

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАГИЯ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ**

**ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**(ДГТУ)**

Факультет Технология машиностроения

Кафедра «Технологии формообразования и художественная обработка материалов»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям по дисциплинам

«Математическое моделирование предельных состояний твердого тела», «Математическое моделирование в отрасли»

Ростов – на – Дону

2022 г.

Составители: к.т.н., доц., Е.А. Ефремова

к.т.н., доц., А.С. Пасхалов

УДК 621.73(075.8)

Методические указания к практическим работам по дисциплинам «Математическое моделирование предельных состояний твердого тела» и «Математическое моделирование в отрасли» для студентов очной и заочной форм обучения по направлениям:

- 15.03.01 «Машиностроение»;

- 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

- 15.04.02 «Технологические машины и оборудование»

Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2022г. с.

В методических указаниях приведены основные положения и порядок выполнения практической работы по математическому моделированию процессов формоизменения при обработке металлов давлением.

Печатается по решению методической комиссии факультетов «Машиностроительные технологии и оборудование» «Технология машиностроения».

Научный редактор – д.т.н., профессор А.В. Вовченко

Рецензент – к.т.н., доцент И.А. Церна

© - Издательский центр ДГТУ, 2022

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Содержание | | |
|  |  |  |
|  | Введение……………………………………………………………….. | 4 |
|  |  |  |
| 1 | Тема: Предельные состояния…………………….……………………….. | 5 |
|  | 1.1. Занятие №1……………………………………………………………. | 5 |
|  | 1.2. Занятия №2 …………………………………………………………… | 7 |
|  | 1.3. Занятия №3……………………………………………………………. | 12 |
|  | 1.4. Занятие №4……………………………………………………………. | 13 |
|  |  |  |
| 2 | Тема: Теория напряженного состояния………………………………….. | 15 |
|  | 2.1. Занятие №5……………………………………………………………. | 15 |
|  | 2.2. Занятие №6……………………………………………………………. | 17 |
|  | 2.3. Занятие №7……………………………………………………………. | 19 |
|  | 2.4. Занятие №8……………………………………………………………. | 21 |
|  |  |  |
| 3 | Тема: Теория деформированного состояния…………………………….. | 23 |
|  | 3.1. Занятие №9…………………………………………………………….. | 23 |
|  | 3.2. Занятие №10…………………………………………………………… | 25 |
|  | 3.3. Занятие №11…………………………………………………………… | 27 |
|  |  |  |
| 4 | Тема: Условия пластичности……………………………………………… | 30 |
|  | 4.1.Занятия № 12…………………………………………………………… | 30 |
|  |  |  |
| 5 | 5. Тема: «Механические схемы напряженного и деформированного |  |
|  | состояния»…………………………………………………………………. | 32 |
|  | 5.1. Занятия № 13………………………………………………………….. | 32 |
|  | 5.2. Занятия № 14………………………………………………………….. | 34 |
|  |  |  |
|  | СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ……………………..... | 36 |

Введение

Практические работа являются закрепляющим материалом по темам:

- предельные состояния;

- теория напряженного состояния;

- теория деформированного состояния

- механические схемы напряженного и деформированного состояния.

В процессе выполнения этой работы студенты учатся строить модели деформируемых твердых тел; моделировать процессы с помощью прикладных таблиц Microsoft Excel; анализировать результаты моделирования процессов с построением необходимых графиков.

Отчет о выполненной практической работе выполняется в формате А4 (210×297мм) и оформляется в соответствии с ГОСТ 2.105-95 «Общие требования к текстовым документам.

Графики, полученные в результате анализа моделирования, строятся или распечатываются на принтере и помещаются в отчет с соответствующими пояснениями.

Номер варианта для выполнения практической работы выдает преподаватель.

**1. Тема: «Предельные состояния»**

**1.1. Занятие №1**

**«Аналитическое построение диаграммы истинных напряжений»**

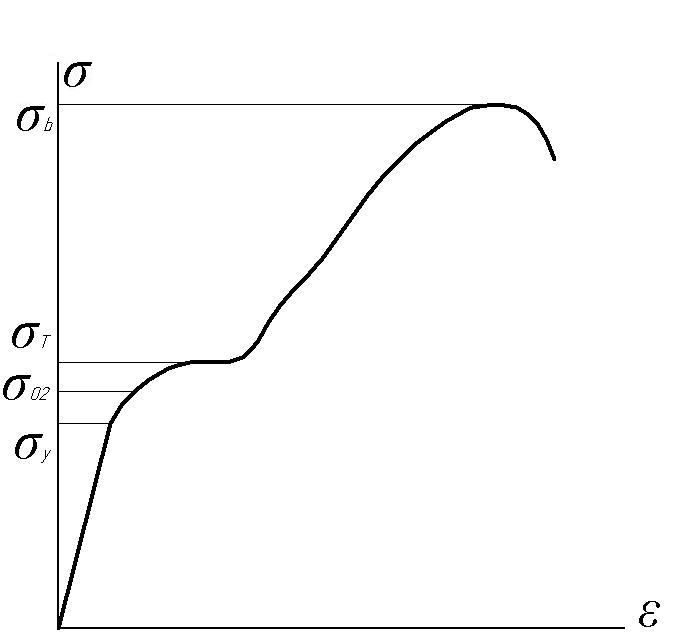


Рисунок 1 – Диаграмма истинных напряжений

Основные положения:

Истинное напряжение определяется по формуле:

 *(Па),*

где *Рк* – текущая сила, Н;

*Fк* – текущая площадь поперечного сечения, м2, определяется по формуле:

*Fк=F0×(1-εк),*

где *εк* – текущее значение относительной деформации образца, которое определяется по формуле:

*εк = Δl/l0,*

где: *Δl* – приращение длины образца, м;

*l0* – начальная длина образца, м.

Для стандартного образца начальная длина определяется по формуле:

*l0 = 10×d0* - для длинных образцов;

*l0 = 5×d0* - для коротких образцов;

Под нагрузкой в области развитой пластической деформации длина образца определяется по формуле:

*lд = l0 +Δlу* + *Δlпл*

Удлинение образца после снятия нагрузки определяется по формуле:

*Δlпл= εпл × l0,*

принимаем *εпл = 0,002*

Удлинение образца при упругой деформации

*Δlу=(σ0,2/E) × l0,*

где *σ0,2 –* напряжение, соответствующее началу образования пластической деформации;

*E* – модуль Юнга (модуль упругости первого рода).

**Задача №1.1**

Стандартный длинный образец диаметром 10мм растянули до перехода в первое предельное состояние и разгрузили. Определить длину образца под нагрузкой и после разгрузки, если сталь малоуглеродистая, у которой *σ0,2=350МПа, а Е=2 ×105МПа*

**Задача №1.2**

При испытании на растяжение стандартного образца длиной 100мм и диаметром 10мм, получили следующие результаты:

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  п/п | Деформируемый материал | Усилие деформирования Р(кН) при растяжении на *Δlмм* | | | | | | | |
| 2,5 | 5 | 7,5 | 10,0 | 12,5 | 15,0 | 17,5 | 20,0 |
| 1 | Алюминий | 6,1 | 6,5 | 6,8 | 7,2 | 7,6 | 7,9 | 8,1 | 8,16 |
| 2 | Медь | 20,6 | 20,9 | 21,2 | 21,4 | 21,6 | 21,8 | 22,0 | 21,1 |
| 3 | Латунь | 26,8 | 29,9 | 32,1 | 34,9 | 35,6 | 37,6 | 38,1 | 37,9 |
| 4 | Сталь 20 | 20,7 | 26,2 | 29,9 | 35,7 | 37,0 | 39,6 | 40,1 | - |
| 5 | Сталь 40 | 42,9 | 52,4 | 58,4 | 62,1 | 63,5 | 64,2 | 65,4 | 64,7 |
| 6 | Сталь Х18Н10Т | 21,4 | 25,4 | 29,2 | 32,8 | 36,3 | 39,6 | 42,8 | 41,8 |

Составить таблицу расчетных значений «*σ*»и «*ε*»и построить график функции «*σ=f(ε)*».

**1. Тема: «Предельные состояния»**

**1.2. Занятия № 2**

**«Модели сплошных сред»**

Основные положения:

Для записи уравнений состояния необходимо идеализировать и аппроксимировать механические свойства деформируемой сплошной среды. При этом под аппроксимацией и идеализацией свойств сплошной среды мы будем понимать научный метод, состоящий в замене одних математических объектов, другими, близкими к исходным, но более простыми.

Для описания свойств реальных материалов используют следующие основные модели сплошных сред:

- *Идеально-упругая среда* (среда Гука) – характеризуется линейной зависимостью между «*σ*»и «*ε*» (см. рисунок 2), причем процесс деформирования является обратимым, диссипации энергии, т.е. превращения механической работы в тепловую энергию и ее рассеивания, при этом не происходит.

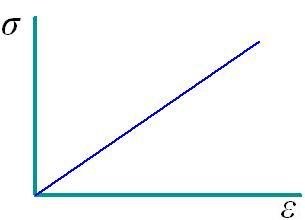


Рисунок 2 – Модель среды Гука

Аппроксимирующее уравнение, описывающее среду Гука, выглядит следующим образом:

*σx=E×εx,*

где *σx* – текущее значение напряжения;

*E* – модуль Юнга (модуль упругости первого рода);

*εx* – текущее значение деформации.

- *Жестко - пластическая неупрочняющаяся среда* – характеризуется отсутствием в начальный момент деформирования упругой составляющей деформации (см. рисунок 3). Материал ведет себя как абсолютно твердое, несжимаемое тело до тех пор, пока напряжения не достигают предела текучести (*σТ).*

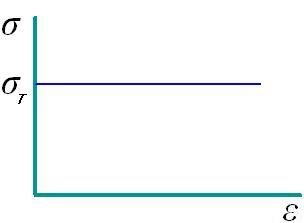


Рисунок 3 – Модель жестко - пластической неупрочняющейся среды

Аппроксимирующее уравнение, описывающее жестко - пластическую среду, выглядит следующим образом:

*σx= σТ,*

где *σx* – текущее значение напряжения;

*σТ* – предел текучести деформируемого материала.

- *Идеальная упругопластическая неупрочняющаяся среда* – характеризуется тем, что в начале процесса деформирования материал ведет себя. как идеально упругий, а с определенного момента начинает деформироваться необратимо при неизменном значении напряжений *σx= σТ,* (см. рисунок 4).

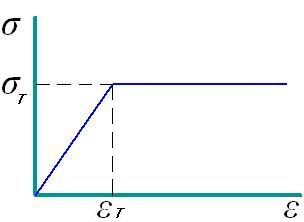


Рисунок 4 – Модель идеальной упругопластической неупрочняющейся среды

В области упругости связь между напряжениями и деформациями носит линейный характер и описывается законом Гука. При развитой пластической деформации можно пренебречь упругой составляющей деформации, т.к. она ничтожно мала по сравнению с пластической составляющей. Такое поведение можно наблюдать у материалов, имеющих ярко выраженную, большую площадку текучести. В этом случае аппроксимирующие уравнения, описывающие идеальную упругопластическую неупрочняющуюся среду, будут выглядеть следующим образом:

*σx=E×εx - (для текущих значений деформации меньших εТ),*

*σx= σТ - (для текущих значений деформации равных и больших εТ),*

где *εТ* – деформация, соответствующая переходу материала во второе предельное состояние.

- *Несжимаемая, упрочняющаяся среда* – характеризуется тем, что необратимые деформации наступают сразу с того момента, когда напряжения достигают предела текучести *σx= σТ,* (см. рисунок 5).

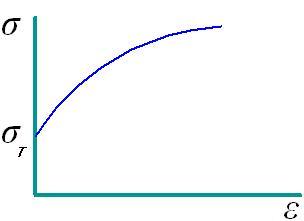


Рисунок 5 – Модель несжимаемой, упрочняющейся среды

Для дальнейшего развития деформации обязательным условием является постоянный рост текущих значений напряжений. В этом случае аппроксимирующее уравнение, описывающее несжимаемую, упрочняющуюся среду, будет выглядеть следующим образом:

*σx= σТ + 3×E1×εx ,*

где *Е1* – модуль упрочнения.

- *Идеально-вязкая среда* – характеризуется тем, что она деформируется необратимо при любом значении текущего напряжения (см. рисунок 6).

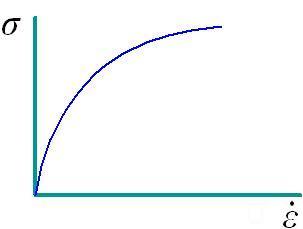


Рисунок 6 – Модель идеально-вязкой среды

Деформация при этом не сопровождается изменением объема. Аппроксимирующее уравнение, описывающее идеально-вязкую среду, выглядит следующим образом:

*σx=3μ\×x,*

где *μ\* – коэффициент вязкости;

*x* – текущее значение скорости деформации, с-1.

Описанные выше модели сплошной среды позволяют аппроксимировать диаграмму истинных напряжений для материала являющегося пластической, упрочняющейся средой следующей степенной зависимостью:

*σS= σТ + А×ψn,*

где *σS –* сопротивление материала пластическому деформированию,

*σТ* – предел текучести материала,

*А* – коэффициент,

*Ψ* – относительная деформация уменьшения размеров.

Математическая модель процесса растяжения стандартного образца в этом случае будет выглядеть следующим образом:

*Рр=F0×σТ ×(1-ψ)+ А×F0 ×(1-ψ)×ψn,*

где *Рр* – сила растяжения образца, Н,

*F0* – начальная площадь поперечного сечения образца, м2,

*σТ* – предел текучести материала, Па,

*Ψ* – относительное поперечное сужение образца при его растяжении,

*А* – коэффициент,

*n* – показатель деформационного упрочнения.

*Ψ = ,*

где *FК* – текущая площадь поперечного сечения образца, м2.

**Задача №2.1**

Зависимость *σS(ε)* для образца диаметром 10мм с рабочей частью длиной *l0* = 100мм задана в виде двух уравнений:

*σS =7,1×104ε,* если *ε≤ 0,05*  (МПа)

*σS =497+807(ε- ε0,2),* если *ε > 0,05* (МПа)

По одной из приведенных формул рассчитать *σS* и определить:

* напряжение *σS*, соответствующее началу перехода от упругой деформации к пластической деформации (при *ε0,2 =* 0,002);
* напряжения при растяжении образца до *lД* =102, 104, 106, 108, 110, 112, 114, 116, 118, 120мм.
* построить график *σS(ε)*, используя расчетные данные/

**Задача №2.2**

Стандартный длинный образец диаметром 5мм из стали 12Х18Н9Т (σТ=200МПа) растягивают в условиях сверхпластичности с переменной скоростью. Через определенные промежутки времени фиксируют скорость деформации *,* площадь поперечного сечения образца *F* и силу деформации *Р*:

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ,с-1 | 10-4 | 5×10-4 | 10-3 | 5×10-3 | 10-2 | 5×10-2 |
| *F*, мм2 | 18,8 | 15,7 | 13,5 | 11,8 | 10,5 | 9,42 |
| *Р*, кН | 0,662 | 0,667 | 0,679 | 0,854 | 1,31 | 1,91 |

Построить графики зависимостей: *σ()*  и *σ(ψ)*

**1. Тема: «Предельные состояния»**

**1.3. Занятия №3**

**«Анализ моделей сплошной среды»**

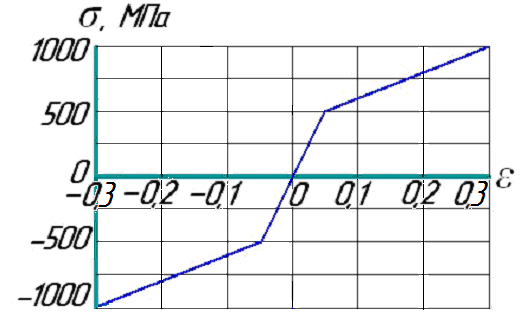


Рисунок 7 – Графическое изображение модели сплошной среды (для задач №3.1 и №3.2)

Варианты заданий для задач №3.1 и №3.2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| *ε* | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,12 | 0,14 | 0,16 | 0,05 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
| ∆*l,* мм | 5 | 5,2 | 5,5 | 5,1 | 5,15 | 5,18 | 4,4 | 4,5 | 4,7 | 4,9 |

**Задача №3.1**

По заданному графическому изображению модели сплошной среды (см. рисунок 7), определить:

- силу растяжения и сжатия образцов с начальным диаметром d0=10мм и начальной длинной *l*0=100мм до приращения длинны образца при его удлинении или сжатии на величину ∆*l*;

- силу, необходимую для растяжения и сжатия указанных образцов на величину заданной степени деформации *ε*.

**Задача №3.2**

По заданной модели сплошной среды (см. рисунок 7) определить ее параметры и силу необходимую для растяжения и сжатия образцов диаметром 10мм и начальной длиной *l*0= 20мм до заданной степени деформации *ε*. Установить, какая сила потребуется для растяжения и сжатия образцов до приращения длинны образца (при его удлинении или сжатии) на заданную величину ∆*l*.

**1. Тема: «Предельные состояния»**

**1.4. Занятие №4**

**«Определение предела прочности материала по диаграммам условных и истинных напряжений (по кривым упрочнения первого рода)»**

Основные положения:

Условное напряжение (для диаграммы условных напряжений) определяется по формуле:

*σУСЛ.=РК/F0*,

где *σУСЛ*. – условное напряжение, МПа;

*РК* – текущее значение силы, Н;

*F0* – начальное значение площади поперечного сечения образца, м2.

Напряжение текучести (для диаграммы истинных напряжений, см. рисунок 8) для любого момента деформации до начала образования шейки определяется по формуле:

*σS=РК/FК,*

где *FК* – площадь поперечного сечения образца в любой момент деформации до начала образования шейки, м2.

*FК=F0×(1-ε);*

*ε=(l-l0)/l0=Δl/l0.*

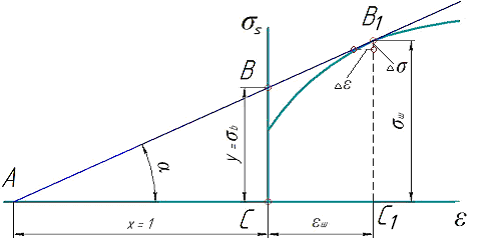


Рисунок 8 – Схема для графического определения предела прочности материала

По построенной диаграмме определяется *σВ* через угол «*α*» наклона касательной к кривой упрочнения в точке начала образования шейки, исходя из условия:

*dσш/dεш=tgα,*

где *dσш* – длина отрезка ВС на диаграмме, мм;

*dεш* - длина отрезка АС на диаграмме, мм.

**Задача № 4.1**

Стандартный металлический образец диаметром 10 мм и длиной 100 мм, растянули до момента образования шейки. Построить диаграммы условных и истинных напряжений и графически определить предел прочности материала по кривой упрочнения первого рода при условии, что в момент образования шейки его длина равна 117,5мм, а сила изменяется согласно табличным данным. Сравнить полученные кривые.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  п/п | Деформируемый материал | Усилие деформирования Р(кН) при растяжении на *Δlмм* | | | | | | | |
| 2,5 | 5 | 7,5 | 10,0 | 12,5 | 15,0 | 17,5 | 20,0 |
| 1 | Алюминий | 6,1 | 6,5 | 6,8 | 7,2 | 7,6 | 7,9 | 8,1 | 8,16 |
| 2 | Медь | 20,6 | 20,9 | 21,2 | 21,4 | 21,6 | 21,8 | 22,0 | 21,02 |
| 3 | Латунь | 26,8 | 29,9 | 32,1 | 34,9 | 35,6 | 37,6 | 38,1 | 38,0 |
| 4 | Сталь. 20 | 20,7 | 26,2 | 29,9 | 35,7 | 37,0 | 39,6 | 39,8 | - |
| 5 | Сталь 40 | 42,9 | 52,4 | 58,4 | 62,1 | 63,5 | 64,2 | 65,4 | 65,2 |
| 6 | Сталь12Х18Н10Т | 21,4 | 25,4 | 29,2 | 32,8 | 36,3 | 39,6 | 42,8 | 41,9 |

Сделать выводы:

* определить графически величину предела прочности материала по диаграммам условных и истинных напряжений;
* сравнить полученную графически величину предела прочности материала со справочными данными для заданного материала;

- сравнить полученные диаграммы условных и истинных напряжений.

**2. Тема: «Теория напряженного состояния»**

**2.1. Занятие №5**

**«Определение напряжений на наклонных площадках»**

Основные положения:

Закон парности касательных напряжений гласит, что на двух взаимно перпендикулярных друг к другу гранях кубического элемента компоненты касательного напряжения, перпендикулярны линии пересечения этих граней и равны по абсолютной величине, т.е. касательные напряжения на взаимно перпендикулярных друг к другу площадках равны между собой. Этот закон можно записать в виде такой системы уравнений:



Напряженное состояние в любой точке тела (при заданном нагружении) определяется тензором напряжений:

*Tσ*=

Для любой наклонной площадки, проходящей через данную точку проекции полного вектора напряжений на координатные оси (x,y,z) можно записать соотношением следующего вида:



Полное (*S*), нормальное (*σн*) и касательное (*τ*) напряжение на наклонной площадке определяется из соотношений:

*S2 = Sx2 + Sy2 + Sz2*

*σн*= *σx*×a*x2*+*σy*×a*y2+ σz*×a*z2*+*2τxy*×a*x×*ay+*2τyz*×a*y×*az+*2τzx*×a*z×*ax

*τ2 =S2 - σн2*

a*x2*+a*y2+*×a*z2=*1

**Задача № 5.1**

В точке тела известны компоненты напряжений: *σx=*500МПа, *σy=*0, *σz*=300МПа, *τxy*=500МПа, *τyz=*-750МПа, *τzx*=800МПа.

- записать тензор напряжений *Tσ;*

- найти полное, нормальное и касательное напряжения для площадки, нормаль к которой характеризуется направляющими косинусами *ax*=1/2, *ay*=1/2, *az*=1/√2

**Задача № 5.2**

В точке тела задана следующая система напряжений: *σx*=50МПа, *σy*=0, *σz*=110МПа, *τxy*=30МПа, *τyz*=-30МПа, *τxz*=80МПа. Найти значения полного, нормального и касательного напряжений на площадке с внешней нормалью, направляющие косинусы которой относительно координатных осей равны между собой.

**Задача № 5.3**

Напряженное состояние в точке определено тензором *Tσ*. Найти нормальное и касательное напряжение в наклонной площадке, проходящей через данную точку, если нормаль к ней образует с осями углы α*x*, α*y*, α*z* (компоненты тензора заданы в МПа)

а) *Tσ*= б) *Tσ*=

*αx*=600, *αy*=450, *αz*=600 *αx*=300, *αy*=680, *αz*=710

в) *Tσ*= г) *Tσ*=

*αx*=520, *αy*=660, *αz*=450 *αx*=450, *αy*=600, *αz*=600

**2.2 Занятие №6**

**«Главные нормальные напряжения, тензорные характеристики напряжений»**

Главные нормальные напряжения (σ1, σ2, σ3) в точке тела при заданном нагружении определяются как корни кубического уравнения вида

,

где - I1, I2, I3 - коэффициенты уравнения являются инвариантами тензора напряжений, которые определяются по формулам:

;

;

.

Тензор главных напряжений

*ТГσ*=

Напряженное состояние тела, находящееся в упругом состоянии описывается шаровым тензором напряжений

*Тшσ*=,

где

,

а находящегося в пластическом состоянии – девиатором напряжений, определяемым по формуле

*Dσ=Тσ-ТσШ*

*Dσ*=,

**Задача 6.1**

Для точки тела известен первый инвариант тензора напряжений I1σГ=30 МПа и задан девиатор напряжений

*Dσ*=

Составить исходное уравнение для определения главных напряжений в данной точке. (Компоненты напряжений заданы в МПа).

**Задача 6.2.**

Напряженное состояние в трех точках деформируемого тела задано тензорами

*Тσ1*=,

*Тσ2*=,

*Тσ3*=,

Определить, одинаковое или разное напряженное состояние в этих точках.

**Задача 6.3**

Определить нормальные и касательные напряжения, а также полное напряжение для площадки, которая наклонена к главным осям под углами 450, 600, 600, при σ1=500 МПа, σ2=700 МПа, σ3=400 МПа. Для заданного напряженного состояния определить инварианты тензора напряжений.

**2.3 Занятие №7**

**«Главные касательные напряжения»**

Главные касательные напряжения можно определить через главные нормальные напряжения по формулам:



Нормальные напряжения, в площадках действия главных касательных напряжений, можно определить по формулам:



**ДОБАВИТЬ: объемное, плоское, линейное (схемы или формулы)**

**Задача 7.1**

В точке деформируемого твердого тела заданы σСР=-185 МПа;

τ12=156 МПа; τ23=-392 МПа; τ31=236 МПа.

Вычислить компоненты тензора, заданного в главных напряжениях. (Напряжения заданы в МПа).

**Задача 7.2**

Напряженное состояние в точке определено тензором главных напряжений:

а)

*Тσ*=

б)

*Тσ*=

в)

*Тσ*=

г)

*Тσ*=

Определить:

- инварианты заданных тензоров;

- полные нормальные и касательные напряжения в площадках, наклоненных к двум главным осям под углом 450 и проходящих через третью ось.

**Задача 7.3**

Напряженное состояние задано тензором ТσГ. Найти главные касательные напряжения τ12, τ23, τ31

а)

*Тσ*=

б)

*Тσ*=

**Задача 7.4**

Параллелепипед (рис. 9) высотой h и шириной “а” квадратного сечения (а×а) растягивается в двух направлениях, по оси Х силой РХ, а по оси Y – силой РY. Определить напряжения на наклонной площадке АВ, нормаль к которой составляет с осью Y угол равный 45 град.

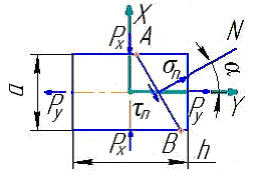
-

Рисунок 9 – Схема образца к задаче 7.4.

**Задача 7.5**

Стержень диаметром 40 мм растянут силой Р=0,25 МН. Определить нормальное и касательное напряжения на наклонной площадке, нормаль к которой составляет с осью стержня угол 30 град. Определить в каком сечении касательное напряжение достигает максимального значения и вычислить их величину, а также величину полного напряжения на этой наклонной площадке (SП). (тело находится в линейном напряженном состоянии). Сделать поясняющий рисунок.

**2.4. Занятие №8**

**«Октаэдрические напряжения и интенсивность напряжений»**

На площадках, равнонаклоненных к главным осям (октаэдрических площадках), действуют октаэдрические напряжения



Интенсивность напряжений или обобщенное напряжение определяется по формуле



Интенсивность касательных напряжений



**Задача № 8.1**

В точке тела задана следующая система напряжений:

σx=σy=500 МПа, σz=1000 МПа, τxy=τyz=τzx=0. Определить нормальное, касательное и полное напряжения на октаэдрических площадках, проведенных через данную точку.

**Задача № 8.2**

Напряженное состояние задано тензором. Определить:

- касательное и нормальное октаэдрические напряжения, их интенсивность;

- определить в «%» различие между октаэдрическими касательными напряжениями и их интенсивностью.

а)

*Тσ*=,

б)

*Тσ*=,

в)

*Тσ*=,

**Задача № 8.3**

Напряженное состояние, в некоторой точке деформируемого тела определяется тензором напряжений

*Тσ*=

Изменив схему напряжения, на тело наложили дополнительное гидростатическое давление (-р). Показать, как изменились компоненты тензора и интенсивность нормальных и касательных напряжений.

**Задача № 8.4**

Напряженное состояние в точке тела определено тензором напряжений

*Тσ*=

Определить значения полного, нормального и касательного напряжений на площадке с внешней нормалью N, направляющие косинусы которой имеют одинаковое значение.

Доказать, что значения полного, нормального и касательного напряжений на площадке с внешней нормалью N, полученные по общим формулам тождественны аналогичным напряжениям (полному, нормальному и касательному), которые получены по формулам для октаэдрических напряжений.

**Задача № 8.5**

Напряженное состояние, в некоторой точке деформируемого тела задано тензором напряжений (МПа):

*Тσ*=

Определить октаэдрические напряжения. Вычислить главные нормальные напряжения и главные касательные напряжения.

**Задача № 8.6**

На площадках, совпадающих с координатными плоскостями, действуют напряжения:

σ1=220МПа, σ2=180МПа, σ3=100МПа.

Определить октаэдрические напряжения и полное, нормальное и касательное напряжения на площадке, проведенных через данную точку, имеющей следующие значения направляющих косинусов:

1/2, 1/2, 1/√2.

**3. Тема: «Теория деформированного состояния»**

**3.1. Занятие №9**

**«Тензорные характеристики деформаций, главные деформации» Относительные степени деформаций**

Основные положения:

Деформированное состояние в окрестностях выбранной точки определяется тензором малых деформаций:

*Tε*= *Tε*Г=

Полное относительное удлинение какого-либо отрезка, проходящего через заданную точку, имеющего направляющие косинусы *ax*, *ay*, *az*, определяется уравнением:

*ε*п= *εx*×*ax2*+*εy*×*ay2+ εz*×*az2*+*0,25γxy*×*ax*×*a*y+*0,25γyz*×*ay*×*a*z+*0,25γzx*×*az*×*a*x

Главные деформациудлинения в точке (*ε1, ε2, ε3*) определяются из уравнения вида: *ε3 – I1(Tε) ε2 + I2(Tε) ε – I3(Tε) = 0*

*I1(Tε) = εx + εу + εz*

*I2(Tε) = εxεy+ εyεz+ εzεx – 0,25γ2xy – 0,25γ2yz – 0,25γ2zx*

*I3(Tε) = εxεyεz + 0,25γxyγyzγzx – 0,25γ2yzεx – 0,25γ2zxεy – 0,25γ2xyεz*

Степени относительной деформации параллелепипеда с ребрами *Xн, Yн, Zн* – до деформации и *Xд, Yд, Zд* – после деформации определяются по формулам:

Если *εк* имеет положительное значение, то это означает, что элемент параллелепипеда растягивается. Если *εк* имеет отрицательное значение, то это означает, что элемент параллелепипеда сжимается.

Основное условие пластической деформации – это «условие постоянства объема». Его можно записать следующим уравнением:

*εx + εу + εz=* 0

При упругой деформации основным является «условие обратимого изменения объема». Его можно записать следующим уравнением:

*εx + εу + εz=* Δ

**Задача № 9.1**

Прямоугольная заготовка с начальными размерами B, L, H (мм) получила деформацию, определенную тензором *Tε .* Найти ее конечные размеры, если:

а) *Tε*= б) *Tε*=

*B*=200мм, *L*=250мм, *H*=10мм *B*=200мм, *L*=250мм, *H*=20мм

в) *Tε*= г) *Tε*=

*B*=200мм, *L*=250мм, *H*=200мм *B*=100мм, *L*=150мм, *H*=200мм

**Задача № 9.2**

В точке тела заданы компоненты деформаций *εx, εy, γxy;* остальные компоненты *εz,=γxz,=γzy=0* (случай плоской деформации). Записать уравнение для определения главных деформаций удлинения (*ε1, ε2, ε3,)*

**Задача № 9.3**

В точке тела известны компоненты деформаций:

*εx=*0,001*; εy=*0,0005*; εz=* –0,0015*;*

*γxy=*0,0002*; γyz=* – 0,0001 *γzx=*0,0003

Записать *Tε* и определить относительное удлинение отрезка, если направляющие косинусы равны между собой

**Задача № 9.4**

Цилиндрическая заготовка имеет следующие начальные размеры (мм):

а) D=200мм, Н=100мм

б) D=200мм, Н=200мм

а) D=20мм, Н=40мм

Ее конечная деформация определяется тензором:

*Tε*=

Рассчитать конечные размеры заготовки и определить является ли такая деформация пластической.

**Задача № 9.5**

В точке тела заданы компоненты деформаций:

*ε1=*0,09*; ε2=*-0,02*; ε3=* –0,07.

Определить относительное удлинение отрезка, проходящего через заданную точку, если направляющие косинусы равны:

*а*1 =; *а*2 =; *а*3 =.

**Задача № 9.6**

В точке тела заданы компоненты деформаций:

*εx=*0,001*; εy=*0,0005*; εz=* –0,0015*;*

*γxy=*0,0002*; γyz=* – 0,0001 *γzx=*0,0003

Записать уравнения для определения главных деформаций

**3.2. Занятие №10**

**«Октаэдрические деформации и интенсивность деформаций»**

Линейная октаэдрическая деформация определяется по формуле:

*εо= εср=(εx + εу + εz)/3*

Октаэдрическую деформацию сдвига можно определить по формуле:



В отличие от деформаций, которые являются векторными величинами, интенсивность деформации, это величина скалярная.

Интенсивность деформации или обобщенная (эффективная) деформация выражается формулами в главных (а) и произвольных (б) осях:

,  (а)

 (б)

Интенсивность деформаций сдвига выражается следующей формулой:



При плоском деформированном состоянии: *ε3=* – *ε1;ε2=0*

При линейном растяжении и сжатии: *ε2= ε3=* – *0,5ε1*

Конечные деформации тела определяются через логарифмические деформации:







**Задача № 10.1**

Цилиндрическая заготовка имеет следующие начальные размеры (мм):

а) D =200мм, H=100мм;

б) D =200мм, H=200мм;

в) D =20мм, H=40мм;

Ее конечная деформация определяется тензором:

*Tε*=

Рассчитать конечные размеры заготовки и определить является ли такая деформация пластической.

**Задача № 10.2**

В точке тела заданы компоненты деформаций:

*ε1* = 0,09;  *ε2* = – 0,02;  *ε3* = – 0,07.

Определить октаэдрическую деформацию сдвига, обобщенную деформацию и интенсивность деформаций сдвига в точке, а также относительные удлинения отрезка, проходящего через заданную точку, если направляющие косинусы равны:

*а1* = ;  *а2* = ;  *а3* =.

**Задача № 10.3**

В точке тела заданны компоненты деформаций:

*εx=*0,001*; εy=* –0,0005*; εz=* –0,0001*;*

*γxy=*0,0002*; γyz=* – 0,0001 *γzx=*0,0003

Записать:

- тензор деформаций;

- линейную и сдвиговую октаэдрические деформации

- интенсивность деформаций сдвига.

**Задача № 10.4**

Плита длиной 1200мм, шириной 360мм, толщиной 5мм растягивается равномерно в продольном направлении до тех пор, пока её длина не увеличится до 1440мм

а) без изменения ширины;

б) с равномерной поперечной деформацией.

Найти конечные размеры плиты и обобщенную эффективную деформацию.

**Задача № 10.5**

Деформации записаны в виде тензора:

*Tε*=

Определить:

- является ли такая деформация пластической;

- конечные размеры тела, если его начальные размеры XН=20мм; YН=30мм; ZН=40мм;

- интенсивность сдвиговых деформаций;

- инварианты тензора деформаций.

**Задача № 10.6**

Конечный диаметр прутка равен 40мм, а длина 2400мм. Пруток был подвергнут равномерной пластической деформации растяжением от начального диаметра 60мм.

Определить: первоначальные размеры прутка, конечные логарифмические деформации, эффективную деформацию в конечный момент деформации.

**Задача № 10.7**

В процессе деформации первоначально квадратная сетка линий исказилась так, что расстояние между деформированными квадратами в горизонтальном направлении увеличилось в 4 раза. Найти:

- а) конечные деформации, если процесс деформации является линейным растяжением;

- б) конечные деформации, если ширина детали остается постоянной.

Размеры детали: L=100мм, B=40мм, A=20мм.

Размер ячейки сетки: а = 5×5 (мм)

**3.3. Занятие №11**

**«Скорости деформаций»**

Краткие сведения.

Скоростью деформаций называется изменение степени деформаций в единицу времени или относительное смещение объема в единицу времени.

Скорости деформаций определяются по формулам:

где - компоненты скоростей перемещений точек тела. Они выражаются через перемещения точек в единицу времени:

Тензор компонент скоростей деформации имеет вид:

Уравнение для определения главных скоростей линейных деформаций (относительных удлинений) имеет вид:

где - инварианты тензора компонент скоростей деформации (см. инварианты .

Условие постоянства объёма при пластической деформации выражается уравнением:

или

записывается как: , называется дивергенцией векторного поля.

При решении задач, в которых необходимо определить конечный размер через заданное время:

1. Определяем .

2. Определяем приращение размера.

3. Определяем конечный размер.

Запишем скорости деформаций как

Интенсивность скоростей деформаций или приведенная скорость деформации:

Определяет количественно полную скорость изменения формы частицы.

Условие несжимаемости материала при пластической деформации, выраженное в скоростях: .

Условие изменения объема при упругой деформации:

.

**Задача №11.1**

В точке тела заданы компоненты скоростей деформаций остальные компоненты равны нулю. Записать инварианты тензора скоростей деформаций и составить уравнения для определения главных скоростей деформаций и интенсивности скоростей деформаций. Определить схему деформированного состояния.

**Задача №11.2**

Записать уравнение для определения главных линейных скоростей деформаций  и , определить состояние тела если заданы следующие тензоры скоростей деформаций:

а) (1/с); б) (1/с);

в) (1/с); г) (1/с).

**Задача №11.3**

Тензоры скоростей деформаций тела находящегося в деформированном состоянии имеют вид:

(1/с) и (1/с)

Определить в одном или разных деформированных состояниях находятся тела. Рассчитать октаэдрические скорости деформации. Определить вид деформированного состояния.

**Задача №11.4**

Деформация прямоугольной заготовки с размерами В=100мм, L=150мм, H=40мм описывается тензором:

(1/с)

Определить конечные размеры заготовки через Δt = 0,12с. Нарисовать схему процесса.

**4. Тема: «Условия пластичности»**

**4.1. Занятие № 12**

**«Условие постоянства максимальных касательных напряжений».**

Пластическая деформация появляется, когда наибольшее из главных касательных напряжений достигает некоторой величины зависящей от свойств деформируемого материала (условие Треска- Сен-Венана-Леви.), т.е. когда:



где *τS* = К;

К= 0,5σт – постоянная пластичности.

**«Условие пластичности Губера-Мизеса».**

Любая элементарная частица металлического тела переходит из упругого состояния в пластическое, когда интенсивность напряжений достигает величины, равной напряжению текучести при одноосном пластическом напряжённом состоянии, cсоответствующему температурно–скоростным условиям деформирования и степени деформации.

Постоянная пластичности по условию Губера-Мизеса

;



К – это величина, которую могут достигать главные касательные напряжения или σi при пластической деформации.



**Задача 12.1**

Три образца из различных материалов нагружены так, что состояние описывается тензором напряжений:



Определить, в каком состоянии находятся образцы, если:

σт = 450 МПа;

σт = 910 МПа;

σт = 1200 МПа;

**Задача 12.2**

Плоская листовая заготовка из стали 08КП с пределом текучести σт=246МПа нагружена так, что ее напряженное состояние описывается тензором:



Каким должно быть напряжение σ3. чтобы заготовка деформировалась пластически

5**. Тема: «Механические схемы напряженного и деформированного состояния»**

**5.1. Занятия № 13**

**«Показатель схемы напряженного состояния и предельная пластичность»**

На усилие деформирования и предельно возможную до разрушения степень деформации процессов обработки металлов давлением существенное влияние оказывает коэффициент жесткости схемы напряженного состояния, который определяется по формуле:

, (1)



где *П –* показатель схемы напряженного состояния или коэффициент жесткости;

*σ1*,*σ2,σ3* – главные напряжения в очаге пластической деформации для рассматриваемого процесса МПа;

*σi* - интенсивность напряжений МПа.

Технологические процессы, в которых величина **П** положительна, относятся к процессам с "жесткой" схемой напряженного состояния. Например, при растяжении образца П =+1 .

Технологические процессы, в которых величина **П** отрицательна, относятся к процессам с "мягкой" схемой напряженного состояния. Например, при выдавливании (прессовании) значение П доходит до -6.

**Задача 13.1**

При растяжении цилиндрических образцов с наложением давления жидкости предельнаяпластичность ***εпр*** углеродистой стали описывается уравнением ***εпр=0,62+2,1\*10-3 \*(p-190)***, где ***p*** – давление жидкости в МПа. Для заданного диапазона изменения величины наложенного давления 200≤***p≤1000***МПа построить график  ***εпр***=F(***p***) с шагом Δ***p***=100МПа.

**Задача 13.2**

При прессовании прутков достигнут показатель жесткости схемы напряженного состояния  **П**=-4, а степень деформации сдвига **λ=1,8.** Пользуясь диаграммой пластичности (рис. 10) определить, возможна ли такая операция без разрушения. Показать, что необходимо сделать, чтобы обеспечить устойчивое производство изделия без брака.

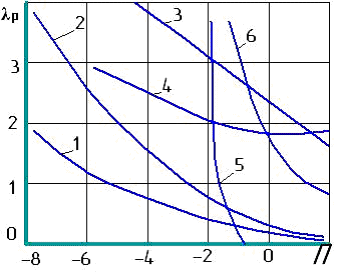
****

Рисунок 10 - Диаграмма пластичности различных материалов: 1 – бериллий; 2 – титановый сплав ВТ9; 3 – медь; 4 – сталь Х18Н10Т; 5 – цинк литой; 6 - алюминиевый сплав Д16.

**5.2. Занятия № 14**

**«Влияние механических схем напряженного состояния на пластичность материала»**

**Задача 14.1**

Рассчитать показатель напряженного состояния и удельное усилие деформирования для процессов прессования и волочения, используя приведенные зависимости и заданные размеры образца (рис.11). Начертить схему образца и схему формированного состояния для этих процессов (рис.12). Пользуясь графиками определить влияние показателя схемы напряженного состояния **П** на усилие деформирования и предельную степень деформации сдвига до разрушения. Сделать выводы.

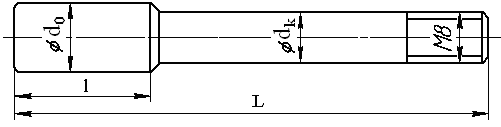


Рисунок 11 Деформированный образец

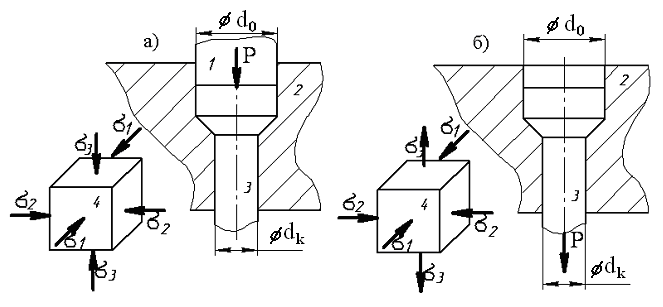


Рисунок 12 - Принципиальные схемы процессов прессования (а) и волочения (б):1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – образец; 4 – схема напряженного состояния

Для принятых размеров образца, деформирующего инструмента и контактных условий рассчитать показатель напряженного состояния:

для прессовании **П=**

для волочения **П=**,

где d0 и dк – начальный и конечный диаметр образца, 9,8мм и 9,6мм, соответственно;

F0 Fк – начальная и конечная площадь поперечного сечения образца;

μ – показатель трения, μ = 0,3;

σ0 – противонатяжение, σ0=0;

α – угол конусного участка матрицы, α=150;

Рассчитать удельные усилия (МПа) по приведенным формулам:

для прессования



для волочения

,



где =β×σS;



β – коэффициент Лоде, β= 1,1;

σS – предел текучести материала деформируемого образца, σS = 320МПа;

*В* = μ×ctgα.

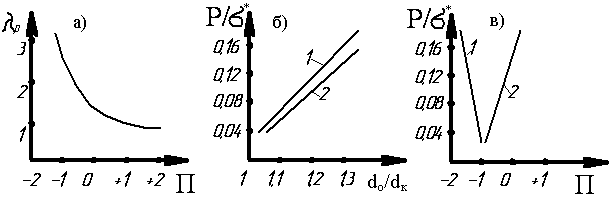


Рисунок 13 - Связь между показателем схемы напряженного состояния

и предельной степенью деформации сдвига до разрушения (а), зависимость относительного усилия деформирования при прессовании (1) и волочении (2) от степени деформации (б) и показателя схемы напряженного состояния (в)

Пользуясь графиками (рисунок 13) сделать выводы о влиянии коэффициент жесткости схемы напряженного состояния (**П**) на параметры процессов деформирования.

СПИСОК РЕкКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ивлев Д.Д. Теория предельного состояния и идеальной пластичности: избр. Работы/ Д.Д. Ивлев .- Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2005. – 357с.

2. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1. – М.: «Наука», 1983. – 528

с. Т. 2. – М.: «Наука», 1983. – 560 с.

3.Рабинович Н.Р. Инженерные задачи механики сплошной среды в

бурении. – М.: «Недра», 1989. – 270 с.

4. Резников Ю.Н., Ефремова Е.А., Вовченко А.В. Инженерная механика твердого тела: Учеб. пособие. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ. 1998. – 167с.

4. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. Изд. 4, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. – 423с.

5. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением. Харьков: Вища

школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1981.- 248с.

**Задания студентам заочной формы обучения**

**к контрольным работам по дисциплине**

***«Математическое моделирование предельных состояний твердого тела»***

Контрольная работа состоит из двух теоретических вопросов рабочей программы по дисциплине «ММПСТТ» и решения задач по заданному условию.

Номер задания выбирается по сумме последних двух цифр номера зачетной книжки.

Вариант№1

1. Гипотеза «единой кривой». Понятие простого нагружения
2. Физический и геометрический смысл условия пластичности.
3. Три образца из различных материалов нагрузили таким образом, что напряженное состояние описывается тензором напряжений



Определить в каком состоянии находятся образцы, если для них σТ равно 450, 500, 550 МПа соответственно.

Вариант№2

1.Вывод закона парности касательных напряжений.

2. Малые деформации (вывод формул).

3. Построить диаграмму Мора для элементарной площадки, находящейся под действием полного напряжения величиной 300 МПа и касательного напряжения равного 120 МПа. Углы наклона площадки относительно главных осей равны 30° и 60°

Вариант№3.

1. Определение напряжений в наклоненных площадках.

2. Вывод зависимостей между напряжениями и деформациями за пределом упругости.

3. Плоскую листовую заготовку из стали 08КП (σТ=246МПа) нагрузили так, что ее напряженное состояние описывается тензором напряжений.



Каким должно быть напряжение σз. чтобы заготовка деформировалась пластически.

1

Вариант№4

1. Идеальные модели твердых тел в механике сплошной среды. Механические аналоги реологических моделей.

2. Главные нормальные напряжения. Инвариантные характеристики напряженного состояния (вывод формул).

3. Прямоугольная заготовка с начальными размерами В=200мм, L=250мм, Н=10мм получила деформацию определенную тензором Tε. Найти ее конечные размеры, если:



Вариант №5.

1. Построение диаграммы напряжений Мора.

2. Конечные деформации, приращение длины линейного элемента.

3. В точке М деформируемого тела заданы: среднее напряжение σср=-185МПа, главнее касательные напряжения    Вычислить компоненты тензора главных напряжений Тσ.

Вариант 6.

1. Понятие тензора напряжений, шарового тензора, девиатора напряжений, их физический смысл. Инварианты тензора напряжений, девиатора напряжений.

2. Точки зрения Эйлера и Лагранжа на движение сплошной среды. Траектории материальной частицы, линии тока, трубки тока.

З. Образец, имеющий размеры , подвергнут осадке с относительной деформацией по высоте . Принимая объем неизменным и напряженное состояние одноосным, определить размеры образца после осадки.

Вариант№7.

1. Ротор поля скоростей сплошной среды.
2. Октаэдрические напряжения (вывод формул).
3. Напряженное состояние в некоторой точке деформируемого тела определено тензором напряжений



Изменив схему напряжений, на тело наложили дополнительное гидростатическое давление равное –Р. Показать, как изменились компоненты тензора Тσ и интенсивность напряжений.

2

Вариант№8.

1 .Понятия ползучести, последействия, релаксации.

2. Главные касательные напряжения (вывод формул). Площадки действия главных касательных напряжений.

З. В точке тела заданы компоненты деформации εx εy εxy, а остальные компоненты равны нулю. Записать инварианты тензора деформаций и вывести формулы для главных деформаций.

Вариант№9.

1. Эллипсоид напряжений Ламэ.
2. Математическое понятие тензора второго ранга.
3. Задан тензор напряжений в произвольной декартовой системе координат x, y, z. Составить уравнение для определения главных напряжений σ1 σ2 σ3.

Вариант №10.

1. Дифференциальные уравнения движения и равновесия.

2. Интенсивность касательных напряжений. Интенсивность деформаций.

З. Деформация прямоугольной заготовки с размерами В=100мм, L=150mm, Н=40мм описывается тензором:



Определить конечные размеры заготовки через 0,1 сек после начала деформации.

Вариант№11.

1. Реологические модели сложных сред. Понятие ползучести.
2. Скорости перемещений и скорости деформаций.
3. Для заданных напряжений 

найти касательное октаэдрическое напряжение. Показать, что его величина в различных системах координат одинакова.

Вариант№12.

1. Элементы теории разрушения O.Mopa, ее применение для оценки вероятности разрушения материалов, деформируемых в различных условиях.

2. Скорость деформаций, их физический смысл. Тензорные характеристики скоростей деформации.

3. Задано напряженное состояние точки:



Вычислить девиатор и шаровой тензор, определить нормальное, касательное и полное напряжение.

Вариант№13.

1.Неразрывность деформаций.

2. Физические уравнения теории пластического течения.

3. Задан тензор напряжений. Вычислить нормальное напряжение σ и касательное напряжение τ на площадке, нормаль к которой n составляет с осями координат углы с косинусами   .

Вариант№14.

1. Материальная точка, абсолютно твердое тело, сплошная среда. Гипотеза сплошности однородность сплошной среды. Тела изотропные и анизотропные.

2. Определение главных нормальных напряжений. Понятие инвариантности, инварианты тензора напряжений,.

3. Тензор скоростей деформаций в некоторой точке и некотором базисе имеет матрицу компонент:

(1/с)

Определить, чему равны I1I2I3

Вариант№15.

1. Конечные деформации.
2. Виды предельных напряженных состояний. Типы диаграмм оценивающих механическое состояние твердого тела.
3. Из уравнения, выражающего обобщенный закон упругости, получить выражение закона Гука для одноосного растяжения.

Вариант№16.

1. Понятие краевой задачи. Аналитические, приближенные и численные  
 методы решения краевых задач.

2. Понятие логарифмических деформаций. 4

3.Определить, находится ли точка в пластическом состоянии, если ее напряженное состояние описывается тензором Тσ, если предел текучести материала σT = 250МПа.



Вариант№17.

1. Условие постоянства объема и смещенный объем.
2. Плоское напряженное и плоское деформированное состояние твердого тела..
3. Образец, имеющий размеры см, подвергнут осадке с относительной деформацией по высоте . Принимая объем неизменным и напряженное состояние одноосным, определить размеры образца после осадки.

Вариант№18.

1. Дифференциальные уравнения неразрывности малых деформаций (вывод формул).

2. Влияние схемы напряженного состояния на пластичность и технологическую деформируемость.

3. Напряженное состояние в точке тела определено тензором напряжений:



Определить течение полного нормального и касательного напряжений на площадке с внешней нормалью «N», направляющие косинусы которой имеют одинаковое значение.

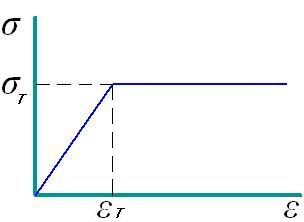
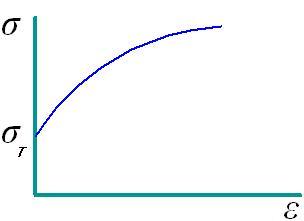
Вариант№19.

1. Главные значения тензора второго ранга.
2. Кривые упрочнения первого и второго рода.

Напряжения в данной точке тела: σ1=30 Мн/м2 (3,0кГ/мм2); σ2=20 Мн/м2 (2,0кГ/мм2); σ3=-10 Мн/м2 (-1,0кГ/мм2). Каким пределом текучести должен обладать металл, чтобы при заданных напряжениях находиться в упругом состоянии

**Вопросы к зачету по дисциплине**

**«Математическое моделирование предельных состояний твердого тела»**

1. Какие площадки называются главными?
2. .
3. Какое количество главных направлений и их взаимное расположение?
4. Что характеризует инвариант тензора напряжений?
5. Какие напряжения действуют на площадках главных касательных напряжений?
6. -
7. Чему равны главные касательные напряжения?
8. Как расположены площадки действия главных касательных напряжений по отношению к главным координатным плоскостям?
9. Чему равна сумма главных касательных напряжений?
10. Какие напряжения называются октаэдрическими?
11. Что характеризует девиатор напряжений?
12. Что такое интенсивность напряжений?
13. .
14. Что понимается под шаровым тензором?
15. Определить уравнение равновесия тетраэдра?.
16. Выбрать уравнения равновесия в декартовой системе координат?
17. Смысл уравнения пластичности Губера-Мизеса?
18. Какие деформации называются малыми?
19. Что является количественной мерой пластичности?
20. Что понимается под сопротивлением деформации?
21. Что понимается под конечной деформацией ?
22. Как влияет показатель напряженного состояния на критическую степень деформации до разрушения?
23. -
24. Какое из уравнений является условием пластичности Губера-Мизеса?
25. Сколько механических схем деформированного состояния?
26. Сколько механических схем плоского напряженного состояния?
27. Что называется условием максимального касательного напряжения
28. Сколько механических схем объемного напряженного состояния?
29. Что понимается под пластичностью материала?
30. Если способность материала к деформируемости не зависит от времени, скорости В каких единицах измеряется абсолютная деформация?
31. В каком случае линейная деформация считается отрицательной?
32. В каком случае при деформации отсутствует смещение диагонали параллелепипеда?
33. .
34. Как определяется полная деформация в каждой точке области развитой пластической деформации?
35. -
36. Выбрать формулу для определения условного напряжения текучести
37. Какие уравнения являются выражением закона парности касательных напряжений?
38. Какой тензор называется девиатором
39. Какое уравнение является условием пластичности Губера-Мизеса?
40. Выберите формулу определяющую показатель напряженного состояния
41. Как определяется текущая площадь поперечного сечения образца?
42. Выберите формулу для определения октаэдрического касательного напряжения.;
43. Выберите формулу для определения интенсивности деформаций сдвига
44. Выберите формулу для определения скорости относительной линейной деформации
45. В каких единицах измеряется абсолютная деформация?
46. В каком случае линейная деформация считается отрицательной?
47. Модель, какой среды представлена графиком?
48. 
49. Модель, какой среды представлена графиком?
50. 
51. .
52. Модель какой среды описывается уравнением вида
53. *σS= σТ + А×ψn?*
54. Какие уравнения являются выражением закона парности касательных напряжений?
55. Какой тензор называется девиатором?
56. Какое уравнение является условием пластичности Губера-Мизеса?
57. Выберите формулу определяющую показатель напряженного состояния
58. Как определяется текущая площадь поперечного сечения образца?
59. Выберите формулу для определения октаэдрического касательного напряжения.
60. ;
61. Выберите формулу для определения интенсивности деформаций сдвига
62. Выберите формулу для определения скорости относительной линейной деформации