

Лекция 8

Легированные стали

Содержание

1. Влияние легирующих элементов на структуру стали
2. Влияние легирующих элементов структуру и механические свойства сталей

Введение

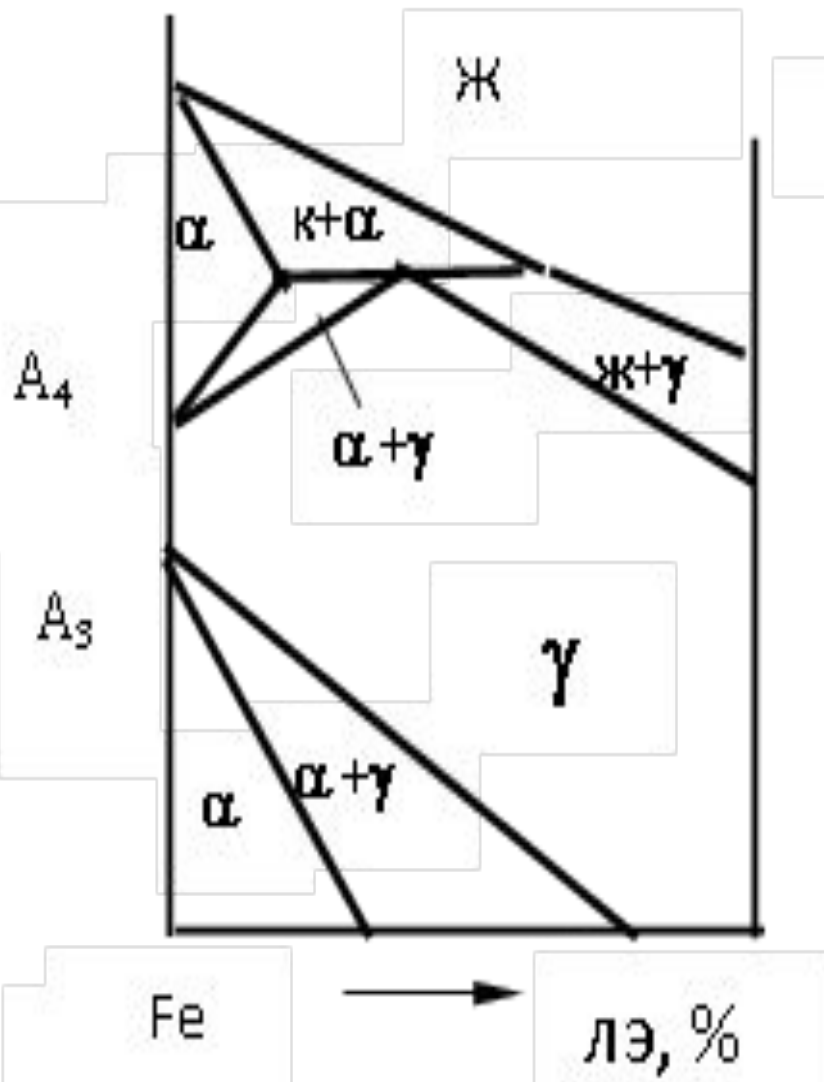
- Легированной называется сталь, в которой, кроме обычных примесей, содержатся специально вводимые в определенных сочетаниях легирующие элементы (Cr, Ni, Mo, W, V, Al, B, Ti и др.), а также Mn и Si в количествах, превышающих их обычное содержание как технологических примесей. Как правило, лучшие свойства обеспечивает комплексное легирование.
- Легирование сталей и сплавов используют для улучшения их механических и технологических свойств. Легированием можно повысить предел текучести, ударную вязкость, относительное сужение и прокаливаемость, а также существенно снизить критическую скорость закалки, порог хладноломкости и вязкость разрушения. В изделиях крупных сечений (диаметром свыше 15...20 мм) механические свойства легированных сталей значительно выше, чем механические свойства углеродистых.

Предельное содержание элементов в углеродистых сталях
по ГОСТ54384 - 2011

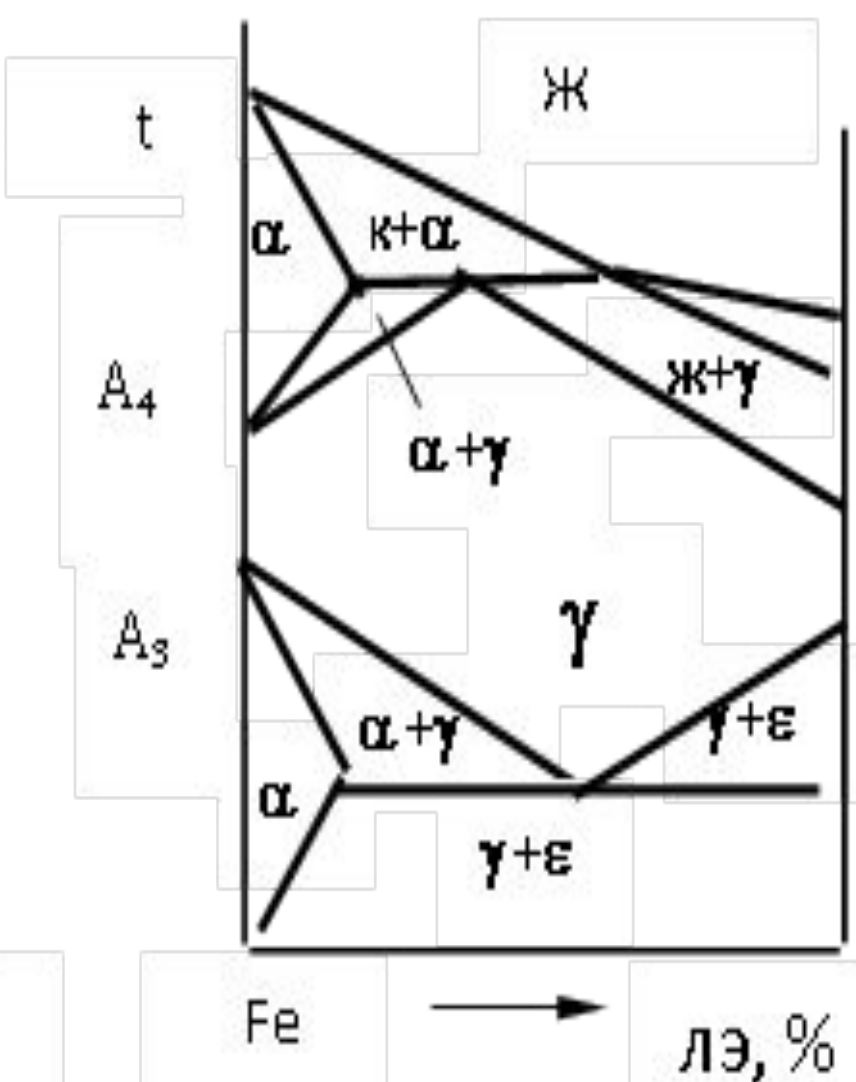
Химический элемент	Граничное содержание, % (по массе)
Алюминий	0,30
Бор	0,0008
Кобальт	0,30
Хром	0,30
Медь	0,40
Марганец	1,65
Молибден	0,08
Никель	0,30
Свинец	0,40
Кремний	0,50
Титан	0,05
Ванадий	0,10
Вольфрам	0,30
Цирконий	0,05
Другие элементы, кроме углерода, фосфора, серы и азота (каждый)	0,10

Влияние легирующих элементов критические точки

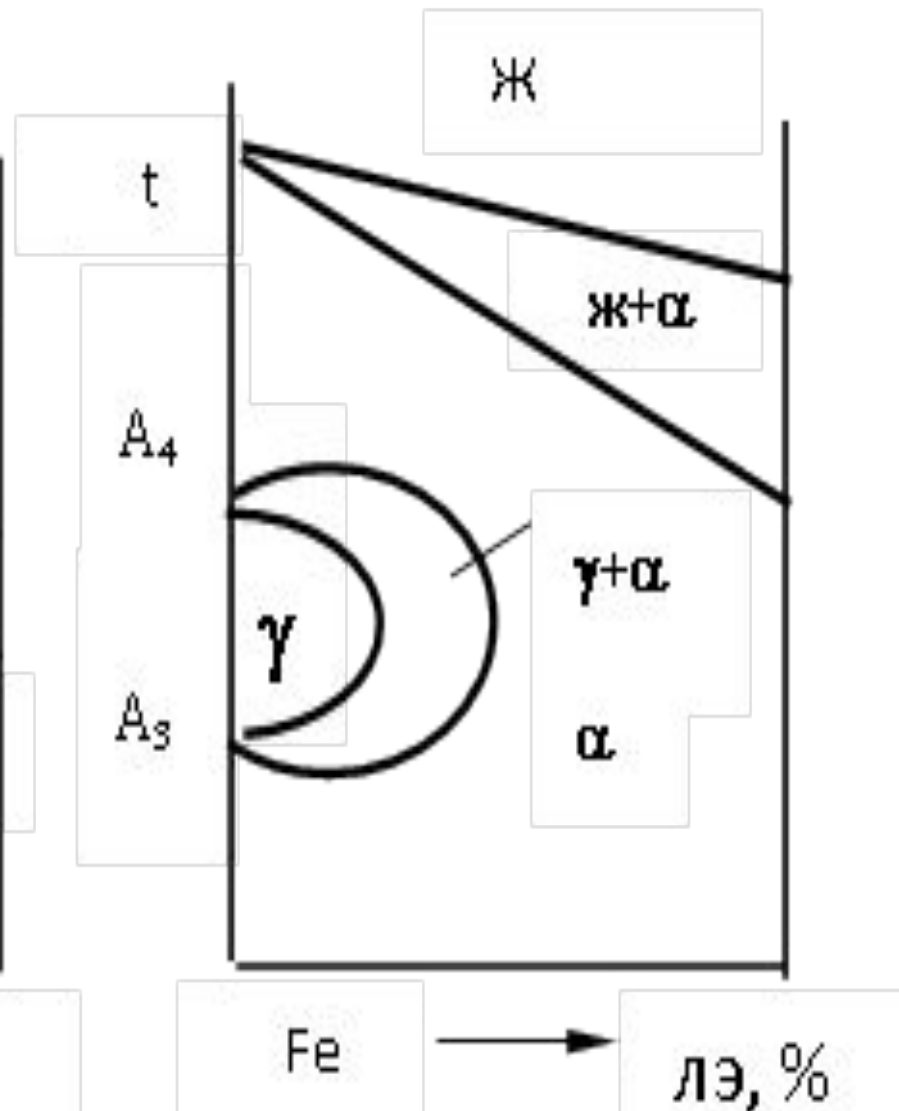
Ni, Mn, Co



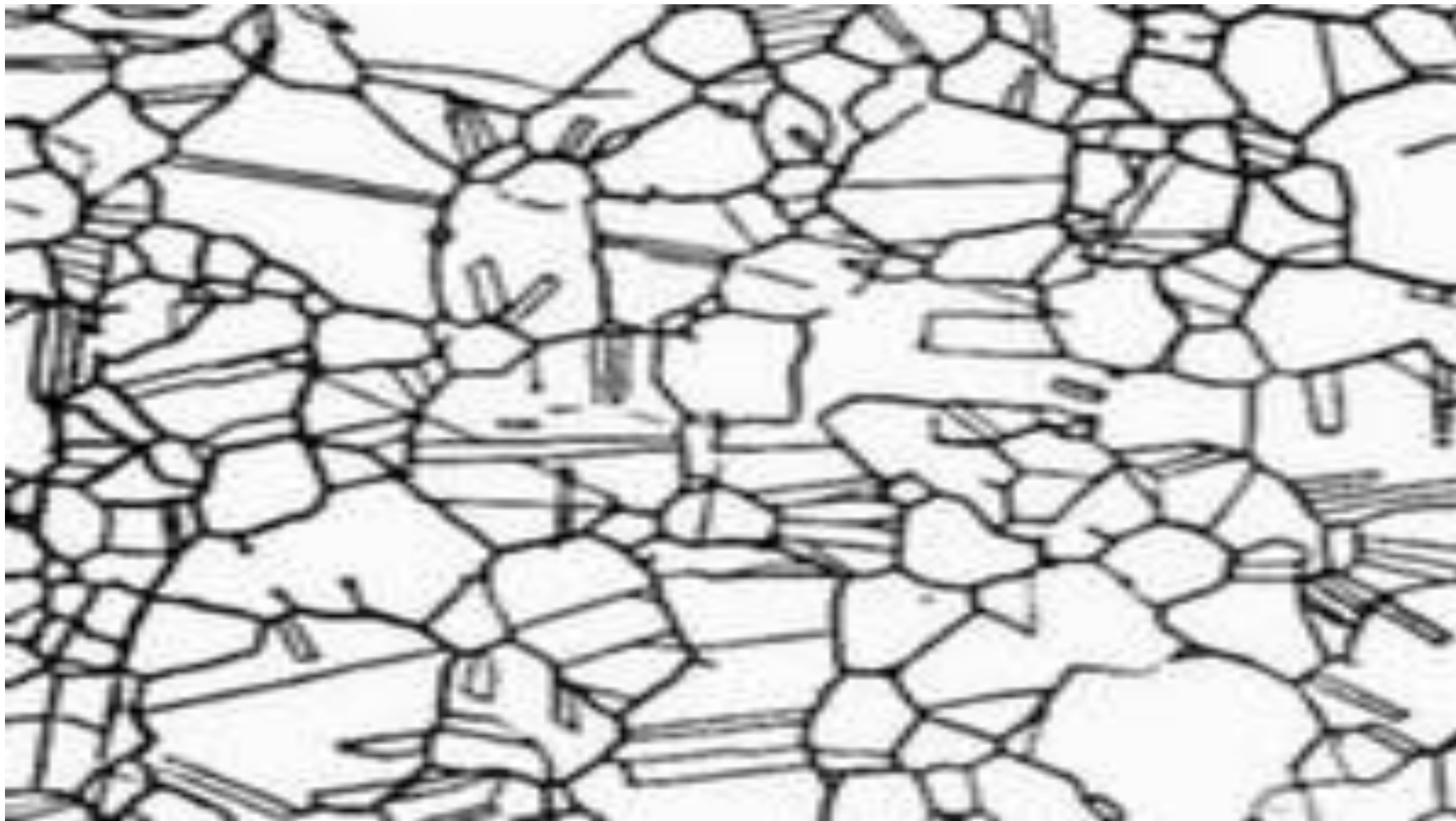
C, N, Cu



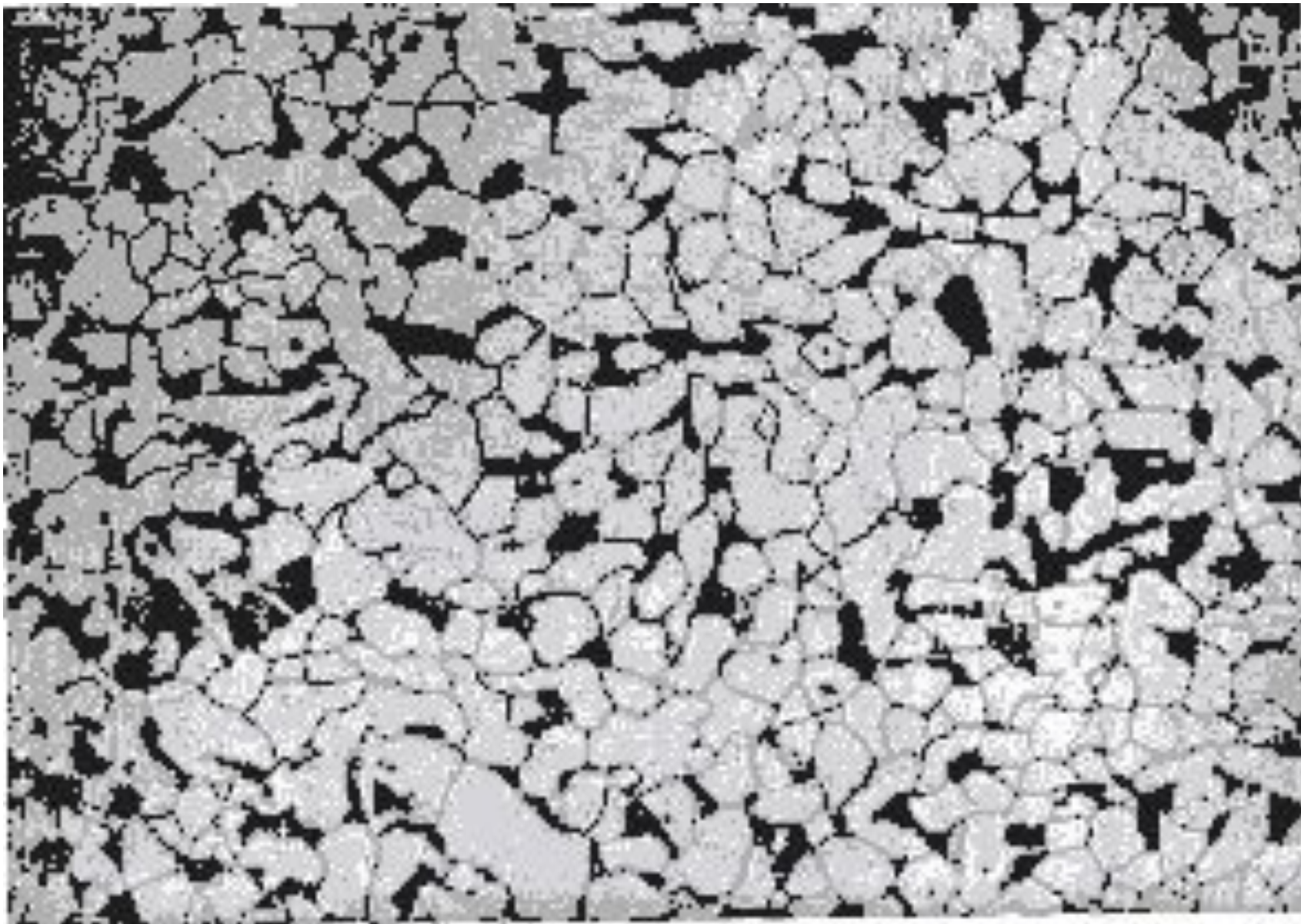
Cr, Mo, W, V



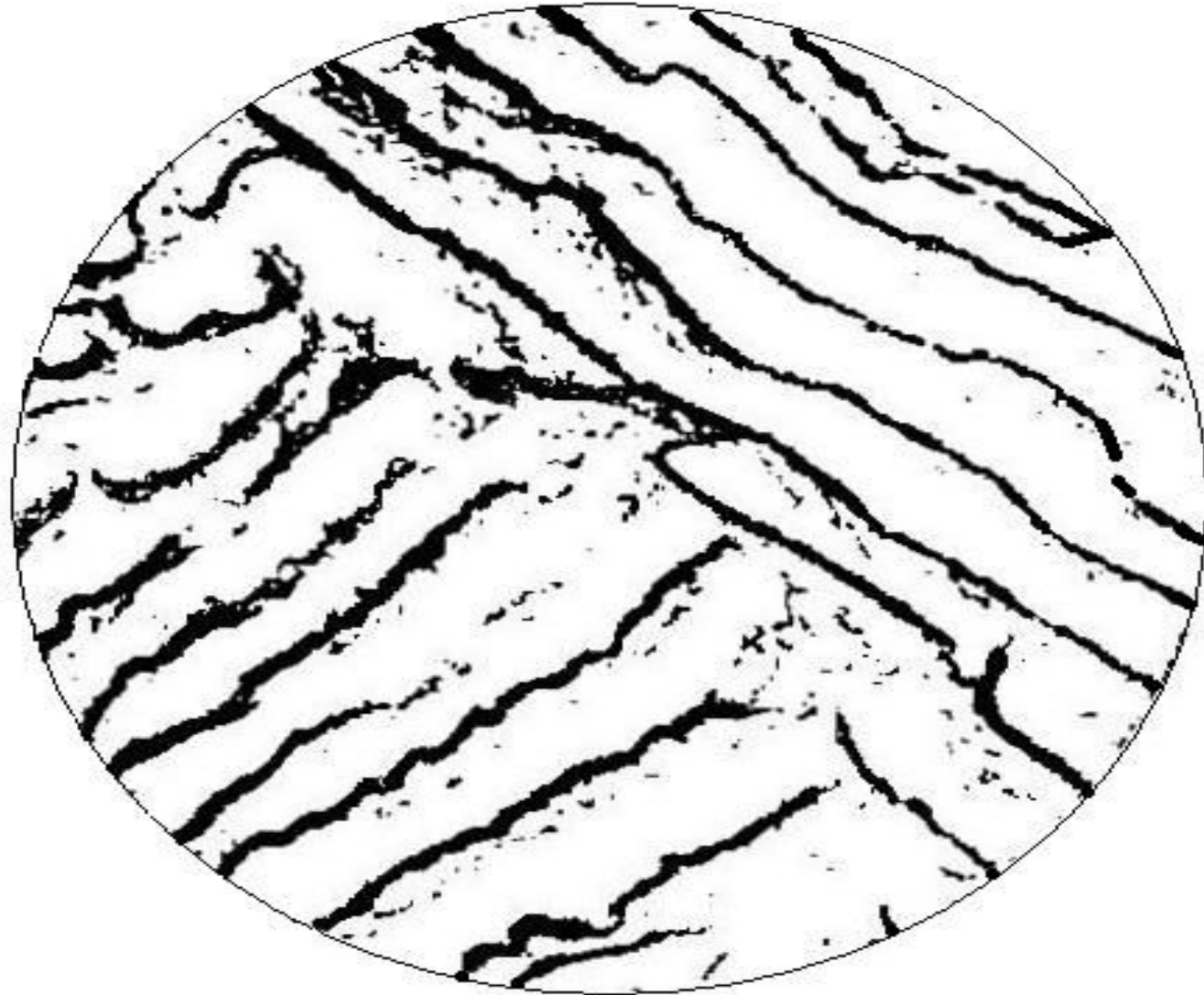
Микроструктура стали аустенитного класса



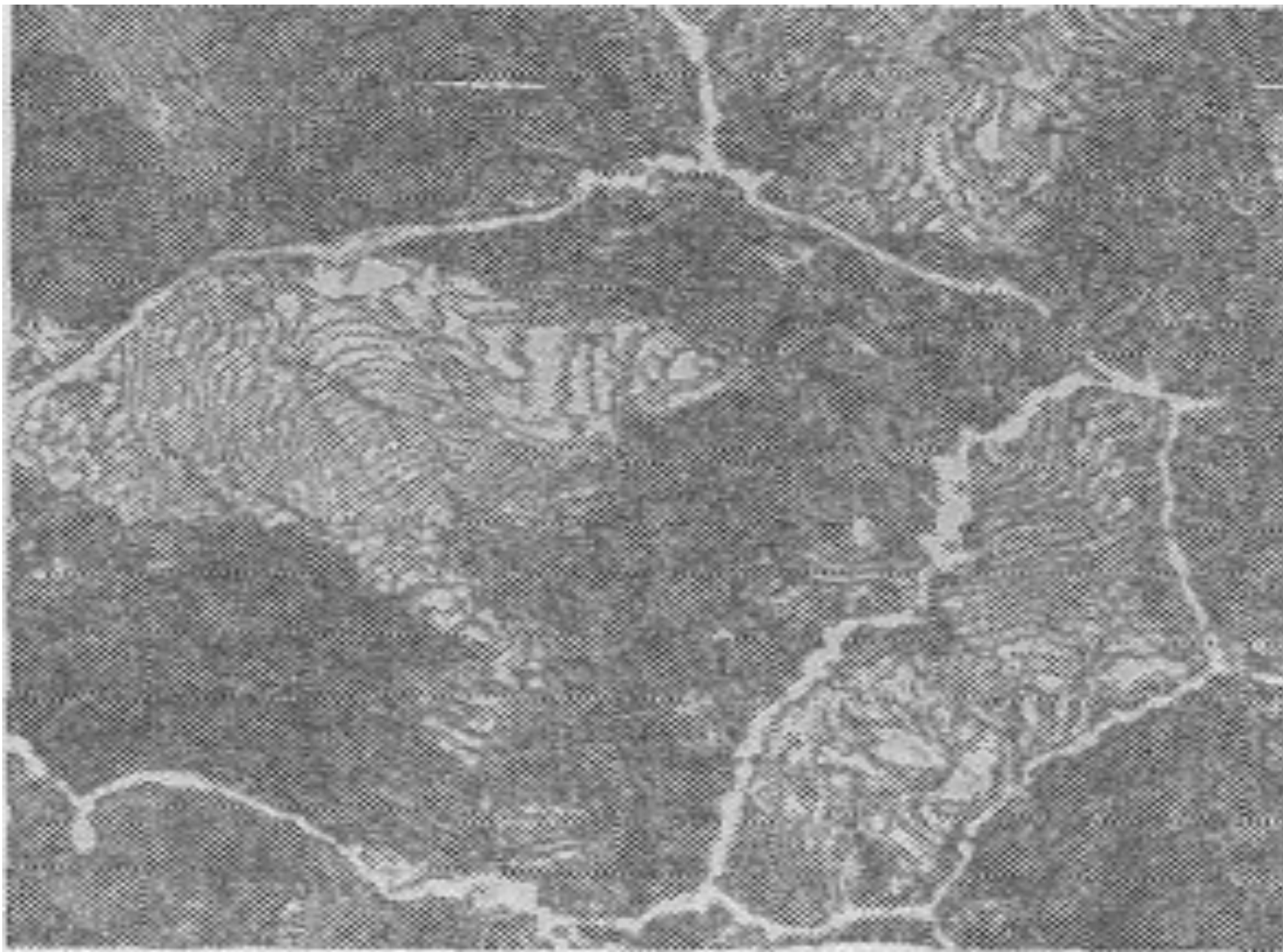
Микроструктура доэвтектоидной стали



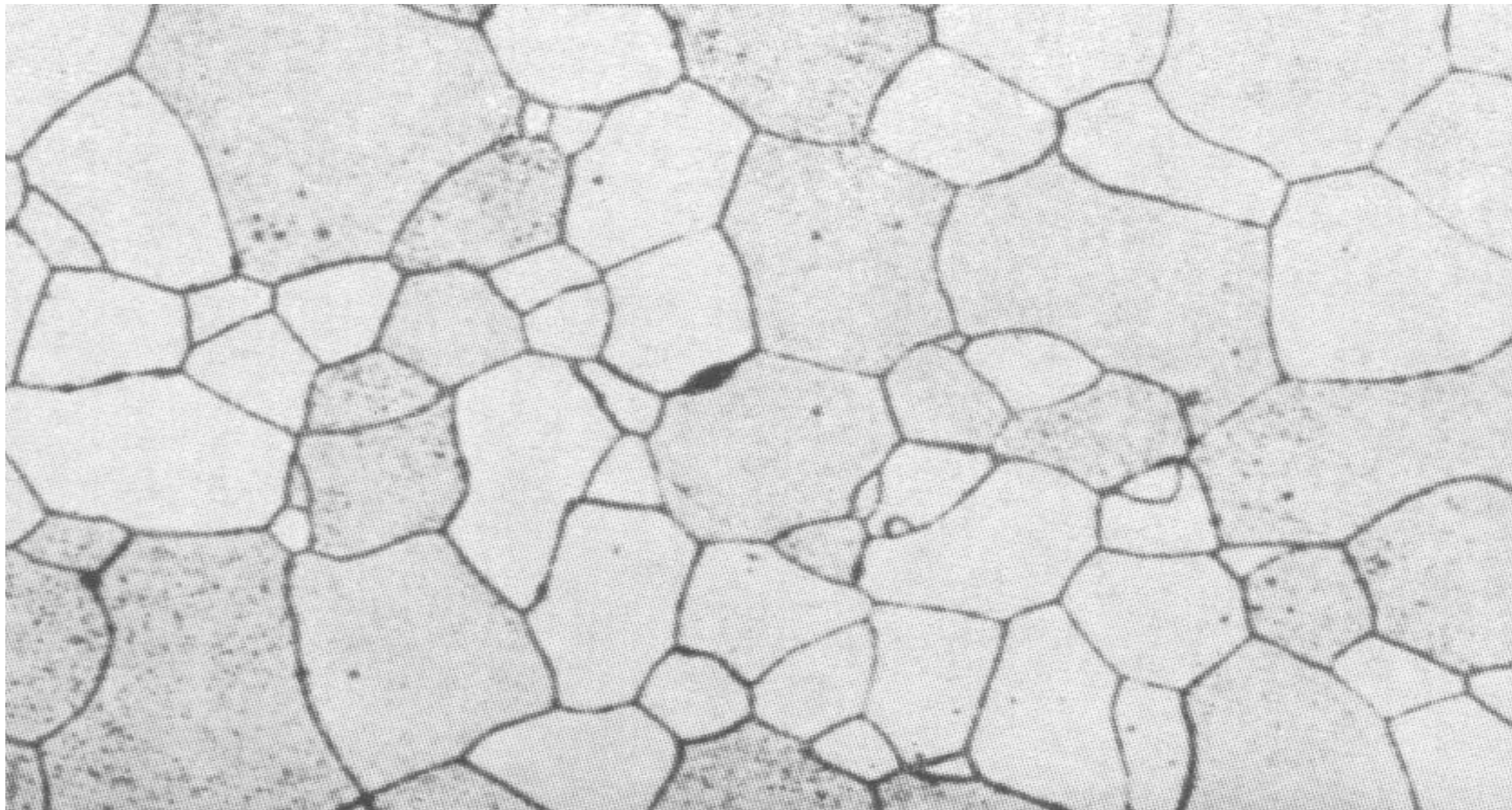
Микроструктура перлитной стали



Микроструктура заэвтектоидной стали



Микроструктура стали ферритного класса



Влияние легирующих элементов на механические свойства сталей

Под влиянием легирующих элементов происходит существенное изменение структуры стали, а следовательно, изменение комплекса механических свойств. Прочность легированных сталей можно представить в виде суперпозиции парциальных вкладов в упрочнение различных структурных составляющих стали.

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_4 + \Delta\sigma_5$$

σ_0 – напряжение старта дислокаций в чистом зерне (сила Пайерлса),

$\Delta\sigma_1$ – вклад в упрочнение растворенных атомов легирующих элементов,

$\Delta\sigma_2$ - вклад в упрочнение за счет мелкодисперсных выделений,

$\Delta\sigma_3$ – вклад в упрочнение атомами углерода в твердом растворе,

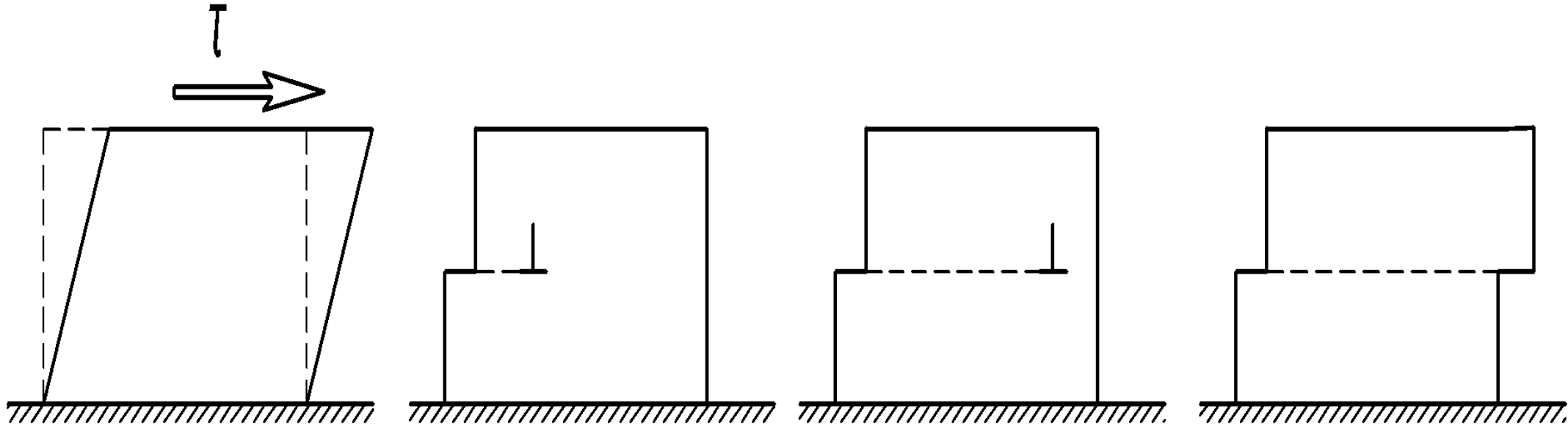
$\Delta\sigma_4$ – вклад в упрочнение границ зерен,

$\Delta\sigma_5$ – вклад в упрочнение дислокаций.

Сила Пайерлса

Сдвиговое напряжение T приводит к появлению силы, действующей на дислокацию. Чтобы инициировать пластическую деформацию, сила должна превышать силу сопротивления движению дислокации. Эта сила определяется свойствами кристаллической решетки, т.е. представляет собой силу «внутреннего трения». Эта сила в расчете на единицу длины дислокации может быть найдена так: $f = T b$.

В чистых металлах с ОЦК решеткой $\sigma_0 \approx 10^{-4} G \approx 20\text{МПа}$, а в металлах технической чистоты $\sigma_0 \approx 100\text{МПа}$.



Упрочнение вследствие образования твердого раствора

Вклад в упрочнение находящихся в твердом растворе атомов легирующего элемента $\Delta\sigma_1$ можно оценить по формуле:

$$\Delta\sigma_1 = \alpha G[\delta (c/c_{\max})]$$

где α – безразмерный коэффициент, G – модуль сдвига,

$\delta = (r - r_{\text{Fe}})/r_{\text{Fe}}$ - параметр несоответствия радиуса атома легирующего элемента r по отношению к атому железа r_{Fe} ,

(c/c_{\max}) - приведенная атомная концентрация легирующего элемента, где c – содержание легирующего элемента, c_{\max} – максимальная растворимость легирующего элемента в железе.

По упрочняющему действию легирующие элементы можно расположить в следующий убывающий ряд:



Вклад в упрочнение вследствие образования твердых растворов составляет
200 – 400 МПа

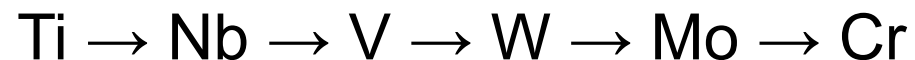
Упрочнение вследствие выделения частиц

Парциальный вклад в упрочнение мелкодисперсных частиц (фаз) может быть оценен по формуле Орована:

$$\Delta\sigma_2 = Gb/(l - 2r),$$

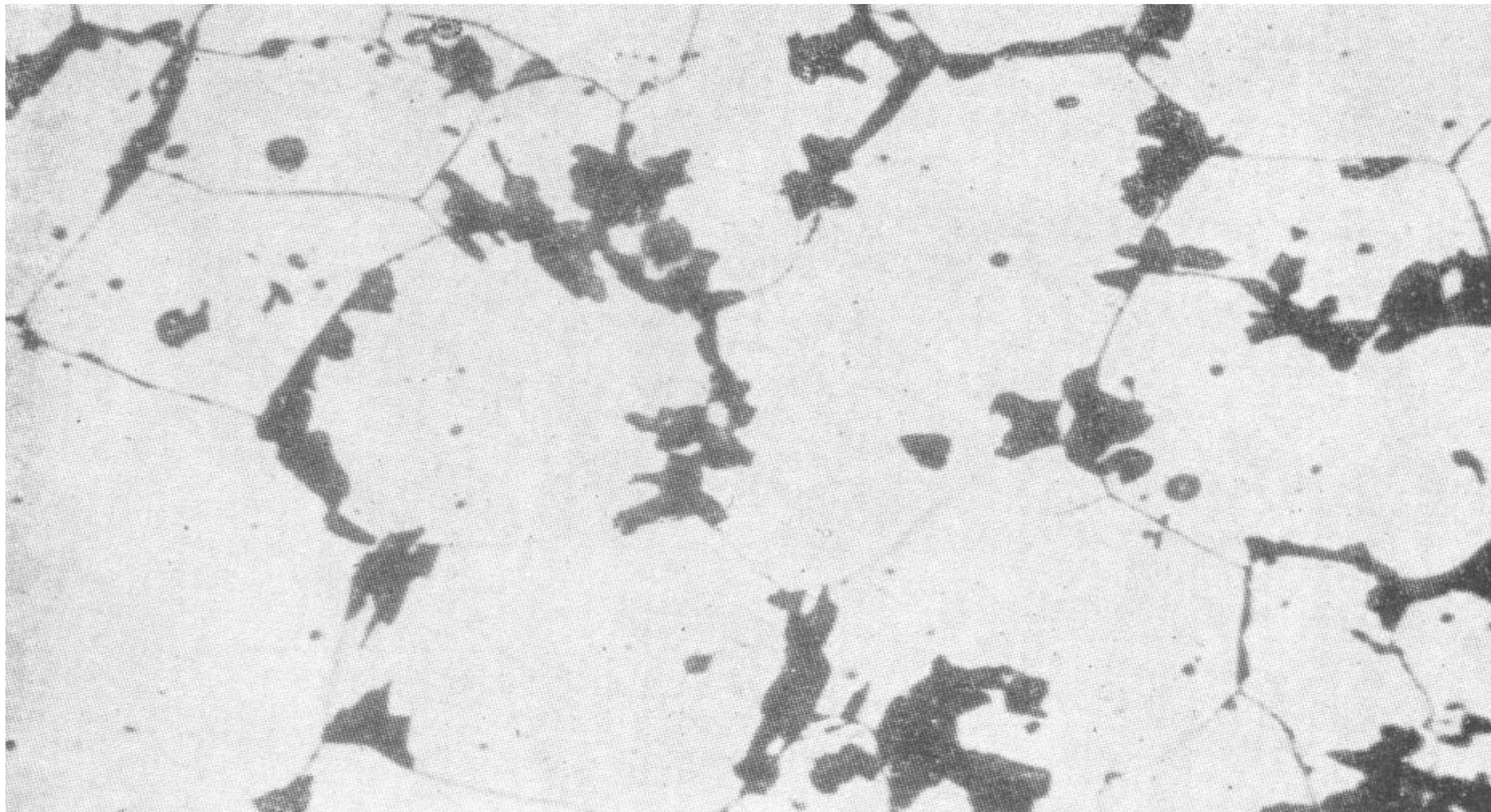
где G – модуль сдвига, l – расстояние между выделениями, r – средний радиус выделений, b – вектор Бюргерса.

К числу мелко дисперсных фаз можно отнести карбиды, нитриды, интерметаллиды. Так легированные конструкционные стали содержат Ti, V, Zr, Nb, которые образуют с углеродом и азотом прочные дисперсные выделения карбонитридов. Алюминий образует с азотом твердые частицы AlN. В некоторых сталях с низким содержанием углерода образуются твердые интерметаллидные соединения типа Ni₃Ti, FeAl и другие, способствующие упрочнению. По карбидообразующей способности легирующие элементы можно расположить в следующий убывающий ряд:



Вклад в упрочнение частиц $\Delta\sigma_2$ составляет 300 – 500 МПа

Нитриды в легированной стали



Вклад в упрочнение атомами углерода в твердом растворе

Упрочнение за счет находящихся в твердом растворе атомов углерода или азота оценивают по формуле:

$$\Delta\sigma_3 = 0,1X G C^{0,5},$$

где X – геометрический множитель, учитывающий пространственную неоднородность распределения атомов углерода, C - атомная концентрация растворенного углерода (азота).

Твердорастворное упрочнение особенно эффективно при введении в раствор элементов внедрения, какими являются углерод и азот. Высокое упрочняющее действие углерода и азота объясняется ассиметричным искажением кристаллической решетки и сильным взаимодействием атомов этих элементов с дислокациями, обусловленным осаждением на них растворенных атомов. Таким образом, эффект упрочнения при образовании твердых растворов внедрения в 10 раз превышает эффект упрочнения от образования твердых растворов замещения. Вклад в упрочнение атомами углерода $\Delta\sigma_3$ составляет $\approx 100 - 200$ МПа

Вклад в упрочнение границ

Вклад в упрочнение границ $\Delta\sigma_4$ объясняется тем, что движущиеся дислокации не могут пройти через границу. И передача скольжения происходит методом эстафеты – путем возбуждения дислокационных источников, расположенных по другую сторону границы. Следовательно, уменьшение размеров зерен способствует росту прочности. Влияние величины зерен на прочность может быть описано уравнением Холла-Петча:

$$\Delta\sigma_4 = K d^{-0,5},$$

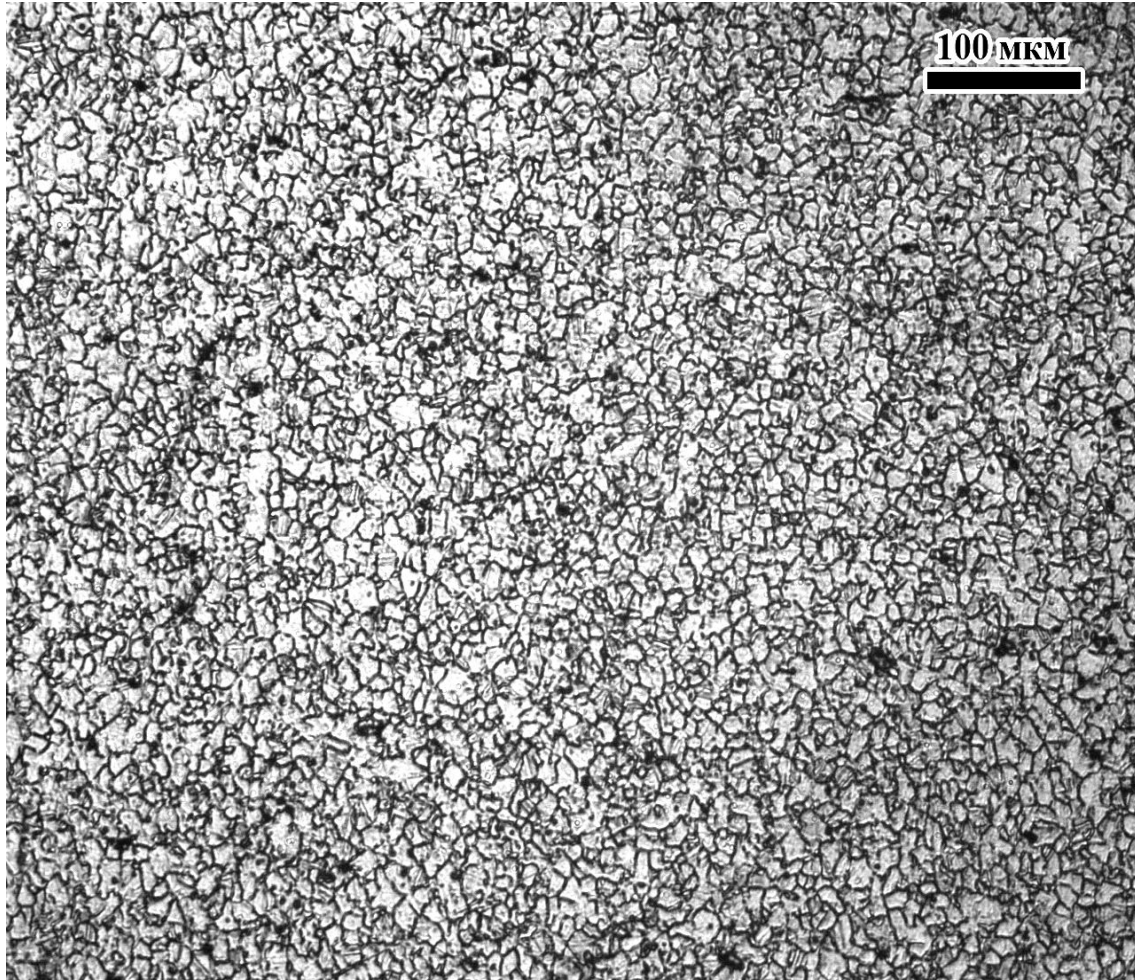
где K – коэффициент, d – средний диаметр зерна.

Особенностью зерно граничного упрочнения является то, что при реализации этого механизма одновременно с увеличением прочности происходит увеличение вязкости и пластичности стали. С измельчением зерна снижается температура вязко-хрупкого перехода и повышается сопротивление хрупкому разрушению.

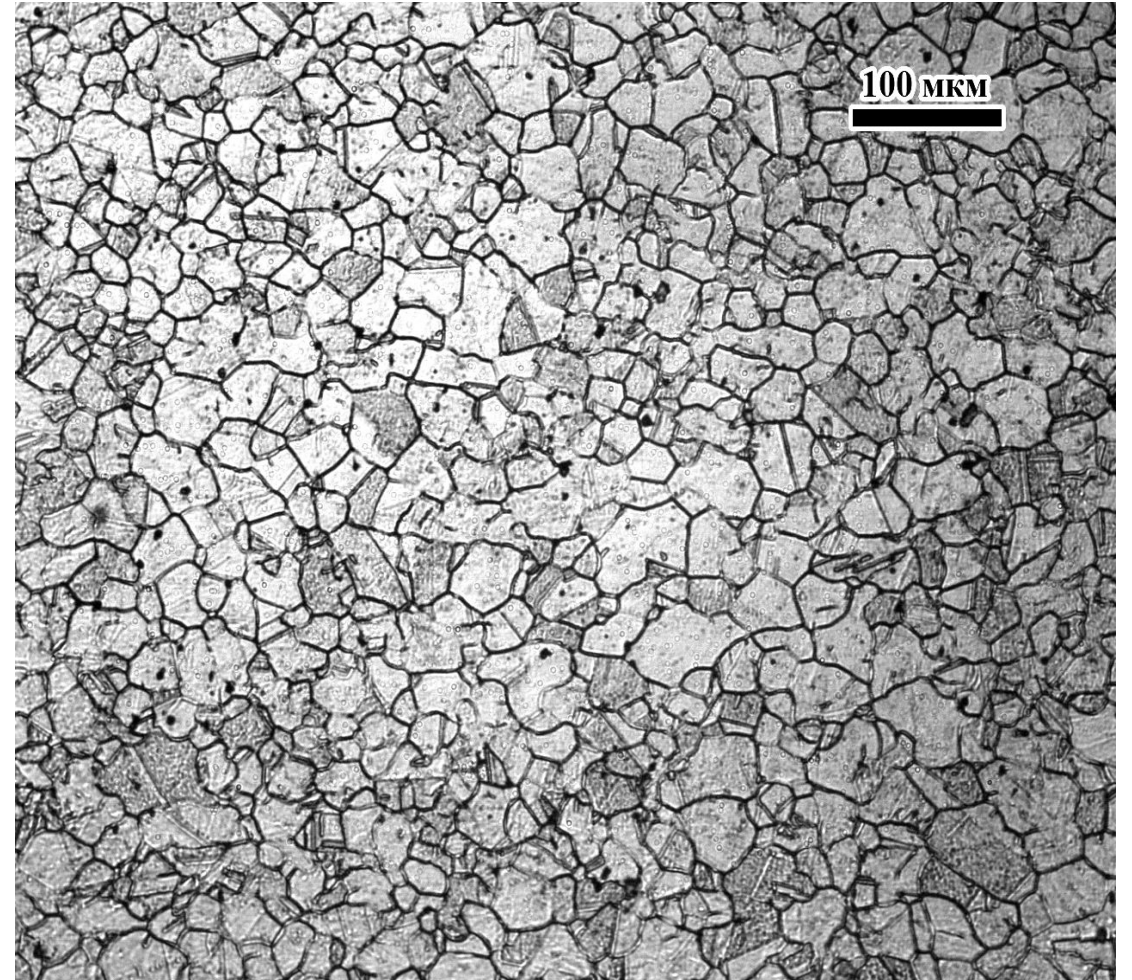
Вклад в упрочнение границ $\Delta\sigma_4$ составляет 200 – 450 МПа

Микроструктура стали с различной величиной зерна

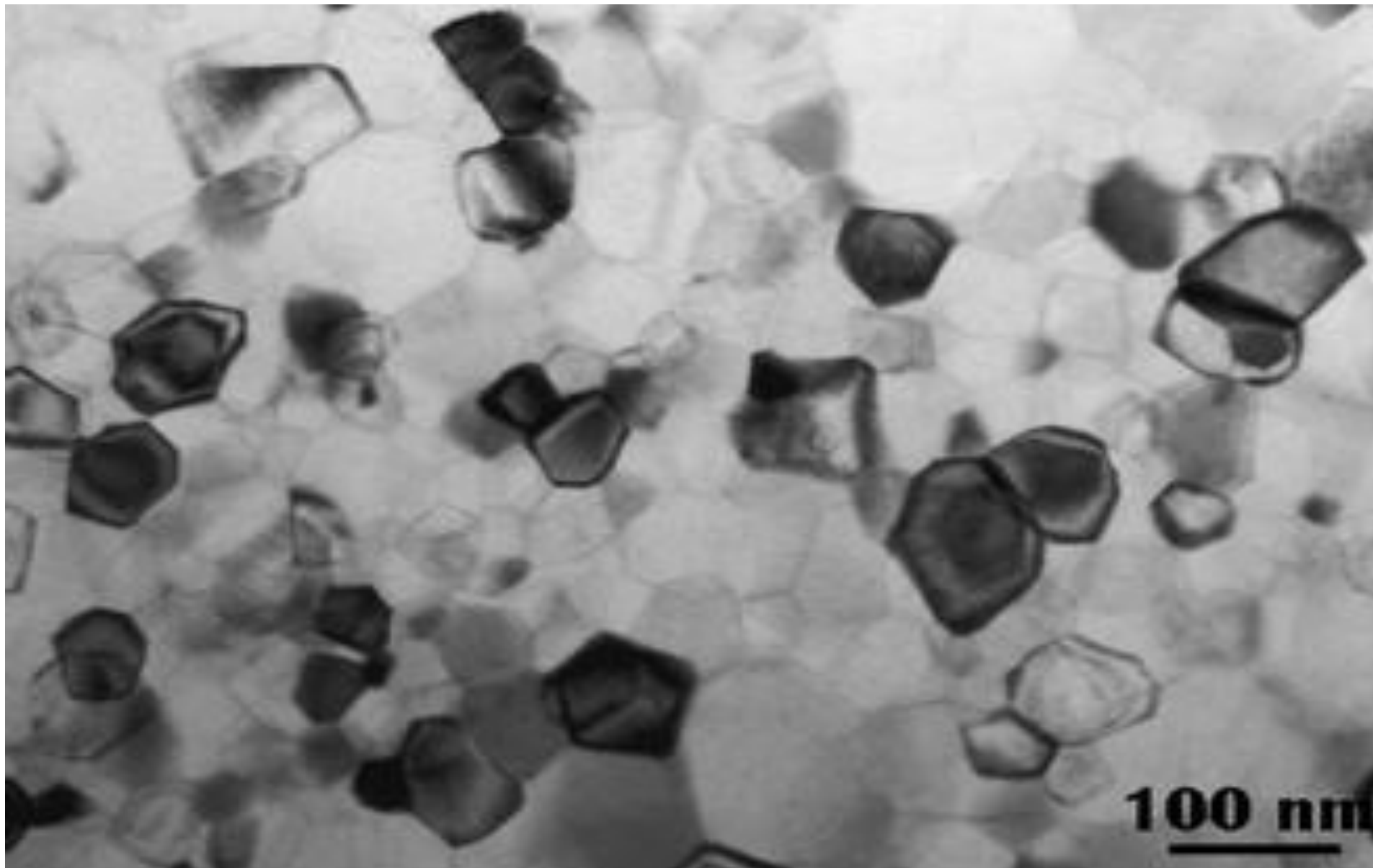
$d = 10 \text{ мкм}$



$d = 50 \text{ мкм}$



Наноструктура металлического сплава



Вклад в упрочнение дислокаций.

Упрочнение сплавов за счет увеличения плотности дислокаций при пластической деформации, либо при фазовом наклепе $\Delta\sigma_5$ обусловлено образованием новых дислокаций. Это приводит к тому, что перемещению дислокаций начинают препятствовать сами же дислокации.

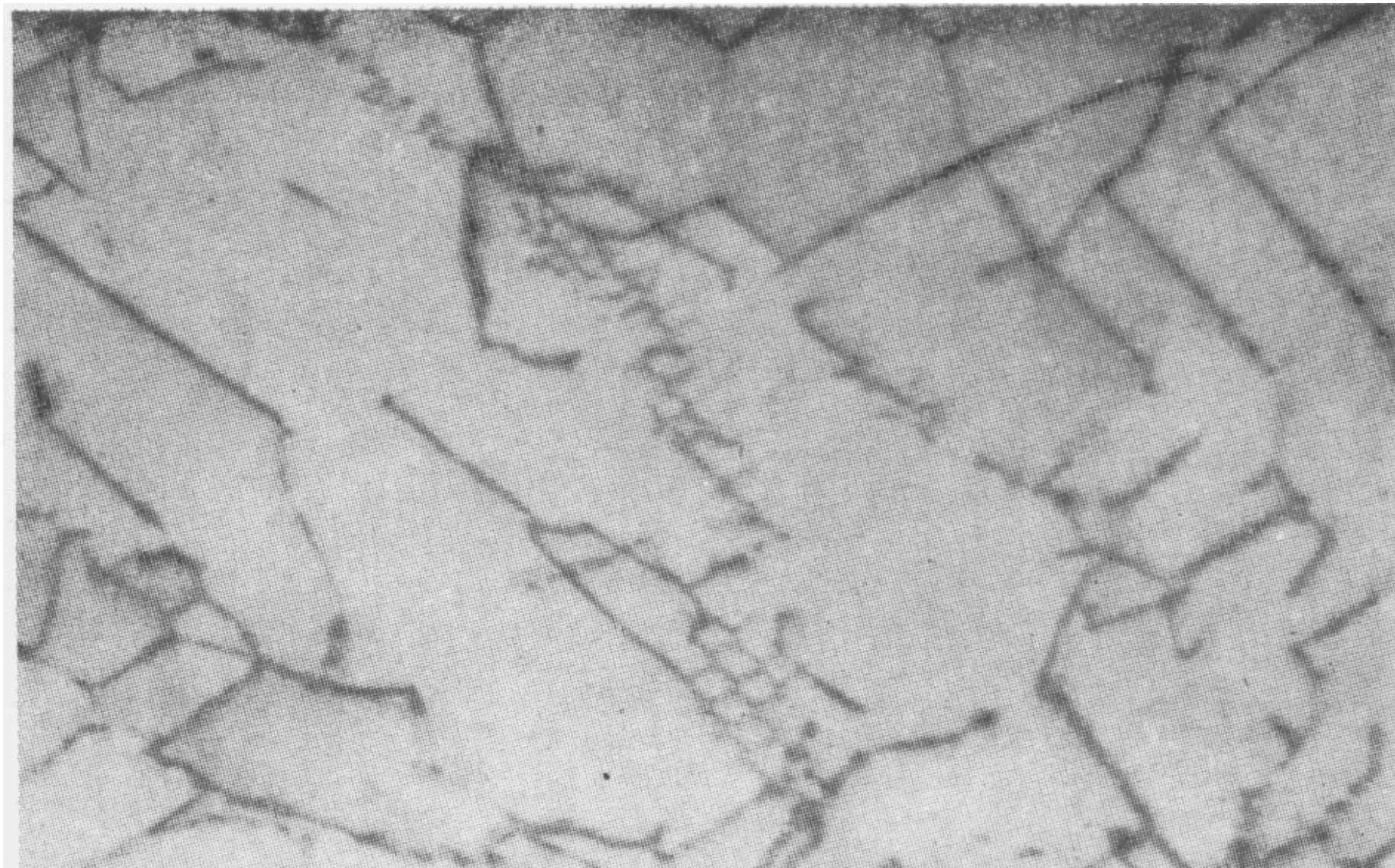
$$\Delta\sigma_5 = k \rho^{0,5},$$

где k – коэффициент зависящий от модуля сдвига, вектора Бюргерса и от характера взаимодействия дислокаций, ρ – плотность дислокаций.

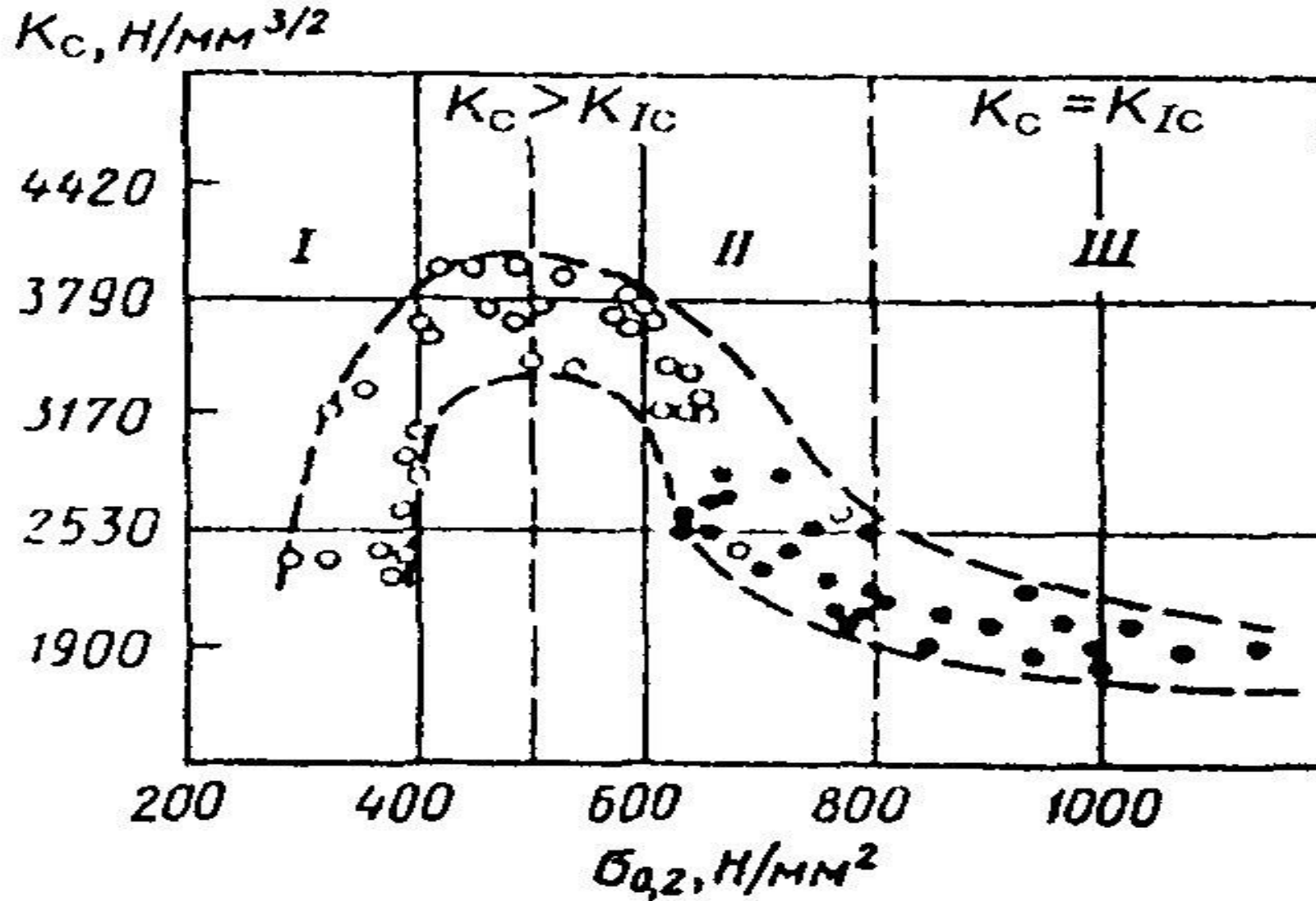
Дислокационное упрочнение, как правило, отрицательно влияет на пластичность и вязкость стали.

Вклад в упрочнение дислокаций $\Delta\sigma_5$ составляет 150 – 300 МПа

Дислокации в металлическом сплаве



Зависимость коэффициента интенсивности напряжений от предела текучести легированной стали



Заключение

Таким образом, введением легирующих элементов можно существенным образом изменить структуру стали. От характера взаимодействия атомов легирующих элементов с железом и углеродом, от типа образованных дефектов структуры, от характера взаимодействия легирующих элементов и т.д. зависит структура и свойства стали.

Условно различают понятия: легирование, микролегирование и модифицирование. При легировании в сплав вводят 0,2-0,5% по массе и более легирующего элемента, при микролегировании - чаще всего до 0,1 %, при модифицировании - меньше, чем при микролегировании, или столько же, однако задачи, решаемые микролегированием и модифицированием, разные. Микролегирование эффективно влияет на строение и энергетическое состояние границ зерен, при этом предполагается, что в сплаве будут реализованы два механизма упрочнения - благодаря легированию твердого раствора и в результате дисперсионного твердения. Модифицирование способствует в процессе кристаллизации измельчению структуры, изменению геометрической формы, размеров и распределения неметаллических включений, изменению формы эвтектических выделений, в целом улучшая механические свойства. Для микролегирования используют элементы, обладающие заметной растворимостью в твердом состоянии (более 0,1 ат. %), для модифицирования обычно служат элементы с малой растворимостью (< 0,1 ат. %).