

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ**

---

**Кафедра материаловедения и технологии машиностроения**

**ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРУКТУРЫ СТАЛИ  
В ПРОЦЕССЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Методические указания к практическим занятиям  
по курсу «Высокотемпературные материалы в энергетике»

Санкт-Петербург  
2012

УДК 669.017(076.5)

Трансформация структуры стали в процессе высокотемпературной эксплуатации: методические указания к практическим занятиям по курсу "Высокотемпературные материалы в энергетике" / сост.: Г.Н.Теплухин, В.Г.Теплухин, Н.Н.Ситов; СПб ГТУРП. - СПб., 2012, - 16с.

Методические указания позволяют студентам самостоятельно подготовиться к практическим занятиям. Предназначены для студентов всех формы обучения.

Рецензент: канд. техн. наук, доцент кафедры инженерной графики  
Тимофеев А.А.

Подготовлены и рекомендованы к печати кафедрой материаловедения и технологии машиностроения СПб ГТУРП (протокол №1 от 10 сентября 2012г.).

Утверждены к изданию методической комиссией факультета механики автоматизированных производств СПб ГТУРП (протокол №1 от 12 сентября 2012 г.).

© Санкт-Петербургский государственный  
технологический университет  
растительных полимеров, 2012

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- ознакомление со структурными превращениями в сталях, происходящими в процессе высокотемпературной эксплуатации;
- ознакомление с изменением свойств жаропрочных материалов при длительном воздействии температуры.

## АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

В условиях длительного пребывания при высоких температурах структура стали может претерпевать значительные изменения. Основные из них:

- сфероидизация пластинчатых составляющих;
- изменение фазового состава;
- графитизация;
- выделение интерметаллидов пластинчатой формы;
- изменение величины зерна;
- изменения под воздействием нейтронного облучения.

## СФЕРОИДИЗАЦИЯ

В сталях с феррито-перлитной структурой в процессе длительной эксплуатации пластинчатая форма цементитных образований утрачивается. Карбидные пластины превращаются в многочисленные округлые частицы - сфероиды. На рис. 1 представлена схема процесса сфероидизации, а на рис. 2-5 - фотографии микроструктур.

Сфероидизация перлитной составляющей ведёт к понижению пределов прочности ( $\sigma_b$ ) и текучести ( $\sigma_T, \sigma_{0,2}$ ). При прочих равных условиях трещины и другие дефекты наблюдаются на участках труб со сфероидизированной структурой. По мере сфероидизации перлитной составляющей увеличивается скорость ползучести.

Наименее устойчивы в отношении сфероидизации перлитной составляющей углеродистые стали. В них сфероидизация с ощутимой скоростью протекает начиная с 470-480 °С. Легирование молибденом и хромом увеличивает устойчивость перлита, однако при температурах выше 500 °С сфероидизация обнаруживается. Кремний и никель сфероидизацию усиливают. Именно потому указанные элементы в теплоустойчивых сталях не используются.

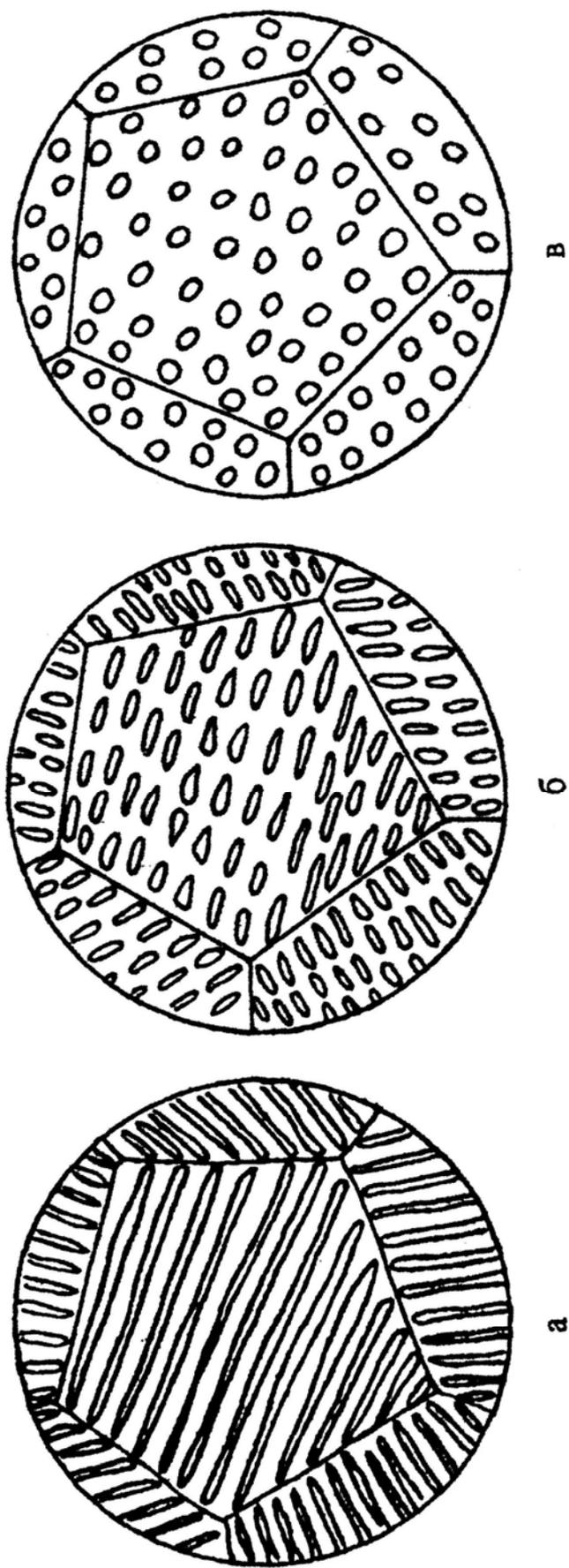


Рис. 1. Схема процесса сфероидизации перлита:  
а- исходная структура – пластичный перлит;  
б- начальная стадия сфероидизации;  
в- зернистый перлит (зернистый цементит)



Рис.2. Пластинчатый перлит в заэвтектоидной стали



Рис.3. Пластинчатый перлит в доэвтектоидной стали

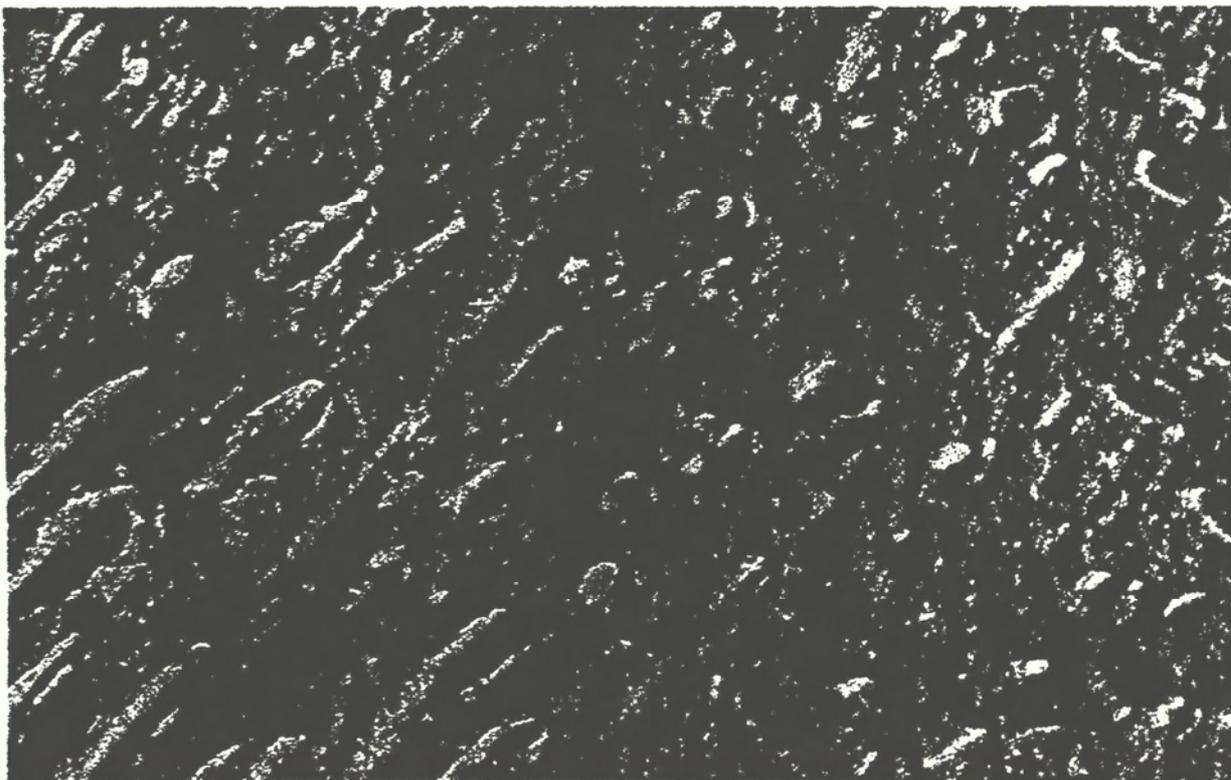


Рис.4. Начальная стадия сфероидизации

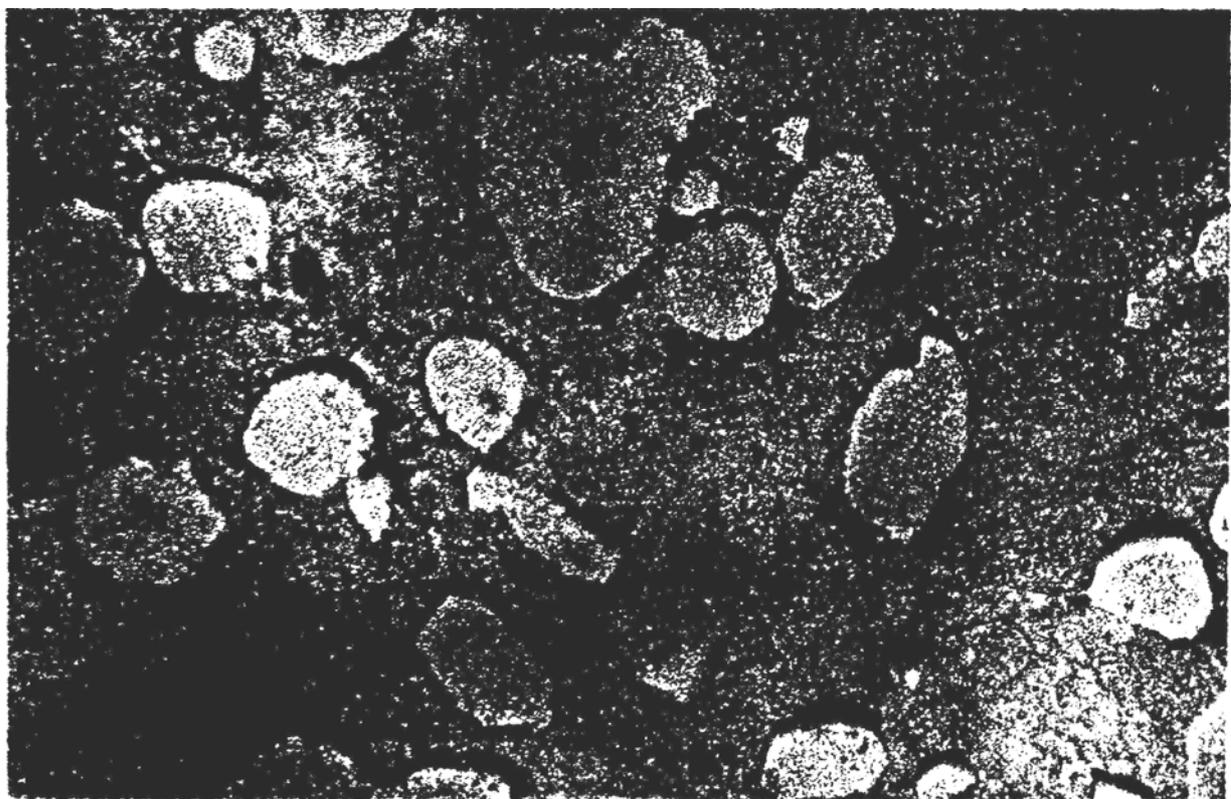


Рис.5. Зернистый перлит

Для оценки степени сфероидизации разработана шестибалльная шкала:  
1-й балл соответствует начальной стадии сфероидизации;  
6-й балл - глубокой сфероидизации, когда цементит полностью теряет пластинчатое строение и принимает форму округлых частиц (сфероидов).

Скорость сфероидизации зависит от температуры и продолжительности процесса, величины перлитного зерна, исходной структуры, величины остаточных напряжений и степени наклёпа.

Время, необходимое для определения степени сфероидизации, может быть найдено с использованием эмпирической формулы:

$$\tau = Ae^{b/T},$$

где  $\tau$  - время, ч;

$T$  - абсолютная температура, К;

$A$  и  $b$  - константы, зависящие от химического состава стали, её исходной структуры, величины зерна и строения перлита.

Ускорению сфероидизации способствует уменьшение размера зерна (крупнозернистые стали сфероидизируются с меньшей скоростью, чем мелкозернистые), утоньшение частиц цементита (отожженные стали сфероидизируются с меньшей скоростью, чем нормализованные), предшествующая пластическая деформация (чем больше степень деформации, тем больше скорость сфероидизации), аналогичным образом влияют остаточные напряжения.

## ИЗМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА

В низколегированных сталях, содержащих молибден (15М, 20М, 15ХМ, 20ХМ, 12МХ), в результате длительного температурного воздействия около 500 °С и выше твёрдый раствор обедняется молибденом, а карбидная фаза, наоборот, обогащается этим элементом. Это явление наблюдается, например, в процессе эксплуатации паропроводов на ТЭЦ.

Так как молибден благотворно влияет на теплостойкость, обеднение им твёрдого раствора приводит к снижению прочности.

## ГРАФИТИЗАЦИЯ

Графитизация развивается в углеродистых сталях при длительном воздействии высоких температур, начиная от 470 - 480 °С, и в сталях типа 15М - от 500 °С.

Углеродистые стали подвержены графитизации независимо от способа их выплавки и условий раскисления. Стали, легированные молибденом, способны графитизироваться лишь при раскислении повышенным количеством алюминия (более 200 г на тонну металла).

Распад цементита в стали происходит медленно, и поэтому требуется значительное время (иногда годы), чтобы графит стало возможным обнаружить металлографическим анализом.

Наибольшую опасность представляют скопления сегрегированного графита, способствующего образованию хрупких с низкой прочностью зон, в которых произойдет зарождение трещины и разрушение.

Менее опасны небольшие точечные образования графита (рис. 6).

Повышение температуры ускоряет процесс графитизации. При этом влияние температуры значительно эффективнее, чем влияние времени.

На развитие процесса графитизации, распределение и величину графитных выделений определённое влияние оказывают напряжения.

Источники напряжений:

- холодная пластическая деформация;
- неравномерное охлаждение при термической обработке.

Предпочтительным местом графитизации металла в рабочих условиях являются низкотемпературные участки зоны теплового влияния сварных швов.

Химический состав также влияет на графитизацию. Препятствуют графитизации карбидообразующие элементы: марганец, молибден, хром, титан, ниобий, вольфрам.

Способствуют графитизации: углерод, кремний, никель, алюминий. Особенно эффективно повышает сопротивление графитизации хром. Достаточно ввести в стали 15М, 20М и др. небольшое количество хрома (0,3 - 0,5%), чтобы предотвратить или, по крайней мере, резко замедлить процесс графитизации. Этим и объясняется наличие хрома в теплоустойчивых сталях 12ХМ, 12Х1МФ, 25Х1МФ, 12Х2МФСР, 20Х3ВМФ, 15Х5ВФ, 14Х12В2МФ, 12Х8ВМ1БФР.

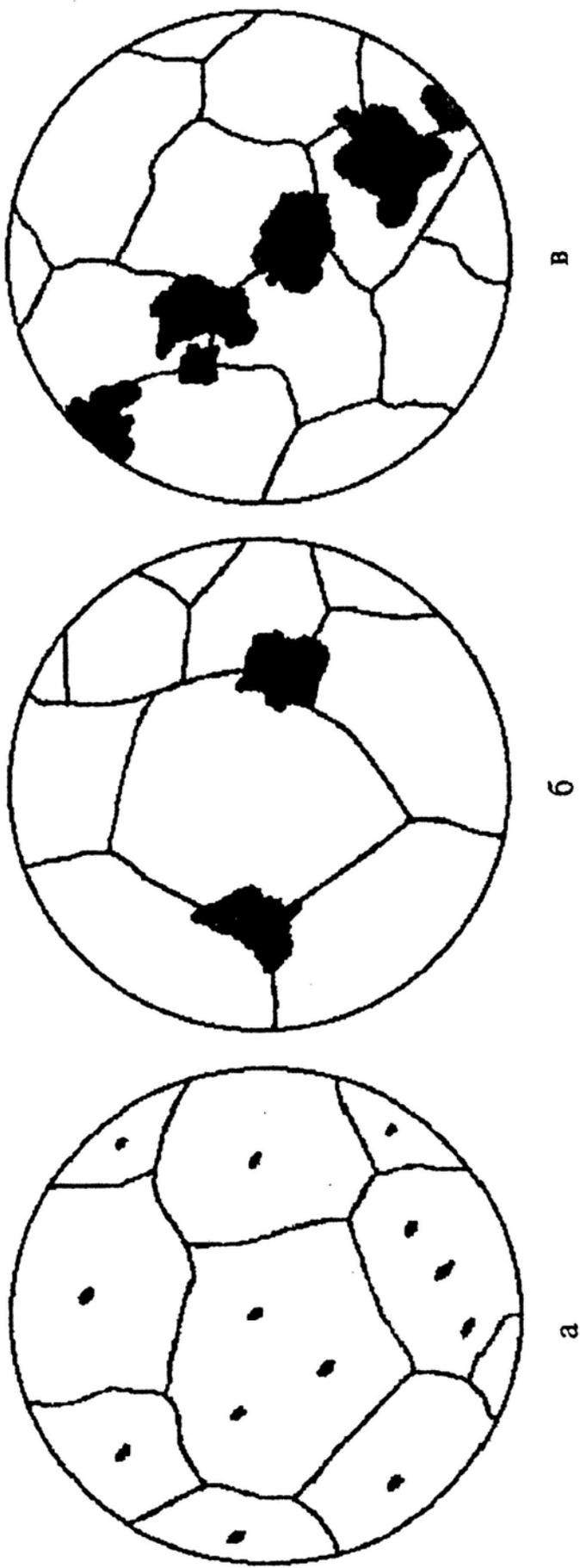


Рис. 6. Графитизация:  
а- выделения точечного графита;  
б- отдельные скопления графита;  
в- сегрегированный графит

## ОБРАЗОВАНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ

В сталях аустенитного класса при длительной эксплуатации в условиях высоких температур (600 - 650 °С) выделяются различные дисперсные фазы, например,  $Ni_3TiAl$  в стали ХН35ВТЮ (старение до 50000 ч), интерметаллид  $Fe_2Ti$  в стали Х12Н20ЕЗР,  $\sigma$  - фаза  $FeCr$  в стали 03Х19Н9МВБТ. Указанные фазы выделяются по границам зёрен или внутри их в виде пластин. В последнем случае обедняется легирующими элементами твердый раствор, уменьшается сопротивляемость внутризеренной пластической деформации и, как следствие, снижается длительная прочность.

## ИЗМЕНЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗЕРНА

В процессе монтажа энергетического оборудования может возникнуть местный холодный наклёп металла (например, при нарезке резьбы, отбортовке, гибке труб). Заметим, что степень деформации в разных зонах при этом будет непременно различной, а поэтому весьма возможно, что некоторые зоны испытают критическую деформацию  $\epsilon_{кр}$  (рис. 7).

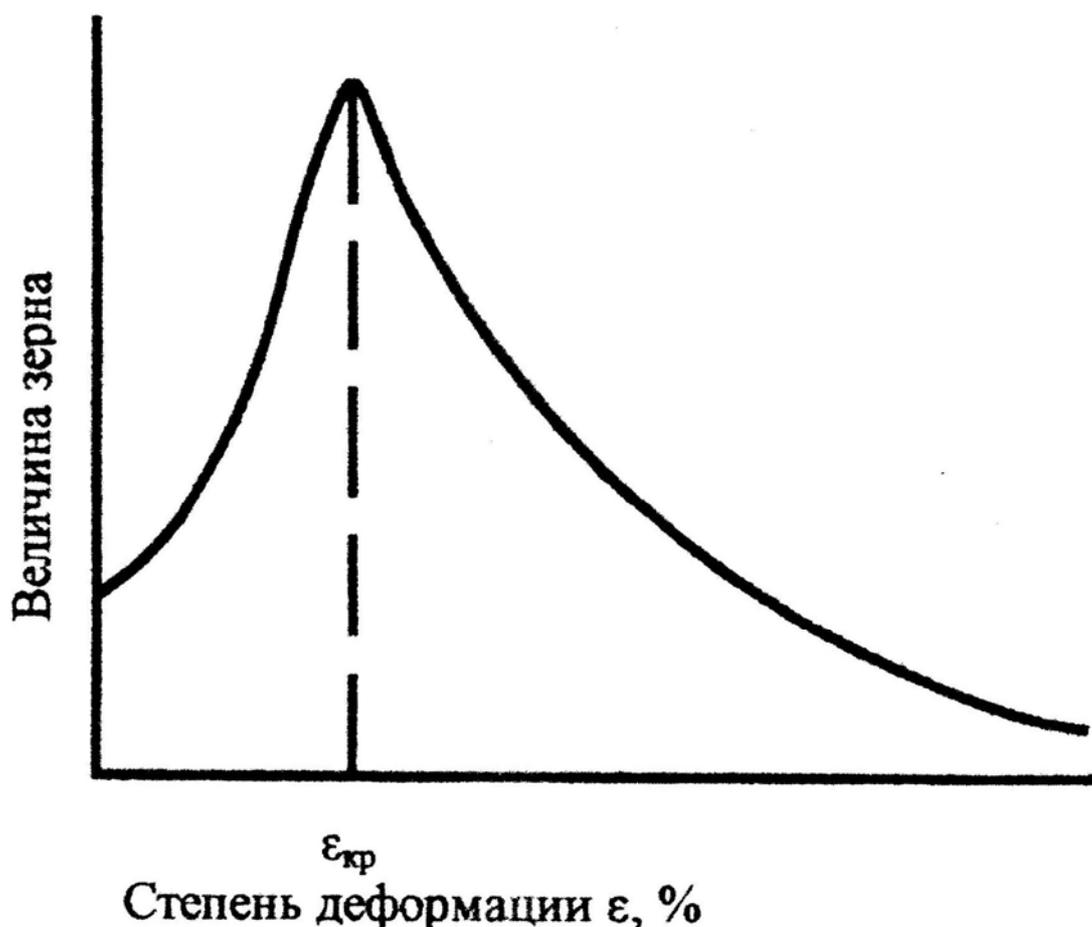


Рис. 7. Влияние степени деформации на величину зерна при рекристаллизации

Если после указанных операций деформированные участки не подвергнуть рекристаллизационному отжигу, то процесс рекристаллизации может развиваться во время промышленной высокотемпературной эксплуатации. При этом непременно образуется разнотельная структура (рис. 8) и на границе раздела крупных и мелких зёрен, особенно при теплосменах, могут образоваться трещины.

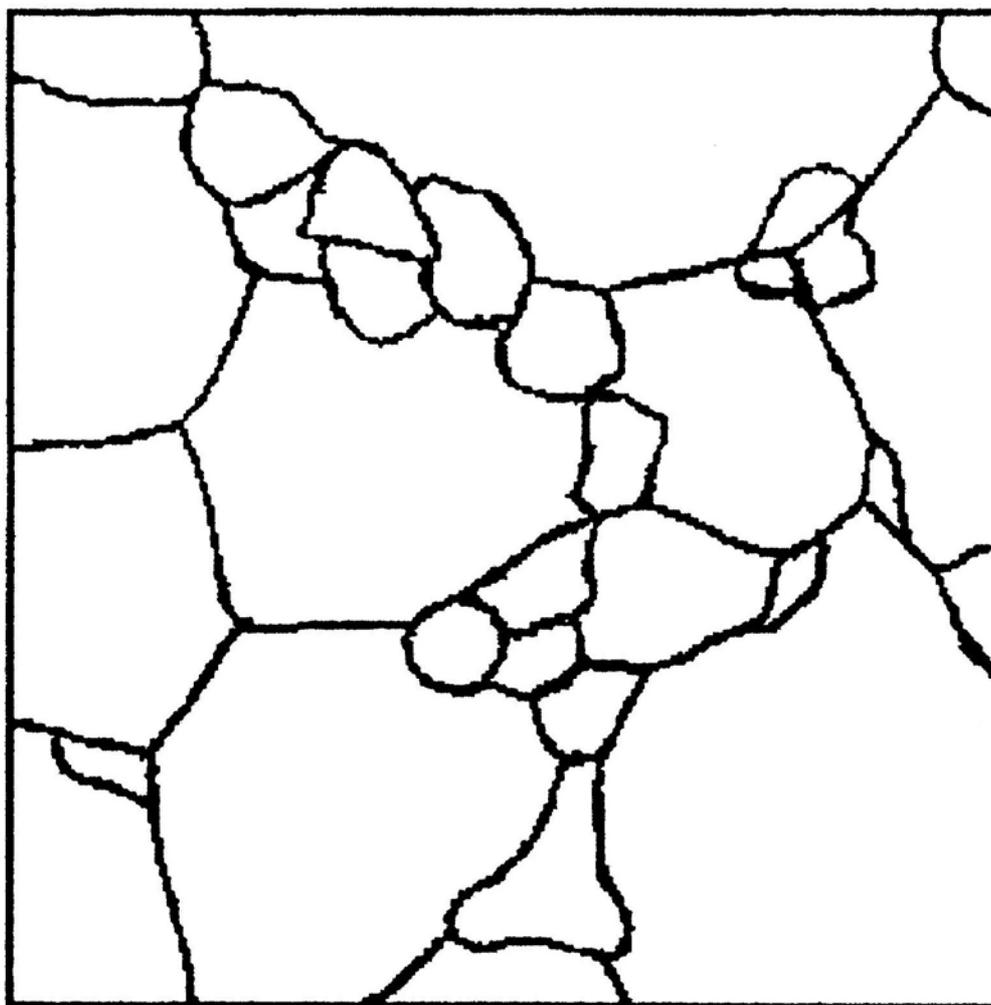


Рис. 8. Разнотельная структура

#### ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРОЦЕССЫ СТРУКТУРО-ОБРАЗОВАНИЯ

В оборудовании атомных электрических станций (АЭС) широко используются аустенитные хромоникелевые стали и высоконикелевые сплавы. Нейтронное облучение, которому подвергаются материалы АЭС, инициирует образование в них трансмутантного гелия, пузырьки которого мигрируют к границам зёрен. Накопление там гелия вызывает охрупчивание (рис. 9). Этот

вопрос особенно важен в связи с возможным увеличением срока службы водяных действующих и проектируемых реакторов ядерных энергетических установок до 60 - 80 и более лет.

В условиях радиации уменьшается растворимость в реакторных сталях фосфора; происходит выделение и миграция его к границам зёрен, образование и даже обособление фосфидов.

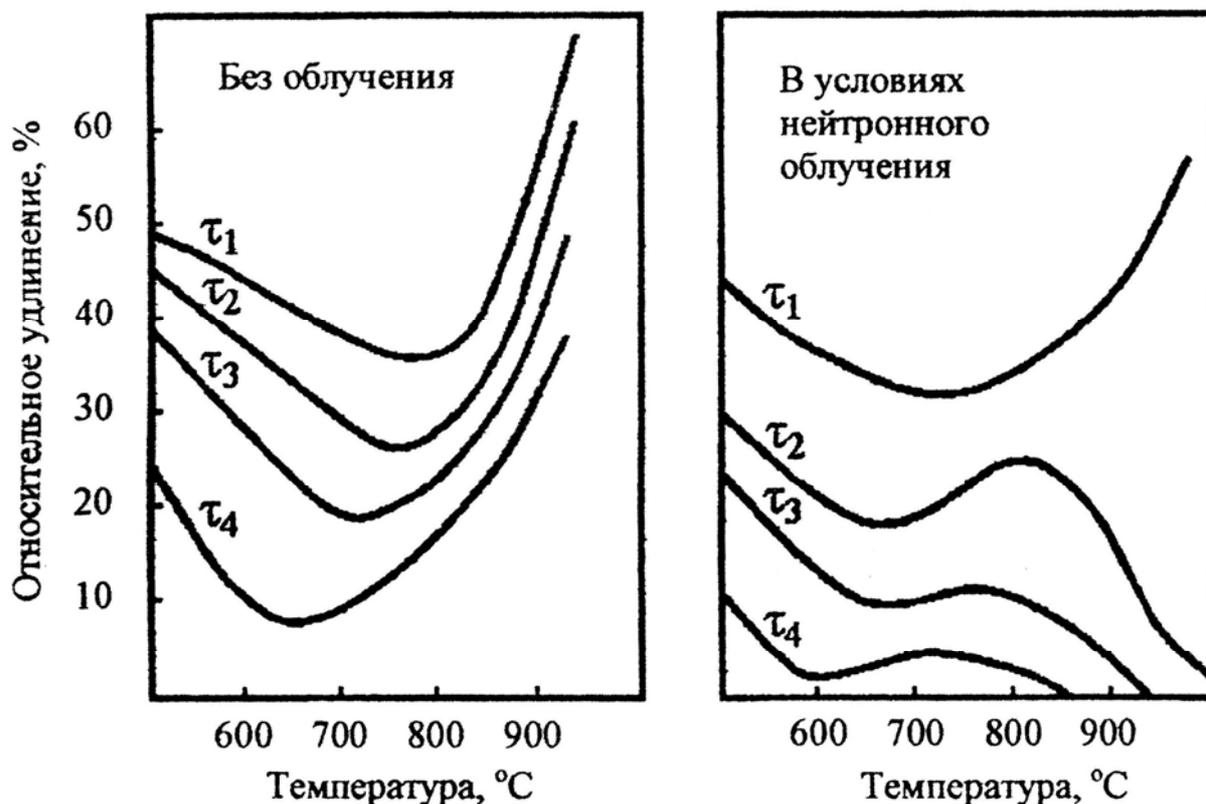


Рис. 9. Характер изменения температурно-временной зависимости длительной пластичности аустенитных хромоникелевых сталей и сплавов без облучения и при нейтронном облучении ( $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3 < \tau_4$ )

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

1. Ознакомиться с основными превращениями, происходящими в структуре сталей при высокотемпературной эксплуатации, вызываемыми этими превращениями изменениями свойств и факторами, влияющими на эти процессы.

2. Получить у преподавателя микрошлифы сталей со структурами пластинчатого перлита начальной стадии сфероидизации, зернистого перлита и изучить их структуру при различных увеличениях микроскопа.

3. Получить микрошлифы сталей с выделениями точечного графита, отдельными скоплениями графита, скоплениями сегрегированного графита и изучить их структуру.

4. Получить микрошлифы с разнотерной структурой. Изучить структуру.

5. Зарисовать схематически все изученные микроструктуры, указав марки сталей, структурные составляющие и увеличение микроскопа.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ

- Как влияет сфероидизация перлитной составляющей на предел прочности и предел текучести сталей с феррито–перлитной структурой?
- Каким образом на сфероидизацию перлитной составляющей влияют легирующие элементы?
- Как оценивается степень сфероидизации?
- Что способствует ускорению сфероидизации?
- Какова опасность изменения фазового состава стали в процессе высокотемпературной эксплуатации?
- Рассмотрите температурно - временные условия графитизации в углеродистых и легированных сталях.
- Влияют ли на процесс графитизации холодная пластическая деформация и неравномерное охлаждение при термической обработке?
- Какова роль химического состава стали при графитизации?
- Объясните причину отрицательного влияния процесса образования интерметаллов на длительную прочность, пластичность и ползучесть легированной стали.
- Каким образом может повлиять неравномерная холодная пластическая деформация на структуру и свойства стали в процессе последующей высокотемпературной эксплуатации?
- Какова роль рекристаллизационного отжига после холодной пластической деформации?
- Объясните причину понижения пластичности хромоникелевых сталей при работе их в условиях нейтронного облучения.

## ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЁТУ

Отчёт должен содержать:

- название практической работы;
- цель работы;
- краткие сведения об изменении структуры и свойств сталей при длительном воздействии высокой температуры;
- графики, иллюстрирующие влияние степени деформации на величину зерна при рекристаллизации и влияние нейтронного облучения на длительную пластичность;
- схематическое изображение микроструктур с различной степенью сфероидизации, разной формой выделения графита, разнотельной структурой.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Теплухин Г.Н. Закономерности структурообразования в сталях перлитного класса.- Л.: ЛГУ, 1982. - 186 с.

Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов / А.Д. Амаев [и др.]; под ред. А.М. Паршина, П.А. Платонова. - СПб.: Политехника, 1997. - 312 с.

Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. - Л.: Машиностроение, 1973. - 296 с.

Сичиков М.Ф. Металлы в турбостроении. - Изд. 2-е, перераб., и доп. - М.: Машиностроение, 1974. - 288 с.

Хрестоматия и специальные вопросы металловедения / А.М. Паршин [и др.]; под ред. А.М. Паршина и А.Н. Тихонова. - СПб.: Изд-во СПбПУ, 1998. 304 с.

Интеллектуальное достояние отечества и некоторые вопросы металловедения / А.М. Паршин [и др.] под ред. А.М. Паршина и А.Н. Тихонова. - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. - 439 с.

Теплухин Г.Н., Пейсахов А.М. Фазовые превращения в сталях перлитного класса. Изд-во СПбПУ, - СПб.: 2009. - 219 с.

Боровков В.М. Материалы и прочность оборудования ТЭС : уч. пособие / В.М. Боровков [и др.], под ред. В.М. Боровкова, Л.Б. Гецова. – СПб. : Изд-во СПбПУ, 2008. - 611 с.

## Содержание

Цель работы.....	3
Актуальность проблемы .....	-
Сферотизация .....	3
Изменение фазового состава .....	7
Графитизация .....	-
Образование интерметаллидов.....	10
Изменение величины звена .....	-
Влияние нейтронного облучения на процессы структурообразования .....	11
Порядок выполнения практического задания .....	12
Вопросы для самоподготовки.....	13
Требования к отчету.....	14
Библиографический список.....	-

Гелий Николаевич Теплухин  
Василий Гельевич Теплухин  
Николай Николаевич Ситов

## **ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРУКТУРЫ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**Методические указания к практическим занятиям по курсу  
«Высокотемпературные материалы в энергетике»**

Редактор и корректор В.А.Басова.  
Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2012г., поз. 59

---

Подп. к печати 25.12.12 Формат 60x84/16. Бумага тип. № 1.  
Печать офсетная. Объем 1,0 печ. л., 1,0 уч. – изд. л.  
Тираж 200 экз. Изд. № 59. Цена "С". Заказ №

---

Ризограф Санкт-Петербургского государственного  
технологического университета растительных полимеров.  
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.