

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 20.02.2021 21:22:20  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)  
Кафедра фундаментальной химии и химической технологии  
**УТВЕРЖДАЮ**



Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

12 \_\_\_\_\_ 2021 г.

Изучение структуры и свойств материалов

Методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по курсу «Основы химического материаловедения» для студентов направления подготовки 18.03.01 - Химическая технология

Курск 2021

УДК 620.171.3; 67.03

Составитель: С.Д. Пожидаева

Рецензент

Кандидат химических наук, доцент *Г.В. Бурых*

**Изучение структуры и свойств материалов:** Методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по курсу «Основы химического материаловедения» для студентов направления подготовки 18.03.01 - Химическая технология/ Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: С.Д. Пожидаева. Курск, 2021. 54 с. табл. 25. рис. 22

Содержат методические указания к выполнению практической и самостоятельной работы.

Приведены содержание и объём практических работ, а также методика их проведения, основные методы решения задач, что помогает понять теоретические положения курса. В методические указания включены вопросы для повторения пройденного материала.

Методические указания предназначены для бакалавров направления 18.03.01 - «Химическая технология».

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *14.12.21*. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. *1,3* Уч.-изд.л. *1,2* Тираж 35 экз. Заказ *1815*. Бесплатно

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## Содержание

Введение	5
Практическая работа №1 Количественная оценка степени разрушения элементов оборудования из металлов и сплавов при контакте с кислыми средами	5
Задачи для решения под контролем преподавателя	5
Задание для индивидуальной и самостоятельной работы	8
Вопросы к практической работе	11
Практическое занятие № 2 Анализ диаграммы состояния железо – углерод	11
Задачи для решения под контролем преподавателя	18
Задание для индивидуальной и самостоятельной работы	21
Вопросы к практической работе	21
Практическое занятие № 3 Микроанализ стали	22
Задачи для решения под контролем преподавателя	23
Задание для индивидуальной и самостоятельной работы	25
Вопросы к практической работе	28
Практическое занятие № 4 Изучение диаграмм состояния сплавов	28
Задачи для решения под контролем преподавателя	29
Задание для индивидуальной и самостоятельной работы	30
Вопросы к практической работе	32
Практическое занятие № 5 Определение физических свойств материалов	32
Задачи для решения под контролем преподавателя	33
Задание для индивидуальной и самостоятельной работы	36
Вопросы к практической работе	38
Практическое занятие № 6 Определение пористости и удельной поверхности катализаторов	38
Задачи для решения под контролем преподавателя	40
Задание для индивидуальной и самостоятельной работы	41
Вопросы к практической работе	43
Практическое занятие № 7 Седиментационный анализ дис-	43

персных наполнителей для композиционных материалов	
Задачи для решения под контролем преподавателя	44
Задание для индивидуальной и самостоятельной работы	46
Вопросы к практической работе	48
Практическое занятие № 8 Моделирование многослойного КМ в FEMAP	48
Библиографический список	54

## Введение43

Данные методические указания предназначены для создания необходимой теоретической и практической базы для восприятия и усвоения современных знаний в области теоретических основ химической технологии и их практических приложений (спецкурсы), вычленения роли и места научных исследований в подготовке молодых специалистов. Полученные навыки должны студенту правильно обосновать выбор метода измерения или анализа, удовлетворяющий требованиям точности, быстроты и экономичности выполнения анализа с учетом возможной величины погрешности измерения, а также показать эффективность использования методов высшей математики в решении практических вопросов.

Используемые в методических указаниях подходы действительны для формирования действительного моста между фундаментальными и технологическими дисциплинами в плане преемственности, подходов и использования достижений отдельных дисциплин при решении практических задач.

В методических указаниях приводятся практические работы для закрепления теоретических знаний по дисциплине

### Практическая работа №1

Количественная оценка степени разрушения элементов оборудования из металлов и сплавов при контакте с кислыми средами

Процессы спонтанного разрушения элементов оборудования можно оценивать по кинетическим кривым убыли массы металла, рассчитывая средние скорости разрушения металла в данных условиях.

Скорость разрушения (в мм/год) можно рассчитать по формуле

$$П = \frac{k}{\rho} \cdot 10^{-3},$$

где  $k$  – потеря массы ( $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$ );  $\rho$  - плотность металла,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

### Задачи для решения под контролем преподавателя

1. По полученным кривым разрушения металла (рис. 1)  $\Delta m = f(\tau)$  получить сведения о максимальной и средних скоростях разрушения металла  $W$  ( $\text{г}_{\text{МЕ}} / \text{кг}_{\text{МЕ}} \cdot \text{ч}$ ), используя данные, приведенные в табл.1.

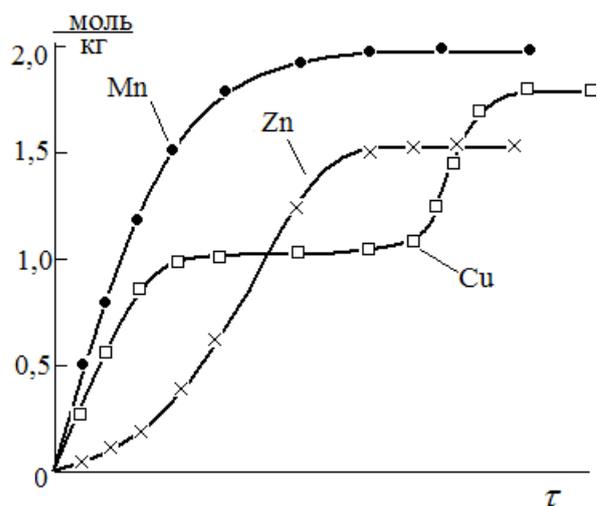


Рисунок 1 – Экспериментальные кривые разрушения металла

Таблица 1 – Некоторые характеристики процесса

Металл	марганец	цинк	медь
Максимальное время разрушения, мин	60	120	240
Масса загрузки, г	100	200	150
Масса металла в загрузке, г	12	20	50
Время для определения скорости (для всех Me)	1/4	1/3	1/2

2. По полученным кривым разрушения сплава (рис. 2), получить сведения об остаточной массе, если первоначальная масса сплава составляла 250 г.

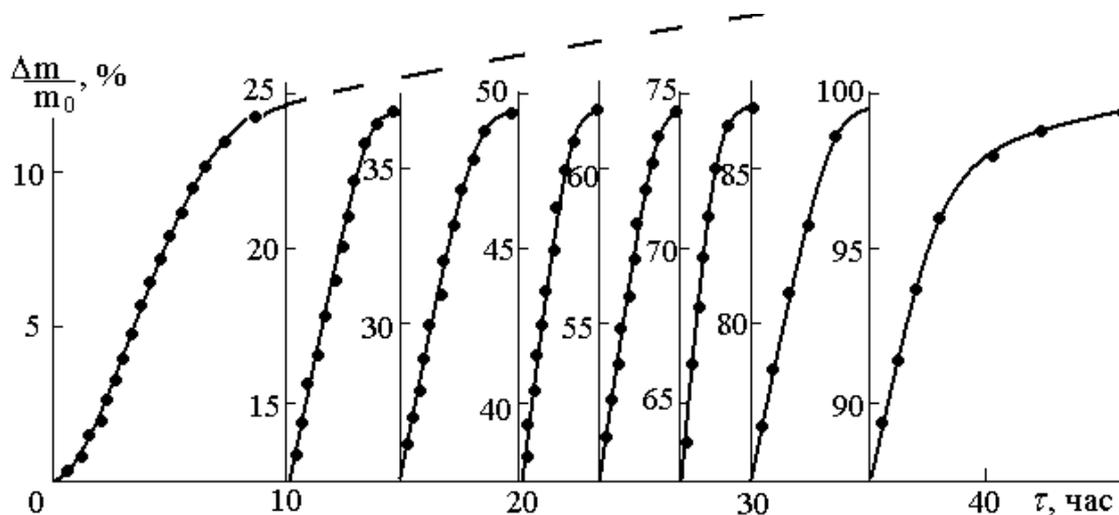


Рисунок 2 - Реализация процесса разрушения детали с многократным промежуточным удалением твердой фазы из реакционной смеси

3. По полученным кривым разрушения раздробленной меди (рис. 3) оценить влияние природы окислителя на скорость разрушения  $W$  ( $\text{моль}_{\text{ME}}/\text{кг}_{\text{ME}} \cdot \text{ч}$ ).

Построить круговую диаграмму оценки влияния природы присутствующего в системе окислителя через 1, 2, 3 и 4 часа от начала

процесса

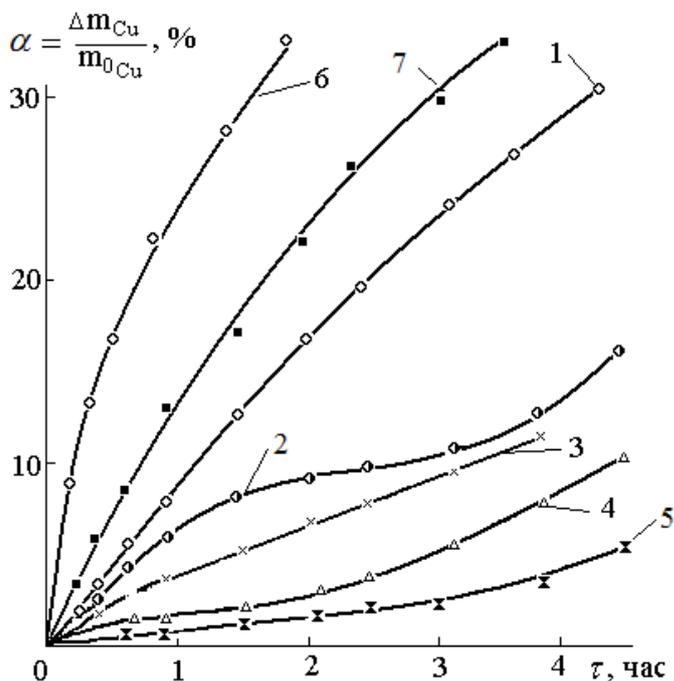


Рисунок 3- Кинетические кривых разрушения раздробленной меди в зависимости от природы присутствующего в системе окислителя:

1-  $\text{FeCl}_3$ ; 2 –  $\text{MnO}_2$ ; 3-  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ;  
4 -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\gamma$ -оксид); 5 –  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ;  
6- жидкая фаза (фильтрат) поз.2;  
7 - жидкая фаза (фильтрат  $\text{Fe}(\text{OCOCH}_3)_3$ )

4. По кинетическим кривым разрушения металла(сплава) (рис. 4) и данным о природе металла (сплава) (табл. 2) рассчитать средние скорости их разрушения  $W$ ,  $(\text{г}_{\text{Me(сплава)}}/\text{кг}_{\text{Me(сплава)}} \cdot \text{ч})$ , . Общее время

проведения процесса 300 мин (180 мин)

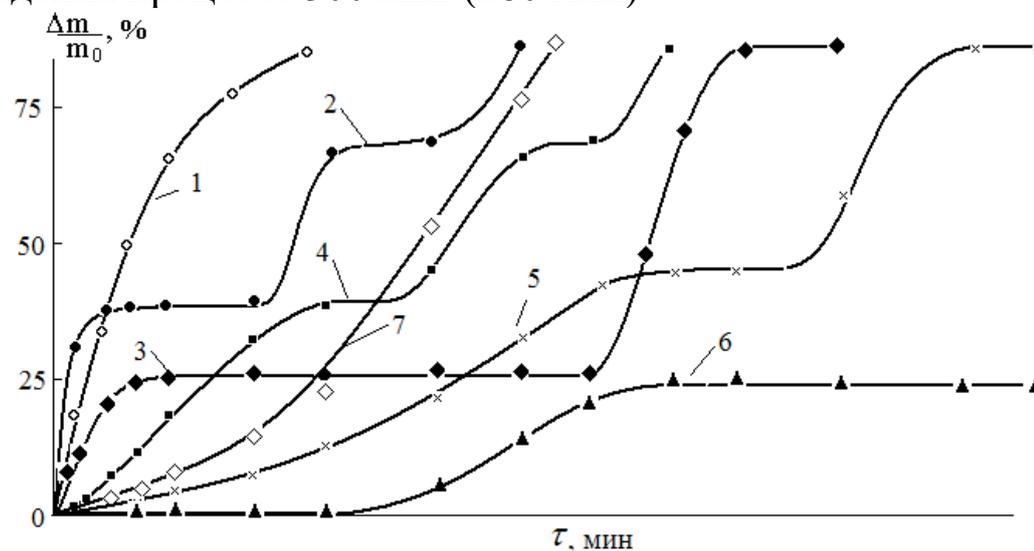


Рисунок 4 - Варианты кинетических кривых расходования металла (сплава) при окислении в системе с двумя окислителями

Таблица 2 - Природа металла (сплава) на кинетических кривых расходования

№	1	2	3	4	5	6	7
Металл (сплав)	марганец	цинк	бронза	латунь	олово	алюминий	оцинкованное железо

## Задание для индивидуальной и самостоятельной работы

1. По полученным экспериментальным данным разрушения стали Ст20 в растворах масляной кислоты при температуре кипения (рис. 5), рассчитать потерю массы в год ( $\text{г/м}^2 \cdot \text{год}$ ) и степень разрушения образца стали Ст20 (данные образца представлены в табл. 3) для всех указанных точек.

Таблица 3 – Данные разрушаемого образца (при расчете умножить на порядковый номер по списку)

№	Форма образца	Параметры образца стали Ст20				
		стороны, мм			высота, мм	радиус, мм
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>		
1	квадрат	120	-	-	-	-
2	прямоугольник	70	150	-	-	-
3	трапеция	50	30	-	40	-
4	прямоугольный треугольник	10	40	-	-	-
5	треугольник	41	55	50	-	-
6	равносторонний треугольник	16	-	-	-	-
7	параллелограмм	32	-	-	40	-
8	круг	-	-	-	-	38
9	правильный шестиугольник	16				

Средняя плотность конструкционной стали при комнатной температуре составляет  $7700 \dots 7900 \text{ кг/м}^3$ . По полученным данным построить зависимость  $\alpha = f(\tau)$ .

2. По полученным кривым разрушения металла (рис. 2), получить сведения об остаточной массе металла. Природа металла и его первоначальная масса представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Сведения о природе металла и его первоначальной массе

№	Природа металла	Масса, г	№	Природа металла	Масса, г
1	цинк	116	7	медь	222
2	алюминий	58	8	медь	78
3	медь	320	9	цинк	56
4	олово	145	10	алюминий	18
5	свинец	224	11	алюминий	12
6	марганец	67	12	олово	84

Определить среднюю скорость расходования  $W$  ( $\text{моль}_{\text{Me}} / \text{кг}_{\text{Me}} \cdot \text{ч}$ ) на каждом этапе.

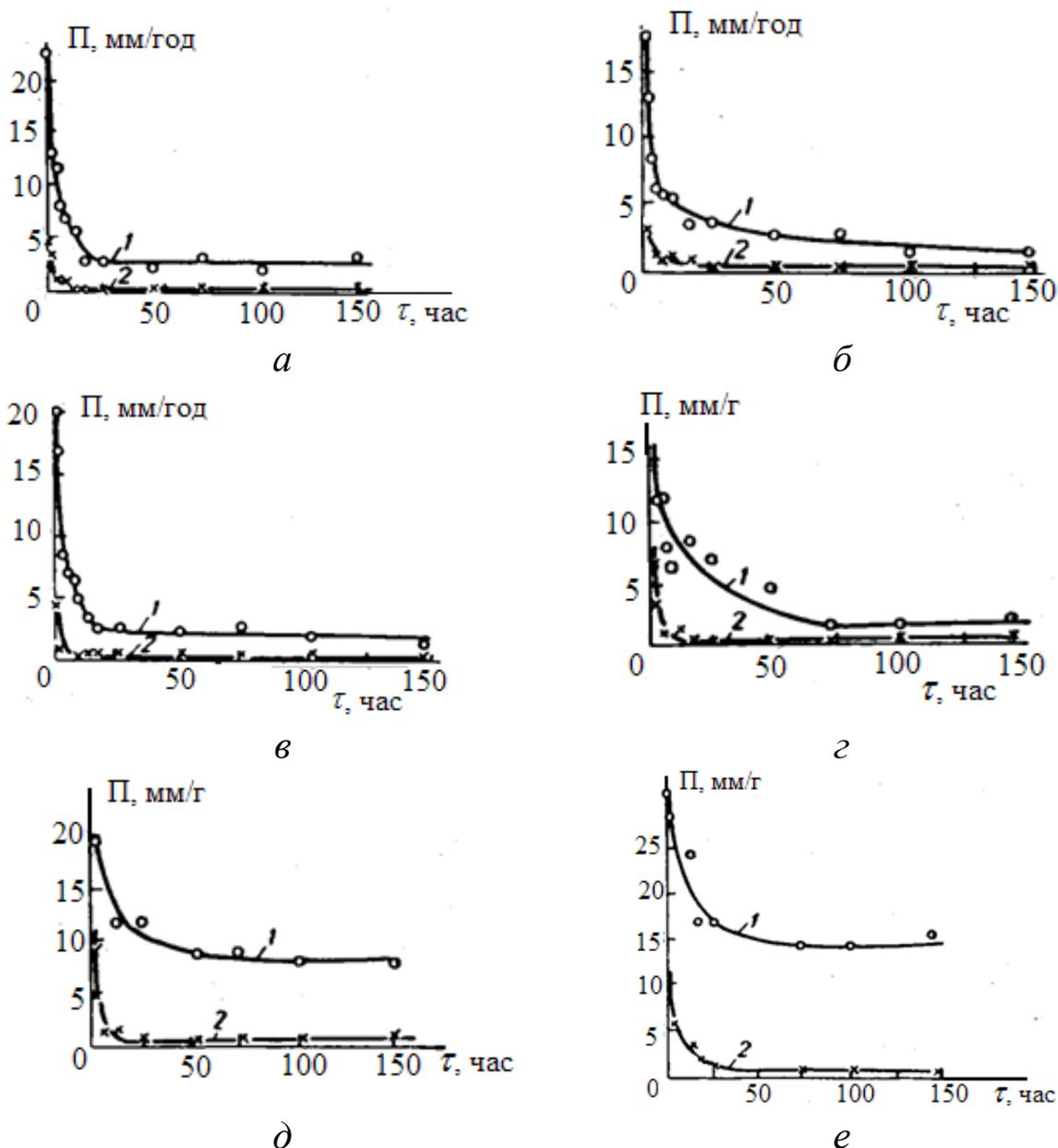


Рисунок 5 - Экспериментальные данные разрушения стали 20 в растворах масляной кислоты при температуре кипения (1 – в водных растворах; 2 – в масляных растворах);

3. По кинетическим кривым разрушения металлов (рис. 6) определить для 4-х произвольных интервалов времени:

- 1) скорость расходования  $W$ , ( $\text{моль}_{\text{МЕ}}/\text{кг}_{\text{МЕ}} \cdot \text{ч}$ );
- 2) скорость расходования  $W$ , ( $\text{г}_{\text{МЕ}}/\text{кг}_{\text{МЕ}} \cdot \text{мин}$ );
- 3) среднюю скорость расходования как среднее арифметическое из полученных значений;
- 4) сравнить полученные значения со значением скорости разрушения, полученным на момент прекращения процесса.

Сделать соответствующие выводы.

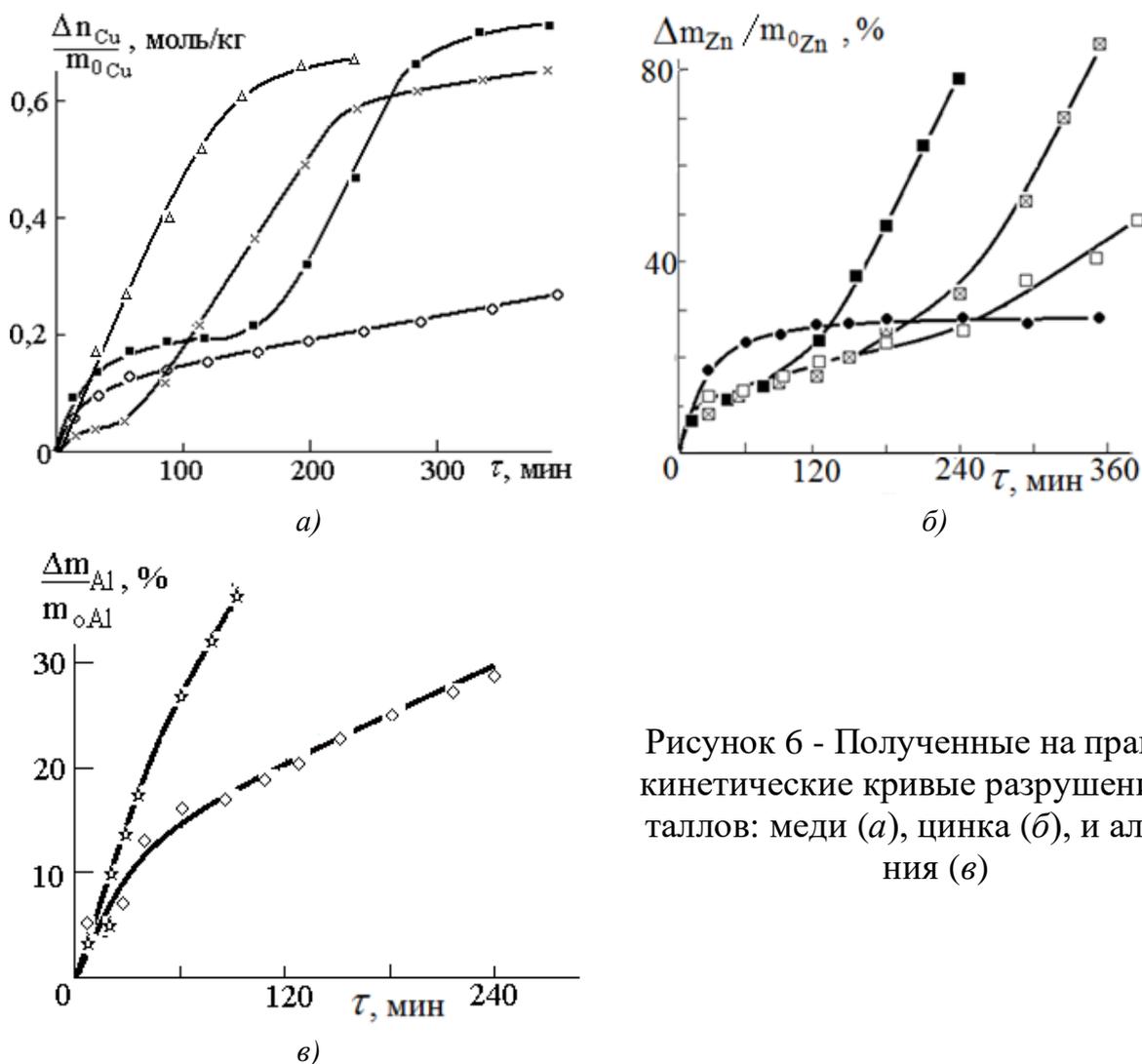


Рисунок 6 - Полученные на практике кинетические кривые разрушения металлов: меди (а), цинка (б), и алюминия (в)

4. По данным, представленным в табл.5, определить степень разрушения цинковой детали в данных условиях. Масса детали 58 г.

Таблица 5 – Влияние природы кислого реагента на характеристики разрушения цинка в водной фазе в бисерной мельнице ( $\tau=2,5$  часа)

Кислый реагент	$W_{ср},$ $\frac{\text{моль}}{\text{кгZn} \cdot \text{час}}$	Кислый реагент	$W_{ср},$ $\frac{\text{моль}}{\text{кгZn} \cdot \text{час}}$	Кислый реагент	$W_{ср},$ $\frac{\text{моль}}{\text{кгZn} \cdot \text{час}}$
Муравьиная	3,41	Фумаровая	0,60	н-Амиловый	0,67
Фтороводородная	3,07	Янтарная	0,56	Гидросульфат калия	1,13
Аминоуксусная	2,14	Салициловая	0,32		
Уксусная	1,21	Пропионовая	0,67	Гидросульфат натрия	0,93
Янтарная	1,17	Пропиловый	2,30	Гидрокарбонат натрия	0,56
Малеиновая	1,03	Метиловый	1,59		
Адипиновая	1,02	Этиловый	1,04	Гидросульфит натрия	0,42
Молочная	1,00	Фенол	0,88		
Трихлоруксусная	0,89	н-Бутиловый	0,79		
Ортофосфорная	0,70	и-Пропиловый	0,74		

## Вопросы к практической работе

1. Классификация металлов.
2. Объясните, какие свойства относятся к физическим?
3. Объясните, какие свойства относятся к механическим?
4. Какими показателями характеризуются: а) прочность; б) пластичность.
5. Какие свойства металлов относятся к технологическим? Приведите примеры.
6. Какие свойства металлов относятся к эксплуатационным? Приведите примеры.
7. Что такое твердость? Какие системы измерения твердости Вы знаете?
8. Методика расчета скорости разрушения металла в процессе механического разрушения.
9. Связь скорости разрушения металла со степенью разрушения металла.
10. Понятие о скорости разрушения металла и о средней скорости разрушения металла.
11. Методика получения кинетических кривых расходования металла на практике.

## Практическое занятие № 2

### Анализ диаграммы состояния железо – углерод

Цель занятия: научиться анализировать диаграмму состояния Fe-Fe<sub>3</sub>C и пользоваться ей для решения практических задач.

Задание:

1. Изучить диаграмму состояния «Fe-Fe<sub>3</sub>C» (рис. 7).
2. Перечертить диаграмму в рабочую тетрадь и привести расшифровки основных ее точек.
3. Перечислить основные фазы сплава и привести их краткую характеристику.
4. Привести в виде схемы структурную классификацию железоуглеродистых сплавов.
5. Сделать основные выводы по работе и подготовить устные ответы на контрольные вопросы.

Важнейшими конструкционными материалами являются железоуглеродистые сплавы.

Диаграмма железоуглеродистых сплавов является графическим изображением фазового и структурного состояния сплавов в зависимости от температуры и концентрации химических компонентов.

Наибольшее практическое значение имеет диаграмма состояния «железо-карбид железа», т. к. для большинства технических сплавов превращения реализуются по этой диаграмме. Карбид железа ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) называют цементитом, поэтому метастабильную диаграмму железоуглеродистых сплавов называют диаграммой состояния «железо-цементит» ( $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ ).

Главными компонентами железоуглеродистых сплавов являются железо и углерод.

Железо – пластичный металл сероватого цвета. Температура плавления –  $1539\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 7).

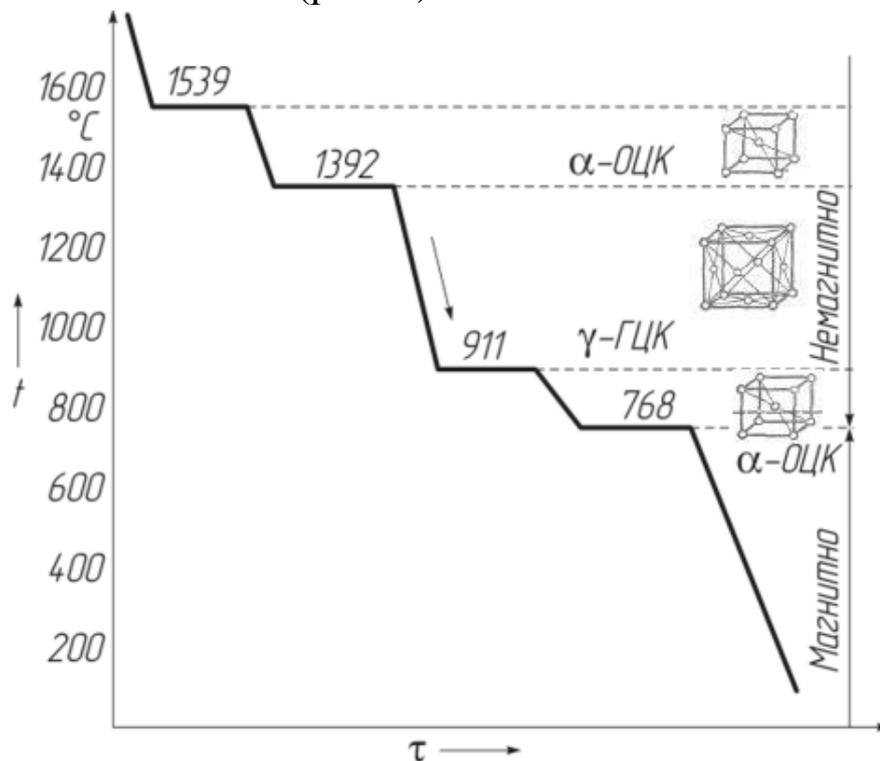


Рисунок 7 – Кривая охлаждения чистого железа

Железо имеет три полиморфные модификации  $\alpha$ ,  $\gamma$  и  $\delta$ . Модификация  $\alpha$  существует при температурах ниже  $911\text{ }^\circ\text{C}$ . Кристаллическая решетка  $\alpha$ -железа – объемно центрированный куб (ОЦК) с периодом решетки  $0,28606\text{ нм}$ . До температуры  $768^\circ\text{C}$   $\alpha$ -железо магнитно (ферромагнитно). Температуру  $768^\circ\text{C}$ , соответствующую магнитному превращению, т.е. переходу из ферромагнитного состояния в парамагнитное, называют точкой Кюри. Плотность  $\alpha$ -железа  $7,68\text{ Мг/м}^3$ .

Вторая модификация  $\gamma$ -железо (Fe $\gamma$ ) существует при температуре 911–1392 °С. Кристаллическая решетка – гранецентрированная кубическая (ГЦК) с периодом 0,3645 нм. В интервале 1392–1539 °С существует  $\delta$ -железо с кристаллической решеткой объемно центрированного куба (ОЦК) с периодом решетки 0,293 нм.

Температурные интервалы существования полиморфных модификаций железа ( $\alpha$  и  $\gamma$ ) показаны на кривой охлаждения чистого железа (рис. 7).

В системе железо – углерод различают следующие фазы: жидкий расплав, твердые растворы –  $\alpha$ -феррит,  $\delta$ -феррит и аустенит, а также цементит и графит. Фазы и структурные составляющие Fe-C сплавов представлены в таблице 6

Таблица 7- Фазы и структурные составляющие Fe-C сплавов

термин	Определение, характеристика
1	2
Углерод (и его модификации)	неметаллический элемент плотность 2,5 мг/м <sup>3</sup> , T <sub>пл</sub> =3500 °С, атомный радиус 0,077 нм. В обычных условиях находится в виде графита.
Феррит (Ф)	твердый раствор углерода и других примесей в ОЦК-железе ( $\alpha$ -железе). Атом С располагается в решетке феррита в центре грани куба, где помещается сфера радиусом 0,031 нм, а также в дефектах кристаллической решетки. Ф. существует в сплавах при T ниже 727 °С. При 727 °С Ф. содержит 0,02% С, при 20 °С 0,006% С. Под микроскопом Ф выявляется в виде однородных полиэдрических (многогранных) зерен. Твердость и прочность феррита невысоки.
Аустенит (А)	твердый раствор углерода и других примесей в $\gamma$ -железе. А. существует в сплавах при температурах выше 727 °С. При 727 °С А. содержит 0,8% С, при 1147 °С 2,14% С. Атом углерода располагается в центре куба, в котором может разместиться сфера радиусом 0,051 нм, и в дефектных областях кристалла.
Цементит (Ц)	химическое соединение железа с углеродом – карбид железа Fe <sub>3</sub> C, содержащий 6,67% С. Цементит имеет сложную ромбическую решетку с плотной упаковкой атомов. Температура плавления цементита точно не определена (около 1260 °С). К характерным особенностям цементита относятся высокая твердость и очень малая пластичность
Графит (Гр)	имеет гексагональную слоистую кристаллическую решетку. Межатомные расстояния в слоях небольшие (0,142 нм), расстояние между плоскостями – 0,340 нм. Гр мягок, обладает низкой прочностью.

Продолжение табл. 7

1	2
Ледобурит (Л)	$L = A + Ц$ - механическая смесь аустенита и цементита (эвтектика). Л. содержит 4,3% С, при T ниже 727 °С распадается на перлит и цементит
Перлит (П)	$P = Ф + Ц$ механическая смесь феррита и цементита(эвтектика). П. содержит 0,8% С, имеет постоянный фазовый состав: $P = 0,88Ф + 0,12Ц$

Кристаллические структуры цементита и аустенита близки, тогда как кристаллические структуры аустенита и графита существенно различны. По составу аустенит и цементит ближе друг к другу и составу жидкой фазы, чем аустенит и графит (аустенит содержит до 2,14% С, цементит – 6,67% С, жидкая фаза – от 2,14 до 6,67% С, графит – 100% С. Поэтому образование цементита из жидкости или из аустенита происходит легче, работа образования зародыша, как и необходимые диффузионные изменения, меньше в случае кристаллизации цементита, чем при кристаллизации графита, несмотря на меньший выигрыш свободной энергии.

Диаграмма состояния «железо-цементит» в равновесном состоянии, т.е. при медленном охлаждении, когда в сплавах успевают произойти диффузионные процессы представлена на рис. 8.

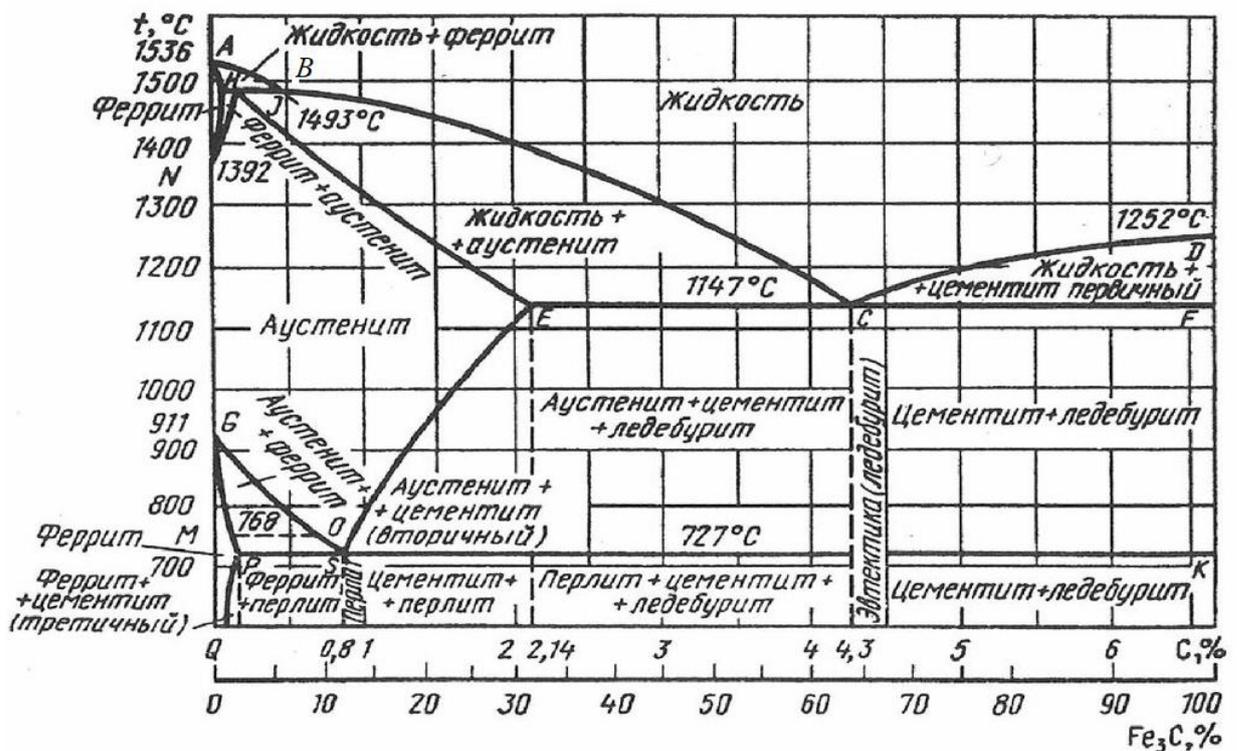


Рисунок 8 – Фазовая диаграмма состояния «Fe-Fe<sub>3</sub>C»

Оси диаграммы состояния: ось абсцисс имеет двойную маркировку: в массовых долях углерода (0-6,67%); в массовых долях цементита (0-100%), ось ординат промаркирована в градусах Цельсия (600-1539°C).

Начало оси ординат диаграммы состояния со значением температуры 600 градусов связано с тем, что до 600°C в Fe-C сплавах не наблюдаются фазовые превращения.

Линии диаграммы состояния представлены в таблице 8.

Таблица 8 - Линии диаграммы состояния

№	Линии диаграммы	Состояние (название)
1	ABCD	ликвидус
2	АНЕССF	солидус
3	HN, JN, GS, GP	перекристаллизация (полиморфные превращения)
4	HJB	перитектическое
5	ECF	эвтектическое
6	PSK	эвтектоидное состояние, линия перлитного превращения. При охлаждении – конец распада А с образованием эвтектоида, т.е. П. При нагревании – начало образования А.
7	CD	линия первичного цементита (Ц <sub>I</sub> ), выделяющегося непосредственно из жидкости при высоких температурах и имеющего крупнокристаллическое строение
8	ES	линия, на которой при нагревании заканчивается растворение вторичного цементита (Ц <sub>II</sub> ), в аустените, а при охлаждении из А. выделяется вторичный Ц.
9	PQ	линия третичного цементита (Ц <sub>III</sub> ), выделяющегося из Ф. при сравнительно низких Т в виде мелкозернистых отдельных включений внутри зерен Ф;
10	DFK	линия Ц., соответствующая постоянному содержанию углерода 6,67% как химическое соединение
11	MO	температура точки Кюри (768 °С). При нагревании ферромагнитный Ф. превращается в парамагнитный, а при охлаждении – наоборот.
12	GOS	линия, на которой при нагревании заканчивается растворение Ф. в А., а при охлаждении из А. выделяются зерна Ф.

Три горизонтальные линии HJB, ECF и PSK указывают на протекание трех превращений при постоянной температуре. При 1499 °С (горизонталь HJB) происходит перитектическая реакция



в результате реакции образуется аустенит.

При 1147 °С (горизонталь ECF) протекает эвтектическая реакция



(жидкость, состав которой соответствует точке С, превращается в эвтектическую смесь аустенита, состав которого соответствует точке Е, и цементита, называемую ледебуритом).

При 727 °С (горизонталь PSK) протекает эвтектоидная реакция



(в отличие от эвтектики, образующейся из жидкости, эвтектоид возникает из твердых фаз). Продукт превращения – эвтектоидная смесь феррита и цементита, называемая перлитом.

Однофазные области диаграммы Fe – Fe<sub>3</sub>C: жидкий расплав – выше линии ABCD, феррит (Φ) – области ANH и GPQ, аустенит (A) – область JESGN.

Двухфазные области диаграммы:

АНВ – в равновесии находится жидкий расплав и кристаллы δ – феррита,

NHJ – в равновесии кристаллы δ – феррита и аустенита,

JECB – в равновесии жидкий расплав и кристаллы аустенита,

CDF – в равновесии жидкий расплав и кристаллы цементита,

SECFK – в равновесии кристаллы аустенита и цементита,

GSP – в равновесии кристаллы аустенита и α – феррита,

QPSKL – в равновесии кристаллы α – феррита и цементита.

Узловые точки представлены в таблице 9.

Таблица 9 - Узловые точки диаграммы состояния системы Fe— Fe<sub>3</sub>C

точка	t, °С	C, %	Значение точки
1	2	3	4
A	1539	0	Плавление (кристаллизация) чистого железа
N	1392	0	Полиморфное превращение δ ↔ γ в чистом железе
G	911	0	Полиморфное превращение α ↔ γ в чистом железе
H	1499	0,1	δ-твердый раствор, предельно насыщенный углеродом. Участвует в перитектическом превращении
J (I)	1499	0,16	Аустенит, возникающий в результате перитектического превращения
B	1499	0,51	Жидкая фаза, участвующая в перитектическом превращении
D	1260	6,67	Предполагаемая температура плавления Fe <sub>3</sub> C

Продолжение табл. 9

точка	t, °С	C, %	Значение точки
E	1147	2,14	Аустенит, предельно насыщенный углеродом
C	1147	4,3	Жидкая фаза, испытывающая эвтектическое превращение
F	1147	6,67	–
P	727	0,02	Феррит, предельно насыщенный углеродом
S	727	0,8	Аустенит, испытывающий эвтектоидное превращение
K	727	6,67	–
Q	20	0,006	Феррит, предельно насыщенный углеродом
L	500	6,67	Нижний конец вертикали цементита

Существует классификация железоуглеродистых сплавов в зависимости от содержания углерода:

- сплавы, содержащие менее 0,02% углерода - технически чистое железо, или феррит
- свыше 0,02% до 2.14 % - углеродистые стали
- свыше 2.14 % до 6,67% - углеродистые чугуны

Таким образом, основным отличием чугунов от сталей является наличие эвтектики - ледебурита. Эвтектоид (перлит) присутствует как в чугунах, так и в сталях. В техническом железе отсутствуют обе двухфазные составляющие - перлит и ледебурит.

По отношению к эвтектоиду стали подразделяют на следующие классы:

- 0,8% углерода - эвтектоидная сталь
- от 0,02 до 0,8% - доэвтектоидные стали
- свыше 0,8% до 2,14% - заэвтектоидные стали

По отношению к эвтектике чугуны подразделяют на следующие классы:

- 4,3% углерода- эвтектический чугун
- от 2,14 до 4,3% - доэвтектические чугуны
- от 4.3% до 6,67% - заэвтектические чугуны

Структурная классификация железоуглеродистых сплавов и варианты их применения приведены в таблице 10.

Диаграмма состояния даёт возможность не только провести анализ фазового состояния, но и определить состав и количественное соотношение фаз при любой температуре. Это осуществляется с помощью двух правил: концентраций и отрезков.

Правило концентраций: чтобы определить концентрацию

компонентов в фазах, через данную точку, характеризующую состояние сплава, проводят горизонтальную линию до пересечения с линиями, ограничивающими данную область; проекция точек пересечения на ось концентраций показывает состав фаз.

Таблица 10- Структурная классификация железоуглеродистых сплавов

Содержание углерода, %	Название сплава	Структура при комнатной температуре	применение
0,006 - 0,02	Техническое железо	$\Phi + \text{Ц}_{\text{III}}$	Сердечники трансформатора
0,02-0,8	Доэвтектоидная сталь	$\Phi + \text{П}$	Полуфабрикаты для деталей машин и конструкций
0,8-2,14	Заэвтектоидная сталь	$\text{П} + \text{Ц}_{\text{II}}$	Режущий, деформирующий и измерительный инструмент
2,14 – 4,3	Доэвтектический (конструкционный) чугун	1. Ферритная $\Phi + \text{Гр}$ 2. Ферритно-перлитная $\Phi + \text{П} + \text{Гр}$	Фасонные отливки
4,3-6,67	Заэвтектический чугун	$(\text{П} + \text{Ц}) + \text{Ц}_{\text{I}}$	Исследовательские сплавы
Ц <sub>I</sub> , Ц <sub>II</sub> , Ц <sub>III</sub> – первичный, вторичный и третичный цементит			

Правило отрезков (рычага): чтобы определить количественное соотношение фаз, через заданную точку проводят горизонтальную линию; отрезки этой линии между заданной точкой и точками, определяющими составы фаз, обратно пропорциональны количествам этих фаз.

### Задачи для решения под контролем преподавателя

1. Построить кривую кристаллизации железоуглеродистого сплава I - доэвтектоидная сталь (0,02 - 0,80 % C) (рис. 9).

Решение:

При температурах выше точки 1 - система однофазна и находится в жидком состоянии (L).

В диапазоне 1-2 - происходит кристаллизация аустенита из жидкого расплава:  $L \rightarrow \gamma$ .

В интервале температур 2-3 происходит простое охлаждение аустенита  $\gamma$ .

В интервале 3-4 по линии GS начинается перекристаллизация аустенита в феррит:  $\gamma \rightarrow \alpha$ .



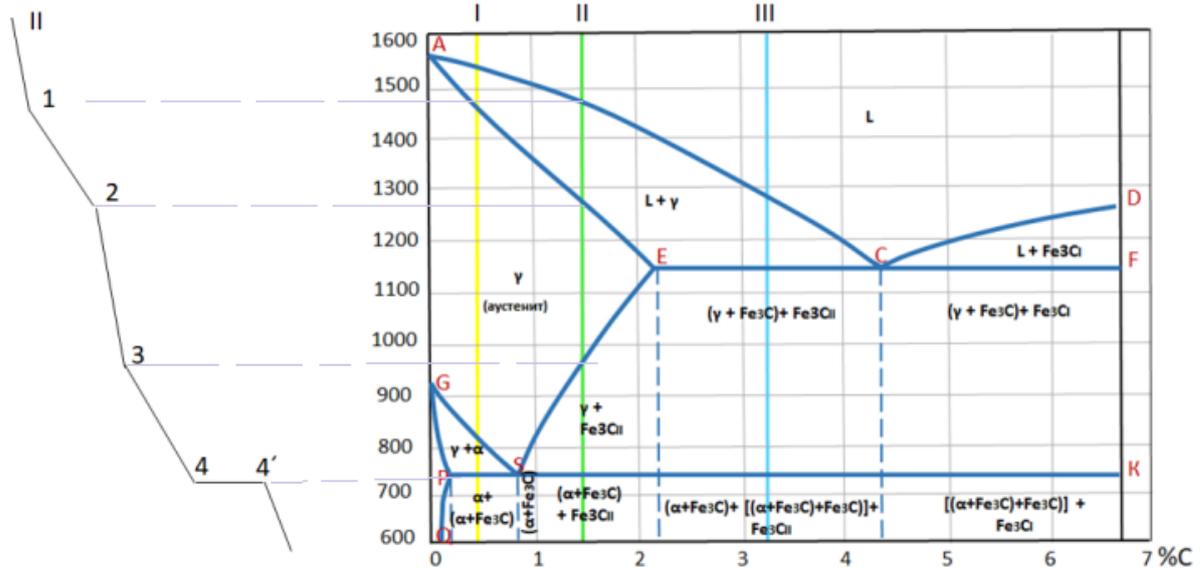


Рисунок 10 – Схема процесса кристаллизации сплава II и построение кривой плавления

В отличие от рассмотренных сплавов I и II в эвтектоидной стали не происходит перекристаллизация аустенита, и конечная структура состоит из зерен перлита.

3. Построить кривую кристаллизации железоуглеродистого сплава III - доэвтектического чугуна ((2,14 - 4,31 % C)).

Решение:

При температурах выше точки 1 - система однофазна и находится в жидком состоянии (L) (рис. 11).

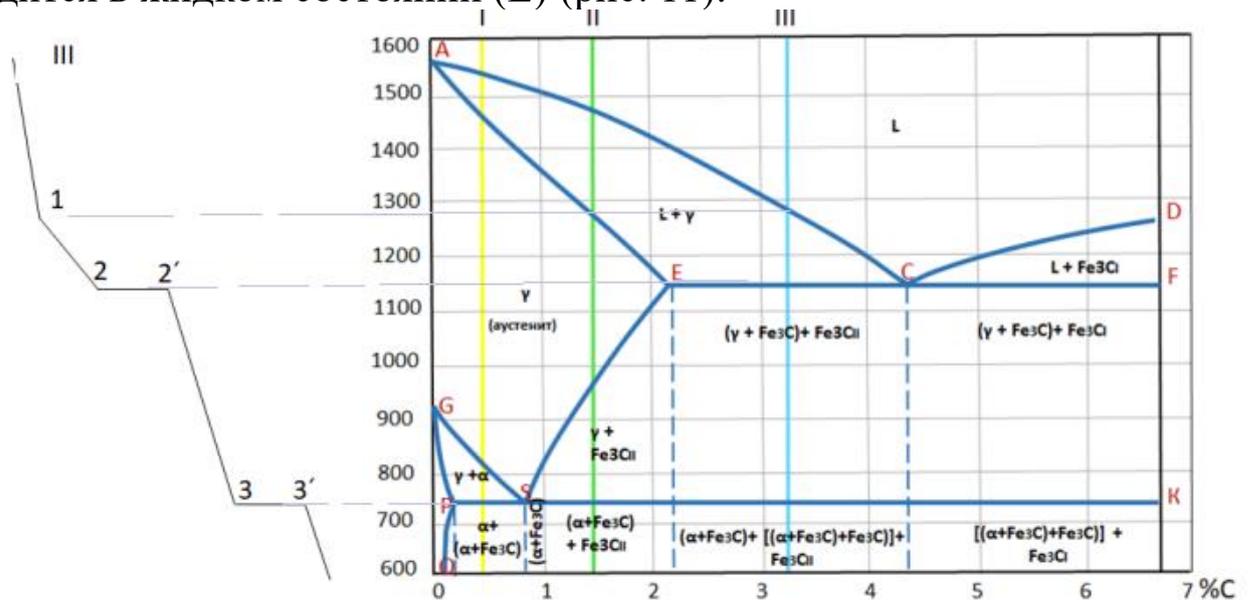


Рисунок 11 – Схема процесса кристаллизации сплава III и построение кривой плавления

В диапазоне 1-2 - происходит кристаллизация аустенита из

жидкого расплава:  $L \rightarrow \gamma$ .

В диапазоне 2- 2' из оставшегося жидкого расплава образуется эвтектика - ледебурит:  $L \rightarrow \gamma + Fe_3C$  (\*образовавшийся ледебурит из жидкой фазы называют высокотемпературным, он состоит из аустенита и цементита).

В интервале 2'-3 из аустенита начинает выделяться углерод в виде цементита вторичного:  $\gamma + Fe_3C_{II}$ .

В точках 3-3' происходит перлитный распад аустенита всех существующих в этот момент структур (т.е. вместо  $\gamma$  записываем  $(\alpha + Fe_3C)$ ):  $(\alpha + Fe_3C) + [(\alpha + Fe_3C) + Fe_3C] + Fe_3C_{II}$  (\*в квадратных скобках - низкотемпературный ледебурит, состоящий из перлита и цементита)

Конечная структура доэвтектических чугунов состоит из зерен перлита, вторичного цементита и включений низкотемпературного ледебурита. Ниже точки 3' происходит простое остывание данной структуры.

### Задание для индивидуальной и самостоятельной работы

1 Получить у преподавателя данные контрольных сплавов для описания (таблица 11).

Таблица 11 – Варианты контрольных сплавов

№	C, %	№	C, %	№	C, %	№	C, %
1	0,4	7	0,9	13	0,55	19	1,6
2	1,5	8	1,4	14	1,9	20	0,15
3	3,2	9	2,6	15	1,2	21	4,1
4	4,6	10	5,3	16	4,7	22	5,6
5	5,8	11	2,9	17	2,5	23	4,0
6	0,08	12	1,7	18	0,7	24	2,0

2 Подробно описать изменение структуры при медленном охлаждении контрольного сплава.

3 Подробное описание изменений структуры при медленном охлаждении контрольного сплава

### Вопросы к практической работе

1. Что такое феррит?
2. Что такое аустенит?
3. Что такое цементит?
4. Что такое ледебурит?

5. Что такое перлит?
6. Что такое техническое железо?
7. Что такое доэвтектоидная сталь?
8. Что такое заэвтектоидная сталь?
9. Что такое доэвтектический чугун?
10. Что такое заэвтектический чугун?
11. Назовите фазовый состав доэвтектоидной стали.
12. Назовите фазовый состав заэвтектоидной стали.
13. Назовите фазовый состав доэвтектического чугуна.
14. Назовите фазовый состав заэвтектического чугуна.

### **Практическое занятие № 3**

#### **Микроанализ стали**

Выявление микроструктуры металлов основано на неравномерном растворении в реактиве структурных составляющих. В чистом металле границы зерен растравливаются сильнее, чем тело зерна. В результате на границах зерен после травления образуются углубления, которые рассеивают (гасят) лучи света, и потому при рассмотрении структуры под микроскопом они наблюдаются в виде темных линий. Микроанализ основан на использовании законов отражения и поглощения световых лучей от поверхности непрозрачных металлических материалов. Полированная металлическая поверхность отражает направленные на нее перпендикулярно световые лучи и видна в окуляр микроскопа как светлая. При наличии в материале неметаллических составляющих структуры они видны как темные, так как поглощают световые лучи.

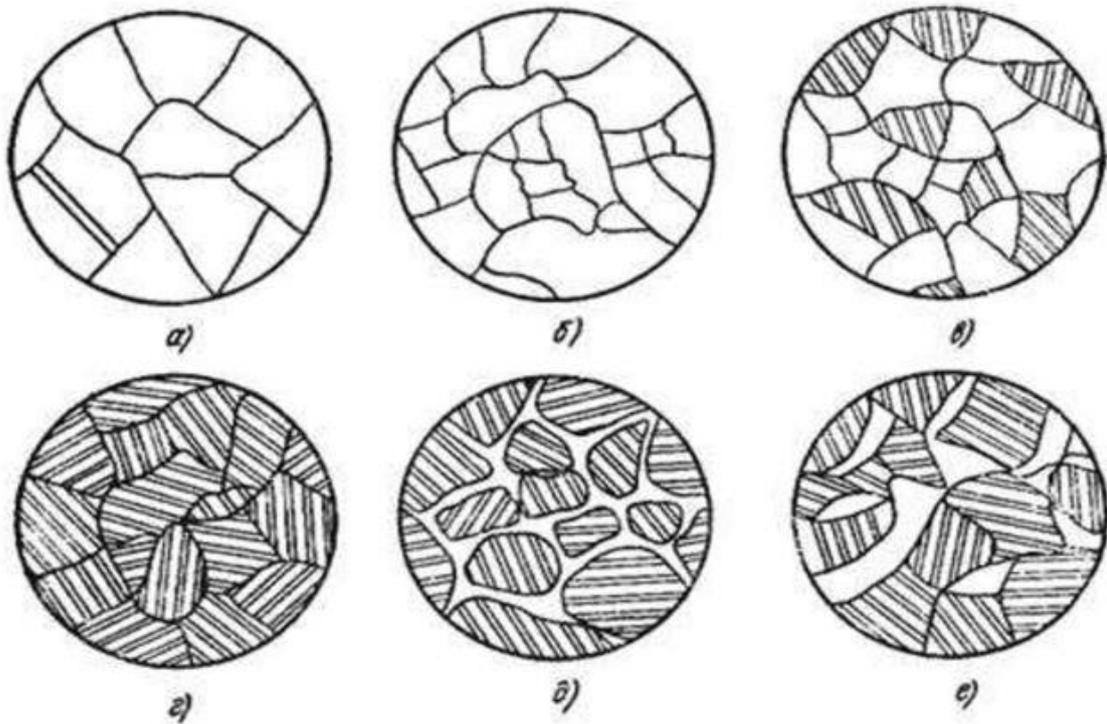
Микроанализ - изучение строения поверхностей шлифованных, полированных и протравленных образцов - микрошлифов с помощью металлографических оптических микроскопов при увеличениях обычно от 100 до 1000.

Наблюдаемое при этом строение поверхности шлифа называется микроструктурой. Микроструктура разных по химическому составу материалов и после их различной обработки отличается по размеру, геометрической форме, цвету, взаимному расположению отдельных структурных составляющих.

В сплавах неоднородные структурные составляющие также обладают неодинаковой растворимостью и потому на поверхности шлифа образуется определенный рельеф разной глубины. Более

глубоко протравленные (вытравленные) участки шлифа дают больше рассеянных лучей и выглядят в микроскопе более темными

Многочисленные стали разных марок, отличающиеся химическим составом, по микроструктуре различаются (рис. 12, табл. 12).



А - А; б - Ф; в - Ф + П; г - П; д, е - П + Ц

Рисунок 12 – Пример микроструктуры сталей

Микроанализ позволяет проводить не только качественное изучение структуры материала, но и количественную оценку структурных составляющих. Можно измерить величину зерна, глубину слоя. Структура характеризуется фазовым составом, размерами и формой кристаллитов (зерен), их взаимным расположением и неизбежными дефектами.

### Задачи для решения под контролем преподавателя

1. Если шлиф углеродистой стали хорошо приготовлен, то микроструктурным анализом можно определить содержание в стали углерода. Такие определения фактически выполняют только для доэвтектоидных сталей, так как в заэвтектоидных сталях значительное изменение в содержании углерода мало и почти незаметно изменяет микроструктуру.

Таблица 12 - Перечень микрошлифов сталей ( типовые примеры)

материал	C, %	структура	Описание микроструктуры
Углеродистая качественная конструкционная сталь	0,20	Доэвтектоидная сталь	Светлые зерна Ф и темные участки перлита
Инструментальная нелегированная сталь У8	0,80	Эвтектоидная сталь	П пластинчатый
Инструментальная нелегированная сталь У8 после отжига	0,80	Эвтектоидная сталь	П зернистый
Инструментальная нелегированная сталь У10	1,00	Заэвтектоидная сталь	Темные участки П и светлая сетка Ц <sub>II</sub>
Сталь конструкционная после перегрева	0,4	Доэвтектоидная сталь	Крупные черные участки П и светлая широкая сетка Ф
Сталь конструкционная с полосчатостью Ф-П структуры	0,25	Доэвтектоидная сталь	П и Ф в виде чередующихся полос
Сталь инструментальная с обезуглероживанием поверхностного слоя	0,80	Эвтектоидная сталь	П в сердцевине, Ф и П в поверхностном слое
Легированная конструкционная сталь 40Х	0,40	Доэвтектоидная сталь	Темные участки П и светлый Ф
Инструментальная легированная сталь	2,0		П мелкозернистый, крупные белые первичные карбиды и более мелкие вторичные карбиды
Коррозионностойкая сталь 12Х17	<0.12	Сталь ферритного класса	Светлые зерна легированного Ф
Коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т	<0.12	Сталь аустенитного класса	Светлые зерна легированного А

Определить примерное содержание углерода в доэвтектоидной стали по структуре не сложно. Для этого на рисунок структуры доэвтектоидной стали надо наложить сетку из равномерно расположенных точек (рис. 13) (можно использовать точки пересечения линий линованной бумаги, на которой нарисована структура).

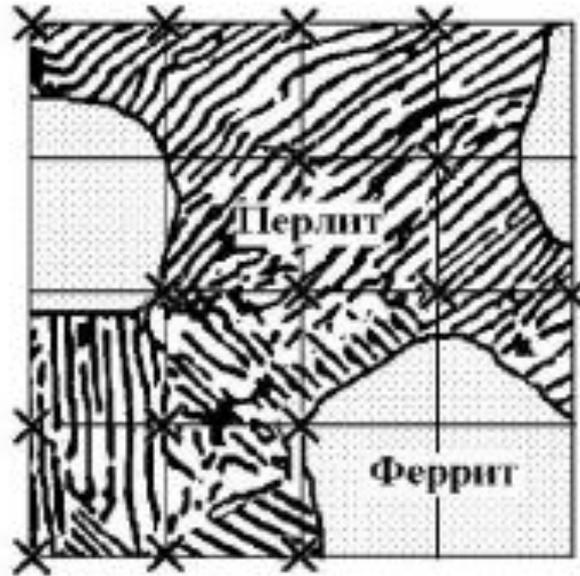


Рисунок 13 - Схема содержания углерода в доэвтектоидной стали по ее структуре

Сначала подсчитывают общее число точек  $N_0$ , попавших на рисунок, затем количество из них – на перлитных зернах  $N_{\Pi}$ . Долю перлита в структуре определяют по формуле

$$F_{\Pi} = \frac{N_{\Pi}}{N_0} \cdot 100\%$$

Общее число точек на структуре на рис. 3 равно 25. Из них на перлит попало – 16 точек (показаны крестиками). Тогда доля перлита в структуре доэвтектоидной стали составит:

$$F_{\Pi} = \frac{16}{25} \cdot 100\% = 64\%$$

Остальное – безуглеродистый феррит (с точностью до 0,001 % C).

Рассмотрим пропорцию:

- если в стали содержится 100 % перлита – в ней 0,8 % углерода;

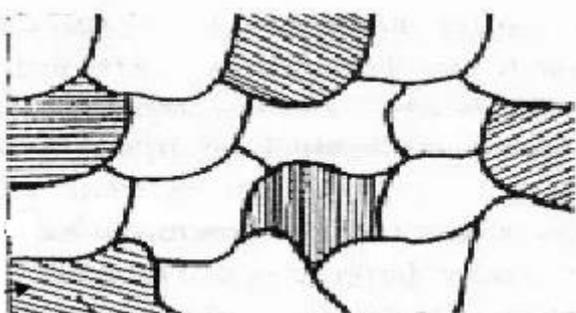
- если в стали содержится 64 % перлита – в ней X % углерода.

Тогда содержание углерода в доэвтектоидной стали

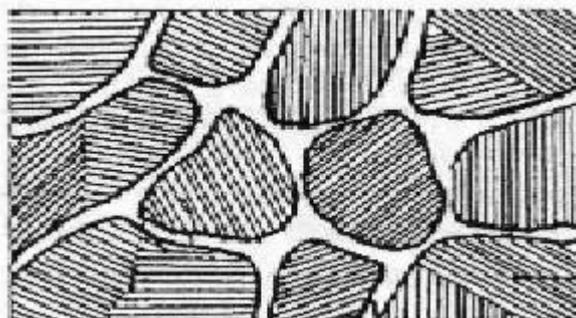
$$X_C = \frac{0,8F_{\Pi}}{100} = \frac{0,8 \cdot 64}{100} = 0,51\%C$$

### Задание для индивидуальной и самостоятельной работы

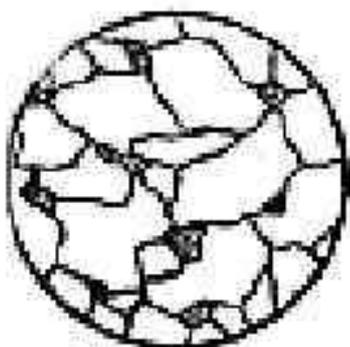
Определить содержание углерода в образцах (рис.14, 15)



1



2



3



4



5



5

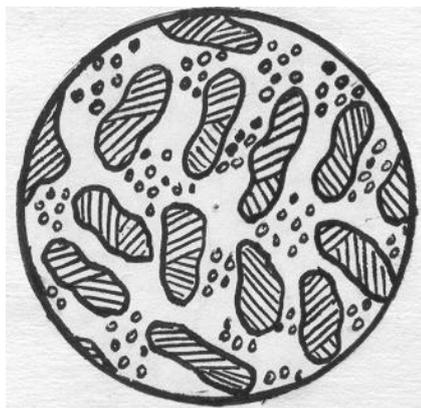


6

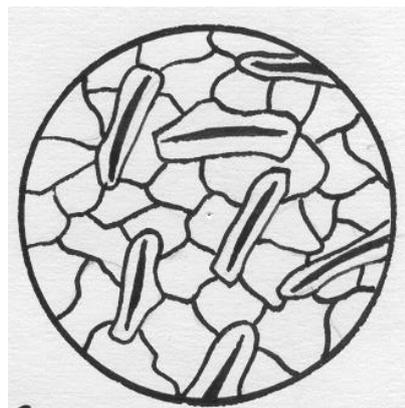


6

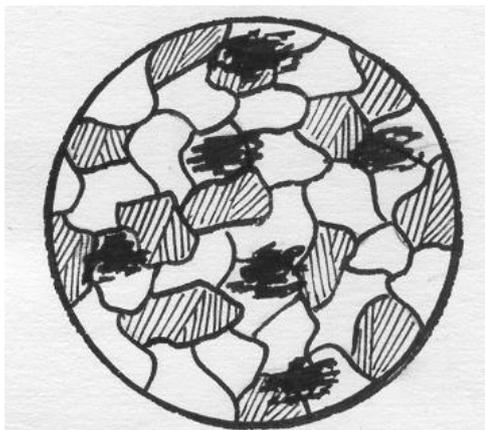
Рисунок 13 - Задание для определения содержания углерода в образцах



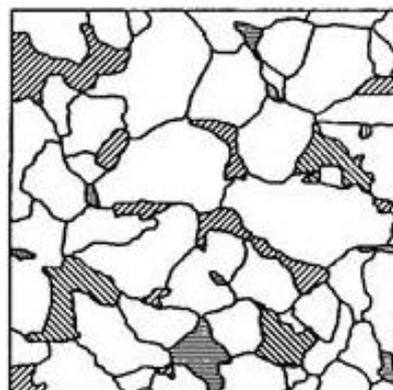
7



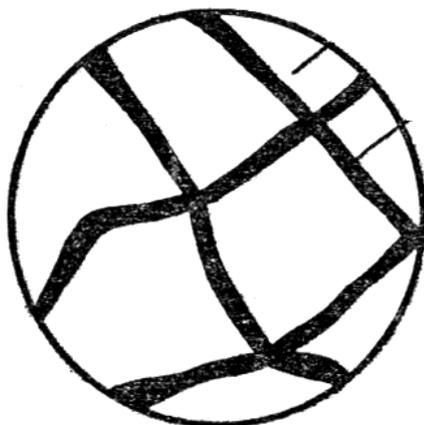
8



9



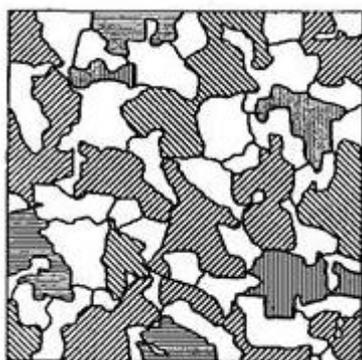
10



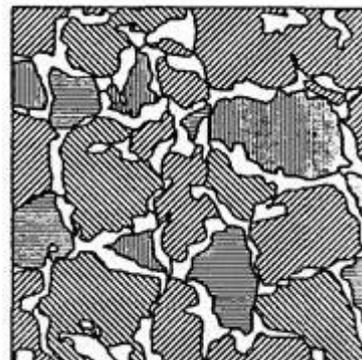
11



12



13



14

Рисунок 14 - Задание для определения содержания углерода в образцах

## Вопросы к практической работе

1. Понятие микроанализа и микроструктуры материалов.
2. Что представляют собой феррит, цементит, перлит, ледебурит?
3. Какие структурные классы имеют стали? Применение и механические свойства сталей.
4. Какие классы стали (по содержанию углерода) вы знаете? В чем их отличие друг от друга?
5. Сколько углерода в заэвтектоидной стали? Какую структуру она имеет в равновесном состоянии?
6. Метод определения примерного количества углерода в стали.
7. Метод определения размера зерен в стали
8. Сущность микроанализа. Основные стадии приготовления микрошлифов.
9. Изобразите графически структурные составляющие железоуглеродистых сплавов.
10. Какова форма графита в сером, ковком и высокопрочном чугунах и как зависят механические свойства чугунов?
11. Какова форма графита в доэвтектоидной стали? Какую структуру она имеет в равновесном состоянии?
12. Сколько углерода в эвтектоидной стали? Какую структуру она имеет в равновесном состоянии?
13. Как классифицируются белые чугуны по структуре в зависимости от содержания углерода?
14. Охарактеризуйте кривые охлаждения чугунов.
15. Как классифицируются серые чугуны в зависимости от формы графитных включений и структуры металлической основы?
16. Каковы области применения белого, серого, высокопрочного и

## Практическое занятие № 4

### Изучение диаграмм состояния сплавов

Фазы, присутствующие в сплавах, устойчивы в определенном диапазоне температур и концентраций. При изменении температуры, давления, химического состава сплава его фазовый состав может измениться. Закономерность изменения числа фаз определяется правилом фаз. Области стабильного существования фаз и температуры фазовых превращений представлены на диаграмме состояния. Диаграммы состояния строят экспериментально или рассчитывают.

Имея диаграмму состояния сплава и применяя правило фаз, можно построить кривые охлаждения любого сплава данной системы.

### Задачи для решения под контролем преподавателя

1. Описать все превращения по диаграмме (рисунок 15) (название диаграммы, описание всех точек, линий, фаз и структур). Определить с помощью правила отрезков структуру сплава с 20% В при  $T = 400^\circ\text{C}$ ; химический состав сплава по структуре  $Q_\beta = 33\%$ ,  $Q_\alpha = 67\%$  при  $T = 200^\circ\text{C}$ . Определить химический состав найденных и заданных фаз. Начертить кривую охлаждения для сплава содержащего 15% В. Определить число степеней свободы для сплава с 30% В при  $T = 300^\circ\text{C}$

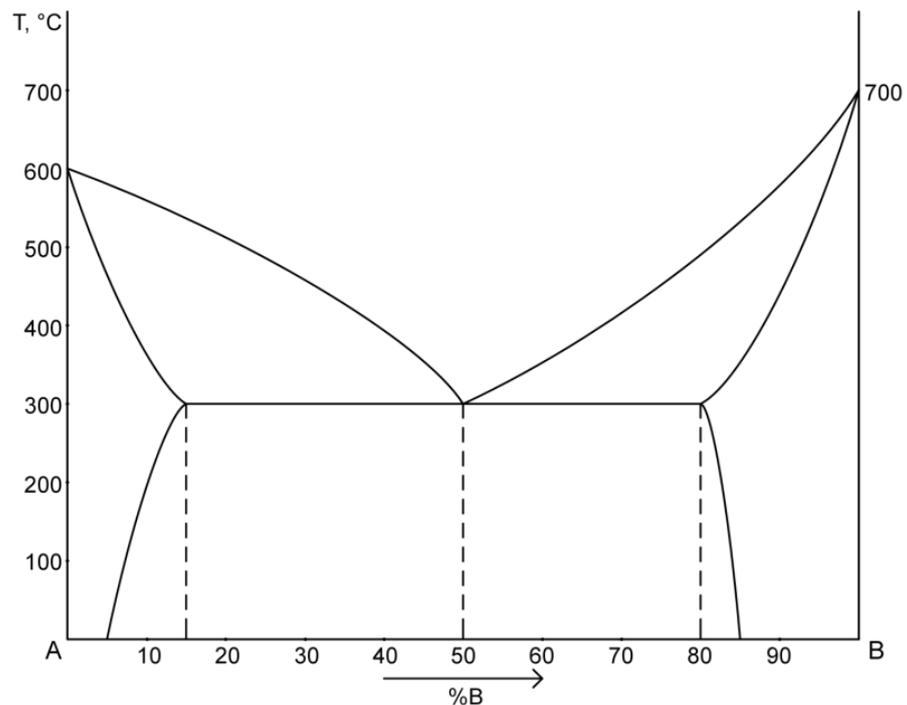


Рисунок 15 – Фазовая диаграмма

2. Описать все превращения по диаграмме (рисунок 16) (название диаграммы, описание всех точек, линий, фаз и структур). Определить с помощью правила отрезков:

- 1) структуру сплава с 30% В при  $T = 200^\circ\text{C}$ ;
- 2) химический состав сплава по структуре  $Q_\beta = 40\%$ ,  $Q_\alpha = 60\%$  при  $T = 300^\circ\text{C}$ ;
- 3) химический состав найденных и заданных фаз.

Начертить кривую охлаждения для сплава содержащего 90% В. Определить число степеней свободы для сплава с 10% В при  $T = 300^\circ\text{C}$ .

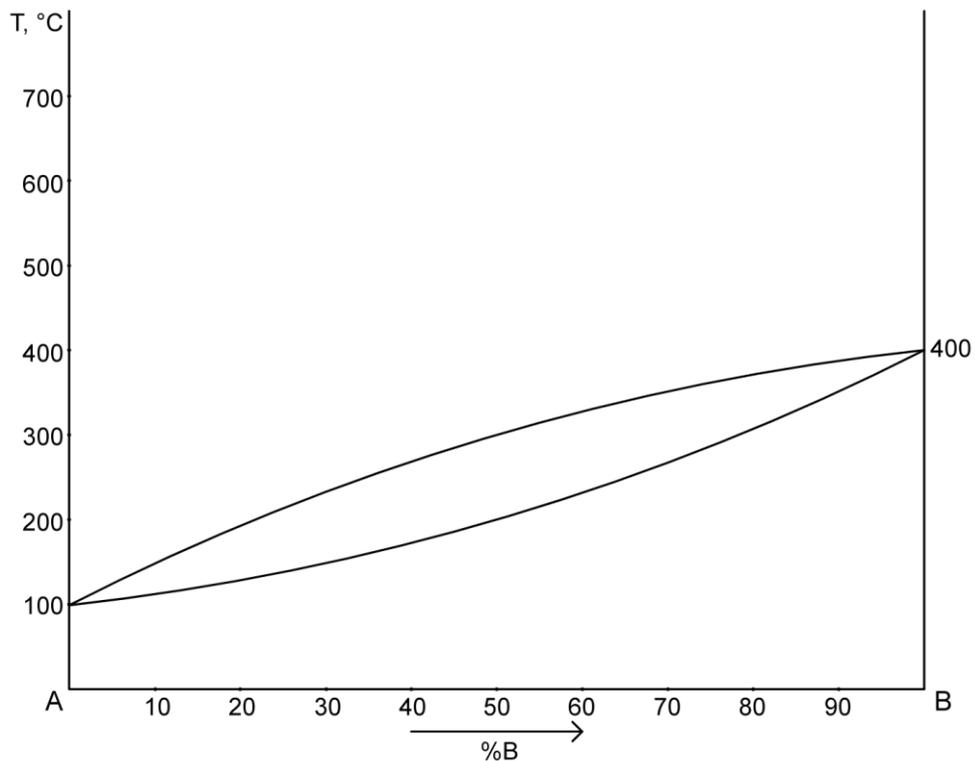


Рисунок 16 – Фазовая диаграмма

3. На основании данных о температуре начала кристаллизации системы А – В постройте диаграмму состояния (табл. 13). Определите тип полученной диаграммы. Опишите фазовые переходы на основных линиях диаграммы и укажите фазовый состав в каждой зоне диаграммы. Начертите кривые охлаждения, отвечающие содержанию 100, 80, 70 и 40% компонента А в расплавах, и опишите процессы кристаллизации указанных расплавов. Для диаграмм с образованием химического соединения определите химическую формулу соединения. Рассчитайте массу вещества А и В в жидкой и твердой фазе при охлаждении 100 кг плава, содержащего 70% вещества В, до 700 К. Вычислите теплоту плавления вещества А.

Таблица 13 - Данные о температуре начала кристаллизации системы А – В

%, В	0	10	15	30	40	60	70	85	90	100
Т, К	1000	925	875	720	780	850	800	675	750	800

### Задачи для индивидуальной и самостоятельной работы

На основании данных о температуре начала кристаллизации двухкомпонентной системы А – В (табл. 14) постройте диаграмму фазового состояния. Определите тип полученной диаграммы. Если в системе образуется химическое соединение, то определите фор-

мулу этого соединения. Опишите фазовые переходы на основных линиях диаграммы и укажите фазовый состав в каждой зоне диаграммы. Начертите все типы кривых охлаждения, возможных в данной системе. Укажите, каким составам на диаграмме эти кривые отвечают, и опишите их.

Определите, при какой температуре начнет отвердевать плава, содержащий  $a$  % компонента А (табл. 14). При какой температуре он отвердеет полностью? Каков состав первых выпавших кристаллов?

Таблица 14 - Температурные данные начала кристаллизации двухкомпонентных систем разного состава

№	состав	параметры	Зависимость температуры начала кристаллизации (Т) от содержания компонента В, вес. %										
			0	5	11	15	25	30	40	51	60	80	100
1-10	A-Mn	В, %	0	5	11	15	25	30	40	51	60	80	100
	B-Si	Т, К	1523	1473	1348	1475	1600	1553	1490	1409	1500	1623	1693
11-20	A-Mg	В, %	0	10	20	30	40	50	60	65	79	90	100
	B-Ca	Т, К	923	873	791	875	943	980	1000	950	718	983	1123
21-30	A-Mg	В, %	0	10	20	39	45	57	65	75	85	90	100
	B-Sn	Т, К	923	913	880	800	865	973	1025	1070	700	470	505

Найдите, при какой температуре начнет плавиться сплав, содержащий  $b$  % компонента А (табл.15). При какой температуре он расплавится полностью? Каков состав первых капель плава?

Таблица 15 - Составы и температуры систем для выполнения расчетов по диаграммам

№	Т <sub>1</sub> ,К	а	в	с	№	Т <sub>1</sub> ,К	а	в	с	№	Т <sub>1</sub> ,К	а	в	с
1	1625	95	45	5	11	820	70	25	90	21	750	5	35	20
2	1600	85	65	10	12	820	95	15	75	22	860	10	95	75
3	1500	80	40	15	13	830	10	85	70	23	870	15	90	90
4	1450	70	30	20	14	850	35	90	60	24	875	20	80	95
5	1450	75	25	30	15	900	90	25	50	25	700	25	85	20
6	1450	90	65	65	16	750	80	55	30	26	600	30	70	20
7	1420	30	15	70	17	760	15	45	20	27	870	35	75	80
8	1400	65	20	95	18	770	25	80	10	28	870	40	15	90
9	1450	60	10	15	19	900	30	70	5	29	860	55	25	50
10	1440	20	55	65	20	800	65	10	45	30	860	90	65	40

Рассчитайте массу компонента А и В в жидком и твердом состоянии при охлаждении 10 кг плава, содержащего  $c$  % компонента А до Т<sub>1</sub> (табл.15). Вычислите теплоты плавления компонентов А и В.

## Вопросы к практической работе

1. Какие сплавы называют чёрными сплавами?
2. Какие виды сплавов по характеру взаимодействия компонентов могут образовывать между собой железо с углеродом?
3. Какой сплав называют сталью?
4. Какая структурная составляющая является эвтектикой?
5. К каким типам сплавов относятся структуры феррит, аустенит, ледебурит, перлит и цементит? Ответ оформите в виде таблицы.
6. Какие полиморфные модификации имеет железо?
7. Какой сплав называют чугуном?
8. Какая структурная составляющая является эвтектоидом?
9. Определите по диаграмме температуру плавления чистого железа.
10. Какие параметры являются координатами диаграммы сплава?
11. Как называется линия начала первичной кристаллизации?
12. Что такое солидус?
13. Какие стали называют доэвтектоидными?
14. Что такое ликвидус?
15. Как называется линия окончания первичной кристаллизации?
16. Какие стали называют заэвтектоидными?
17. В чём назначение диаграммы?
18. Какие сплавы называют чёрными? Дайте определения этих сплавов.
19. Какие полиморфные модификации имеет железо, какие кристаллические решётки присущи этим модификациям?
20. В каком виде может содержаться углерод в сплавах?

## Практическое занятие № 5

### Определение физических свойств материала

Среди основных характеристик материала, во многом определяющих его технические свойства, являются плотность и пористость, а важнейшим параметром состояния является его влажность. Многие материалы в процессе их эксплуатации и хранения подвергаются действию воды или водяных паров, находящихся в воздухе. При этом их свойства существенно изменяются. Так, при увлажнении материала повышается его теплопроводность, изменяется средняя плотность, прочность и другие свойства. Поэтому при всех расчетах необходимо учитывать как влажность материала, так и его способность к поглощению влаги.

Для оценки ожидаемой прочности композитов широко используется правило аддитивности, согласно которому прочность композита рассчитывается по уравнению

$$\sigma = \sigma_B \cdot V_B + \sigma_M \cdot V_M$$

или

$$\sigma = \sigma_B \cdot V_B + \sigma_M \cdot (1 - V_B),$$

где  $\sigma_M$ ,  $\sigma_B$ ,  $\sigma$  – прочность матрицы, волокон и композита соответственно;

$V_M$ ,  $V_B$  – объемные доли матрицы и волокон в композите

Возможны случаи, когда реальная прочность однонаправленного армированного материала оказывается выше или ниже, чем рассчитанная по правилу аддитивности. Тем не менее, данное правило можно использовать для оценочных расчетов, так как во многих случаях (при условии получения композитов по оптимальным технологическим режимам) отклонение расчетных значений прочности от экспериментальных незначительно.

Модуль Юнга для композита в направлении укладки волокон можно также рассчитать по правилу аддитивности:

$$E = E_M V_M + E_B V_B$$

или

$$E = E_M (1 - V_B) + E_B V_B,$$

где  $E_M$ ,  $E_B$ ,  $E$  – модули Юнга матрицы, волокон и композита соответственно;

$V_M$ ,  $V_B$  – объемные доли матрицы и волокон в композите.

Аналогично рассчитывается плотность композита:

$$d = d_B V_B + d_M (1 - V_B),$$

где  $d$ ,  $d_B$ ,  $d_M$  – плотности композита, волокон и матрицы;

$V_B$  – объемная доля волокон.

### **Задачи для решения под контролем преподавателя**

1. Образец твердого материала в сухом состоянии весил 0,250 кг. При погружении образца в цилиндр с водой он поднял уровень воды на 100 см<sup>3</sup>. После того, как образец был вынут из воды, вытерт с поверхности и снова погружен в цилиндр с водой, он вытеснил уже 125 см<sup>3</sup> воды.

Далее образец был высушен и насыщен водой под давлением. Количество поглощенной при этом воды составило 33 г. Затем образец был снова высушен и измельчен для измерения абсолютного объема, который оказался равным 90 см<sup>3</sup>. Вычислить среднюю

плотность материала в сухом состоянии, весовое и объемное водопоглощение, истинную плотность.

Объем материала будет соответствовать объему вытесненной воды, т.е  $125 \text{ см}^3$ .

$$\text{Средняя плотность в сухом состоянии: } \rho = \frac{m}{V} = \frac{250}{125} = 2 \text{ г/см}^3.$$

Водопоглощение по весу составляет

$$V_{\text{вес}} = \frac{125 - 100}{250} \cdot 100\% = 10\%$$

Водопоглощение по объему составляет

$$V_{\text{об}} = \frac{125 - 100}{125} \cdot 100\% = 20\%$$

Истинная плотность

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{250}{90} = 2,78 \text{ г/см}^3.$$

2. Сухие образцы материала весом  $50 \text{ кг}$  нагрели от температуры  $t_n = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  до температуры  $t_k = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , затратив  $Q = 250 \text{ ккал}$  полезного тепла. Затем материал охладили и уложили в воду.

После нескольких дней выдерживания в воде вес материала стал на  $1 \text{ кг}$  больше. Определить удельную теплоемкость данного материала в сухом состоянии. Изменится ли и насколько его теплоемкость после увлажнения? Вычислить объемную теплоемкость материала, если среднюю плотность  $2000 \text{ кг/м}^3$

Удельная теплоемкость материала

$$C_0 = \frac{Q}{m(t_k - t_n)} = \frac{250}{50(50 - 25)} = 0,21 \text{ ккал/кг}\cdot\text{град}$$

Водопоглощение по весу составляет

$$V_{\text{вес}} = \frac{(50 + 1) - 50}{50} \cdot 100\% = 2\%$$

Коэффициент удельной теплоемкости увлажнённого материала

$$C_{\text{уд}} = C_0 + \frac{m \cdot V_{\text{вес}}}{100} = 0,21 + 1 \frac{2}{100} = 0,23 \text{ ккал/кг}\cdot\text{град}$$

Объемная теплоёмкость сухого материала

$$C_{\text{об\_сух}} = C_0 \rho_{\text{сух}} = 0,21 \cdot 2000 = 420 \text{ ккал/кг}\cdot\text{град}$$

Объемная теплоёмкость влажного материала

$$C_{\text{об\_влаж}} = C_0 \rho_{\text{влаж}} = 0,21 \cdot (2000 + 2000 \cdot \frac{2}{100}) = 469,2$$

ккал/кг·град

3. Определить влажность формовочной массы для изготовления керамических изделий и потерю массы при прокаливании в процессе обжига. Известно, что лабораторный образец сырец весил 45,0 г; его масса в сухом состоянии равнялась 36,8 г, а после обжига — 33,2 г.

Влажность и потерю массы при прокаливании определяют по изменению массы навески после высушивания при температуре  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$  и после обжига при температуре  $(1000 \pm 50)^\circ\text{C}$  соответственно (ГОСТ 21216–2014 Сырье глинистое. Методы испытаний).

При этом потерю массы следует относить к массе навески в исходном для этого испытания состоянии. Влажность формовочной массы  $W$ , %, вычисляется по формуле:

$$W = (m_r - m_c) / m_r \cdot 100,$$

где  $m_r$  — масса образца-сырца (влажная глина), г;

$m_c$  — масса образца в сухом состоянии, г.

Отсюда влажность

$$W = (45 - 36,8) / 45 \cdot 100 = 18,2 \%$$

Потеря массы при прокаливании  $X$ , %, рассчитывается по формуле:

$$X = (m_c - m_k) / m_c \cdot 100,$$

где  $m_c$  — масса образца в сухом состоянии (до прокаливания), г;

$m_k$  — масса образца после прокаливания (керамика), г.

Тогда:  $X = (36,8 - 33,2) / 36,8 \cdot 100 = 9,8 \%$  - потеря массы при прокаливании.

4. Рассчитать объемную долю борных и углеродных волокон для изготовления композита «Бронепластина» с модулем Юнга 200 ГПа, если известно, что модуль Юнга алюминиевой матрицы составляет 70 ГПа, средний модуль Юнга борных волокон 400 ГПа, а углеродных волокон 350 ГПа.

Для композита, армированного борными волокнами, формула примет вид:

$$200 = 70(1 - V_B) + 400 V_B.$$

Решая уравнение относительно  $V_B$ , получим:

$$V_B = 0,39 = 39 \% \text{ (по объему).}$$

Для композита алюминий — углеродные волокна

$$200 = 70(1-V_B) + 350V_B,$$

откуда  $V_B = 0,46 = 46 \%$  (по объему).

Таким образом, чтобы выполнить требование по жесткости, необходимо ввести в алюминий либо 39 % (по объему) борных волокон, либо 46 % (по объему) углеродных волокон.

### Задачи для индивидуальной и самостоятельной работы

1. Рассчитать объемную долю борных и углеродных волокон для изготовления композита с алюминиевой матрицей с прочностью 1000 МПа, если известно, что борные волокна в среднем имеют  $\sigma_B = 3250$  МПа, а углеродные  $\sigma_B = 2500$  МПа, прочность алюминиевой матрицы 30 МПа.

2. Рассчитать плотность композита с алюминиевой матрицей, армированного борными или углеродными волокнами, если известно, что борные волокна в среднем имеют плотность  $2630 \text{ кг/м}^3$ , а углеродные  $1700 \text{ кг/м}^3$ . При этом количество борных волокон составляет 39 % по объему, углеродных волокон 46 %, плотность алюминия  $2700 \text{ кг/м}^3$ .

3. Рассчитать объемную долю волокон бора для изготовления композита с модулем Юнга 245 ГПа, если известно, что модуль Юнга алюминиевой матрицы составляет 70 ГПа, средний модуль Юнга борных волокон 420 ГПа.

4. Для композиционных материалов (табл. 16, 17) по уравнению аддитивности вычислить содержание волокнистых наполнителей в КМ в %. Рассчитать удельную прочность перспективных КМ с металлической и полимерной матрицей при наполнении их нитевидными волокнами или кристаллами (табл.18). Объемная доля волокна в композиционном материале составляет 40-50% .

Таблица 16 – Свойства композиционных материалов

матрица	природа	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Прочность $\sigma_B$ , МПа	Модуль Юнга E, ГПа
Металлическая	Al	2,7	250	70
	Mg	1,8	200	44
	Ni	4,5	500	1/3
	Cu	8,9	220	132
	Сталь 30ХГСА	7,85	1600	210
	Ti	4,85	1500	110
Полимерная	эпоксидная	1,6	40	
	фенолформальдегидная	1,4	35	

Таблица 17 – Свойства конструкционных материалов

природа	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Прочность $\sigma_B$ , МПа	Модуль Юнга E, ГПа
Углепластик высокопрочный	1,55	2070	143
Углепластик высокомодульный	1,61	1040	281
Стеклопластик	2,20	2100	70
Органопластик	1,40	2200	95
Боропластик	2,60	1200	250
Бороалюминий	2,70	1750	260

Таблица 18 – Свойства нитевидных материалов

Вид наполнителя	природа наполнителя	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Прочность $\sigma_B$ , МПа
Нитевидное волокно	Сталь	7,9	3,5
	Стекло	2,5	4,0
	Углерод	2,0	3,0-5,5
	Карборунд	3,2	3,0
	Бор	2,6	3,5
Нитевидный кристалл	Корунд	3,8	30,0
	Карборунд	3,2	40,0

Таблица 19 – Варианты заданий

№	природа			Объемная доля, %
	матрицы	наполнителя	Вид наполнителя	
1	2	3	4	5
	Al	Сталь	волокно	45
2	Mg	Корунд	нити	50
3	Ni	Сталь	волокно	40
4	Cu	Стекло	волокно	46
5	Al	Углерод	волокно	49
6	Mg	Углерод	волокно	41
7	Ni	Углерод	волокно	45
8	Cu	Карборунд	волокно	43
9	Al	Бор	волокно	48
10	Mg	Карборунд	волокно	40
11	Ni	Корунд	нити	44
12	Cu	Карборунд	нити	47
13	Al	Карборунд	волокно	50
14	Mg	Карборунд	нити	42
15	Ni	Стекло	волокно	48
16	Cu	Бор	волокно	44
17	эпоксидная	Сталь	волокно	40
18	эпоксидная	Стекло	волокно	50
19	эпоксидная	Углерод	волокно	41

Продолжение табл.19

1	2	3	4	5
20	эпоксидная	Карборунд	волокно	49
21	эпоксидная	Бор	волокно	42
22	эпоксидная	Корунд	нити	46
23	эпоксидная	Карборунд	нити	43
24	фенолформальдегидная	Сталь	волокно	46
252	фенолформальдегидная	Стекло	волокно	44
26	фенолформальдегидная	Углерод	волокно	48
27	фенолформальдегидная	Карборунд	нити	45
28	фенолформальдегидная	Бор	волокно	40
29	фенолформальдегидная	Корунд	нити	47
30	Углепластик высокопрочный	Карборунд	волокно	40
31	Углепластик высокомодульный	Корунд	нити	50
32	Стеклопластик	Карборунд	нити	45
33	Органопластик	Бор	волокно	48
34	Боропластик	Стекло	волокно	42
35	Бороалюминий	Корунд	нити	46

### Вопросы к практической работе

1. Что такое композиционный материал?
2. Назначение матрицы и наполнителя.
3. Классификация КМ по геометрической форме наполнителя.
4. Классификация КМ по виду наполнителя.
5. Классификация КП по форме наполнителя схеме армирования.
6. За счет чего обеспечиваются связь между волокнами и матрицей
7. В чем проявляется адгезионная связь двух разнородных поверхностей матрицы и наполнителя?
8. Механизм упрочнения КМ с зернистым наполнителем.
9. Механизм упрочнения КМ с волокнистым упрочнителем.
10. Что такое удельная порочность КМ и ее значение в реальных металлических сплавах и КМ?

### Практическое занятие № 6

#### Определение пористости и удельной поверхности катализаторов

Пористость – скалярная величина, численно равная общему объему пор (пустот) в единице объема образца материала:

$$\Pi = \frac{V_{\Pi}}{V_0}$$

Пористость может принимать значения от 0, что соответствует объему образца материала без пор, до 1 (100 %). Стопроцентная пористость – это абстракция, но существуют материалы, пористость которых приближается к этому значению, например пены, аэрогели.

Пористость материалов обуславливает их газопроницаемость, способность к адсорбции, диффузию реагентов, оказывает влияние на адгезионную способность, теплопроводность, прочностные характеристики образцов.

Принято следующее разделение пор по размерам: макропоры (диаметр свыше 50 нм), мезопоры (диаметр от 2 до 50 нм) и микропоры (диаметр менее 2 нм). По однородности размеров пор материалы подразделяются на однороднопористые и разнороднопористые; по жесткости структуры пор – на жесткие и набухающие. Если поры материала сообщаются между собой, то такие поры считаются открытыми (взаимосвязанными), изолированные поры относятся к закрытым. Общая пористость материала учитывает суммарный объем открытых и закрытых пор.

Условно методы определения пористости подразделяются на экспериментальные и расчетные. К экспериментальным методам относятся жидкостная, ртутная и газовая порометрии, метод проницаемости, газодинамические, методы непосредственного наблюдения пор, капиллярные и сорбционные. Использование большинства данных методов сопряжено с разрушением материала и требует наличия специализированной аппаратуры и высококвалифицированного персонала. При этом каждый метод имеет существенные ограничения применения к конкретным материалам.

Использование расчетных методов определения пористости позволяет быстро провести ее оценку по имеющимся экспериментальным данным.

Данная методика позволяет оценить пористость материалов по результатам измерений плотности гидростатическим и пикнметрическим методами:

$$\Pi = \frac{V_{\Pi}}{V_0} = 1 - \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\Pi}}$$

где -  $\rho_{\Gamma}$  – плотность, определяемая гидростатическим методом,  $\rho_{\Pi}$  –

плотность, определяемая с помощью пикнометра.

### Задачи для решения под контролем преподавателя

1. Масса сухого образца пористого материала неправильной формы составляет  $m_{\text{сух}} = 39$  г. Поверхность образца покрыли парафином. Масса гирь при взвешивании образца в воде составила  $m_{\text{в}} = 19,7$  г.

Парафина израсходовано  $m_{\text{пар}} = 0,7$  г, плотность парафина  $\rho_{\text{пар}} = 0,9$  г/см<sup>3</sup>. Плотность воды  $\rho_{\text{в}} = 1$  г/см<sup>3</sup>. Определить среднюю плотность материала

Объем парафина на покрытие образца составляет:

$$V_{\text{пар}} = \frac{m_{\text{пар}}}{\rho_{\text{пар}}} = \frac{0,7}{0,9} = 0,78 \text{ см}^3$$

Объем образца определяется по формуле:

$$V_{\text{с}} = \frac{m_{\text{сух}} - m_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}} - V_{\text{пар}} = \frac{39 - 19,7}{1} - 0,78 = 18,52 \text{ см}^3$$

Средняя плотность материала:

$$\rho_{\text{м}} = \frac{m}{V_{\text{с}}} = \frac{39}{18,52} = 2,1 \text{ г/см}^3$$

2. Во сколько раз пористость материала А меньше пористости материала В, если известно, что истинная плотность этих материалов равна и составляет 2,72 г/см<sup>3</sup>? Средняя плотность материала А на 20 % больше, чем у материала В. Материал В имеет водопоглощение по объему в 1,8 раза больше водопоглощения по массе.

Водопоглощение по массе  $W_{\text{м}}$  и по объему  $W_{\text{о}}$  (%) определяют соответственно по формулам

$$W_{\text{м}} = \frac{m_{\text{нас}} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}}} \cdot 100$$

$$W_{\text{о}} = \frac{m_{\text{нас}} - m_{\text{сух}}}{\rho_{\text{в}} V_{\text{с}}} \cdot 100 = \frac{W_{\text{м}} \rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{с}}} 100 = W_{\text{м}} d$$

Определяем средние плотности материалов А и В:

Средняя плотность материала А:  $\rho_{\text{м}}^{\text{А}} = 1,8 \cdot (1 + 0,2) = 2,16$  г/см<sup>3</sup>

Средняя плотность материала В:  $\rho_{\text{м}}^{\text{В}} = \frac{W_{\text{о}}}{W_{\text{м}}} \cdot \rho_{\text{о}} = 1,8 \cdot 1 = 1,8$  г/см<sup>3</sup>

Определяем пористость материалов А и В:

$$P^{\text{А}} = \frac{\rho - \rho_{\text{м}}^{\text{А}}}{\rho} \cdot 100 = \frac{2,72 - 2,16}{2,72} \cdot 100 = 20,6 \%$$

$$P^B = \frac{\rho - \rho_m^B}{\rho} \cdot 100 = \frac{2,72 - 1,8}{2,72} \cdot 100 = 33,8 \%$$

Отношение пористости материала В к пористости материала А составит:

$$\frac{P^B}{P^A} = \frac{33,8}{20,6} = 1,44 \text{ раза}$$

Пористость материала А меньше пористости материала В в 1,44 раза

### Задание для индивидуальной и самостоятельной работы

1. Какое количество (л) аммиака при 289 К и давлении 1 атм может адсорбироваться на поверхности 45 г активного угля, если вся поверхность полностью покрыта аммиаком? Поверхность 1 г активированного угля 1000 м<sup>2</sup>. Диаметр молекулы 3·10<sup>-8</sup> см. Молекулы касаются друг друга в плоскости так, что центры четырех соседних сфер расположены в углах квадрата.

2. Вычислите площадь поверхности катализатора, 1 г которого при образовании монослоя адсорбирует 103 см<sup>3</sup> азота (при 1 атм и 273 К). Адсорбция измеряется при 78 К, эффективная площадь, занятая молекулами азота на поверхности, 16,2·10<sup>-20</sup> м<sup>2</sup>.

3. Объем газообразного азота V<sub>m</sub> при 1,04·10<sup>5</sup> Па (750 мм рт.ст.) и 273 К, необходимый для покрытия образца силикагеля мономолекулярным слоем, 129 мл/г. Вычислите удельную площадь поверхности 1 г силикагеля, если молекула азота занимает площадь 16,2·10<sup>-20</sup> м<sup>2</sup>.

4. Активная площадь поверхности древесного угля достигает 1000 м<sup>2</sup> на 1 г угля. Рассчитать, сколько фосгена (мг) поглотится 10 м<sup>2</sup> угля, если 1 г угля адсорбирует 440 см<sup>3</sup> газа.

5. В табл. 20 приведены экспериментальные значения плотности композиционных материалов, изготовленных по разным технологиям.

Здесь  $\rho_{\text{Псв}}$  – пикнометрическая плотность при свободном спекании;  $\rho_{\text{Пз}}$  – пикнометрическая плотность при спекании в зажимах;  $\rho_{\text{Гсв}}$  – гидростатическая плотность материала при свободном спекании;  $\rho_{\text{Гз}}$  – гидростатическая плотность материала при спекании в зажимах;  $P_1$  – пористость материала при свободном спекании;  $P_2$  – пористость материала при спекании в зажимах

Таблица 20 - Экспериментальные значения плотности композиционных материалов, изготовленных по разным технологиям

№	материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>				Пористость, %	
		$\rho_{Псв}$	$\rho_{Пз}$	$\rho_{Гсв}$	$\rho_{Гз}$	$\Pi_1$	$\Pi_2$
1	ПЭТФ	2,198	2,202				
2	ПЭТФ+3%СКГ	2,189	2,193				
3	ПЭТФ+5%СКГ	2,186	2,184				
4	ПЭТФ+10%СКГ	2,183	2,179				
5	ПЭТФ+15%СКГ	2,180	2,177				
6	ПЭТФ+20%СКГ	2,178	2,160				
7	ПЭТФ+10% УВ	2,196	2,193				
8	ПЭТФ+5% УВ+20% СКГ	2,168	2,178				
9	ПЭТФ+5% УВ+20% СКГ	-	2,154				

1. Внесите в табл. 20 значения плотности материалов, с использованием результатов, представленных в табл. 13, определенные гидростатическим методом по формуле

$$\rho_{Г} = \frac{1 - \varphi}{\frac{1}{\rho_{П}} - \frac{\varphi}{\rho_{Н}}}$$

где плотность СКГ  $\rho_{Н} = (2,112 \pm 0,002)$  г/см<sup>3</sup>; плотность углеродного волокна  $\rho_{УВ} = (1,821 \pm 0,002)$  г/см<sup>3</sup>.

2. Для образцов № 1–6 по формуле

$$\Pi = \frac{V_{\Pi}}{V_0} = 1 - \frac{\rho_{Г}}{\rho_{П}}$$

рассчитайте пористость композиционных материалов.

Результаты занесите в табл. 13.

3. С учетом полученных результатов постройте графики зависимости пористости композитов от концентрации СКГ.

Для удобства сопоставления результатов построение проводите, используя одну систему координат для образцов, изготовленных с помощью разных технологий спекания. Сопоставьте полученные результаты и сделайте выводы.

4. Рассчитайте пористость образцов композитов № 7–9, используя формулу

$$\Pi = \frac{V_{\Pi}}{V_0} = 1 - \frac{\rho_{Г}}{\rho_{П}}$$

Результат занесите в табл. 13.

5. Сопоставьте результаты для образцов № 4 и № 7, а также для образцов № 6, 8 и № 9, сделайте выводы.

### **Вопросы к практической работе**

1. Пористость как характеристика материала.
2. Методы определения пористости.
3. Процесс организации тонкопористых и крупнопористых сорбентов на примере силикагелей.
4. Типы сорбентов. Их особенности.
5. Особенности примесных атомов на поверхности. Их роль в характеристике поверхности.
6. Структура и свойства поверхности, включающей слой или более атомов металлов или их оксидов.
7. Качественная оценка энергии поверхностных уровней.
8. Поверхность металлов общее и различия с поверхностью от оксидов в структурном и электронном аспектах.
9. Определение толщины слоя и площади, занимаемой одной молекулой.
10. Уравнения Шишковского и Фрейнлиха. Их использование при обработке экспериментальных адсорбционных данных.
11. Теория мономолекулярного слоя Лэнгмюра.
12. Основные положения теории БЭТ .
13. Определение удельной поверхности пористых тел на практике.
14. Неорганические адсорбенты, используемые на практике.
15. Органические адсорбенты, используемые на практике.
16. Высокомолекулярные ионообменные смолы, использование в качестве сорбентов.
17. Поверхности кристаллов, нанокластеров и сорбентов.
18. Микроскопический аспект и его применение для изучения свойств поверхности.

### **Практическое занятие № 7**

**Седиментационный анализ дисперсных наполнителей для композиционных материалов**

Седиментационный анализ является одним из распространенных методов исследования дисперсных систем (порошков, суспензий, эмульсий). Его целью является определение фракци-

онного состава дисперсной фазы, т. е. разделение частиц по размерам на фракции, и ее удельной поверхности. Чем крупнее частицы дисперсной фазы, тем быстрее они оседают.

Реальные суспензии очень часто содержат частицы, сильно отличающиеся по форме от шарообразных. При исследовании таких суспензий с помощью седиментационного анализа радиус частиц представляет собой радиус воображаемых шарообразных частиц из того же материала, оседающих с той же скоростью, что и частицы изучаемой суспензии. Вычисленный таким образом радиус называется эквивалентным.

Существует несколько принципов седиментационного анализа. К первой группе относятся методы, в которых анализ проводится с разделением дисперсной фазы на отдельные фракции; это может происходить в спокойной жидкости, а также в текущей струе жидкости. Во вторую группу входят методы, в которых не производится непосредственное разделение дисперсной системы на фракции: к ним относится гравиметрический (весовой) метод анализа. В последнем случае по результатам непрерывного определения массы седиментационного остатка строят седиментационную кривую – зависимость массы седиментационного осадка  $m$  от времени оседания.

В реальных полидисперсных системах кривые оседания имеют плавный ход. Затем экспериментальную седиментационную кривую обрабатывают графическим способом (путем построения касательных в точках кривой, соответствующих разным значениям) и получают данные для построения интегральной и дифференциальной кривых распределения. Седиментационный анализ проводят на весах Фигуровского или с помощью торсионных весов.

### **Задачи для решения под контролем преподавателя**

1. Частицы бентонита  $Al_2[Si_4O_{10}](OH)_2 \cdot nH_2O$  дисперсностью  $0,8 \text{ мкм}^{-1}$  оседают в водной среде под действием силы тяжести. Определите время оседания  $\tau_1$  на расстояние  $h = 0,1 \text{ м}$ , если плотность бентонита  $\rho = 2,1 \text{ г/см}^3$ , плотность среды  $\rho_0 = 1,1 \text{ г/см}^3$ , вязкость среды  $\eta = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Во сколько раз быстрее осядут частицы на то же расстояние в центробежном поле, если начальное расстояние от оси вращения  $h_0 = 0,15 \text{ м}$ , а скорость вращения центрифуги  $n = 600 \text{ об/с}$ .

Из уравнения  $r = \sqrt{\frac{H}{\tau} \cdot \frac{9\eta}{2g(\rho - \rho_0)}}$  выражаем время оседания  $\tau$

$$\tau = \frac{9\eta H}{2g(\rho - \rho_0)r^2}$$

Дисперсность связана с размером частиц  $D = \frac{1}{d} = \frac{1}{2r}$

Следовательно,  $r = \frac{1}{2D}$ . Полученное выражение подставляем в выражение для определения времени оседания

$$\tau = \frac{9\eta H (2 \cdot D)^2}{2g(\rho - \rho_0)}$$

и находим время оседание

$$\tau = \frac{9 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 (2 \cdot 8 \cdot 10^5)^2}{2 \cdot 9,81 (2,1 - 1,1) \cdot 10^3} = 2,35 \cdot 10^5 \text{ с}$$

Для частиц, оседающих в центробежном поле, справедливо уравнение

$$\ln \frac{H_2}{H_1} = \frac{2r\omega^2(\rho - \rho_0)\tau}{9\eta}$$

где  $H_2 = H_1 + h_0$ , угловая скорость центрифуги  $\omega = 2\pi \cdot n$

Время оседания в центробежном поле составит

$$\tau = \frac{9\eta \cdot \ln \frac{H_2}{H_1}}{2r\omega^2(\rho - \rho_0)\tau} = \frac{9\eta \cdot \ln \frac{(H_1 + h_0)}{H_1} 4D^2}{2(2\pi \cdot n)^2(\rho - \rho_0)}$$

$$\tau = \frac{9 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \frac{(0,15 + 0,1)}{0,1} 4 \cdot (8 \cdot 10^5)^2}{2(2\pi \cdot 600)^2 (2,1 - 1,1) \cdot 10^3} = 0,83 \text{ с}$$

Соотношение времени равно  $\frac{2,35 \cdot 10^5}{0,83} = 2,83 \cdot 10^5$

2. Рассчитайте и сравните время оседания частиц в гравитационном и центробежном полях при следующих условиях: радиус частиц  $r = 10^{-7}$  м; плотность дисперсионной фазы  $\rho = 3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; плотность дисперсионной среды  $\rho_0 = 1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; вязкость  $\eta = 1 \cdot 10^{-3}$  Па·с; высота оседания  $H = 0,1$  м; центробежное ускорение  $\omega^2 h = 200g$ .

3. Рассчитайте радиус частиц, если время оседания их водного раствора в центрифуге составило 10 мин при следующих условиях: исходный уровень  $h_1 = 0,09$  м; конечный уровень  $h_2 = 0,14$  м; плотность дисперсионной фазы  $\rho = 5,6 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; плотность дисперсионной среды  $\rho_0 = 1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; частота вращения центрифуги  $n = 1000$  об/мин; вязкость  $\eta = 1 \cdot 10^{-3}$  Па·с.

## Задание для индивидуальной и самостоятельной работы

1. Рассчитать и построить интегральную и дифференциальную кривые распределения частиц в водной среде (табл. 21):

Таблица 21 - Данные по осаждению частиц

τ, мин	1	2	3	5	10	20	25	30	35
m, мг	6,5	12,0	17,5	25,0	37,0	48,0	49,0	50,0	50,0

Если остальные параметры представлены в таблице 22

Таблица 22 – Параметры осаждения

№	Высота осаждения, м	Вязкость среды, $10^{-3}$ Па·с	Плотность, $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	
			среды	фазы
1	0,12	1,1	1,0	2,7
2	0,1	2,0	0,99	2,1
3	0,09	1,2	1,0	3,0
4	0,05	0,73	0,94	4,0
5	0,15	0,325	0,8	2,7

2. Определите удельную поверхность порошка сульфата бария (в расчете на единицу массы), если частицы его оседают в водной среде на высоту 0,226 м за 1350 с (предполагая, что частицы имеют сферическую форму). Плотность сульфата бария и воды соответственно 4,5 и 1 г/см<sup>3</sup>, вязкость воды  $1 \cdot 10^{-3}$  Па · с. Для расчета удельной поверхности воспользоваться формулой

$$S_{уд} = \frac{k}{d\rho}$$

$k$  – постоянная Больцмана,  $\rho$  – плотность,  $d$  – диаметр частиц

3. Пробирка высотой 0,1 м заполнена высокодисперсной суспензией кварца (плотность 2650 кг/м<sup>3</sup>) в воде (плотность 1000 кг/м<sup>3</sup> вязкость 0,001 Па · с). Время полного оседания частиц равно 2 ч 50.

Каков минимальный размер частиц, принимая, что они имеют сферическую форму?

4. Рассчитайте время оседания частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> радиусом  $r = 10^{-7}$  м в центробежном поле при следующих условиях: плотность дисперсной фазы  $\rho = 3,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; плотность дисперсионной среды  $\rho_0 = 1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; исходный уровень оседания  $h_1 = 0,05$  м; конечный уровень  $h_2 = 0,12$  м; вязкость  $\eta = 1 \cdot 10^{-3}$  Па · с; частота вращения центрифуги  $n = 1800$  об/мин.

5. Рассчитайте размер частиц AgCl в ацетоне, если время их оседания в центрифуге составило 8 мин при следующих условиях: исходный уровень  $h_1 = 0,05$  м; конечный уровень  $h_2 = 0,10$  м; плот-

ность дисперсной фазы  $\rho = 5,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; плотность дисперсионной среды  $\rho_0 = 0,79 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; вязкость  $\eta = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ; частота вращения центрифуги  $n = 1800 \text{ об/мин}$ .

6. Рассчитайте размер частиц пигмента кубового желтого в воде, если время их оседания в центробежном поле составило 180 с при следующих условиях: исходный уровень  $h_1 = 0,04 \text{ м}$ ; конечный уровень  $h_2 = 0,09 \text{ м}$ ; плотность дисперсной фазы  $\rho = 1,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; плотность дисперсионной среды  $\rho_0 = 1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; вязкость  $\eta = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ; частота вращения центрифуги  $n = 1800 \text{ об/мин}$

7. Рассчитайте и сравните скорости оседания частиц в воде в гравитационном и центробежном полях при следующих условиях, представленных в табл. 23.

Таблица 23 – Параметры осаждения

№	вещество	Высота осадения, м	центробежное ускорение $\omega^2 h$ /частота вращения	радиус частиц, $10^{-7} \text{ м}$	Вязкость среды, $10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$	Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$	
						среды	фазы
1	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,2	300g	5	1,0	1,1	3,9
2	глина	0,2	1000 об/мин	20	1,0	1,0	2,7
3	-	0,2	600 об/мин	0,2	1,0	1,0	2,7
4		0,05	6000 об/мин	3,5	0,73	0,94	4,0

8. Постройте седиментационную кривую, рассчитайте и постройте интегральную и дифференциальную кривые распределения частиц глины в воде, используя графический метод обработки кривой седиментации (табл.24) и следующие условия: высота оседания  $H = 0,093 \text{ м}$ ; вязкость  $\eta = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ; плотность глины  $\rho = 2,76 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; плотность дисперсионной среды  $\rho_0 = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Таблица 24 – Условия осаждения

№	Характеристик осаждения									
	1	$\tau$ , мин	15	30	60	120	240	360	480	600
$m$ , мг		3	6	8	9	12	13	13,5	13,5	
2	$\tau$ , мин	0,5	1	2	3	5	7	9	12	15
	$m$ , мг	8	12	15	18	25	30	33	35	35
3	$\tau$ , мин	0,5	1	2	4	6	8	12	20	24
	$m$ , мг	8	11	18	21	26	29	34	40	40
4	$\tau$ , мин	0,25	0,5	1	2	4	8	16	24	28
	$m$ , мг	2	7	11	14	22	37	48	50	50

## Вопросы к практической работе

1. Напишите уравнение для скорости седиментации в гравитационном поле. Каков физический смысл входящих в него величин
2. Изменением каких параметров системы можно управлять скоростью осаждения частиц?
3. Что такое диффузионно-седиментационное равновесие?
4. Чем характеризуется кинетическая и термодинамическая седиментационная устойчивость системы?
5. Как определяют размеры частиц в условиях диффузионно-седиментационного равновесия?
6. Напишите уравнение для скорости седиментации в центробежном поле.
7. Опишите, в чем заключается принцип седиментационного анализа для определения размеров частиц.
8. Перечислите факторы, которые обеспечивают кинетическую устойчивость суспензий.
9. Степень дисперсности и линейные размеры частиц. Удельная поверхность дисперсных систем по массе и по объёму и её расчёт. Расчёт суммарной площади поверхности частиц
10. Порошки. Получение, применение в фармации. Слеживаемость, распыляемость, сыпучесть. Гранулирование порошков.
11. Чем обусловлено образование паст и их механическая прочность?

## Практическое занятие № 8

### Моделирование многослойного КМ в FEMAP

При моделировании надо знать:

- Свойства материала (ортотропный или анизотропный и т.п.)
- Количество слоев, их толщину и углы укладки материала по отношению к оси элемента (reference axis)
- Тип элемента (Laminate) и свойства материала (2D или 3D – Orthotropic)
- Направление, относительно которого будем откладывать углы укладки слоев.

Есть два способа, которые можно использовать для моделирования многослойных композитов в Siemens Femap. Зависит от того, является ли модель двумерной или трехмерной. Определение материала, конфигурации слоев (Layer) и свойств (Property) является

общим для двумерных и трехмерных моделей. Однако, углы укладки слоев могут быть заданы с использованием двух методов для 2D-модели, в то время как для 3D-модели используется лишь один метод.

В этом примере мы выполним анализ простого двумерного композита с отверстием под действием одноосного растяжения. Подобные композитные конструкции с отверстиями часто применяются в аэрокосмической промышленности. Материал, укладка слоев и их толщина, используемые в этом примере, не абстрактная, а реально используемая в отраслях промышленности. Рассмотрим два пакета с одинаковым количеством слоев и одинаковой ориентацией, но уложенных по-разному. Проанализируем различия в результатах, просто изменив порядок укладки. Работая с примером, изучим уникальное поведение композитов.

Свойства материала, используемые для композита, соответствуют пластинке из однонаправленного углеродного волокна, пропитанной эпоксидной смолой. Соответственно, для этой задачи тип материал должен быть «2D Orthotropic». Свойства материала приведены в следующей таблице 25.

Таблица 25 - Свойства композитного материала

Свойства	Единицы	T800S/3900-2
Продольный модуль упругости ( $E_1$ )	ГПа	147
Поперечные модули упругости ( $E_2 = E_3$ )	ГПа	7.58
Модуль сдвига в плоскости пластинки ( $G_{12}$ ) = Межслоевой модуль сдвига ( $G_{13}$ )	ГПа	3.96
Межслоевой модуль сдвига ( $G_{23}$ )	ГПа	3.00
Коэффициент Пуассона в плоскости пластинки ( $\nu_{12}$ ) = Коэффициент Пуассона в межслоевом направлении ( $\nu_{13}$ )		0.33
Коэффициент Пуассона в межслоевом направлении ( $\nu_{23}$ )		0.38
Продольное растягивающее напряжение ( $X_t$ ) = Продольное сжимающее напряжение ( $X_c$ )	ГПа	2.86
Поперечное растягивающее напряжение ( $Y_t$ ) = Поперечное сжимающее напряжение ( $Y_c$ )	ГПа	1.55
Напряжение сдвига ( $S$ )	ГПа	0.104

Поскольку в этой задаче модель композита двумерная, свойствами материала в направлении 3 можно пренебречь (рис. 17).

Задание пакета укладки. В этой модели мы проанализируем два вида пакета с разной укладкой слоев. Идея состоит в том, чтобы исследовать, как укладка слоев может повлиять на результаты анализа, даже если композит имеет одинаковое количество слоев, слои

имеют одинаковые углы ориентации, но сложены в другой последовательности.

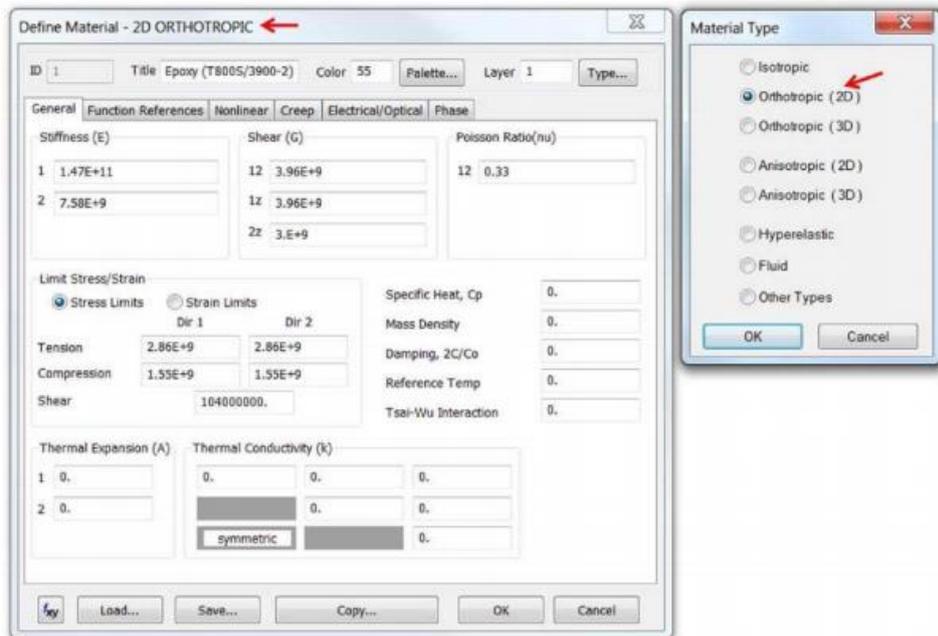


Рисунок 17 - Задание свойств материала для двумерной модели композита в Siemens Femap

Пакет укладки 1:  $[45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ]_s$  каждый слой толщиной 0.195 мм. Нижний индекс 's' в определении укладки указывает на то, что пакет является симметричным ламинатом. Это означает, что конфигурация пакета следующая:  $[45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/45^\circ]$ .

Пакет укладки 2:  $[45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ]$ . Пакет 2 имеет 8 слоев, так же как пакет 1, за исключением того, что конфигурация пакета больше не симметрична относительно срединной плоскости ламината. Редактор пакета с определением Пакета 1 показан ниже. Пакет 2 можно определить аналогичным образом, изменив углы ориентации (рис.18).

За свойства 2D композитов в Nastran отвечает функция PCOMP. Подробная информация о функции PCOMP доступна в руководстве пользователя Nastran (Nastran User Guide). Модель двумерного композита основана на классической теории композитов. Выберите тип «Laminate» по кнопке Element/Property Type. По умолчанию Femap назначает тип элемента «Plate» для 2D-моделей. Пакет (Layer), определенный на предыдущем шаге, можно назначить при задании свойства композита. Поскольку мы определили все 8 слоев в пакете укладки, в окне Свойств (Property) в списке Options оставлено по умолчанию "0. As Specified". В качестве альтернативы, мы можем определить только 4 слоя в пакете и исполь-

зовать опцию "1. Simmetric". Однако этот параметр следует использовать с осторожностью, поскольку его нельзя использовать для несимметричного композита.

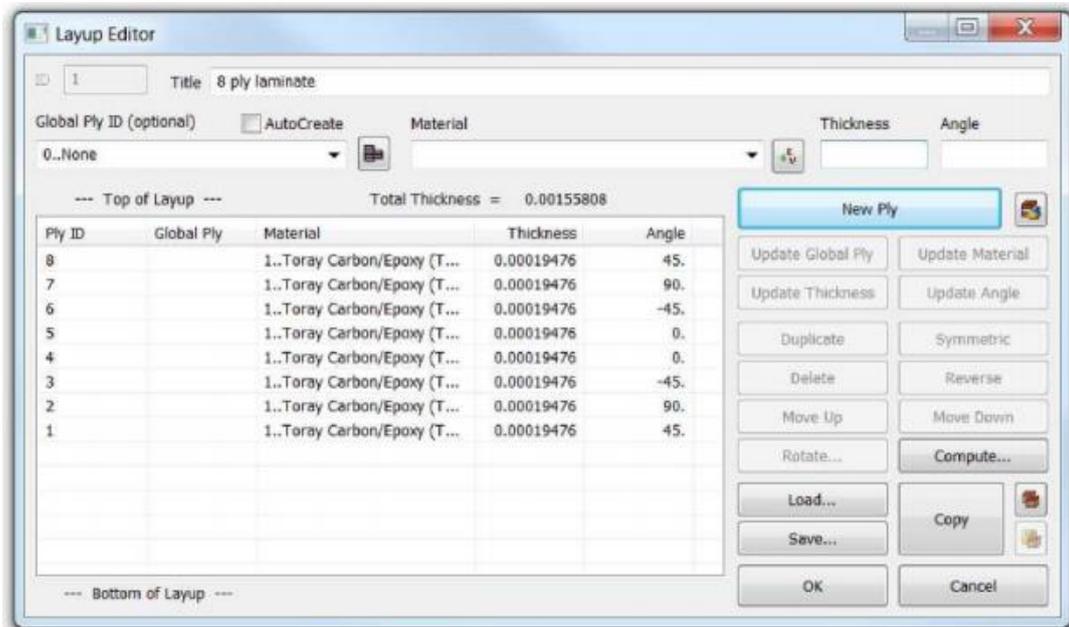


Рисунок 18 - Редактор пакета Layup Editor с определением Пакета 1

Для задания направления материала будем использовать направление по глобальной оси X в качестве базового направления материала. Мы можем использовать одну из процедур, которые были описаны ранее.

Для этой модели сила 10 кН приложена к узлам на одном конце, а узлы на другом конце закреплены, как показано ниже. Чтобы имитировать поведение нагрузки в эксперименте, нагрузка 10 кН прикладывается к независимому узлу Rigid-элемента и этот узел связан с узлами на правом конце панели (рис.19). Когда нагрузка прикладывается к независимому узлу, его перемещение преобразуется в соответствующие перемещения зависимых узлов. Модель готова для анализа и для нее получено линейное статическое решение. Анализ модели выполнен для двух пакетов укладки и мы проанализируем напряжения, наблюдаемые в обоих этих случаях.

Настройка диспетчера анализа (ANALYSIS SET MANAGER) для композитов. Параметр SRCOMPS управляет вычислением и выводом коэффициентов прочности слоев. Если флаг включен, для элементов композита выводятся коэффициенты прочности слоев, если задан критерий разрушения.

Параметр NOFISR (рис.200 управляет вычислением и выводом индексов разрушения и коэффициентов прочности слоев. Если

флаг включен, индексы разрушения и коэффициенты прочности слоев не выводятся в файл f06.

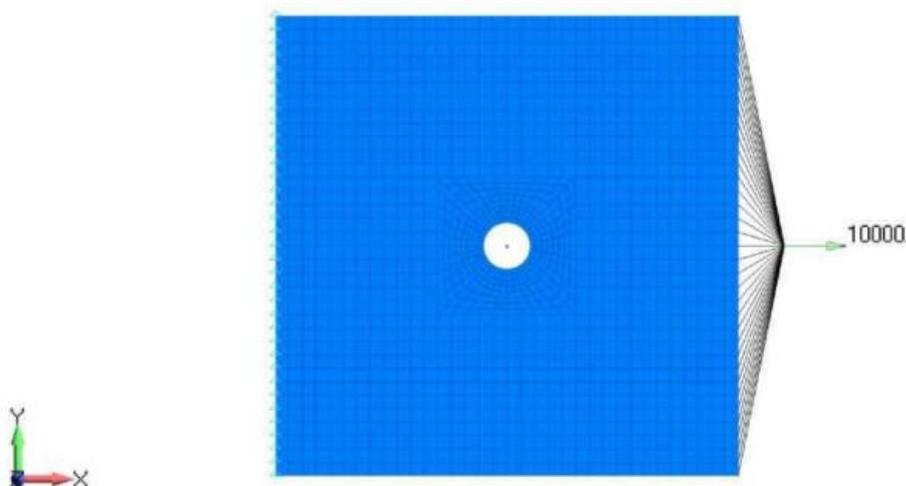


Рисунок 19 - Определение граничных условий модели из композитного материала

NASTRAN Bulk Data Options

Portion of Model to Write: 0..Entire Model

PARAM	
<input checked="" type="checkbox"/> AUTOSPC	0..Eigenvalue
<input checked="" type="checkbox"/> GRDPNT	0
<input type="checkbox"/> WTMASS	1,
<input checked="" type="checkbox"/> K6ROT	100,
<input type="checkbox"/> MAXRATIO	100000000,
<input type="checkbox"/> NDAMP	0,01
<input type="checkbox"/> INREL	-1..On
<input type="checkbox"/> BOLTFACT	10000000,
<input type="checkbox"/> ENFMOTN	0..Constraint Mode
<input type="checkbox"/> SWPANGLE	0,
<input type="checkbox"/> MGRID	0
MDOF	0
<input type="checkbox"/> MATNL	
<input type="checkbox"/> LANGLE	<input type="checkbox"/> AUTOMPC
<input type="checkbox"/> LGDISP	<input type="checkbox"/> DDRMM off
<input type="checkbox"/> LGSTRN	<input type="checkbox"/> MODACC
<input checked="" type="checkbox"/> PRGPST	<input type="checkbox"/> RESVEC
<input type="checkbox"/> OGEOM	<input checked="" type="radio"/> On <input type="radio"/> Off
<input type="checkbox"/> SRCOMPS	<input type="checkbox"/> RESVNER
<input type="checkbox"/> NOFISR	<input type="checkbox"/> CNTASET
<input type="checkbox"/> BAILOUT	<input checked="" type="checkbox"/> SECOMB

PARAM	
<input type="checkbox"/> ALPHA1	Real 0,
	Complex 0,
<input type="checkbox"/> ALPHA2	Real 0,
	Complex 0,

Format

Small Field

Large Field (CSys, Material, Prop)

Large Field (CSys, Node)

Large Field (All But Elements)

Large Field

Translator Options

All Plates as QUADR/TRIAR

Skip Beam/Bar Cross Sections

Gaps as Contact

Dynamic Loads using LOADSET/LSEQ

Write All Static Load/BC Sets

Rigid Element Method

Manual Control

Skip Standard Bulk Data

End Text at End of File Outside Bulk

Start Text (Off) End Text (Off)

Prev... Next... OK Cancel

Рисунок 20 - Настройки решателя в диспетчере анализа Analysis Set Manager для вывода индексов разрушения и коэффициентов запаса прочности композита в Siemens Femap

Вначале проанализировали модель с симметричной укладкой слоев ( $[45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/45^\circ/90^\circ/45^\circ]$ ). Общие перемещения этой модели показаны на рис. 21.

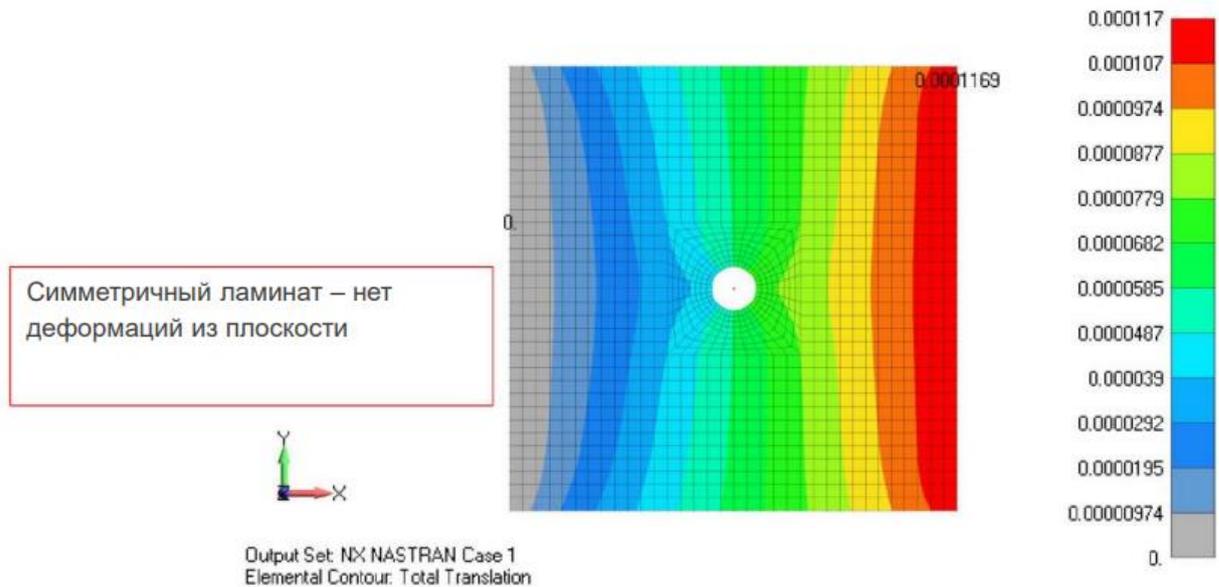


Рисунок 21 - Результаты расчета модели симметричного композита - нет деформаций из плоскости

Деформации симметричны относительно оси X. При приложении одноосной растягивающей нагрузки деформации панели лежат в плоскости, как и ожидалось. Не наблюдается никаких деформаций из плоскости пластины.

Затем была проанализирована модель с несимметричной укладкой слоев ( $[45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ]$ ) рис. 22. Из линий уровней (показанных ниже) можно заметить, что деформации не симметричны относительно оси X. Кроме того, теперь мы можем видеть, что несимметричный слоистый материал привел к деформациям из плоскости пластины, хотя нагрузка была одноосной.

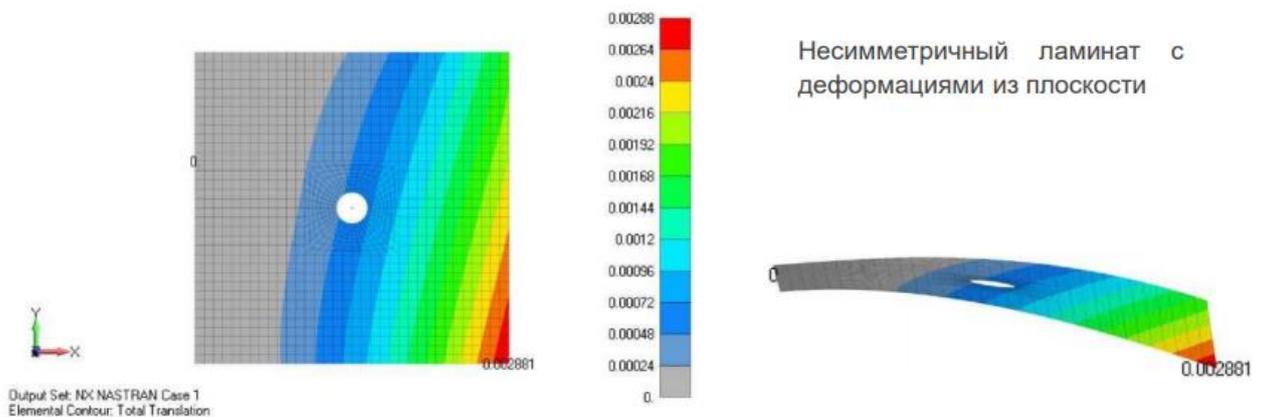


Рисунок 22 - Результаты расчета модели несимметричного композита - есть деформации из плоскости

## Библиографический список

1. Физико-химические основы создания активных материалов : учебник / М. Ф. Куприянов, Ю. В. Кабиров, А. Г. Рудская и др. ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону : Южный федеральный университет, 2011. – 278 с. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=241105> (дата обращения: 30.09.2021). – Режим доступа: по подписке. – Текст : электронный.
2. Томилин, В. И. Физическое материаловедение. В 2 частях : учебное пособие / В. И. Томилин, Н. П. Томилина, В. А. Бахтина. – Красноярск : Сибирский федеральный университет (СФУ), 2012. – Ч. 1. Пассивные диэлектрики. – 280 с. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=229343> (дата обращения: 30.09.2021). – Режим доступа: по подписке. – Текст : электронный.
3. Бурдикова, Т. В. Адгезионная прочность композиционных материалов : учебное пособие / Т. В. Бурдикова, А. М. Коробков, Е. Г. Белов ; Казанский национальный исследовательский технологический университет. – Казань : КНИТУ, 2018. – 148 с. : схем., табл., ил. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=500568> (дата обращения: 30.09.2021). – Режим доступа: по подписке. – Текст : электронный.
4. [Lab\\_work4\\_mikroanaliz.pdf \(tpu.ru\)](#)
5. [Моделирование композитов в Siemens Femap \(cad-is.ru\)](#)
6. [Mashkov\\_MU\\_PZ\\_NiN.pdf \(omgtu.ru\)](#)
7. [ДЗ\\_06\\_Седимен.pdf \(physcolloid.ru\)](#)
8. [Коллоидная химия : примеры и задачи : учебное пособие \(urfu.ru\)](#)  
с.50
9. [Diagram.pdf - Яндекс.Документы \(yandex.ru\)](#)
10. [oleneva.pdf - Яндекс.Документы \(yandex.ru\)](#)  
[4D6963726F736F667420576F7264202D20C83236395FD8E5F1F2E0EAEEE25FE2E5F0F1F2EAE0](https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=4D6963726F736F667420576F7264202D20C83236395FD8E5F1F2E0EAEEE25FE2E5F0F1F2EAE0) (mgsu.ru)
11. [Kompozicionnye\\_materialy.pdf \(sibadi.org\)](#)