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 точных 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 распада твёрдого раствора.

Сегрегация

Следствием распада гомогенного твёрдого раствора в облучаемом материале являются два важных взаимосвязанных процесса: перераспределение и локальное изменение композиционного и приметного состава материалов, зарождение 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 вакасионному 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.

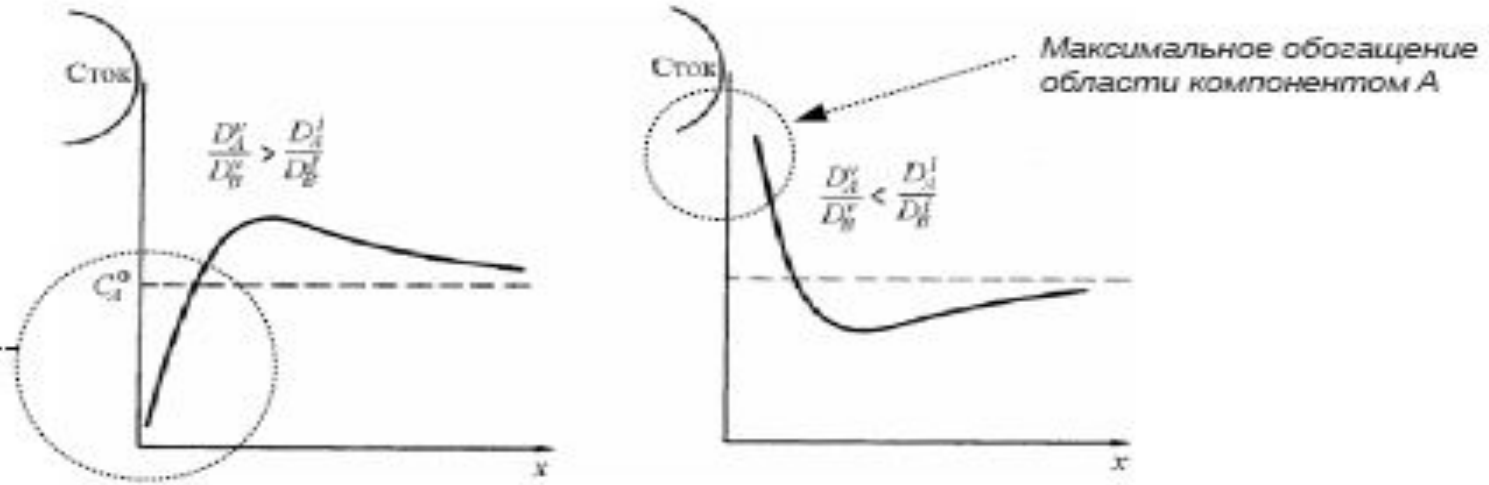
Обратный эффект Киркендалла вблизи стока дефектов в двойном сплаве с компонентами А и В описывается следующими уровнениями:

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 мееждоузельному механизму; D_A^v, D_A^i, D_B^v, D_B^i - парциальные коэффециенты диффузии компанентов А и В по вакансному и муждоузельному механизмам; C_A, C_B - атомные концентрации компонентов А и В.

Механизмы радиационно-индуцированной сегрегации

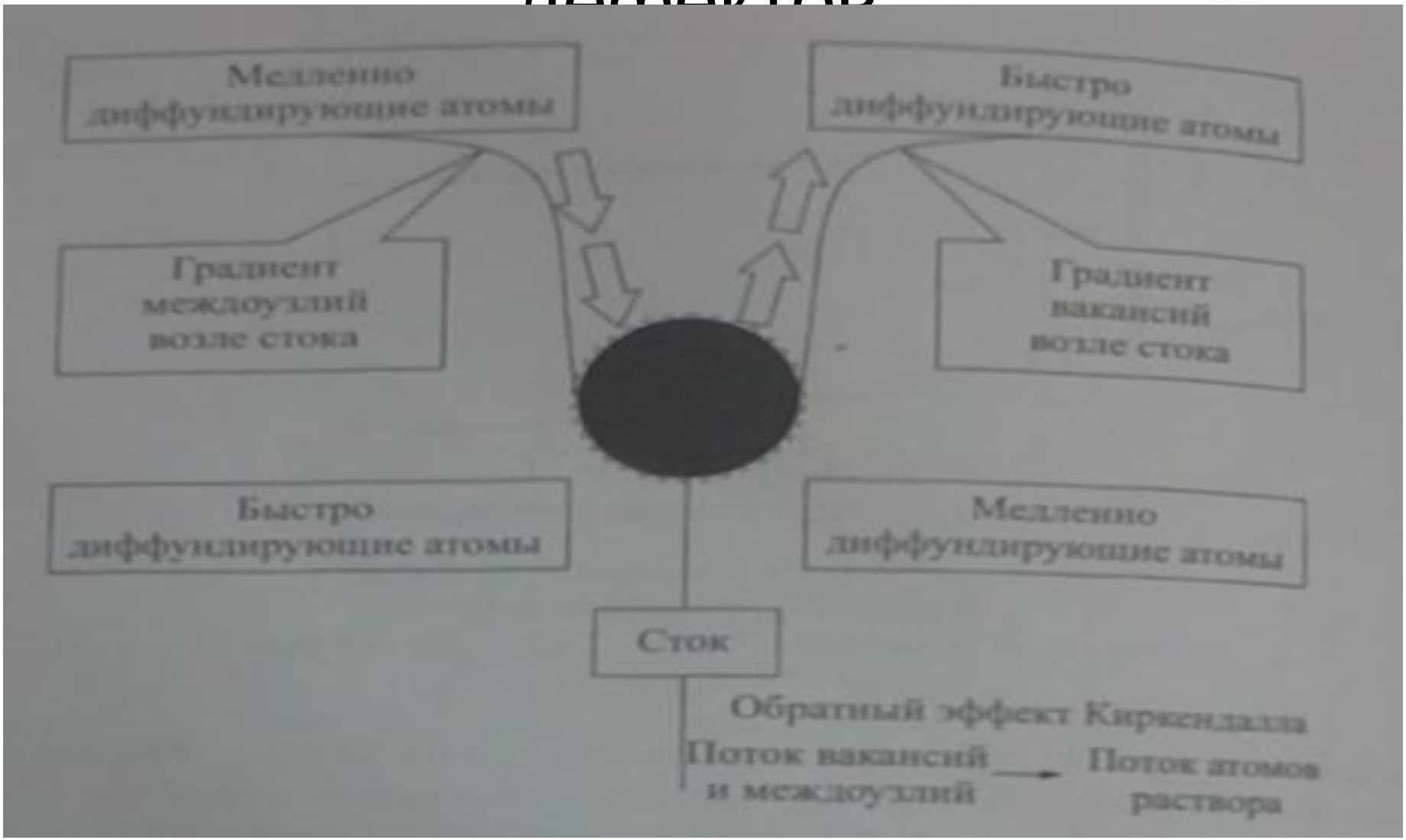


Влияние соотношений парциальных коэффициентов диффузии на распределение по глубине от стока растворенных атомов А

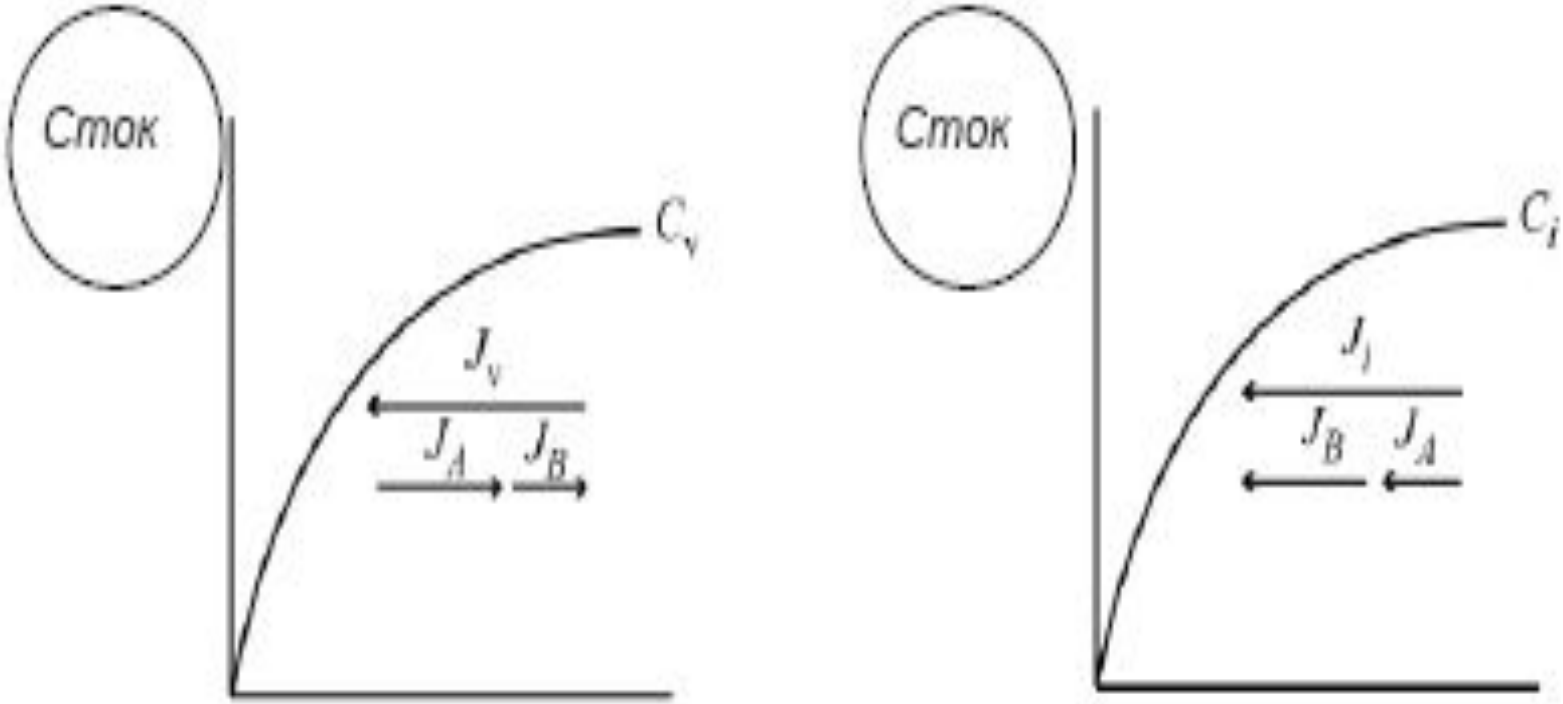
Обеднение области, прилегающей к стоку, компонентом А (перенос атомов А по вакансионному механизму преобладает над межузельным). В случае *(б)* наблюдается обратная ситуация.

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



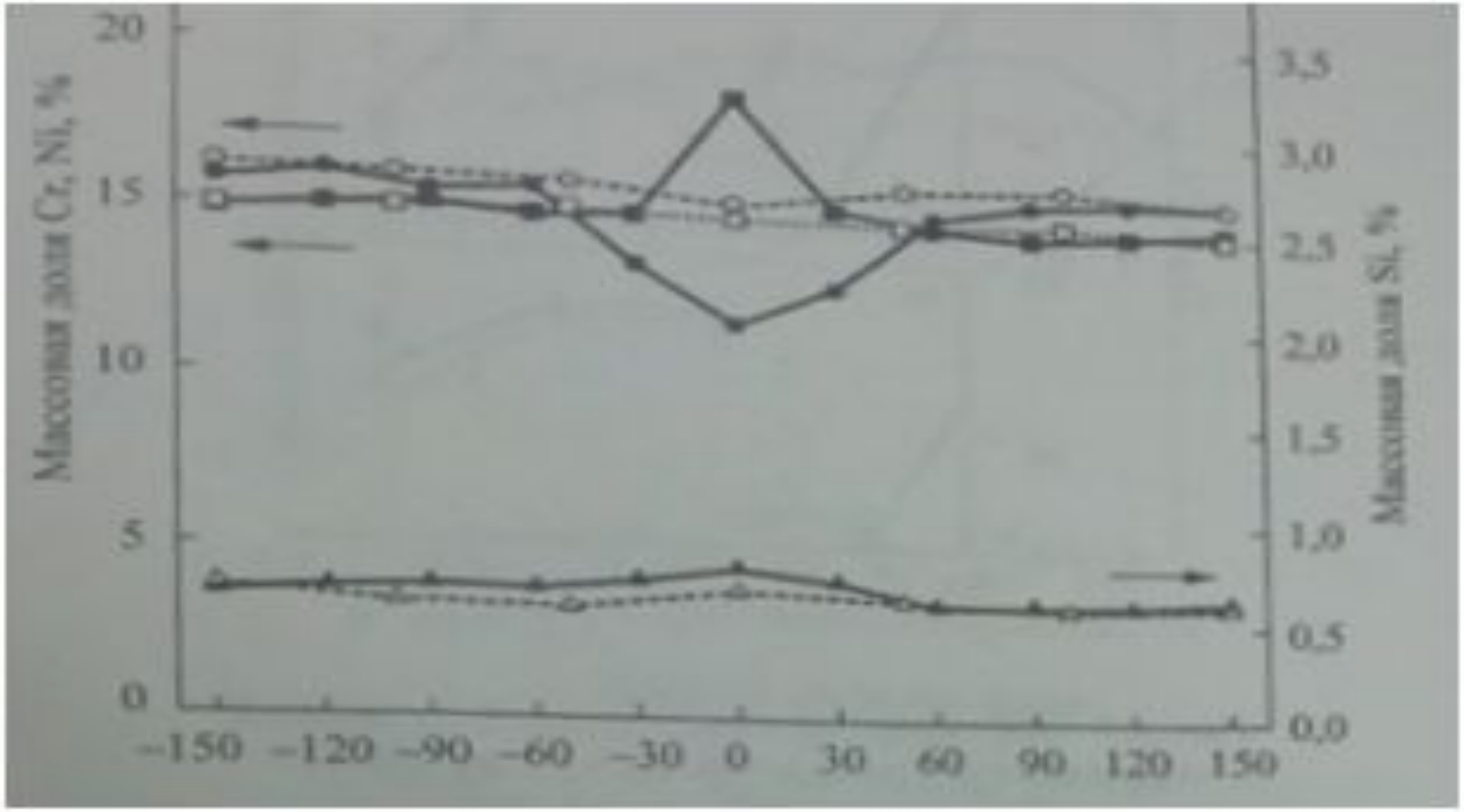
Обратный эффект Киркендалла



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

Влияние на различные материаллы

В ***аустенитных сталях*** *(1Х18Н9Т, 0Х16Н15М3Б, близких к ним американских сталях SS304 и SS316)* в результате облучения различными типами частиц при относительно небольшой степени повреждаемости *(Ф ~ 10Е19 нейтр./см2)* и *Т<400С* 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 *0Х16Н15М3Б* ($T_{обл}$=440 гр. С) △, ▲ - Si; ⬜, ⬛ - Ni; □, ● - Cr(△ , ⬜ , □ - D = 8сна; $T_{обл}$=340гр.С; ▲ , ⬛ , ● - D = 13сна)

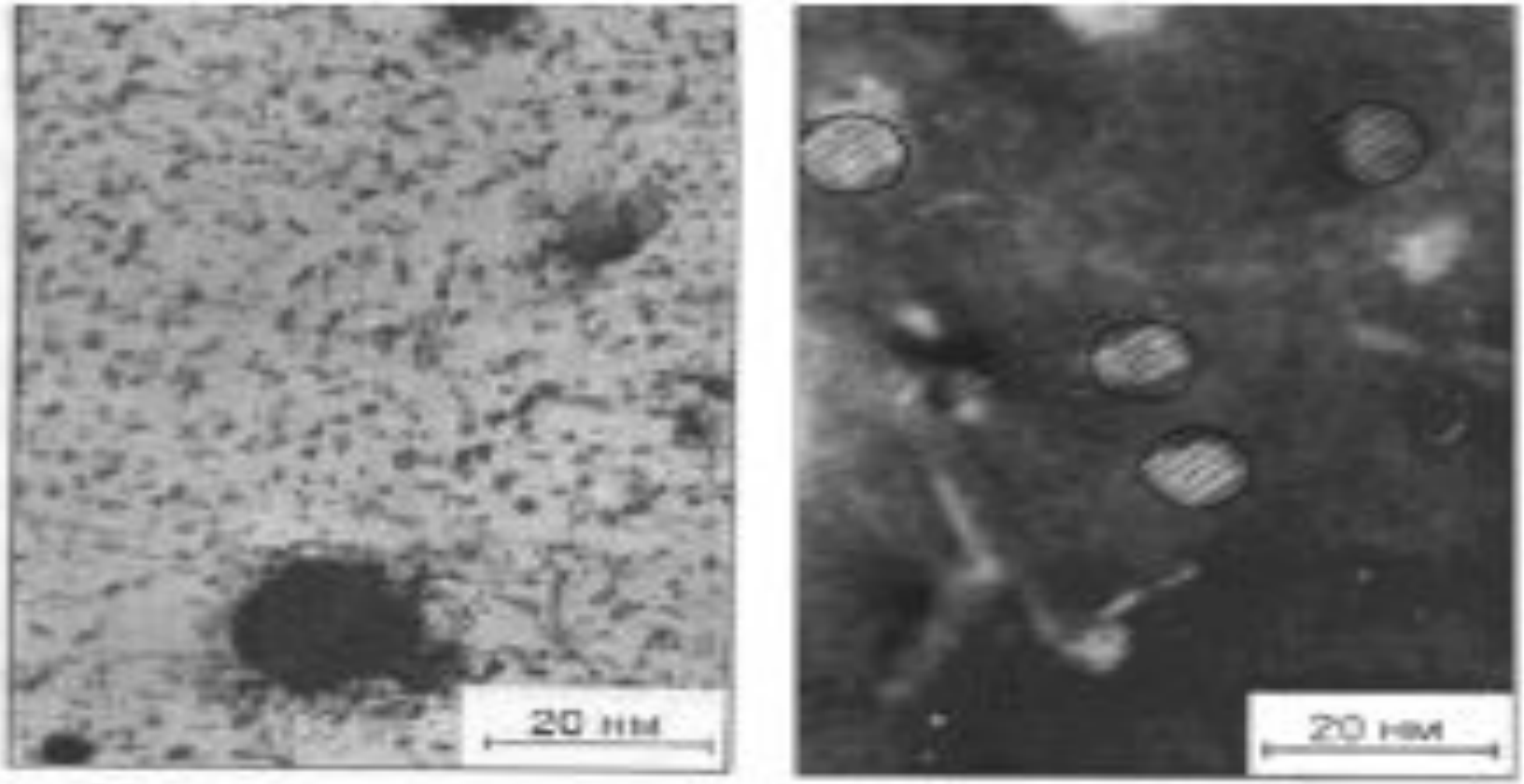
Карбиды СМ

Карбиды МС*(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 (M6C) является другим представителем *радиационно-ускоренной фазы*. Большинство частиц развивается в форму ромбоэдрических дисков.

Карбиды СМ



Выделения МС (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)*

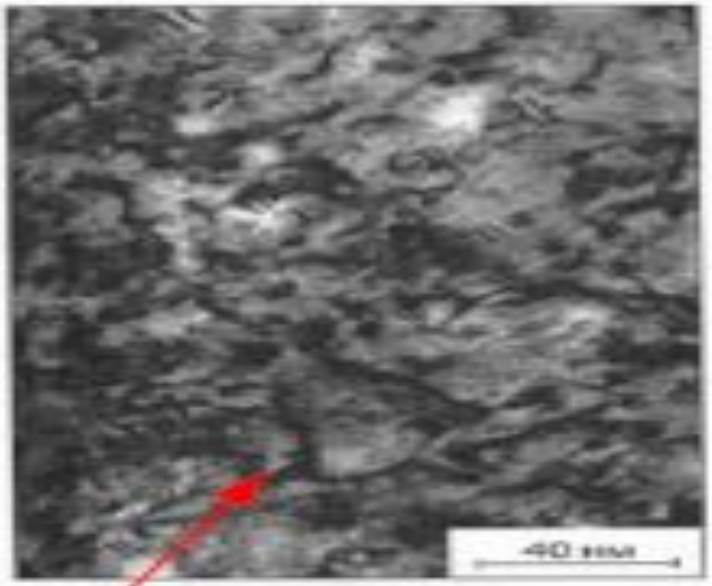
Ферритные стали

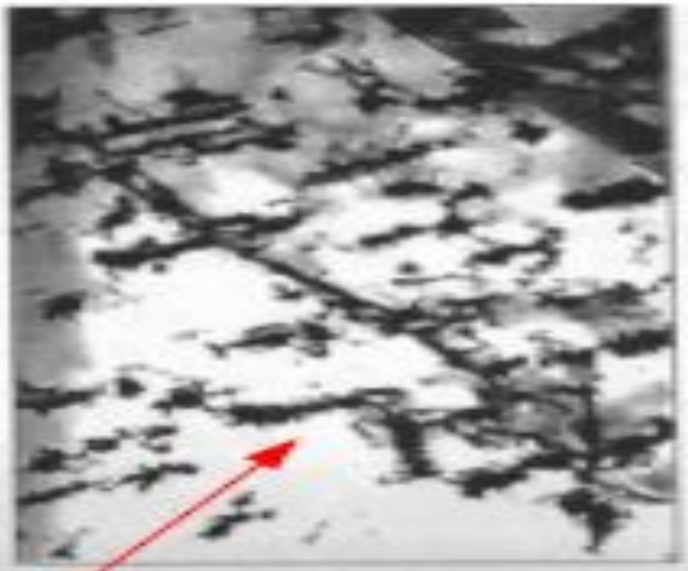
Наряду с α'-фазой, в температурном интервале 300- 350 °С и дозах ~10 сна в феррите происходит образование игольчатых выделений типа ***M2X***, по составу близких к Cr2N. Размер этих выделений растет от 50 нм при 300 °С до 100 нм при 550 °С.

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

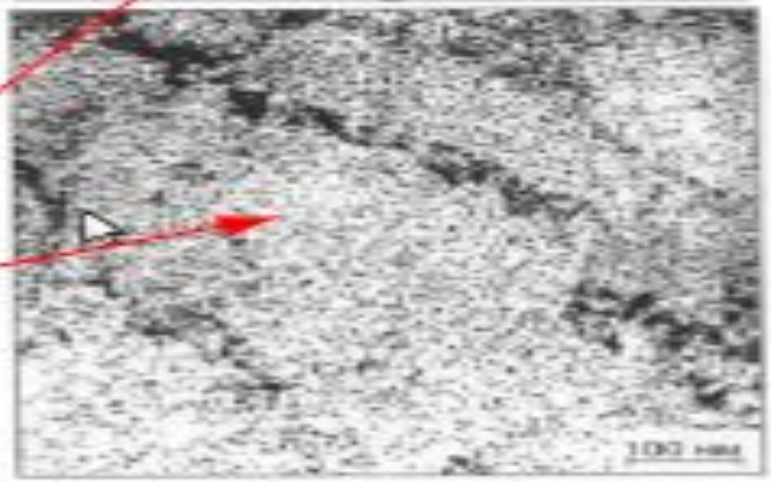
Повышение температуры облучения до 550-650 °С приводит лишь к коагуляции зернограничных выделений типа ***M23C6*** и ***M6C***; образование радиационно-индуцированных фаз при таких температурах не обнаружено.

Ферритные стали





Формирование мелкодисперсной ОЦК σ'-фазы (обогащенного хромом феррита

M_2X

M_6C