



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ «Фундаментальные науки»

КАФЕДРА «Вычислительная математика и математическая физика» (ФН-11)

РАСЧЁТНО - ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к научно-исследовательской работе на тему:

Моделирование усталостного разрушения неоднородной структуры
металлического материала

Студент группы ФН11-71Б

(Подпись, дата)

Бородин Н.С.
(И.О.Фамилия)

Руководитель курсовой работы

(Подпись, дата)

Димитриенко Ю.И.
(И.О.Фамилия)

Консультант

(Подпись, дата)

Автаев В.В.
(И.О.Фамилия)

Оценка: _____

Москва, 2023

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель курсовой

работы

подпись, дата

Димитриенко Ю.И.

Исполнитель

подпись, дата

Бородин Н.С.

Нормоконтролёр

подпись, дата

Прозоровский А.А.

СОДЕРЖАНИЕ

	с.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Определение основных параметров структуры металла	6
2. Дислокации в металле.....	8
2.1 Краевая дислокация.....	8
2.2 Винтовая дислокация	12
3. Границы зерен и субзерен.....	16
4. Механизм разрушения конструкционного материала.....	17
4.1 Явление усталостного разрушения	17
4.1 Основные параметры цикла	17
4.2 Схемы и типы испытаний	19
4.3 Виды кривых усталости	20
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	21
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	22
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	23

ВВЕДЕНИЕ

Практика студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана является обязательной частью основной образовательной программы высшего образования, одной из форм организации учебного процесса.

Практика – вид учебной работы, направленный на развитие практических навыков и умений, а также формирование компетенций обучающихся в процессе выполнения определенных видов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Основными видами практики студентов Университета, обучающихся по основным образовательным программам высшего профессионального образования, являются:

- учебная;
- производственная;
- научно-исследовательская работа (НИР).

НИР состоит в освоении студентами средств и приемов выполнения научно-исследовательских работ, а также проведении собственно учебно-исследовательской работы.

Целями НИР являются:

- овладение фундаментальной научной базой своего направления подготовки, методологией научного творчества, современными информационными технологиями, подготовка к научно-исследовательской деятельности;
- подготовка материалов для выпускной квалификационной работы.

Задачами НИР являются:

- участие в научно-исследовательском процессе;
- исследование научной темы, выданной студенту;
- обзор источников для выпускной квалификационной работы;
- выполнение теоретической части выпускной квалификационной работы;
- и другое.

Расчётно-пояснительная записка к НИР в электронном виде (формат Word) после получения зачёта направляется студентом в электронный архив кафедры, адрес: archive-fn@mail.ru

К задачам этой работы относится (с полным текстом поставленного задания можно ознакомиться в ПРИЛОЖЕНИИ А):

- определение основных структур и доминирующих на начальных стадиях механизмов разрушения конструкционного материала.
- моделирование роста трещины усталости от концентраторов с разной исходной геометрией.
- определение скорректированных коэффициентов интенсивности напряжений (КИН)
- определение скорректированных КИН для малых усталостных трещин, включая переходную область.
- оформить данную НИРС по ГОСТ 7.32-2017

Процессы термомеханической обработки металлов и сплавов вызывают значительные изменения в их микроструктуре, что определяет физико-механические свойства материалов. Важные характеристики структуры включают параметры зеренного строения поликристаллических материалов, такие как форма, размеры и распределение ориентации кристаллитов. Из исследований известно, что размеры зерен имеют существенное влияние на физико-механические свойства материалов [1].

1. Определение основных параметров структуры металла

Практически все физико-механические свойства металлов и сплавов являются структурно-чувствительными, т.е. такие свойства, как прочность, пластичность, ударная вязкость, жаропрочность, коррозионная стойкость, теплопроводность, магнитная проницаемость и многие другие, напрямую зависят от размеров структурных составляющих (зерен) и степени их однородности во всем объеме изделия.

В настоящее время определение количества зерен в единице площади и среднего размера зерна выполняют на плоском срезе (шлифе) и оно дает весьма приближенное представление о структуре металла в объеме, что не позволяет уверенно судить о правильности выбора соответствующих режимов деформации и термической обработки [2].

Известен способ определения основных параметров структуры металла, включающий изготовление шлифа, получение видимого изображения зеренной структуры на плоском срезе, фотографирование сечения одного из зерен, замер на фотоотпечатке геометрических параметров и распределение найденных величин в долях по размерам.

При использовании данного способа для выбора интервалов измерения используют заранее разработанные таблицы интервалов пересчета, причем размеры интервалов измерений регламентируются методикой расчета значений параметров распределения. Само измерение плоских сечений производят визуально при передвижении шлифа микрометрическим винтом столика микроскопа в направлении, строго перпендикулярном к линейке окуляра.

При этом:

- сначала осуществляют предварительный просмотр шлифа, устанавливают наибольший диаметр или наибольшую площадь наблюдаемых сечений, а затем устанавливают размерные интервалы диаметров;

- для распределения сечений зерен по размерам предварительно устанавливают ряд размерных групп, например, в пределах от 7 до 12;
- увеличение микроскопа подбирают таким образом, чтобы диаметр наибольших сечений был равен целому числу делений окулярной линейки микроскопа в пределах от 7 до 12.

Данный способ позволяет определить только распределение сечений зерен по размерам для последующего расчета числа зерен на единице площади и средний диаметр зерна.

Такой процесс характеризуется низкой точностью из-за погрешностей, возникающих в процессе сложного метода измерения объектов плоского среза.

2. Дислокации в металле

Дислокации принадлежат к линейным несовершенствам кристалла. Как будет показано ниже, дислокации являются особым типом несовершенств в решетке, резко отличным по своей природе от других, в том числе и линейных, несовершенств. Первоначально представления о дислокациях были введены в физику кристаллов для того, чтобы объяснить несоответствие между наблюдаемой и теоретической прочностью и описать атомный механизм скольжения при пластической деформации кристаллов. Впоследствии теория дислокаций получила широкое развитие и стала применяться для анализа самых разнообразных явлений в металлах и сплавах.

2.1 Краевая дислокация

Наиболее простой и наглядный способ введения дислокаций в кристалле - сдвиг. На рисунке 1 показан параллелепипед, верхняя часть которого сдвинута относительно нижней на одно межатомное расстояние, причем зафиксировано положение, когда сдвиг охватил не всю плоскость скольжения от правой грани параллелепипеда до левой, а лишь часть плоскости скольжения. ABCD – участок плоскости скольжения, в котором произошел сдвиг; АВ – граница этого участка [3].

На рисунке 2 для случая примитивной кубической решетки показан разрез параллелепипеда по атомной плоскости, перпендикулярной линии АВ на рисунке 1. В этом сечении кристалл имеет n вертикальных атомных плоскостей. В результате показанного на рисунке 1 сдвига на одно межатомное расстояние n вертикальных атомных плоскостей, расположенных выше плоскости скольжения, оказываются напротив $(n - 1)$ вертикальных атомных плоскостей, расположенных ниже плоскости скольжения (на рисунке 2 – девять против восьми). Одна вертикальная атомная плоскость в верхней половине кристалла уже не имеет продолжения в нижней половине кристалла.

Такую «лишнюю», неполную атомную плоскость называют экстраплоскостью.

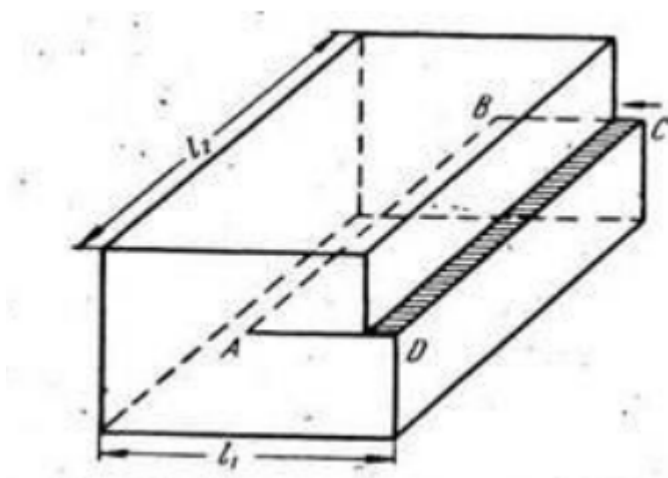


Рис. 1. Параллелепипед со сдвигом.

Можно представить и другой путь появления экстраплоскости: мысленно расщепить кристалл по вертикали сверху вниз до половины высоты и вставить в него сверху лишний атомный слой.

Лишний атомный слой (экстраплоскость) действует как клин, изгибая решетку вокруг своего нижнего края внутри кристалла. Наиболее существенно то, что в некоторой области непосредственно вблизи края экстраплоскости внутри кристалла решетка сильно искажена. Выше края экстраплоскости межатомные расстояния меньше нормальных, а ниже края – больше. Атом на самой кромке экстраплоскости имеет меньше соседей, чем атом внутри совершенной решетки. Таким образом, вдоль края экстраплоскости тянется область с несовершенной решеткой.

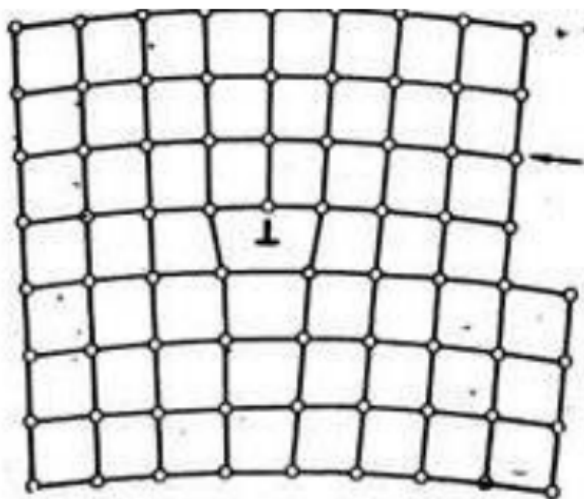


Рис.2. Прimitivesкая кубическая решётка

Область несовершенства кристалла вокруг края экстраплоскости называется краевой дислокацией. В одном измерении протяженность этого несовершенства такая же, как и длина края экстраплоскости, т. е. размер ее макроскопический. В плоскости, перпендикулярной краю экстраплоскости, область рассматриваемого несовершенства имеет малые размеры – от двух до десяти атомных диаметров. Следовательно, краевая дислокация относится к классу линейных несовершенств. Можно себе мысленно представить, что рассматриваемая область несовершенства находится внутри трубы, осью которой является край экстраплоскости. Вне этой трубы строение кристалла близко к идеальной решетке, а внутри (в так называемом ядре дислокации) сильно искажено.

Истинное положение атомов в ядре дислокации расчетным путем пока не удалось установить, и в металлических кристаллах оно остается неизвестным. В схеме на рисунке 2 приведено неточное описание структуры ядра дислокации, но правильно отражено то, что в ядре дислокации выше края экстраплоскости имеется область сгущения атомов, а ниже этого края – область разрежения.

Положение центра ядра дислокации в кристаллографической плоскости, являющейся плоскостью чертежа, обозначается знаком L. Совокупность таких центров в параллельных атомных плоскостях образует линию дислокации.

Если кристалл расщепить по вертикали не сверху вниз, а снизу вверх до половины высоты и вставить в него снизу «лишнюю» атомную плоскость, то также образуется краевая дислокация – область несовершенства вокруг края экстраплоскости. В отличие от дислокации на рисунке 2 в верхней части ядра новой дислокации будет область разрежения, а в нижней – область сгущения атомов

Если экстраплоскость находится в верхней части кристалла, то дислокацию называют положительной, а если в нижней – то отрицательной. Положение центра ядра отрицательной дислокации обозначают знаком Т. Различие между положительной и отрицательной краевыми дислокациями чисто условное. Переворачивая кристалл (или рисунок), мы превращаем положительную дислокацию в отрицательную, и наоборот.

Рассматривая образование дислокации при сдвиге, необходимо отметить, что линия краевой дислокации перпендикулярна вектору сдвига. Сопоставляя рисунки 1 и 2, можно дать следующее общее определение дислокации: дислокацией называется линейное несовершенство, образующее внутри кристалла границу зоны сдвига. Эта граница отделяет ту часть плоскости скольжения, где сдвиг уже прошел, от той части, где он еще не начинался. При макроскопическом рассмотрении такая граница зоны сдвига внутри кристалла является геометрической линией (АВ на рис.1), а при микроскопическом рассмотрении - областью несовершенства решетки (рис. 2).

2.2 Винтовая дислокация

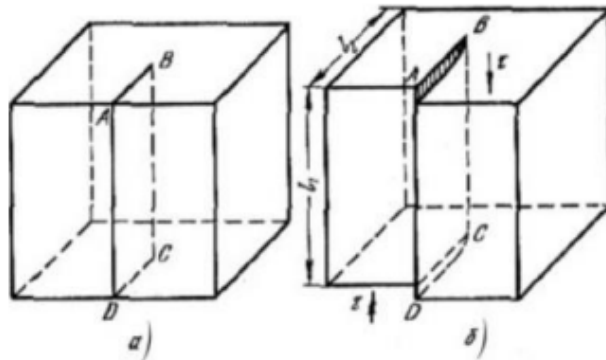


Рис.3. Винтовая дислокация в кристалле

Сделаем в кристалле надрез по плоскости ABCD и сдвинем правую (переднюю) часть кристалла вниз на один период решетки (рисунок 3б). Образовавшаяся при таком сдвиге ступенька на верхней грани не проходит через всю ширину кристалла, оканчиваясь в точке В. Простая кубическая решетка в рассматриваемом случае выглядит так, как показано на рисунке 4. У переднего края кристалла (вблизи точки А) сдвиг произошел ровно на один период решетки так, что верхняя атомная плоскость справа от точки А сливается в единое целое со второй сверху плоскостью слева от точки А. Так как надрез ABCD дошел только до середины кристалла, то правая часть кристалла не может целиком сдвинуться по отношению к левой на один период решетки. Величина смещения правой части по отношению к левой уменьшается по направлению от точки А к точке В.

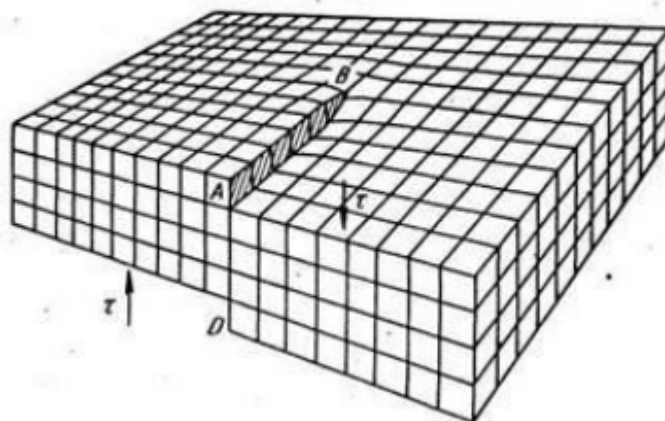


Рис.4. Кубическая решётка при винтовой дислокации

Верхняя атомная плоскость оказывается изогнутой. Точно так же деформируется вторая сверху атомная плоскость; правая часть ее у передней грани кристалла смещается на один период решетки и сливается в единое целое с третьей сверху атомной плоскостью. Эта плоскость в своей правой части смещается вниз и сливается с четвертой сверху плоскостью и т. д.

Если до сдвига кристалл состоял из параллельных горизонтальных атомных слоев, то после несквозного сдвига по плоскости ABCD он превратился в одну атомную плоскость, закрученную в виде геликоида (винтовой лестницы). На рисунке 5, а показано расположение атомов в двух вертикальных плоскостях, проходящих непосредственно по обе стороны от плоскости сдвига ABCD на рисунке 4. Если смотреть на них со стороны правой грани кристалла, то черные кружки обозначают атомы на вертикальной плоскости слева от плоскости сдвига, а светлые кружки - атомы на вертикальной плоскости справа от плоскости сдвига. Заштрихована образовавшаяся при сдвиге ступенька на верхней грани кристалла. На рисунке 5, а плоскость скольжения ABCD совпадает с плоскостью чертежа; атомы, обозначенные черными кружками, находятся под плоскостью чертежа, а обозначенные светлыми кружками – над ней. Стрелка, направленная сверху вниз, обозначает сдвигающие напряжения, приложенные к той части кристалла, которая находится над плоскостью чертежа на рисунке 5а, т. е.

правее плоскости ABCD на рисунке 3б и 4. Стрелка, направленная снизу вверх, обозначает сдвигающие напряжения, приложенные к той части кристалла, которая находится под плоскостью чертежа на рисунке 5а, т. е. левее плоскости ABCD на рисунке 3б и 4.

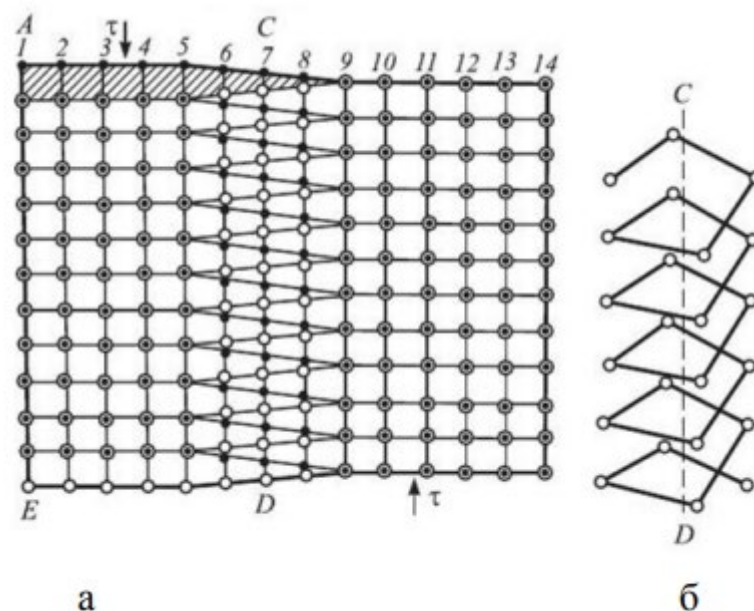


Рис.5. Кубическая решётка со стороны правой грани

Правее линии ВС (рисунок 3б), между атомными рядами 9 и 14 (рисунок 5а), положения белых и черных кружков совпадают, т. е. соответствующие атомы находятся на одном горизонте. Та же картина наблюдается на некотором расстоянии слева от линии ВС, между атомными рядами 1 и 5. Вокруг же линии ВС, между атомными рядами 5 и 9, атомы, обозначенные черными и белыми кружками, т. е. находящиеся под плоскостью чертежа и над ней, образуют винтовую лестницу.

Таким образом, после рассмотренного сдвига по плоскости ABCD вдали от линии ВС решетка остается совершенной, а вблизи от линии ВС вдоль нее тянется область несовершенства. В одном измерении - вдоль линии ВС область несовершенства имеет макроскопический размер, а в двух других она очень мала (ее размеры по нормали к линии ВС составляют несколько периодов решетки - четыре на рисунке 5а). Следовательно, при сдвиге по плоскости ABCD вокруг линии ВС возникло линейное несовершенство. Сама

линия ВС представляет собой границу зоны сдвига внутри кристалла, отделяющую ту часть плоскости скольжения, где сдвиг уже прошел, от той части, где сдвиг еще не начинался. Следовательно, несовершенная область вокруг линии ВС является дислокацией. Так как после появления такой дислокации в кристалле он состоит из атомной плоскости, закрученной в винтовую лестницу, то эта дислокация называется винтовой.

Точное расположение атомов в ядре винтовой дислокации неизвестно. Схематично можно себе представить, что оно близко к расположению их по винтовой линии.

3. Границы зерен и субзерен

Границей зерен, а также субзерен называют поверхность, по обе стороны от которой кристаллические решетки различаются пространственной ориентацией. Эта поверхность является двумерным дефектом, имеющим макроскопические размеры в двух измерениях и атомные - в третьем измерении. Двумерный дефект может быть плоским.

В общем случае плоская граница зерен имеет пять степеней свободы, т. е. для кристаллографического описания границы требуется пять параметров: три характеризуют взаимную пространственную ориентацию решеток соседних зерен, а два - ориентацию плоскости границы по отношению к решетке одного из зерен.

4. Механизм разрушения конструкционного материала

4.1 Явление усталостного разрушения

Элементы конструкции, детали машин при эксплуатации подвергаются действию циклически изменяющихся во времени нагрузок, что является причиной особого вида разрушения – усталости. Сопротивление действию переменных напряжений называют выносливостью или циклической прочностью.

Циклическими называются нагрузки, которые вызывают появление в поперечных сечениях изменяющихся напряжений. Циклом напряжений называется совокупность всех значений напряжений за время одного периода их изменения, его продолжительность по времени определяет период цикла. Частота изменений напряжений представляет из себя число циклов в единицу времени. Наиболее простой случай нагружения – постоянная амплитуда и пропорциональное нагружение. На практике приходится иметь дело с переменной или непостоянной амплитудой для которой требуется специальная обработка результатов.

Пропорциональным называется нагружение для которого отношение главных напряжений постоянной и направления главных площадок не изменяются в течении всего времени нагружения.

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = const \quad (1)$$

Непропорциональное нагружение означает отсутствие постоянных зависимостей между компонентами напряжений. Причинами являются: наложение двух различных пропорциональных напряжений, изменяющаяся нагрузка, нелинейные граничные условия.

4.1 Основные параметры цикла

Рассматриваемые напряжения могут быть иметь как касательное, так и

нормальное направления. Для нормальных напряжений для любого цикла вводится среднее напряжение равное полусумме максимальных и минимальных напряжений (Рис.6а):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2)$$

Также рассматривается амплитуда переменного напряжения – полуразность максимальных и минимальных напряжений:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (3)$$

и коэффициент асимметрии цикла – отношение минимальных напряжений к максимальным (Рис. 6в):

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (4)$$

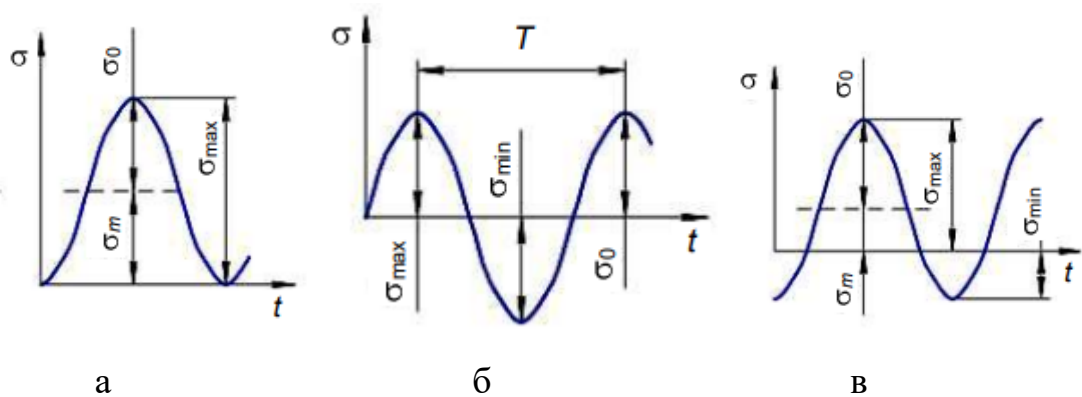


Рис. 6. Кривые зависимости напряжения от времени

4.2 Схемы и типы испытаний

В отличие от испытаний на растяжение испытания на усталость металлических материалов могут выполняться разнообразными способами. Испытание на усталость проводят при следующих программах изменения амплитуд циклов [6]:

1. с постоянными амплитудными значениями при синусоидальной (гармонической) или реже другой форме цикла;
2. бигармонической;
3. с переменной частотой;
4. программированный блочный цикл;
5. с воспроизведением эксплуатационного спектра с переменной во времени амплитудой напряжения.
6. с включением одиночных перегрузок в гармонический цикл.

Схему нагружения выбирают для того, чтобы воспроизвести в образцах напряженное состояние, характерное для эксплуатационных условий работы детали, и воспроизвести в образце или детали излом эксплуатационного вида.

К основным типам нагружения относятся:

- а - чистый изгиб при вращении;
- б - то же, в одной плоскости;
- в - поперечный изгиб при вращении консольных круглых образцов;
- г - то же, в одной плоскости круглых и не круглых образцов;
- д - поперечный изгиб консольных круглых и не круглых образцов при вращении силовой плоскости;
- е - растяжение-сжатие;
- ж - переменное кручение круглых образцов,
- з - нагружение внутренним давлением или при наложении гидростатического давления.

4.3 Виды кривых усталости

Выделяют 2 типа усталости: многоцикловую и малоцикловую. Многоцикловая усталость – это усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит в основном при упругом деформировании, а при малоцикловой - усталостное повреждение или разрушение происходит при упругопластическом деформировании.

База испытаний для определения пределов выносливости составляет 10^7 циклов для металлов и сплавов, имеющих практически горизонтальный вид на кривой усталости (кривая 1, Рис. 7) и 10^8 циклов для металлов и сплавов без физического предела выносливости (кривая 2, Рис. 7).

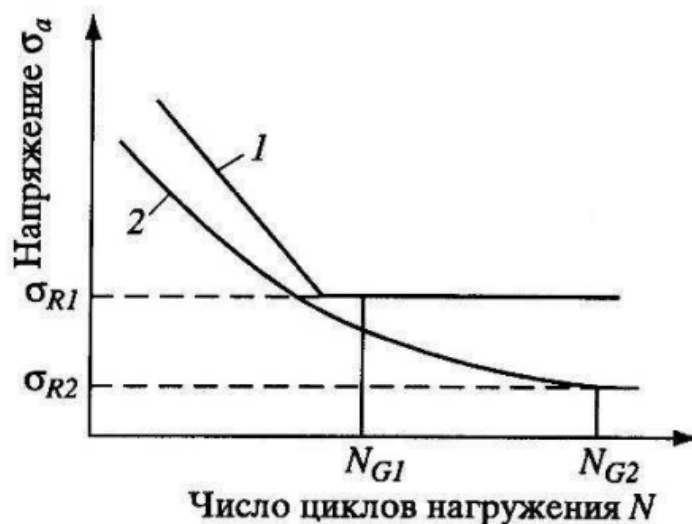


Рис.7. Кривые усталости: 1 – для образцов с физическим пределом выносливости; 2 – кривая усталости для образцов без физического предела выносливости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения НИР были достигнуты цели:

- овладение фундаментальной научной базой своего направления подготовки, методологией научного творчества, современными информационными технологиями, подготовка к научноисследовательской деятельности;
- подготовка материалов для выпускной квалификационной работы.

Были выполнены задачи:

- участие в научно-исследовательском процессе;
- исследование научной темы;
- обзор источников для выпускной квалификационной работы;
- выполнение теоретической части выпускной квалификационной работы;

Расчётно-пояснительная записка к НИР в электронном виде (формат Word) после получения зачёта направляется студентом в электронный архив кафедры, адрес: archive-fn@mail.ru

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Трусов П.В., Останина Т.В. Эволюция зеренной структуры металлов и сплавов при интенсивном пластическом деформировании: континуальные модели.
2. Лезинская Е. Я., Гулькин Е.В. Способ определения основных параметров структуры металла
3. Новиков И. И. Дефекты кристаллического строения металлов: Учебное пособие для вузов. М.: Металлургия, 1983. 232 с.
4. Бэкоффен В. Процессы деформации. Пер. с англ. М., Металлургия, 1977.
5. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. 3-е изд. В 2-х ч. М.: Машиностроение, 1974
6. Мыльников В. В. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов [Текст]: монография / В. В. Мыльников, О. Б. Кондрашкин, Д. И. Шетулов; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т – Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. –177 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А