерну – через весь образец бежит фронт Людерса, в котором и локализована деформация. После деформационного старения вновь возникает зуб и площадка текучести.

В малоуглеродистой стали деформационное старение идет уже при 200С; наиболее интенсивно оно протекает при 150−2000С за счет атомов углерода и азота, которые образуют на дислокациях сначала ненасыщенные сегрегации, затем конденсированные атмосферы Коттрелла и, наконец, выделения карбидов и нитридов.

Количество примеси, осажденной на дислокации, пропорционально величине , где *t* – время; *Т* – температура; *D* – коэффициент диффузии.

В зависимости от этапов выделения примесей на дислокациях, деформационное упрочнение проходит несколько стадий (максимальное их количество – четыре).

Если отожженный материал деформировать далее площадки текучести (для получения большого количества подвижных дислокаций) и состарить (то есть закрепить эти дислокации примесными атомами), то при последующем нагружении появляются зуб и площадка текучести.

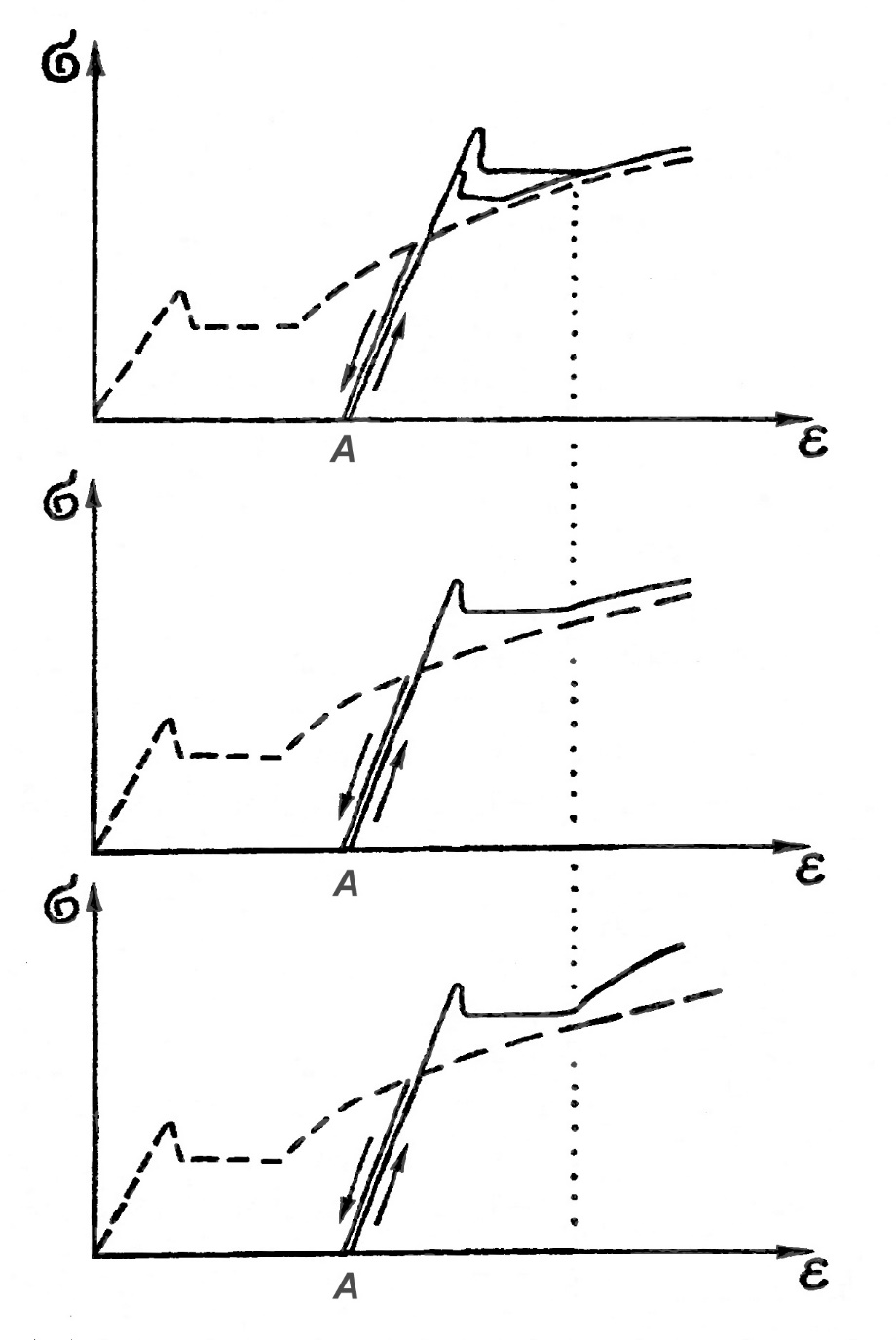
Стадии деформационного старения отличаются по характерным особенностям диаграмм деформации (рисунок):

1) первая стадия – ненасыщенные атмосферы: площадка текучести, состаренной стали заканчивается на кривой нестаренной стали и далее обе кривых совпадают; для железа первая стадия старения наблюдается после получасовой выдержки образца при 600С;

2) вторая стадия – конденсированные атмосферы: конец площадки текучести, состаренной стали лежит выше кривой нестаренной стали, после площадки кривая состаренной стали повторяет исходную кривую, располагаясь выше нее; на этой стадии лавинное размножение дислокаций при текучести не связано с их отрывом от атмосфер – увеличивается общая плотность дислокаций, они становятся «лесом» и тормозят процесс скольжения;

3) третья стадия – формирование дисперсных карбидов: при деформации происходит огибание их дислокациями; образуются петли дислокаций вокруг карбидов; деформационные кривые аналогичны второй стадии, только на последнем этапе модуль упрочнения (наклон кривой) состаренной стали существенно выше;

4) четвертая стадия – коагуляция карбидов: механические свойства падают, то есть происходит «перестаривание» стали (на рисунке эта стадия не показана).



Изменение диаграммы деформации на разных стадиях деформационного старения

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ:

Подготовить 3 одинаковых образца из малоуглеродистой листовой стали. Размеры образцов 160х20х2 мм, расчетная деформационная длина 80мм (расстояние между захватами машины).

Все испытания вести с записью диаграммы в масштабе 10:1.

Образец №1 довести до разрушения. Определить пределы текучести  и , длину площадки текучести , предел прочности  и относительное удлинение δ.

Образцы №2 и 3 деформировать на 5−10% далее площадки текучести и разгрузить (точка А на рисунке). Затем: образец №2 старить в течение 10 мин. при 1000С (погрузить в кипящую воду); образец №3 старить 30−40 мин. при 175 0С.

Охладить образцы до комнатной температуры и испытать до разрушения с записью диаграмм. Вычислить и свести в таблицу (вместе с данными образца №1) значения механических свойств (,,,,δ).

Скопировать на один лист обе диаграммы деформации каждого образца (№1+№2 и №1+№3), совместив начало деформации после старения с концом деформации до старения (положение А на рисунке). Выяснить (по схеме рисунка) − какой стадии деформационного старения соответствует каждый из выбранных режимов. Объяснить влияние режима старения на изменение свойств. Сформулировать все это в виде выводов по работе.

### Результаты экспериментов

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  образца | Характеристика  образца  (режим старения) | Механические свойства образцов | | | | |
| , МПа | ,  МПа | , МПа | , % | δ, % |
| 1 | Без старения |  |  |  |  |  |
| 2 | Старение при 1000С в течение 10 мин. |  |  |  |  |  |
| 3 | Старение при 1750С  в течение 30 мин. |  |  |  |  |  |

3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Понятие деформационного старения.
3. Краткие теоретические сведения о стадиях деформационного старения.
4. Техническая характеристика эксперимента: размеры и материал образцов, тип и марка разрывной машины, усилие и скорость деформации.
5. Экспериментальные и расчетные данные в виде заполненной таблицы.
6. Совмещенные на одном листе диаграммы деформации всех экспериментальных образцов.
7. Выводы о наблюдаемых стадиях деформационного старения и о влиянии применявшихся в работе режимов старения на изменение свойств образцов.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимается под деформационным старением стали?
2. Как влияет деформационное старение на поведение дислокаций при деформации?
3. Какими параметрами определяется плотность атмосфер и размер сегрегаций на дислокациях?
4. Назовите и охарактеризуйте стадии деформационного старения.
5. Почему после деформационного старения восстанавливается зуб и площадка текучести?
6. По какому кинетическому признаку деформационное старение можно отличить от других диффузионных процессов упрочнения?
7. Какая разница в механизме размножения дислокаций на первой и второй стадиях деформационного старения?
8. Какая разница в механизме упрочнения между второй и третьей стадиями деформационного старения?
9. Для каких сталей характерно наличие на диаграмме деформации двух пределов текучести – верхнего и нижнего?
10. Как влияет деформационное старение на штампуемость стального листа?

### РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч.2. Деформация. - М.: МИСиС, 1997. - 527 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. - М.: Металлургия, 1979. - С.185-230.
3. Штремель М.А. Лабораторный практикум по спецкурсу «Прочность сплавов». Ч.1. - М.: МИСиС, 1969. - С.16-24.

**Лабораторная работа №4**

##### **ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ ПРИ ИЗГИБЕ С ВРАЩЕНИЕМ**

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: экспериментальное построение кривой усталости лабораторных образцов (кривой Велера) с определением предела выносливости материала.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Виды разрушений и основные механические свойства материалов

Вид разрушения деталей машин в условиях эксплуатации зависит от типа материала, формы и размеров детали, температуры, характера изменения нагрузки во времени, внешней среды, облучения и других факторов.

Нагрузки делят на *статические, переменные* и *ударные. Статическими* называют нагрузки, которые медленно изменяются от нуля до своего конечного значения и затем не изменяются или изменяются весьма незначительно в течение всего срока эксплуатации. *Ударными* называют нагрузки, характеризуемые высокими скоростями их возрастания.

При однократном приложении статической нагрузки может возникать вязкое, квазихрупкое или хрупкое разрушение. Вязким называют разрушение, которому предшествует большая пластическая деформация и на которое затрачивается большая работа. Это разрушение, например, при испытании на растяжение стандартных образцов из пластичных материалов (конструкционная сталь, деформируемые легкие сплавы и др.). Из диаграммы растяжения получают основные механические характеристики материала при статических нагрузках:

- характеристики сопротивления деформированию: предел пропорциональности *σпц=Pпц/A0*; предел текучести *σт=Pт/A0*; предел прочности или временное сопротивление *σв=Pmax/A0*.;

- характеристики прочности: *Sk=Pk/Ak* - истинное сопротивление разрыву;

* характеристики пластичности: *δk=(ΔIk/I0)×100%* - относительное остаточное;
* удлинение при разрыве; *ψk=(ΔAk/A0)×100%* - относительное остаточное сужение площади поперечного сечения.

Здесь *Рпц* - наибольшая нагрузка, до которой сохраняется прямая пропорциональность (линейная зависимость) между напряжением *σ* и относительным удлинением *ε*; *Рт* - нагрузка, соответствующая площадке текучести или остаточной относительной деформации *ε*=0,2% (при отсутствии площадки текучести); *Рmax* - максимальная нагрузка, которую выдержал образец при испытании на растяжение; *Рk* - нагрузка в момент разрыва; *А0, Аk* - площади поперечного сечения образца в начальный момент и при разрыве соответственно; *ΔАk=А0-Аk; I0, Ik* - длина рабочей части образца в начальный момент и при разрыве.

Пластичными, условно называют материалы, имеющие характеристики пластичности в пределах 10...60% и более (при статическом растяжении лабораторных образцов при нормальной температуре). При определенных условиях (низкие температуры, большие размеры детали, наличие резкой концентрации напряжений и растягивающих остаточных напряжений, как при сварке, дефектов типа непроваров, надрезов, трещин т. п.) детали из пластичных материалов могут разрушаться хрупко.

*Хрупким* называют разрушение, протекающее практически без заметных пластических деформаций при малых затратах энергии на разрушение.

*Квазихрупким* называют разрушение, занимающее промежуточное положение между хрупким и вязким, т.е. протекающее с некоторой небольшой предшествующей пластической деформацией и с затратой определенной энергии на разрушение.

При напряжениях, переменных во времени, может возникать другой вид разрушения *усталостный.*

Если переменные напряжения превышают некоторый предельный уровень, то в материале начинает протекать процесс постепенного накопления повреждений, образования и развития трещины, приводящий, в конце концов, к разрушению детали. Этот процесс называют *усталостью металла,* а разрушение *усталостным.*

1.2. Физическая природа и характеристики усталостного разрушения

Установлено, что в поликристаллическом теле, каким является большинство конструкционных металлов, в отдельных неблагоприятно ориентированных зернах даже при небольших амплитудах напряжений возникает циклическое скольжение дислокаций по плоскостям скольжения кристаллитов. Вследствие циклического скольжения возникает накопление дефектов типа дислокации, вакансий и др., приводящих после определенного числа циклов к появлению трещины в одном или нескольких зернах. В последующем трещины объединяются в одну макроскопическую трещину, которая начинает развиваться. После того как трещина распространится на значительную часть сечения, происходит внезапное разрушение.

В условиях действия циклических (повторно-переменных) напряжений в металлах и сплавах происходит зарождение и постепенное развитие трещин, вызывающее в конечном итоге полное разрушение детали или образца. Это разрушение особенно опасно, так как может происходить под действием напряжений, намного меньших пределов прочности и текучести.

Процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием циклических нагрузок, приводящих к уменьшению долговечности из-за образования трещин и разрушения, называют *усталостью,* а свойство противостоять усталости - *выносливостью.*

Усталостная трещина зарождается в поверхностных слоях и затем развивается вглубь образца или детали, образуя острый надрез. Процесс распространения усталостной трещины весьма длителен. Он продолжается до тех пор, пока сечение не окажется столь малым, что действующие в нем напряжения превысят разрушающие. Тогда произойдет быстрое разрушение, как правило, хрупкое из-за наличия острого надреза.

Задача усталостных испытаний - дать количественную оценку способности материала работать в условиях циклического нагружения без разрушения.

Современные методы испытаний на усталость (выносливость) очень разнообразны. Они отличаются характером изменения напряжений во времени, схемой нагружения (изгиб, растяжение-сжатие, кручение), наличием или отсутствием концентраторов напряжений. Как и другие виды, усталостные испытания проводятся при различных температурах и в разных средах. Основные требования к методике усталостных испытаний регламентированы ГОСТом.

В процессе любого усталостного испытания на образец действуют циклические напряжения, непрерывно изменяющиеся по величине и часто — по знаку. Типичные примеры используемых циклов напряжений показаны на рис.1. Цикл напряжений — это совокупность переменных значений напряжений за один период их изменения. Каждый цикл характеризуется несколькими параметрами. За максимальное напряжение цикла *σmax* принимают наибольшее по алгебраической величине напряжение. Минимальное напряжение цикла *σmin* — наименьшее по алгебраической величине напряжение.

|  |  |
| --- | --- |
|  | Рис. 1. Разновидности циклов напряжений. |

Среднее напряжение цикла:

|  |  |
| --- | --- |
| *σm=(σmax - σmin)/2* | (1) |

Амплитуда напряжений цикла:

|  |  |
| --- | --- |
| *σa=(σmax + σmin)/2* | (2) |

Цикл характеризуется также коэффициентом асимметрии:

|  |  |
| --- | --- |
| *Rσ= σmin / σmax* | (3) |

Если *Rσ*= −1, то такой цикл называют симметричным (кривая 1 на рис.1). Если же минимальное и максимальное напряжения цикла не равны по величине, то он называется асимметричным (кривые 2 и 3 на рис.1). Когда напряжения меняются по величине и знаку, цикл считается знакопеременным (кривые 1 и 2 на рис.1), если только по величине — знакопостоянным (кривая 3 на рис.1). Для испытаний чаще всего используют симметричные знакопеременные циклы с *Rσ*= −1.

Наиболее распространенная схема нагружения при усталостных испытаниях — изгиб.

Возможные виды переменных во времени нагрузок представлены на рис.2.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 2. Изменение напряжений во времени:  а - симметричный цикл (*σmax= −σmin=σa; R= −1*); б - отнулевой или пульсационный цикл (*σm=σa=1/2σmax; σmin=0; R=0*); в – асимметричный цикл [*σa=1/2(σmax − σmin*); *σm=1/2(σmax + σmin); R= σmin / σmax*]; г - случайный процесс изменения нагрузки |

По симметричному циклу изменяются, например, нормальные напряжения от изгиба в валах и осях. Отнулевой цикл характерен для изменения напряжения у корня зуба шестерни при её вращении в одну сторону. Асимметричный цикл с 0<*R*<1 имеет место в затянутых болтах, лопатках турбин, клапанных пружинах и т.п. деталях.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Типы испытуемых образцов, методы испытаний и обработки результатов регламентированы ГОСТом в зависимости от используемой усталостной машины. Характеристики сопротивления усталости материала находят в результате испытаний гладких (с плавными очертаниями) полированных лабораторных образцов диаметром в рабочем сечении *d0*=7,5 мм при изгибе с вращением. Согласно требованиям ГОСТ для оценки характеристик сопротивления усталости испытывают не менее 15 идентичных образцов. Результаты испытаний заносят в таблицу и на график. В качестве примера в таблице и на рис.3 представлены результаты испытаний лабораторных образцов из стали Ст.З с пределом прочности *σв*=460МПа при изгибе с вращением (симметричный цикл с коэффициентом асимметрии *R* = −1). По оси абсцисс на рис.З отложены числа циклов *N*, которые выдержали образцы до разрушения, в логарифмическом масштабе, по оси ординат - амплитуды переменных напряжений *σa*, также в логарифмическом масштабе. Образец №1 испытывается при достаточно высокой амплитуде *σa*, составляющей (0,7...0,8)⋅*σв*. В данном примере образец испытывался при амплитуде *σa*=350 МПа и выдержал до разрушения число циклов *N* = 4⋅104.

Результаты испытаний лабораторных образцов из стали Ст.З при изгибе с вращением (пример)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  образца | *σА*, МПа | *N* |  | №  образца | *σА*, МПа | *N* |
| 1 | 350 | 4х104 |  | 9 | 222 | 1,6х106 |
| 2 | 300 | 1.05х105 |  | 10 | 221 | >107 |
| 3 | 250 | 6х105 |  | 11 | 330 | 7,5х104 |
| 4 | 200 | >107 |  | 12 | 280 | 1,3х105 |
| 5 | 230 | 1,1х106 |  | 13 | 275 | 3х105 |
| 6 | 210 | >107 |  | 14 | 255 | 3,1х105 |
| 7 | 220 | >107 |  | 15 | 240 | 9х105 |
| 8 | 225 | 1,9х106 |  | − | − | − |

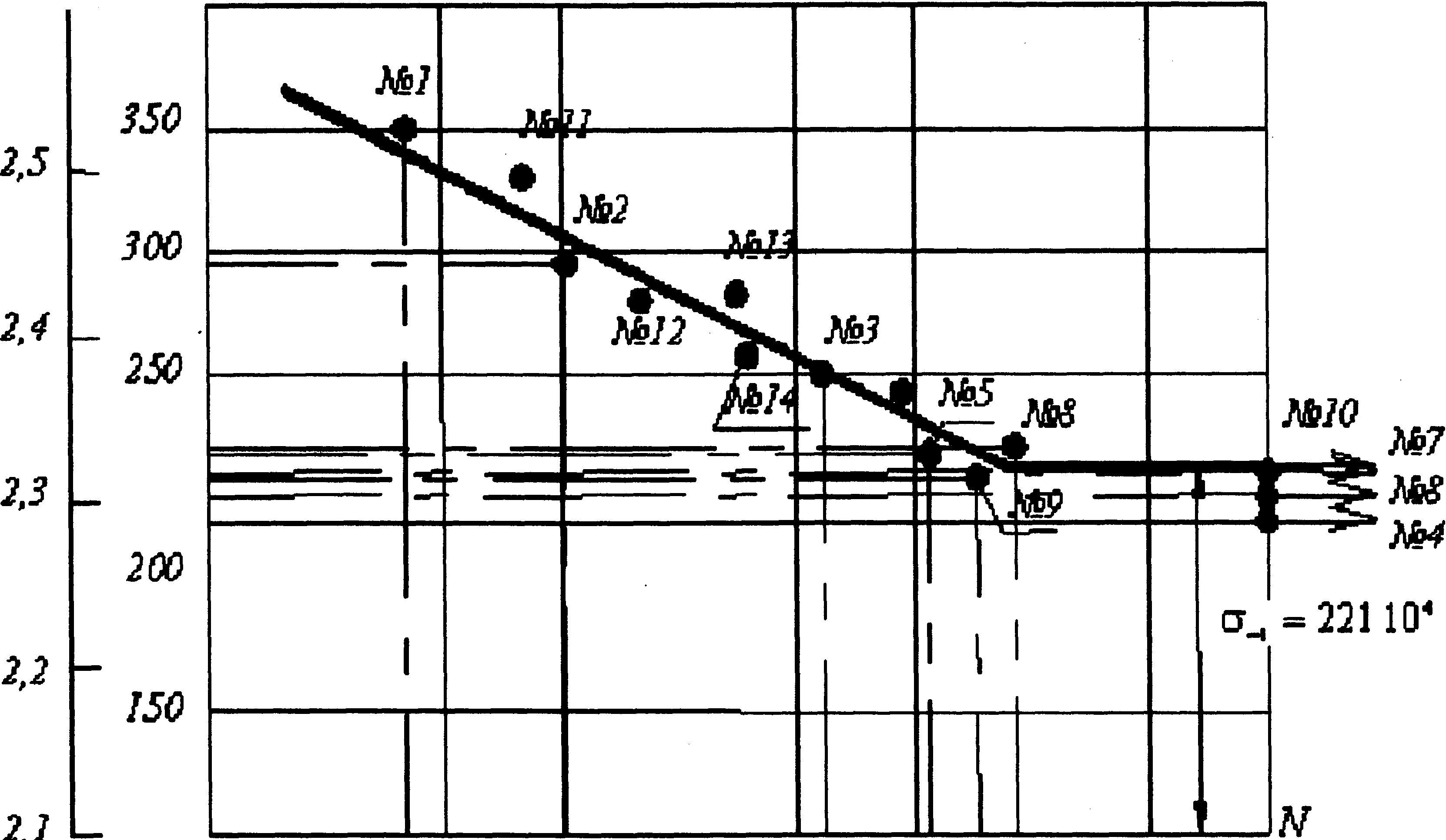
По этим данным нанесена точка №1 на рис.3. Последующие образцы испытываются при более низких амплитудах. Так, образец №2 при амплитуде *σа*=300МПа выдержал число циклов *N*=1,05х105, образец №3 при *σа*=250МПа выдержал *N*=6х105 циклов. Образец №4 при амплитуде *σа*=200МПа проработал *N*=107 (10млн.) циклов и не сломался.

Обычно машины для усталостных испытаний при изгибе с вращением работают при частоте вращения шпинделя 3000 об/мин (один цикл соответствует одному обороту). Поэтому 10 млн. циклов накапливаются при работе машины в течение 107/(30000×60)=55,5 ч непрерывной работы. При испытании углеродистых сталей на воздухе при нормальной температуре экспериментально показано, что если образец не сломался до 107 циклов, то он не сломается далее. Поэтому при достижении данного числа циклов испытания прекращают, а на графике (рис.1) ставят точку со стрелкой, показывающей, что образец может работать и дальше. Число циклов, при достижении которого испытания прекращают, если образец не сломался, называют *базой испытаний* и обозначают N5. База испытания принимается равной 107 циклов для углеродистых и малолегированных сталей.

Последующие образцы испытывают в интервале *σа*=250...200МПа. Так, образец №5 при *σа* =230МПа сломался при числе циклов *N*=1,1x106, образец №6 при *σа*=210МПа не сломался до базы испытания 107 циклов и т.д. Образец №9 при *σа* =222 МПа сломался при *N*=1,6x106 циклах, образец №10 при *σа*=221МПа не

*tg σa σa*,МПа

***2,6 400***



104 105 106 *Nσ*=2x106 107

Рис. 3.. Кривая усталости гладких лабораторных образцов из стали Ст.3 при изгибе вращением (построена по данным таблицы)

сломался до базы испытания. *Пределом выносливости при симметричном цикле* называют то наибольшее значение амплитуды переменных напряжений, до которого образцы не ломаются до базы испытания, и обозначают его *σ−1* (индекс указывает значение коэффициента асимметрии цикла *R=σmin/σmax*). В данном примере предел выносливости получился равным *σ−1*=221МПа, ибо до этого значения включительно образцы не ломались до базы испытания. По экспериментальным точкам в левой части графика с помощью метода линейного регрессивного анализа (или графически) проводят наклонную прямую, а в правой части графика - горизонтальную прямую, соответствующую ординате *σа*=221МПа. Совокупность этих двух прямых называют *кривой* *усталости* или *кривой* *Велера* по имени немецкого ученого, впервые построившего данную кривую для осей железнодорожных вагонов в середине XIXв. Наклонная и горизонтальная части кривой усталости пересекаются в точке с абсциссой, обозначаемой *NG.* Для сталей обычно *NG*=(1...3)×106 циклов. В среднем при отсутствии данных можно принять *NG*=2х106. Уравнение кривой усталости может быть представлено в форме:

(4)

|  |  |
| --- | --- |
| *σam × N = σ−1m × NG,* при *σа≥ σ−1 ;*  *N=∞,* при *σа≤ σ−1 .* | (4) |

Показатель степени *т* характеризует наклон левой ветви кривой усталости: при увеличении *т* наклон левой ветви к оси абсцисс уменьшается, т.е. линия становится более пологой. Величина *т* легко находится из (4):

|  |  |
| --- | --- |
| *m = lg (NG / N) / lg (σa / σ−1)* | (5) |

Приняв *σ−1*=221 МПа, *NG*=2x106, *σa*=300МПа, *N* = 1,2x105, по уравнению (5) получаем: *m* = *lg* [2x106 / (1,2x105)] / *lg* (300 / 221) = 1,22/0,132 = 9,3. Таким образом, параметрами кривой усталости в данном случае являются:

*σ−1*=221МПа, *N*=2x106, *m*=9,3.

Предел выносливости *σ−1*  связан корреляционной зависимостью с пределом прочности *σв*. В качестве такой зависимости для сталей предлагается в ГОСТ 25.504 - 82 следующая:

|  |  |
| --- | --- |
| *σ−1* = (0,55 − 0,0001⋅ *σв*) ⋅ *σв ,*  где *σв* − в МПа. | (6) |

3. УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Для оценки характеристик сопротивления материала и деталей усталостному разрушению проводят усталостные испытания лабораторных образцов и деталей на специальных усталостных машинах. Существует большое разнообразие типоразмеров усталостных машин. Их можно классифицировать по виду нагружения испытуемого объекта (изгиб в одной плоскости, изгиб при вращении, кручение, растяжение−сжатие, сложное нагружение), по способу возбуждения переменных нагрузок (механическое, электромеханическое, гидропульсационное, электрогидравлическое и др.), по значению максимальных нагрузок (например, для испытаний при осевом нагружении выпускают машины с максимальными нагрузками 10, 20, 50,100 т и выше).

На рис.4 показана схема одной из машин для проведения усталостных испытаний (марки МВП−10000). Образец 8 вращается электродвигателем 1 через двухступенчатый шкив 2 и шкив 3 программного устройства. Нагрузка на образец подается рычагом 11 с перемещающимся грузом 10 и съемными грузами 14. Рычажная система с грузами подвешена к образцу на тягах 12. Грузовой рычаг устанавливается в рабочее положение маховиком 13. Биение (деформация) образца фиксируется на индикаторах 9. Количество циклов нагружения регистрирует счетчик 4, который соединен со шпинделем 7 через редуктор 5 и гибкий валик 6. Программное устройство позволяет изменять нагрузку в процессе испытания по заданной программе.

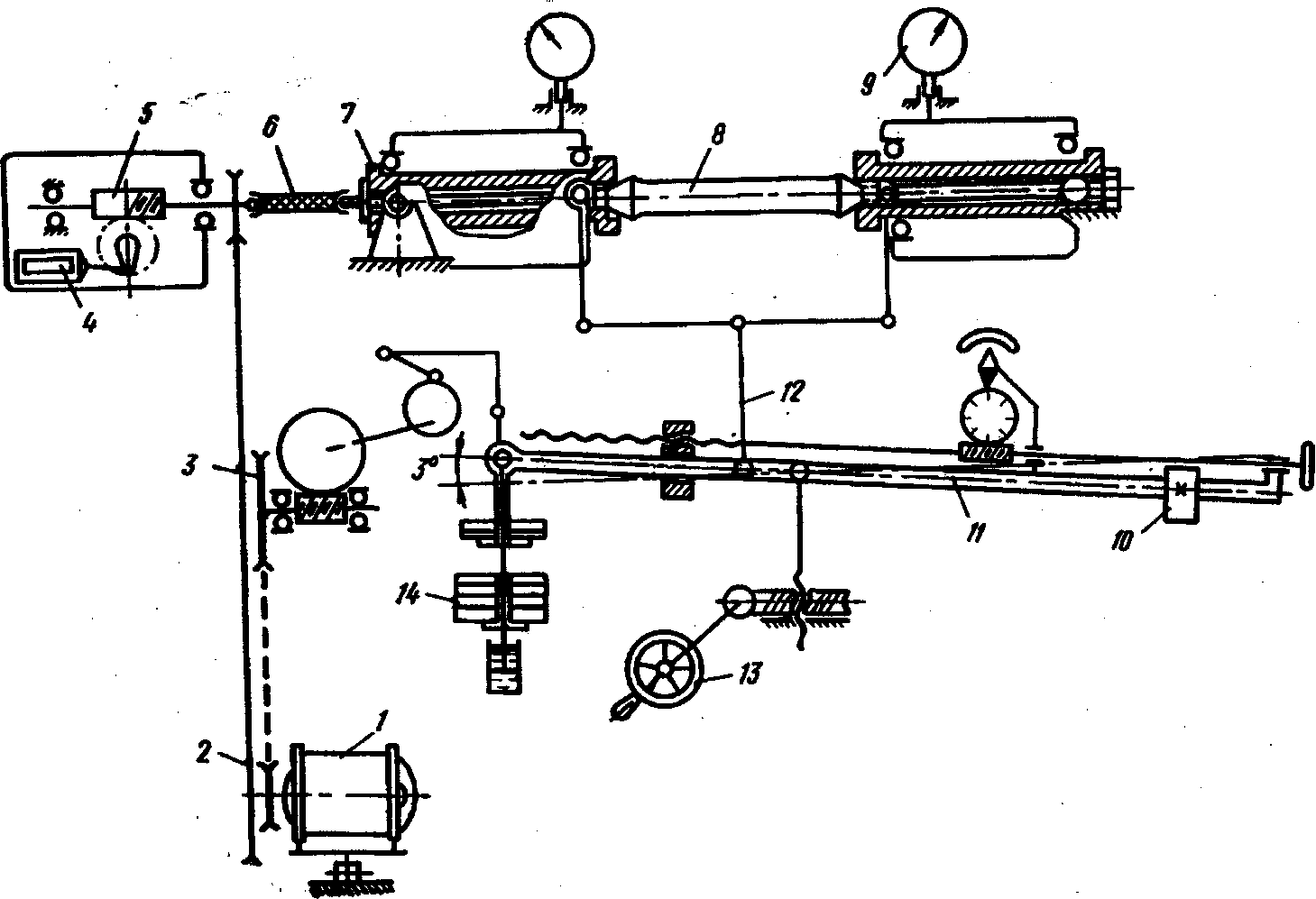


Рис. 4. Схема машины МВП−10000 для усталостных испытаний на изгиб

Аналогичным образом устроена машина усталостных испытаний МУП-6000, отличающаяся от МВП-10000 более простой системой нагружения 10-14 и бесшкивным (муфтовым) подводом вращения от электродвигателя 1 к образцу 8 (см. компьютерный имитатор МУП-6000).

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с устройством, принципами работы и управления компьютерного имитатора машины усталостных испытаний МУП-6000.

2. Для подготовки имитатора к проведению испытаний установить необходимое число оборотов двигателя и приемлемый для данного испытания масштаб времени (соответствующий выбранному образцу).

3. С помощью величины груза, устанавливаемого на машине, и размера сечения образца, подобрать необходимое значение амплитуды напряжения *σ* /примерный ряд значений *σ* : 280, 300, 320, 350, 400, 420, 450, 480, 500, 550 МПа/.

4. Провести испытание образца при заданных параметрах, определяя долговечность образца *N* (число циклов до разрушения). Число испытаний *n* должно быть не менее 15. Параметры испытаний подбирать таким образом, чтобы выполнялось многоцикловое условие 105≤*N*≤107. *N*max=107 – если образец не разрушился за *N*max циклов, то испытание прекращают, образец снимают и делают новый подбор параметров для другого образца.

5. Полученные значения заносят в таблицу экспериментальных данных и отмечают точками на графике с координатными осями *σ* – *lg N* (см. таблицу и рис.3).

6. Долговечность *N* является случайной величиной, распределенной по нормальному закону. Для аппроксимации кривой усталости в инженерной практике обычно применяется линейный регрессионный анализ. Исходя из линейности усталостного закона (4):

|  |  |
| --- | --- |
| *(σ/σa)m=N/NG → lg σ=ln σa+1/m × ( lg N − lg NG)* | (7) |

Теоретическая линия регрессии, получаемая на основе имеющейся совокупности экспериментальных точек (*xi, yi*), будет иметь вид:

|  |  |
| --- | --- |
| *Y=a+b(X−x) ,* | (8) |

где коэффициенты *a* и *b* при общем числе экспериментальных точек *n* рассчитываются по формулам:

|  |  |
| --- | --- |
| *x=Σxi / n; a=y=Σyi / n; b=Σ(xi − x)yi / Σ(xi − x)2* | (9) |

В уравнении (8) *Y* – оценка условного математического ожидания величины *y=lg σ* для заданного значения *x=lg N*.

7. По экспериментальным данным, полученным в п.4 и 5, согласно п.6 построить теоретическую кривую усталости по форме (8) и построить ее график с экспериментальными точками из п.5 (аналогично рис.3)

8. На основе построенной теоретической кривой усталости по выражению (5) определить параметр наклона кривой усталости *m*.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Экспериментальные данные (таблица и график со значениями *σi* и *Ni*).
4. Расчетная часть с определением величин *σa, NG, a, b, x, Y, m* и построенной теоретической кривой усталости.
5. Выводы о выносливости испытанного материала [соответствие предела выносливости *σ−1*  ГОСТу по выражению (6)].

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как классифицируются нагрузки по характеру изменения во времени и какие их типы используются в лабораторной работе?
2. По каким основным параметрам различаются хрупкий и вязкий типы разрушения?
3. При каком виде нагружения определяются основные механические свойства материала; какие из них относят к прочностным, а какие − к пластическим?
4. Что понимается под усталостью металла и при каком характере нагрузки она возникает?
5. Какие физические процессы в металле предшествуют зарождению усталостных трещин?
6. Охарактеризуйте стадии усталостного разрушения по сечению образца и во времени (длительность каждой стадии).
7. Какими параметрами характеризуются циклические напряжения; какой из них является базовым для классификации циклов?
8. Какой тип циклических напряжений имеет место в дверных ручках наших квартир, у ножей газонокосилок или кофемолок, при изгибе оси вращающегося велосипедного колеса (для нормальных напряжений)?
9. Что представляет собой база усталостных испытаний и как она определяется для конкретного материала?
10. Какой вид имеет закон усталости для низкоуглеродистой стали; как записывается уравнение кривой усталости (кривой Велера); из каких характерных участков эта кривая состоит?
11. Что понимается под пределом выносливости материала и как влияет на эту величину тип цикла нагружения?

### РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. - М.: Металлургия, 1979. - С.326−384, 423−465.
2. Золоторевский В.С. Механические испытания и свойства металлов. - М.: Металлургия, 1983. - 350 с.

#### Оглавление

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО

ПРАКТИКУМА И ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТОВ ……………………………………….….… 3

Лабораторная работа №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ …….. 6

Лабораторная работа №2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА УПРУГОСТИ ПРИ ИЗГИБЕ ЛЕНТОЧНЫХ

ОБРАЗЦОВ …………………………………………………………………………………….. 13

Лабораторная работа №3

ДЕФОРМАЦИОННОЕ СТАРЕНИЕ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ……………..….. 19

Лабораторная работа №4

ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ ПРИ ИЗГИБЕ

С ВРАЩЕНИЕМ……………………………………………………………………………….... 23