

Белорусский Государственный Университет
Физический факультет
Кафедра ядерной физики

Сегрегация элементов в сплаве

Выполнил студент 5-ого
курса

Сапрунов Евгений
Витальевич

Минск 2012

Сегрегация

Явление радиационно-индуцированной сегрегации (РИС) является более общим, чем эффект диффузии, поскольку оно проявляется посредством радиационно-стимулирующей диффузии. РИС определяет возникновение концентрационных градиентов и часто вызывает появление бимодальных пространственных концентрационных или возникновение неравновесных преципитатов. В результате непрерывного образования пар Френкеля в процессе облучения и сильного взаимодействия между растворенными атомами твердого раствора и точечными дефектами в материале устанавливаются квазистационарные потоки подвижных точечных дефектов и их комплексов на различные типы стоков. К ним относятся как существующие перед облучением, так и возникшие в процессе облучения стоки. Это является причиной РИС и расслоения твердого раствора.

Сегрегация

Следствием распада гомогенного твёрдого раствора в облучаемом материале являются два важных взаимосвязанных процесса: перераспределение и локальное изменение композиционного и примесного состава материалов, зарождение и рост новых выделений вторых фаз и модификация композиций фаз, существующих до облучения.

В общем случае дефектами-стоками могут быть:

- дислокационные петли;
- поры;
- границы зёрен;
- выделение вторых фаз.

Механизмы радиационно-индуцированной сегрегации

Обратный эффект Киркендалла по вакансионному механизму РИС подтверждает, что предпочтительная миграция атомов возникает из-за различий в скорости обмена атомов и вакансий. Относительная частота перескоков каждой разновидности может быть определена из термических коэффициентов само-диффузии. Очевидно, что потоки атомов движутся в направлении, противоположном вакансионному потоку, таким образом, что наиболее медленно диффундирующие элементы обогащаются, а наиболее быстро диффундирующие обедняются.

Механизмы радиационно-индуцированной сегрегации

Обратный эффект Киркендалла по междоузельному механизму РИС аналогичен вакансионному, однако в этом случае поток атомов движется в том же самом направлении, что и поток дефектов.

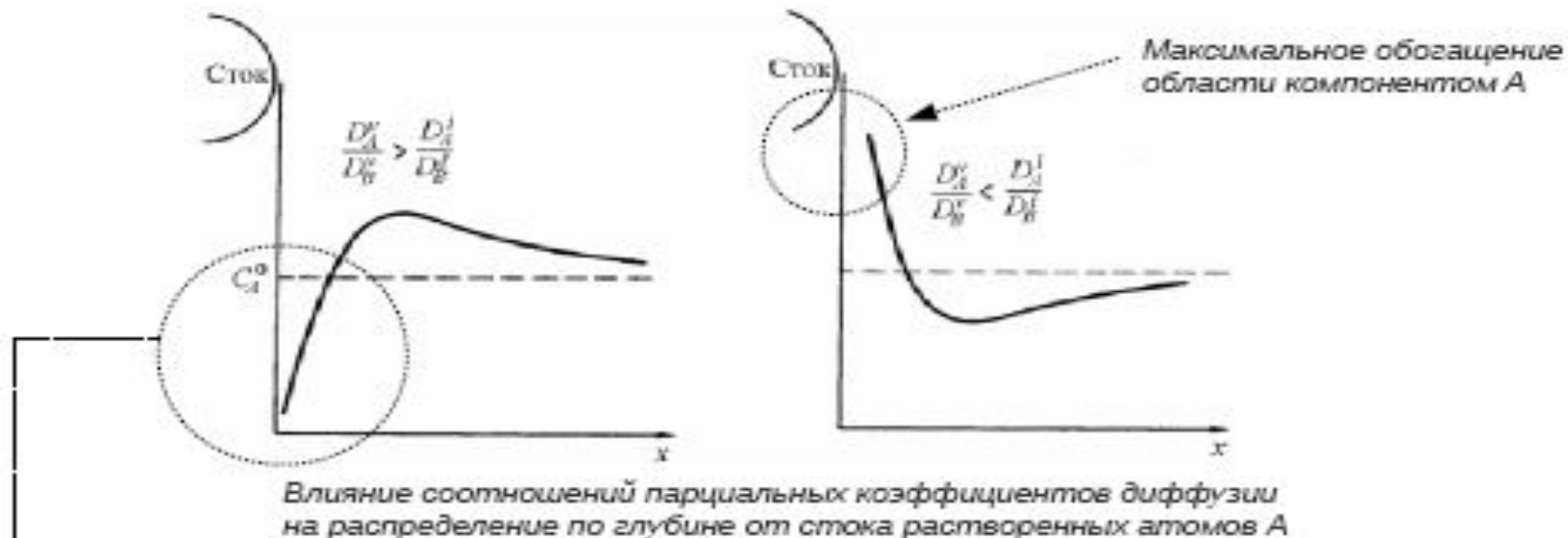
Обратный эффект Киркендалла вблизи стока дефектов в двойном сплаве с компонентами А и В описывается следующими уравнениями:

Механизмы радиационно-индуцированной сегрегации

- $$\frac{I_A^i}{I_B^i} = \frac{D_A^i C_A}{D_B^i C_B}$$
$$\frac{I_A^v}{I_B^v} = \frac{D_A^v C_A}{D_B^v C_B}$$

где I_A^v, I_B^v - потоки атомов по вакансионному механизму; I_A^i, I_B^i - потоки атомов по междоузельному механизму; $D_A^v, D_A^i, D_B^v, D_B^i$ - парциальные коэффициенты диффузии компонентов А и В по вакансному и междоузельному механизмам; C_A, C_B - атомные концентрации компонентов А и В.

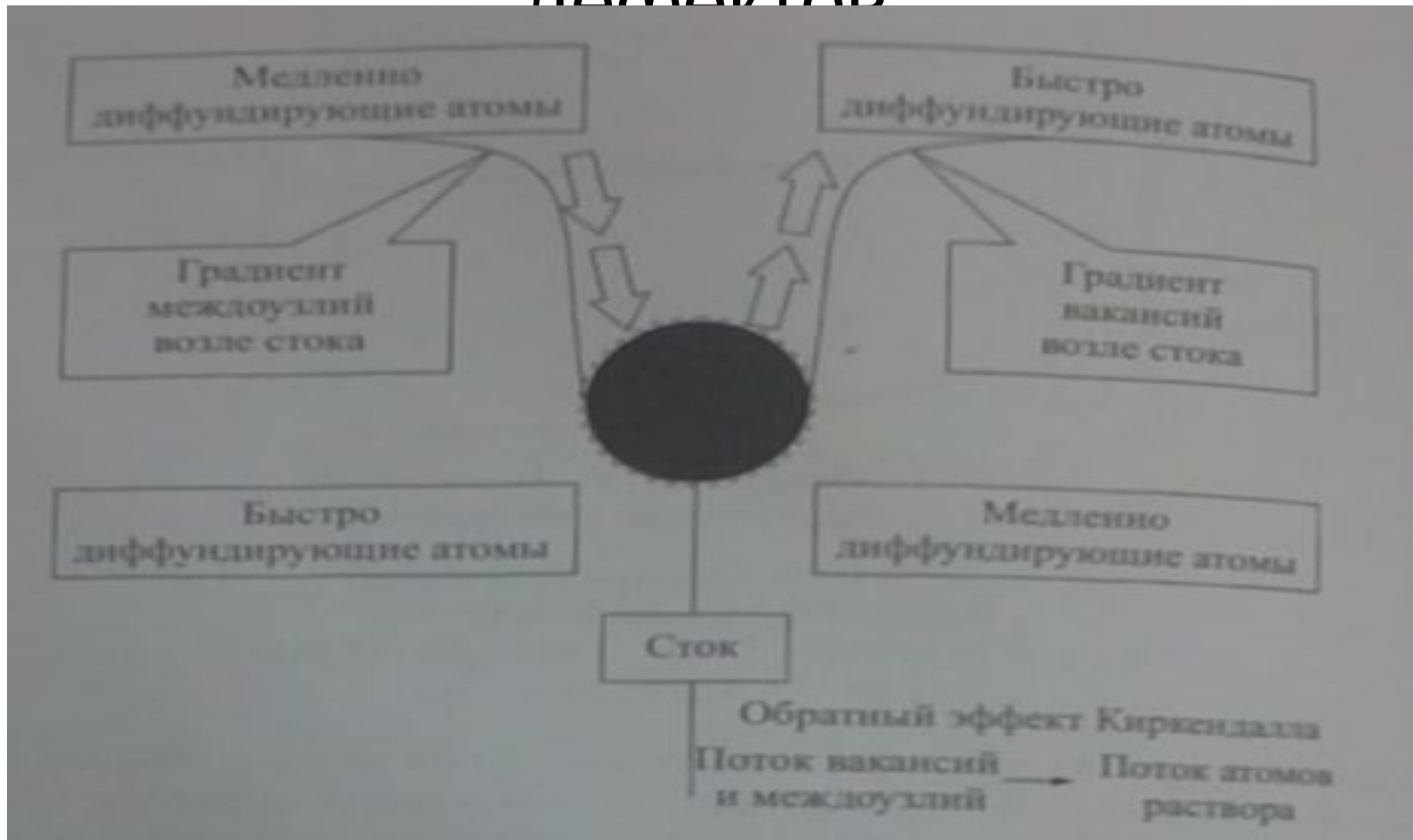
Механизмы радиационно-индуцированной сегрегации



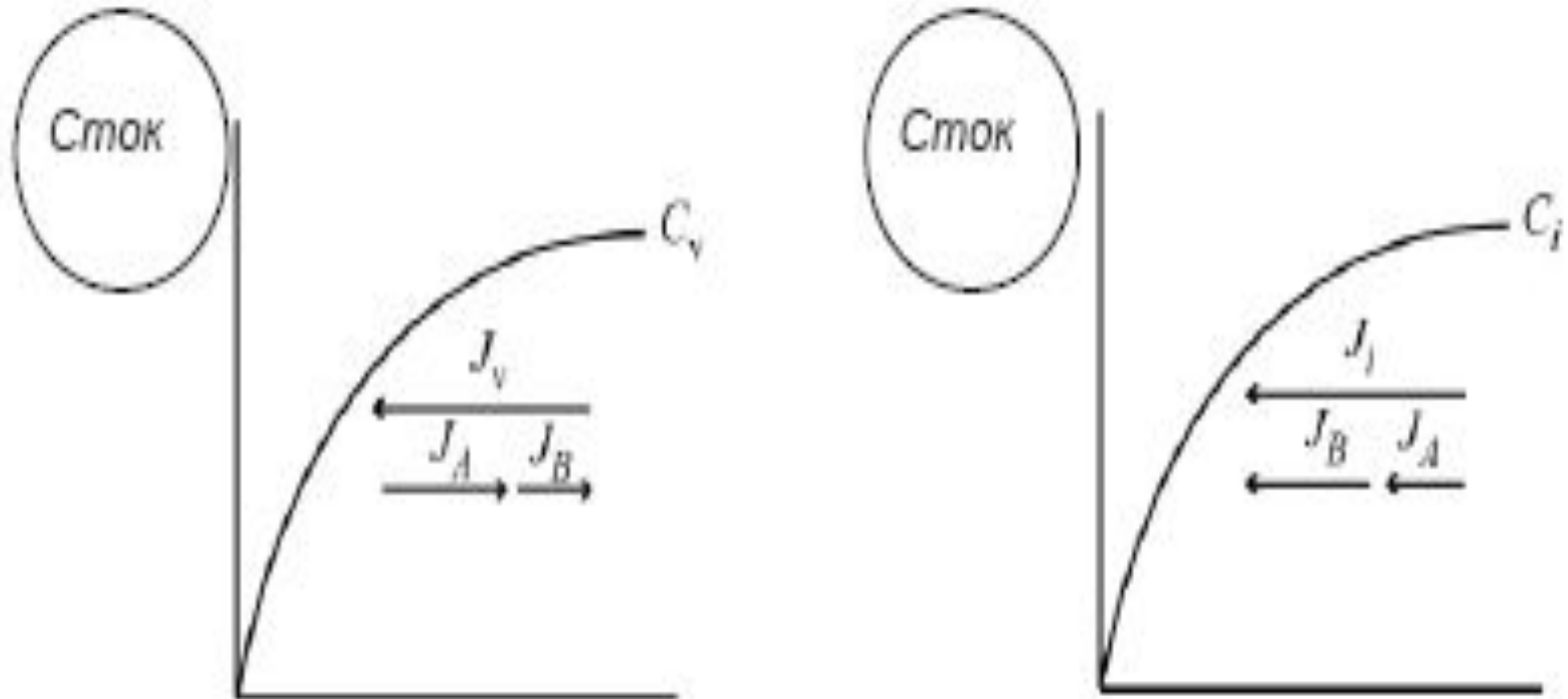
Обеднение области, прилегающей к стоку, компонентом А (перенос атомов А по вакансионному механизму преобладает над межузельным). В случае (б) наблюдается обратная ситуация.

Вывод: Максимальное обогащение области вблизи стока компонентом А реализуется в случае, когда атомы А диффундируют только по междоузлиям, а атомы В – только по вакансиям.

Схема обратного эффекта Киркендалла вблизи стока дефектов



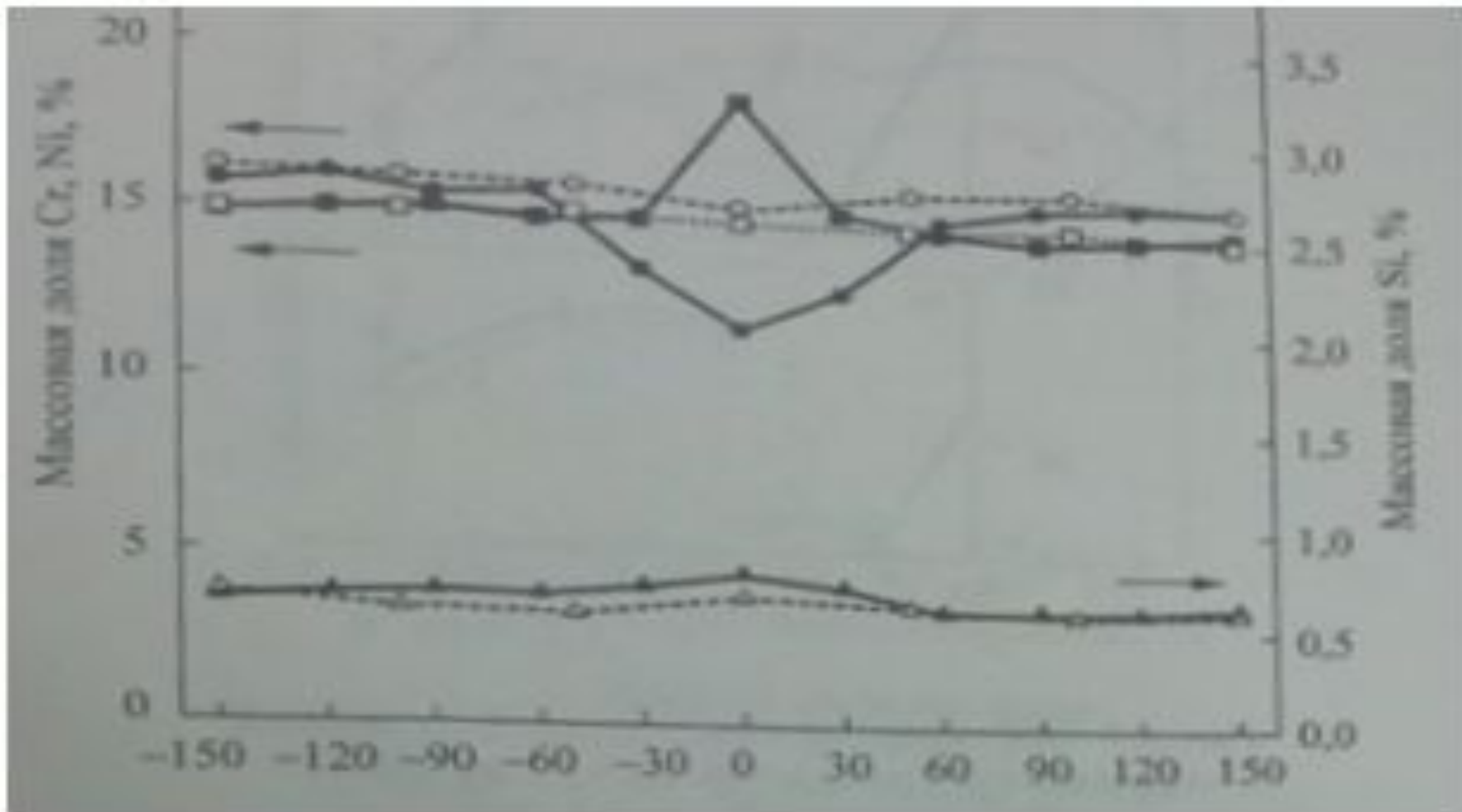
Обратный эффект Киркендалла



Схематическое изображение обратного эффекта Киркендалла, вызванного потоком вакансий (а) и межузельных атомов (б)

Влияние на различные материалы

В **аустенитных сталях** (*1X18H9T, 0X16H15M3Б, близких к ним американских сталях SS304 и SS316*) в результате облучения различными типами частиц при относительно небольшой степени повреждаемости ($\Phi \sim 10E19$ нейтр./см²) и $T < 400C$ наблюдаются выделения ферромагнитной α -фазы. Кроме того, происходит образование **карбидов** сложного состава и **карбонитридов**. Основными карбидообразующими элементами в аустенитных сталях, применяемых в настоящее время в активных зонах реакторов, являются **титан и ниобий**.



Профили сегрегации элементов на грани зерна в облученной стали 0X16H15M3B ($T_{\text{обл}} = 440$ гр. С)

Δ, \blacktriangle - Si; \square, \blacksquare - Ni; \square, \bullet - Cr (Δ, \square, \square - D = 8сна; $T_{\text{обл}} = 340$ гр.С; $\blacktriangle, \blacksquare, \bullet$ - D = 13сна)

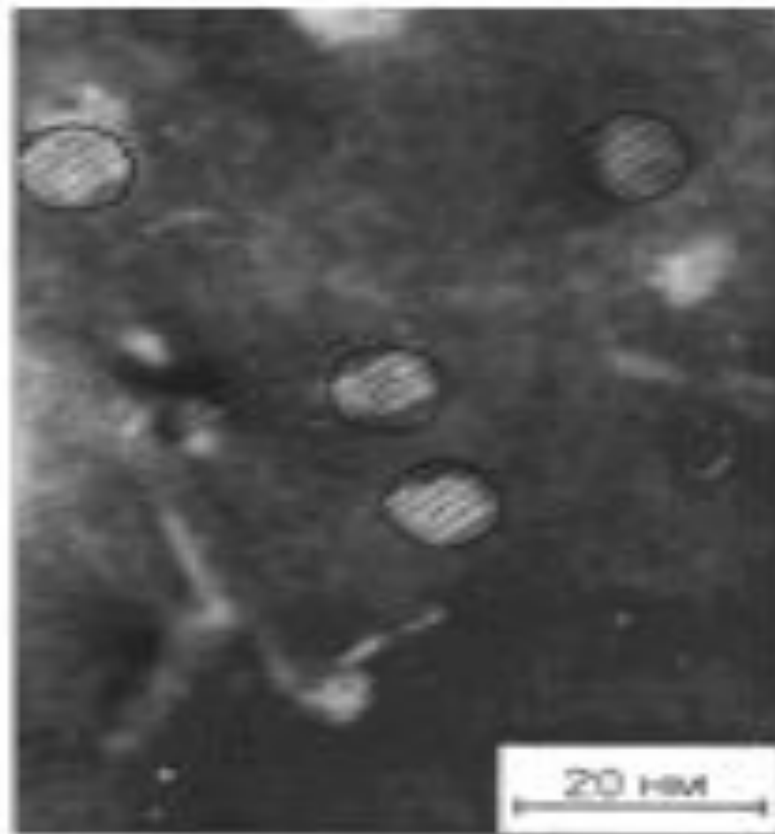
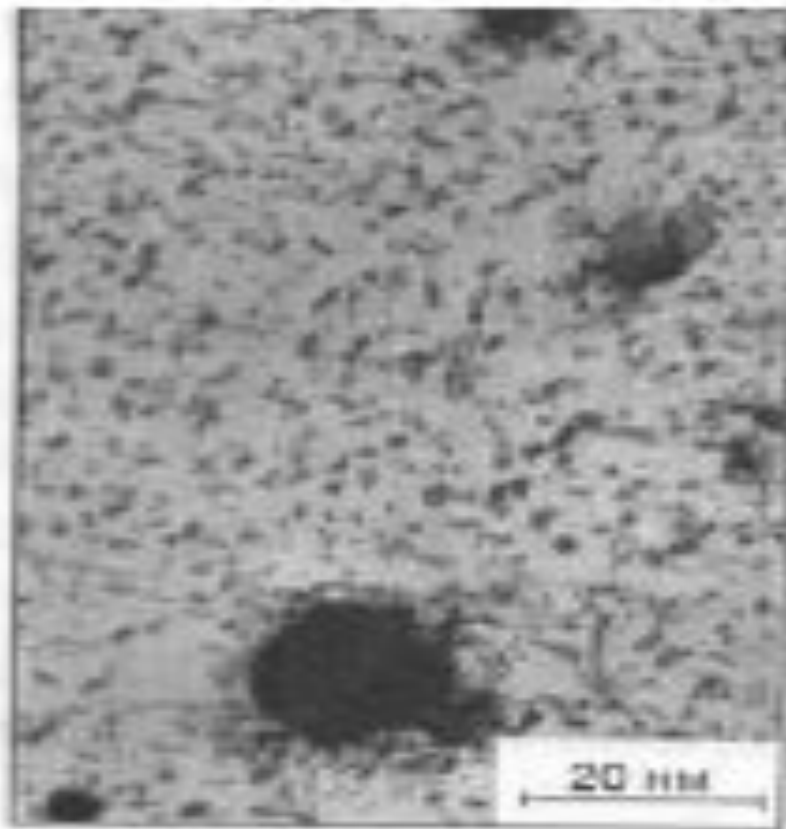
Карбиды CM

Карбиды MC ($NbC, TiC, VC, etc...$) представители радиационно-модифицированной группы выделений. *Скорость формирования* изменяется в процессе облучения, но *композиция* которых изменяется незначительно по сравнению с термически образованными выделениями.

Выделения ($NbC, TiC, VC, etc...$) могут быть крупнозернистыми (первично остались нерастворенными в процессе обработки в растворе) и мелкодисперсными, содержащими небольшие количества кремния. Крупные (до 1 мкм) карбиды (карбонитриды) являются главным образом сфероидальными выделениями. **Мелкие внутризеренные (вторичные) карбидные выделения являются следствием облучения.** Часть атомов углерода карбидах может быть частично замещена атомами азота, кислорода, т. е. в общем виде эти выделения следует классифицировать как MX , где $X = [C, O, N]$. Зарождение этих выделений происходит, как правило, на дислокациях или дефектах упаковки.

η -Фаза (M_6C) является другим представителем радиационно-ускоренной фазы. Большинство частиц развивается в форму ромбоэдрических дисков.

Карбиды СМ



Выделения MC (слева первичные карбиды, справа – вторичные)

Ферритные стали

В температурном интервале от 350 до 425 °С облучение приводит к образованию большого количества мелкодисперсных выделений второй фазы. С ростом температуры облучения концентрация выделений второй фазы падает, а размер увеличивается (с 2 до 5-10 нм соответственно). Выделения гомогенно распределены по ферриту и сорбиту.

Наблюдается формирование мелкодисперсной ОЦК α' - *фазы* (обогащенного хромом феррита) в ряде ферритных сталей с 9 и 12 % Cr, облученных в быстрых реакторах, *(существует чувствительность образования α' -фазы к температуре облучения)*

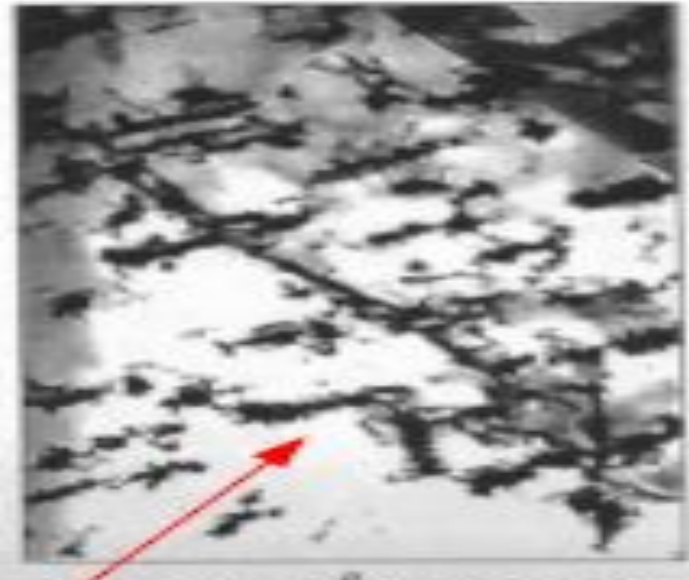
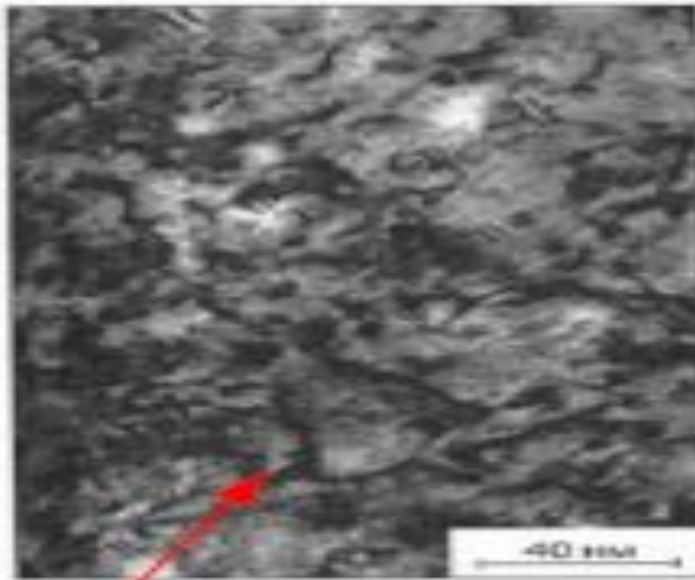
Ферритные стали

Наряду с α' -фазой, в температурном интервале 300- 350 °С и дозах ~ 10 сна в феррите происходит образование игольчатых выделений типа ***M2X***, по составу близких к Cr₂N. Размер этих выделений растет от 50 нм при 300 °С до 100 нм при 550 °С.

Облучение при температурах 500-550 °С приводит к выделению в феррите небольшого количества выделений типа ***MC***, обогащенных *ванадием*; помимо матричного феррита они выделяются также на границах зерен. Размер их составляет 50-60 нм.

Повышение температуры облучения до 550-650 °С приводит лишь к коагуляции зернограницных выделений типа ***M23C6*** и ***M6C***; образование радиационно-индуцированных фаз при таких температурах не обнаружено.

Ферритные стали



Формирование мелкодисперсной
ОЦК σ' -фазы (обогащенного
хромом феррита).

M_2X

MeC

