

Отпуск сталей

Отпуск в сталях

Отпуск – это термическая обработка стали с метастабильной структурой мартенсита или нижнего бейнита, которая заключается в нагреве ее до температуры ниже критической точки A_1 , выдержке при этой температуре и последующем охлаждении.

Основная цель отпуска – снятие закалочных напряжений, повышение пластичности и вязкости сталей, снижение склонности к хрупкому разрушению, общая стабилизация структуры.

Изменение основных **параметров** отпуска – температуры нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения – приводит к различным сочетаниям характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости закаленных и отпущенных сталей.

Особенности процессов отпуска закаленной стали вызваны следующими причинами:

- При закалке образуется мартенсит, являющийся пересыщенным по углероду α твердым раствором железа;
- Мартенситное превращение приводит к возникновению неоднородных и весьма высоких внутренних напряжений, образованию тонкой субструктуры и высокой плотности дефектов кристаллической решетки.
- Диффузионная подвижность углерода, железа и легирующих элементов сильно отличается, поэтому при повышении температуры развиваются процессы приближения к равновесному состоянию.

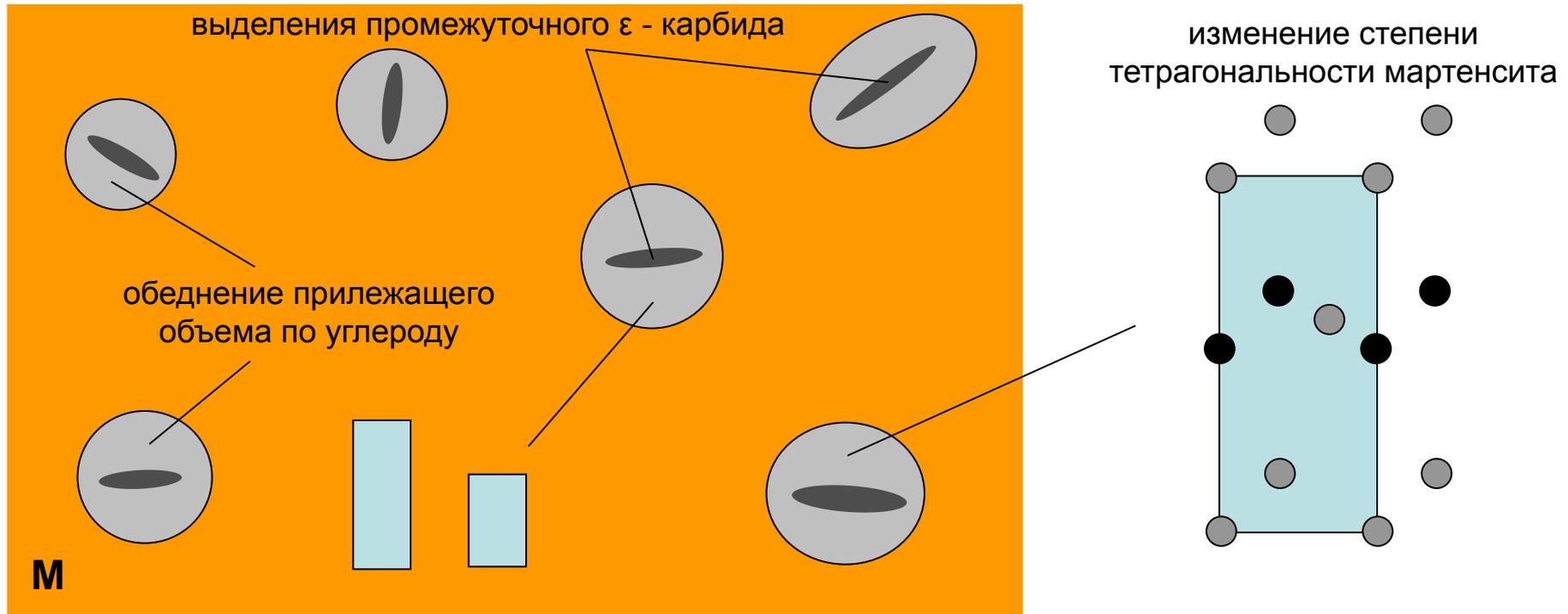
Отпуск в сталях

Перераспределение углерода. Выделение промежуточных карбидов.

Мартенсит представляет собой пересыщенный по углероду α тв. раствор железа, поэтому при повышении температуры будет происходить перераспределение углерода в мартенситной фазе.

Первая стадия – *двухфазный распад* (при температуре ниже 150°C)

сосуществуют два мартенсита с исходной и более низкой концентрацией углерода и, соответственно, с разной степенью тетрагональности решеток.



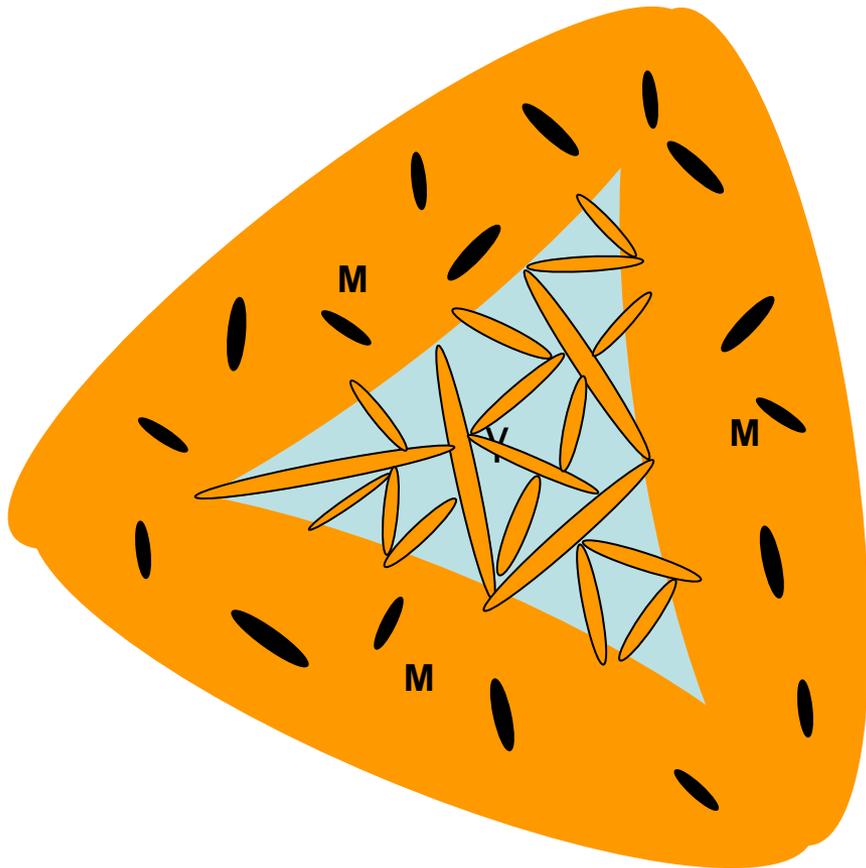
Вторая стадия – *однофазный распад* (при температуре выше 150°C)

диффузионная подвижность атомов углерода возрастает, концентрация по объему мартенситной фазы выравнивается

Отпуск в сталях

Распад остаточного аустенита.

После закалки в структуре наряду с мартенситом практически всегда имеется некоторое количество остаточного аустенита. Его распад активно протекает в интервале температур 200 - 300°C, превращение при этом подобно тому, которое при данной температуре испытывал бы переохлажденный аустенит. Остаточный аустенит при отпуске превращается в нижний бейнит.



Распад остаточного аустенита идет по промежуточному диффузионно – сдвиговому механизму и поэтому сопровождается положительным объемным эффектом.

Наиболее существенную роль распад остаточного аустенита играет в процессе отпуска легированных и высокоуглеродистых сталей, где он находится в значительных количествах.

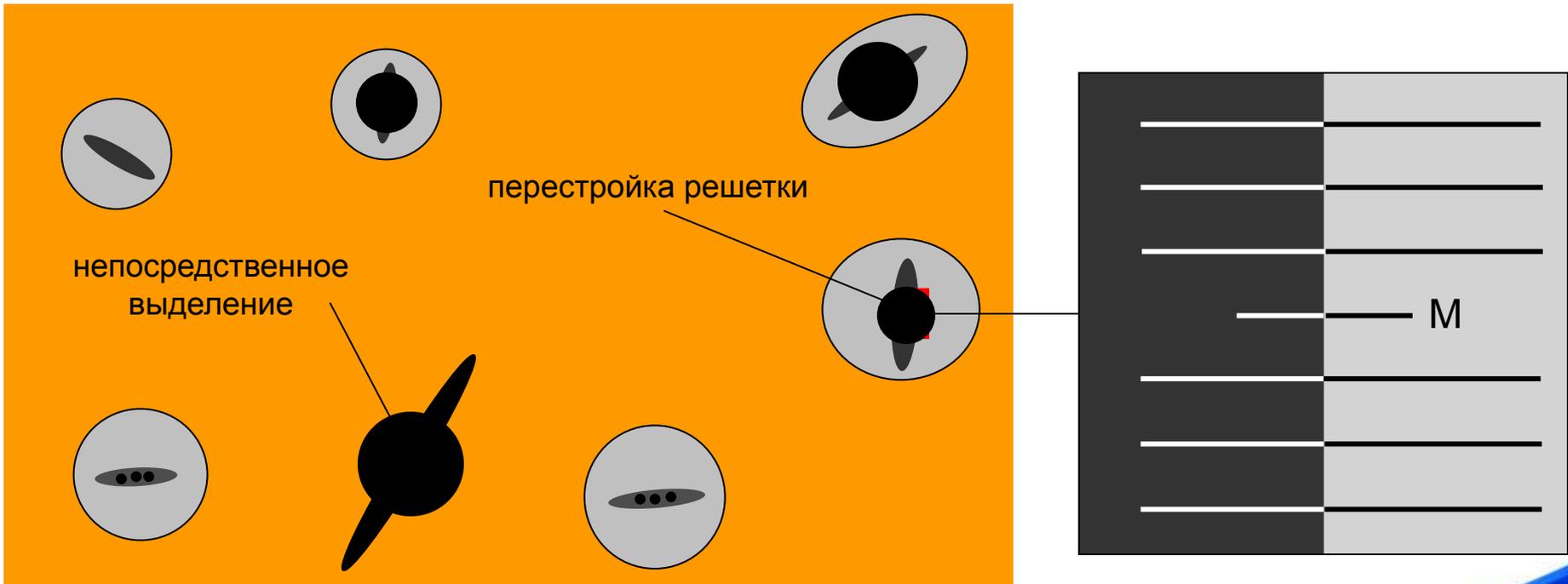
Отпуск в сталях

Выделение цементитных карбидов.

При температуре двухфазного распада мартенсита в виде тонких пластин или стержней выделяется метастабильный ϵ – карбид Fe_2C . Это обусловлено тем, что он имеет гексагональную решетку, которая когерентно сопрягается с решеткой мартенсита.

При повышении температуры концентрация углерода в мартенсите снижается, что приводит к изменению межплоскостных расстояний. Решетка мартенсита начинает лучше сопрягаться с решеткой цементита Fe_3C .

Образование цементита возможно двумя путями: **перестройкой** решетки ϵ – карбида в решетку цементита или **непосредственном выделении** цементита из пересыщенного α тв. раствора (при этом промежуточные ϵ – карбиды растворяются).

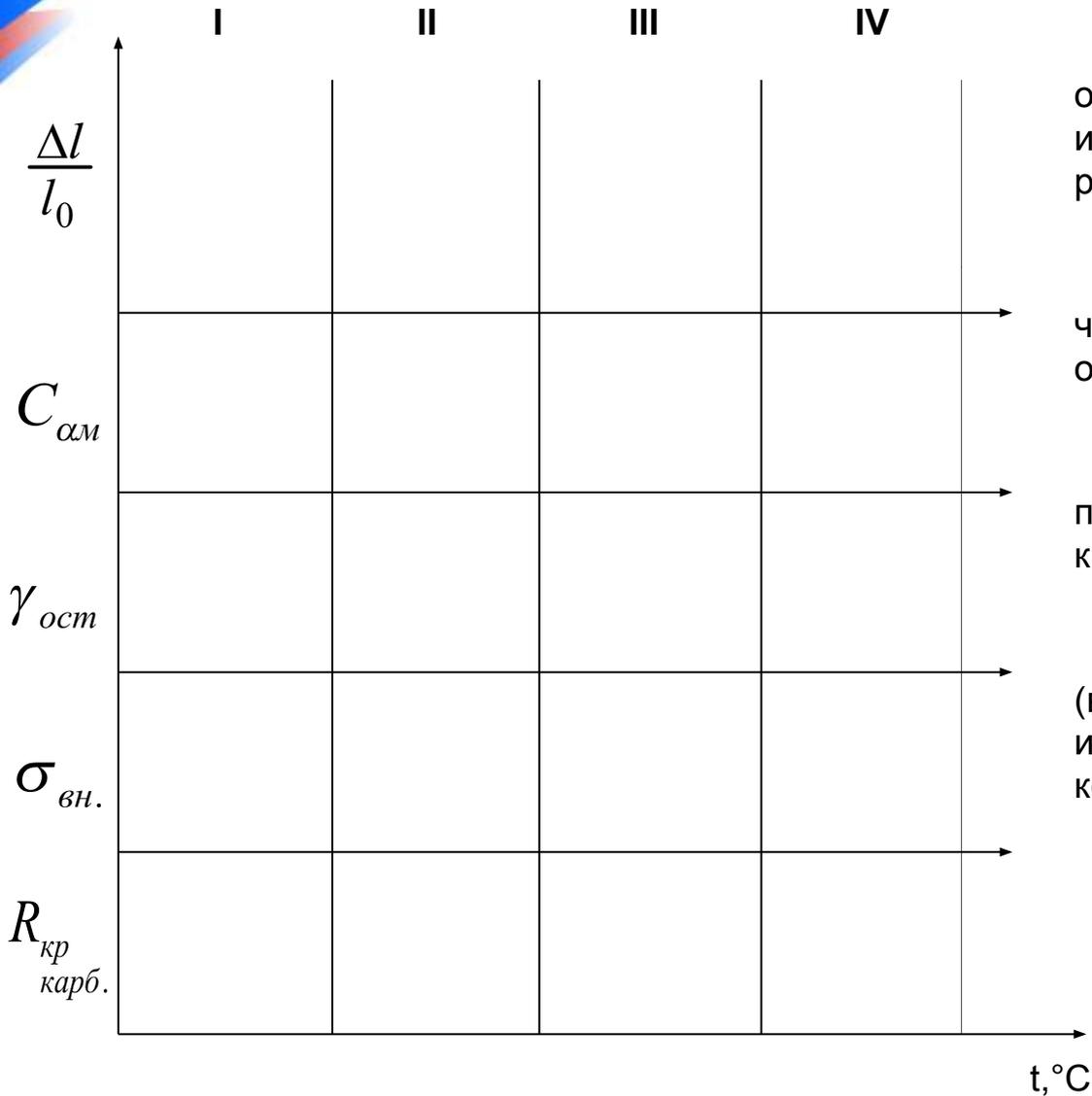


Завершающая стадия карбидообразования – **коагуляция** и **сфероидизация** цементитных частиц.

Отпуск в сталях

Превращения при отпуске

Условно выделяют четыре превращения при отпуске:



I сопровождается уменьшением объема образца, что связано с распадом мартенсита и уменьшением степени тетрагональности решетки.

II сопровождается увеличением объема, что связывают с началом распада остаточного аустенита

III завершение распада мартенсита. преобразование промежуточных карбидов в карбиды цементитного типа.

IV совокупность процессов в α -фазе (возврат, полигонизация, рекристаллизация) и карбидной фазе (сфероидизация, коагуляция)

Влияние легирующих элементов

1. Распад мартенсита

Легирующие элементы практически не влияют на распад мартенсита при низких температурах и существенно изменяют кинетику распада при более высоких.

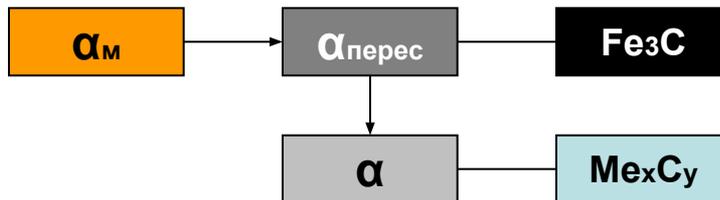
Карбидообразующие л.э. замедляют распад мартенсита и смещают температурный интервал распада в область более высоких температур, что связано с уменьшением термодинамической активности углерода.

Некарбидообразующие л.э. практически не влияют на распад мартенсита (по некоторым данным ускоряют).

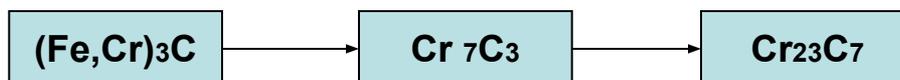
2. Образование специальных карбидов.

В легированных сталях начальные этапы карбидообразования аналогичны углеродистым – выделение промежуточного карбида Fe_2C , его преобразование в цементит Fe_3C . При температуре выше $400\text{ }^{\circ}C$ возможно образование специальных карбидов по двум механизмам:

- непосредственное выделение из пересыщенного по л.э. α -тв. раствора



- образование по механизму in situ («на месте») – пересыщение цементитного карбида по легирующему элементу с последующей перестройкой его решетки.



Отпуск в сталях

Влияние легирующих элементов

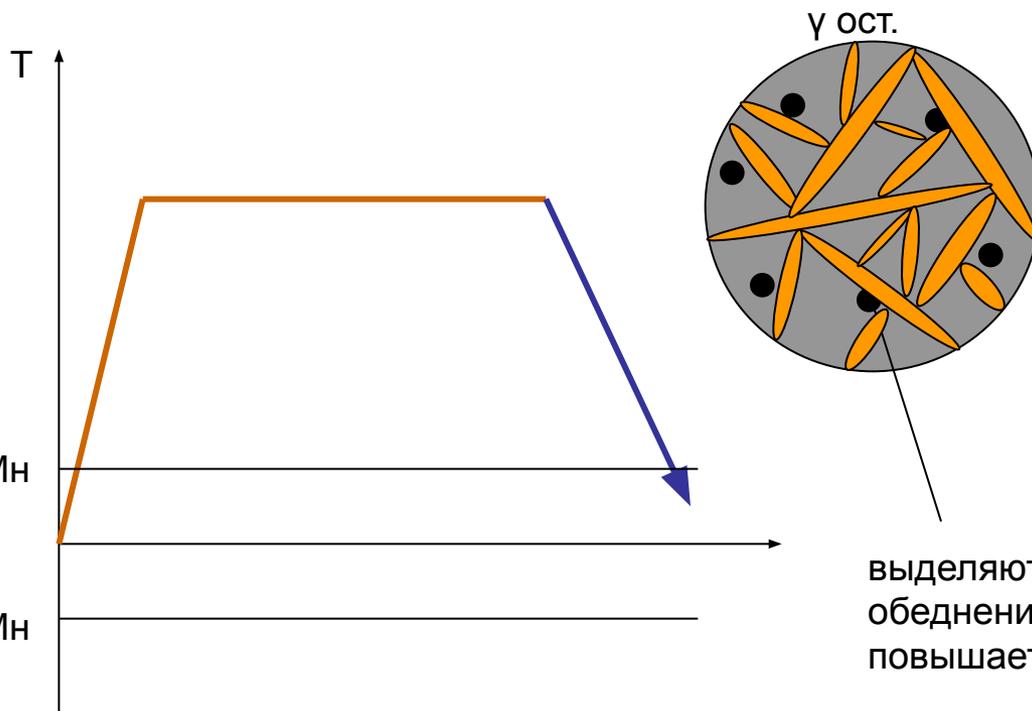
3. Возврат и рекристаллизация α -фазы

Данные процессы обусловлены высокой плотностью дислокаций в мартенситной фазе. Л.э. затрудняют процессы скольжения и переползания дислокаций вследствие уменьшения диффузионной подвижности атомов и закрепления дислокаций дисперсными выделениями спецкарбидов, препятствуя тем самым процессам рекристаллизации и полигонизации.

4. Распад остаточного аустенита

Легирующие элементы повышают температурный интервал распада остаточного аустенита до 500-600° (против 200-300° у углеродистых).

После отпуска при 500-600° остаточный аустенит приобретает способность к мартенситному превращению:



Количество остаточного аустенита в сталях:

конструкционные – 3-5%

констр. легированные – до 15%

быстрорежущие – 20-40%

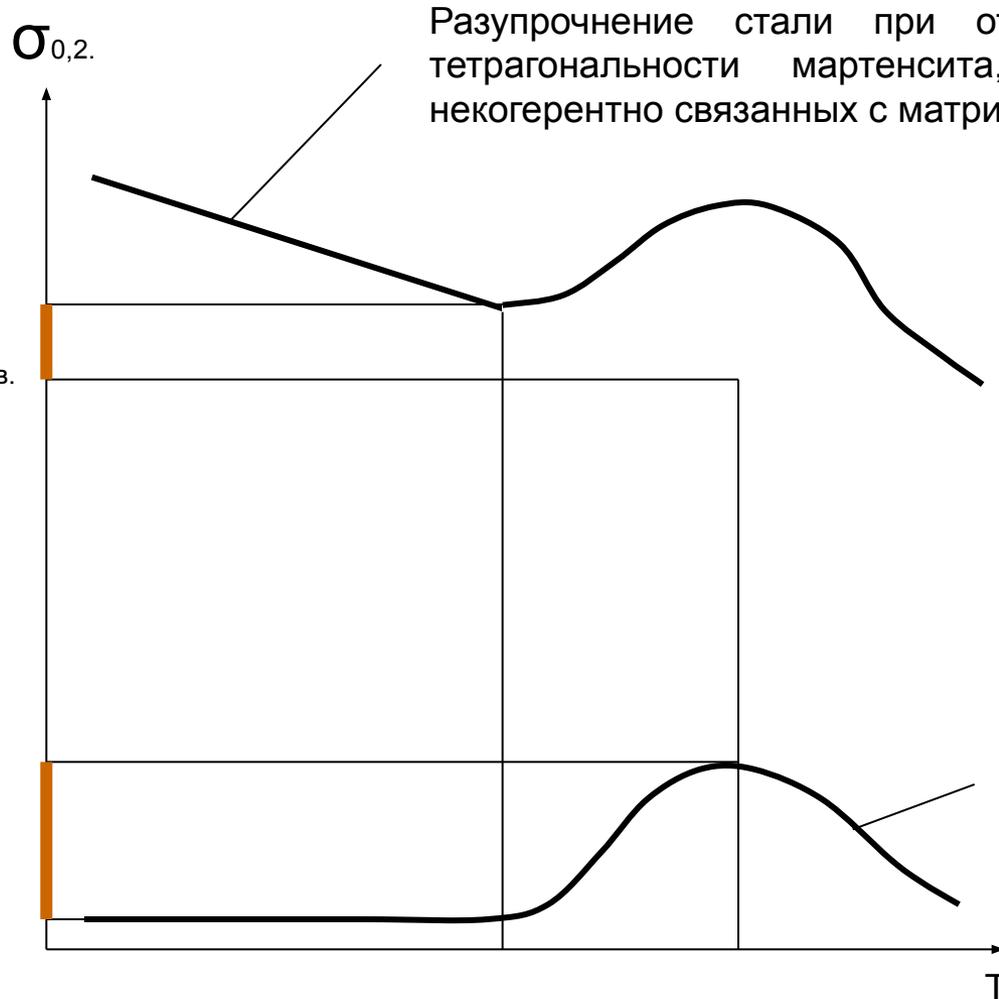
высокохромистые – до 60%

Отпуск в сталях

Влияние легирующих элементов

5. Дисперсионное упрочнение стали

Формирование дисперсной карбидной фазы упрочняет металл вследствие затруднения движения дислокаций.



Разупрочнение стали при отпуске вследствие уменьшения степени тетрагональности мартенсита, образования цементитных карбидов, некогерентно связанных с матрицей, их коагуляции.

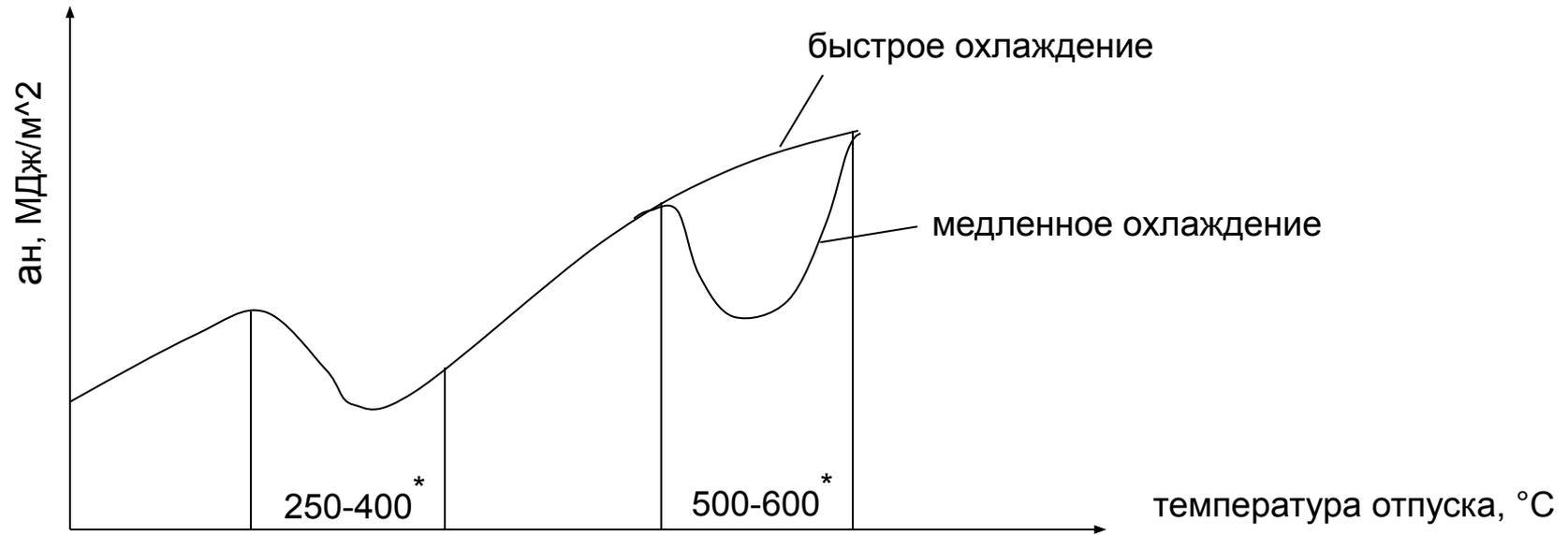
Если эффект дисперсионного твердения превышает эффект твердорастворного разупрочнения, то формируется пик вторичной твердости.

При повышенных температурах начинают выделяться дисперсные спецкарбиды, эффективно тормозящие дислокации → материал упрочняется.

Отпускная хрупкость стали

Явление охрупчивания стали при отпуске.

При отпуске закаленных углеродистых и легированных сталей в интервале температур 250...400°C и 500...600°C наблюдается снижение ударной вязкости. Это явление получило название **отпускной хрупкости**.



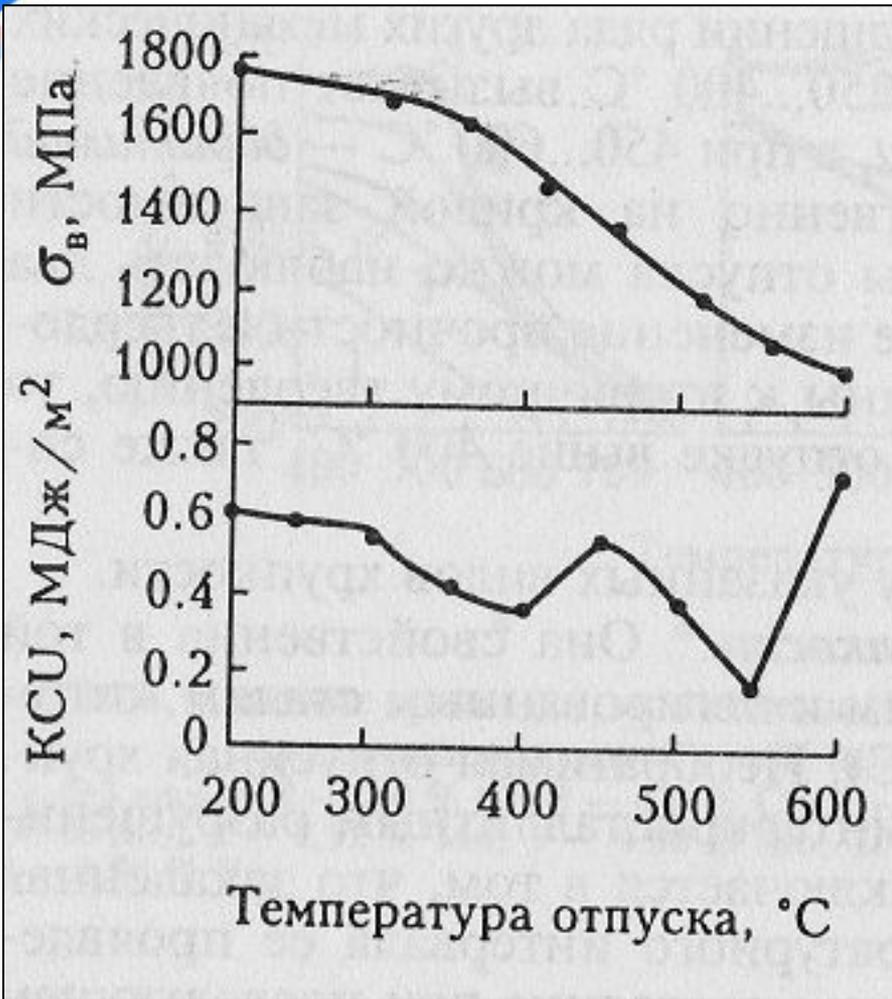
* - указанные температурные интервалы условны, зависят от состава стали и продолжительности отпуска.

В зависимости от температурного интервала охрупчивания различают два вида ОХ:

Необратимая отпускная хрупкость, наблюдающаяся в результате отпуска при 250...400°C. К ней склонны углеродистые и легированные стали.

Обратимая отпускная хрупкость, проявляющаяся при температурах высокого отпуска с последующим медленным охлаждением. К обратимой хрупкости склонны преимущественно легированные стали.

Отпускная хрупкость стали



Зависимость прочности и ударной вязкости стали 30ХГСНА от температуры отпуска.

Закалка с 940° в воде

Отпуск 2 часа, охлаждение на воздухе

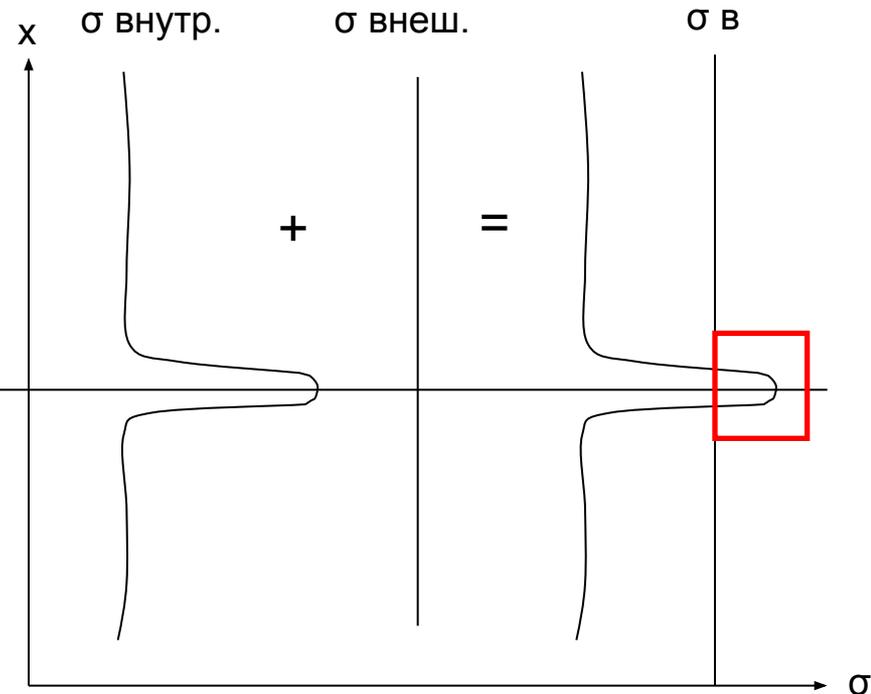
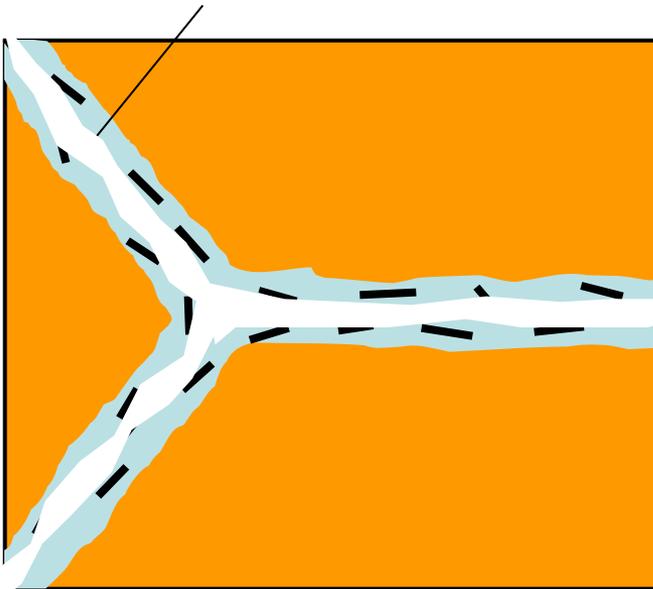
Отпускная хрупкость стали

Необратимая отпускная хрупкость.

Отличительной особенностью отпускной хрупкости 1го рода является ее необратимый характер. Отпуск при более высокой температуре снимает хрупкость, и сталь становится к ней не склонной даже при повторном отпуске в опасный интервал температур.

Возможное объяснение этого явления связывают с объемно – напряженным состоянием, возникающим при неоднородном распаде мартенсита при низких температурах отпуска.

границы исходных аустенитных зерен



Считается, что распад мартенсита идет интенсивнее вблизи границ исходного аустенитного зерна, что приводит к предпочтительному выделению здесь пластинок карбидной фазы, около которых возникают пики напряжений, облегчающих разрушение материала.

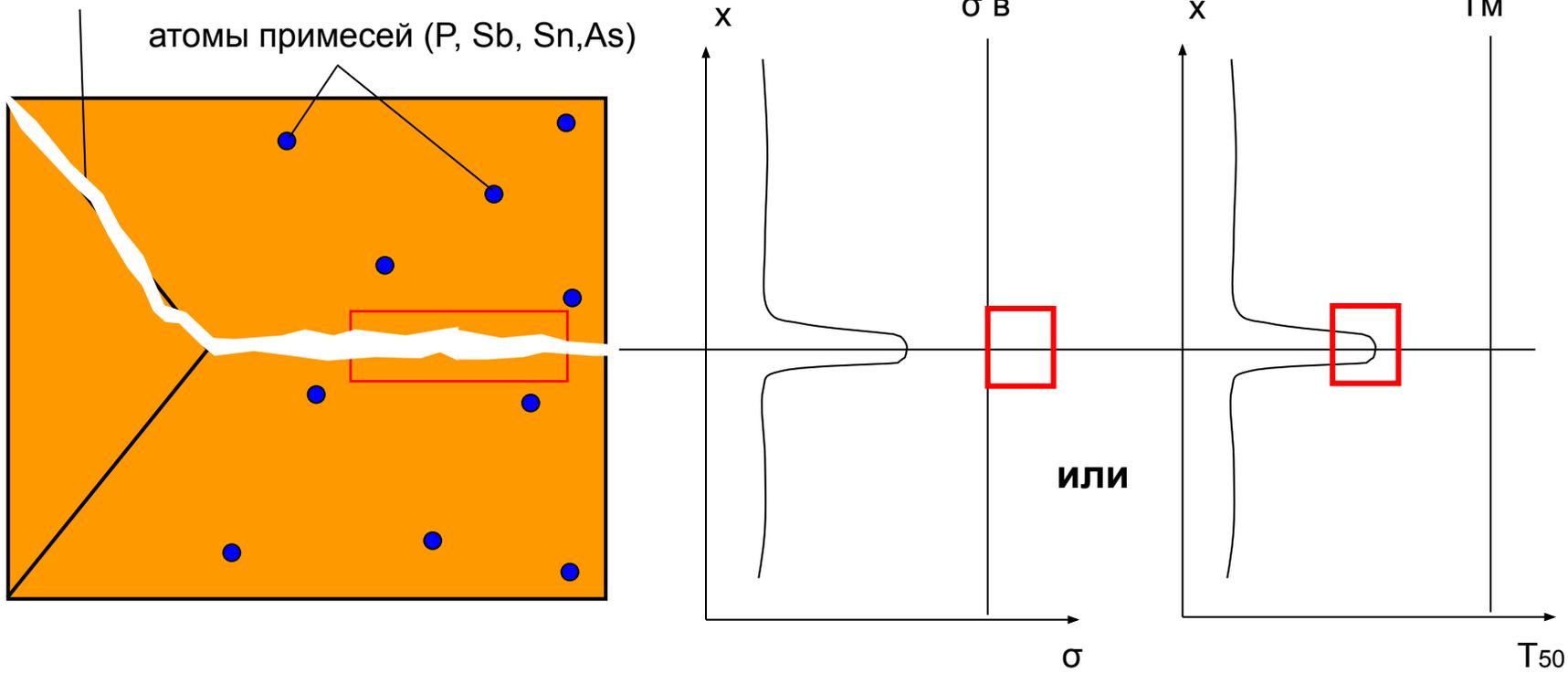
Отпускная хрупкость стали

Обратимая отпускная хрупкость.

Обратимая отпускная хрупкость, или хрупкость 2го рода, может быть устранена повторным высоким отпуском с последующим быстрым охлаждением и вызвана вновь длительным нагревом в опасный интервал 500-650°C или высоким отпуском с медленным охлаждением.

Считается, что данный вид отпускной хрупкости связан с образованием сегрегаций примесных атомов в приграничных слоях твердого раствора.

границы исходных аустенитных зерен



Отпускная хрупкость стали

Меры борьбы с обратимой отпускной хрупкостью.

1. Контроль и ограничение содержания примесей.

2. Специальное легирование сталей Mo в количестве 0,3...0,6% или W 1,1...1,6% и ограничение концентраций легирующих элементов минимально необходимыми.

3. Ослабление отпускной хрупкости методами термообработки.

4. Применение термомеханической обработки для формирования зубчатых большеугловых границ зерен.