

Механизмы упрочнения низкоуглеродистых сталей

Принципы упрочнения низкоуглеродистых сталей

- снижение содержания углерода в стали;
- снижение содержания вредных примесей и неметаллических включений;
- замена твердорастворного упрочнения дисперсионным;
- измельчение зерна путем термомеханической обработки и микролегирования;
- формирование оптимальной структуры металла с помощью механизмов ускоренного охлаждения.

Механизмы упрочнения низкоуглеродистых сталей

Вклад в упрочнение различных механизмов упрочнения

$$\sigma_T = \sigma_0 + \Delta\sigma_{\text{т.р.}} + \Delta\sigma_{\text{п}} + \Delta\sigma_{\text{д.ч.}} + \Delta\sigma_{\text{д}} + \Delta\sigma_{\text{з}} (+ \Delta\sigma_{\text{с}})$$

- σ_0 – сопротивление движению дислокаций со стороны кристаллической решетки;
- $\Delta\sigma_{\text{т.р.}}$ – упрочнение твердого раствора феррита растворенными легирующими элементами;
- $\Delta\sigma_{\text{п}}$ – упрочнение за счет образования перлита;
- $\Delta\sigma_{\text{д.ч.}}$ – упрочнение дисперсными частицами;
- $\Delta\sigma_{\text{д}}$ – упрочнение за счет повышения плотности дислокаций;
- $\Delta\sigma_{\text{з}}$ – зернограничное упрочнение;
- $\Delta\sigma_{\text{с}}$ – субструктурное упрочнение.

Механизмы упрочнения низкоуглеродистых сталей

- σ_0 – сопротивление движению дислокаций со стороны кристаллической решетки (напряжение трения решетки α -железа)

$$\sigma_0 = 3-4 \text{ Н/см}^2 ;$$

- $\Delta\sigma_{\text{т.р.}}$ – упрочнение твердого раствора феррита растворенными легирующими элементами

$$\Delta\sigma_{\text{т.р.}} = \sum k_i \cdot c_i ,$$

- где k_i – коэффициент упрочнения феррита – прирост предела текучести при растворении в нем 1%) i -того легирующего элемента; c_i – концентрация i -того легирующего элемента, растворенного в феррите, %.

Значения коэффициента k_i приведены в таблице:

Элемент	C+N	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	P	V	Ti	W
МПа, %	4670	33	86	31	30	11	60	39	690	3	82	23

- $\Delta\sigma_{\text{П}}$ – упрочнение за счет образования перлита

$$\Delta\sigma_{\text{П}} = 0,24 \cdot \% \text{П (кгс/мм}^2\text{)},$$

- где %П – содержание перлитной составляющей в объеме стали

Механизмы упрочнения низкоуглеродистых сталей

- $\Delta\sigma_{\text{д.ч.}}$ – упрочнение дисперсными частицами – напряжение сдвига, необходимое для преодоления влияния дисперсных частиц (уравнение Эшби-Орована):

$$\Delta\sigma_{\text{д.ч.}} = 1/1,18[1,2\sigma b/(2\pi L)]\ln(X/2b),$$

- где X – средний диаметр частиц; L – расстояние между частицами, $L=1/(n_s)^{1/2}$ (здесь n_s – число частиц на единице площади в плоскости скольжения); σ – модуль сдвига, b – вектор Бюргерса в плоскости скольжения

Уравнение, связывающее величину дисперсионного упрочнения с количеством упрочняющей фазы $f=n_s\pi X^2/4$ и средним диаметром частиц X

$$\Delta\sigma_{\text{д.ч.}} = 5,9(f/X)^{1/2}\ln[(X/2,5\cdot 10^{-4})],$$

- где X – средний диаметр частиц; L – расстояние между частицами, $L=1/(n_s)^{1/2}$ (здесь n_s – число частиц на единице площади в плоскости скольжения); σ – модуль сдвига, b – вектор Бюргерса в плоскости скольжения

- $\Delta\sigma_{\text{д}}$ – упрочнение за счет повышения плотности дислокаций – напряжение течения. Упрощенно можно принять

$$\Delta\sigma_{\text{д}} = 0,5Gbp^{1/2},$$

- где G – модуль сдвига, b – вектор Бюргерса, p – плотность дислокаций, см^{-2}

Механизмы упрочнения низкоуглеродистых сталей

- $\Delta\sigma_3$ – зернограничное упрочнение – повышение прочности за счет границ зерен в материале, являющихся барьерами распространения течения

$$\Delta\sigma_3 = k_y \cdot d^{-1/2},$$

- где d – размер зерен, k_y – индивидуальная для каждого материала константа, характеризующая трудность возбуждения скольжения в соседнем зерне (т.е. «проницаемость» границ зерен для дислокаций)

$$k_y = \sigma_d (2S)^{-1/2},$$

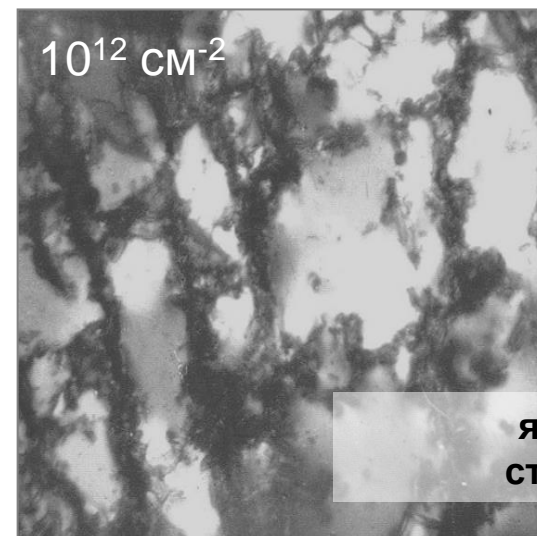
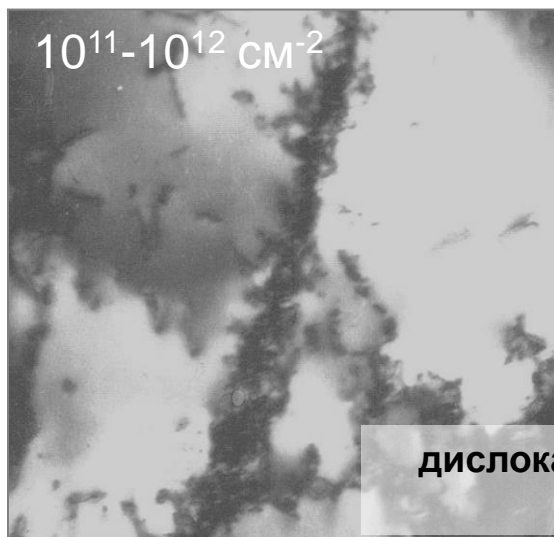
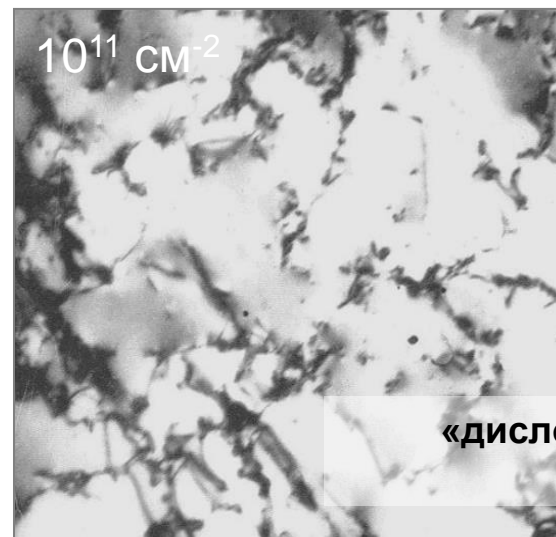
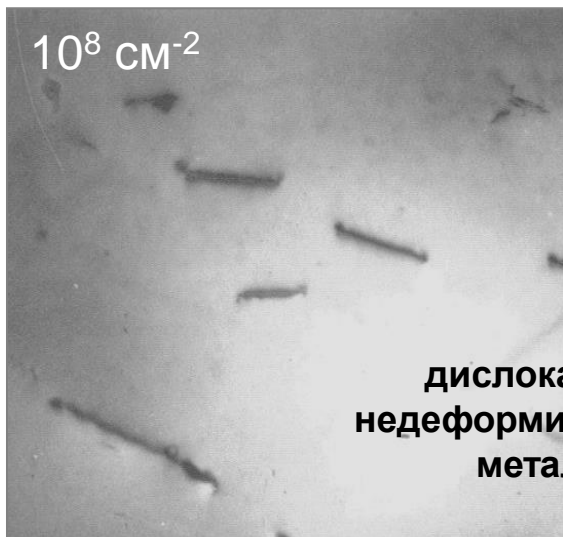
- где σ_d – напряжение отрыва дислокации с закрепления в какой-то точке зерна (напряжение разблокировки), S – расстояние от этой точки до границы зерна

- $\Delta\sigma_c$ – субструктурное упрочнение

$$\Delta\sigma_c = k_c \cdot l^{-1},$$

- где l – размер субзерен, k_c – работа, необходимая для образования дислокаций (для ряда низколегированных сталей принимается 0,015).

Изменение дислокационной структуры при холодной пластической деформации



Сопротивление хрупкому разрушению

На сопротивление стали хрупкому разрушению, как и на прочность, влияют:

состояние твердого раствора, размер зерна, дисперсионное упрочнение, плотность дислокаций, субструктура.

Критерий сопротивления хрупкому разрушению $T_{хл}$ – переходная температура, соответствующая наличию в изломе определенного количества вязкой составляющей ($T_{50 В.С.}$)

Коэффициент охрупчивания:

$$k = \Delta T_{хл} / \Delta \sigma_T$$

При повышении σ_m на каждые 10 Н/мм^2 упрочнения

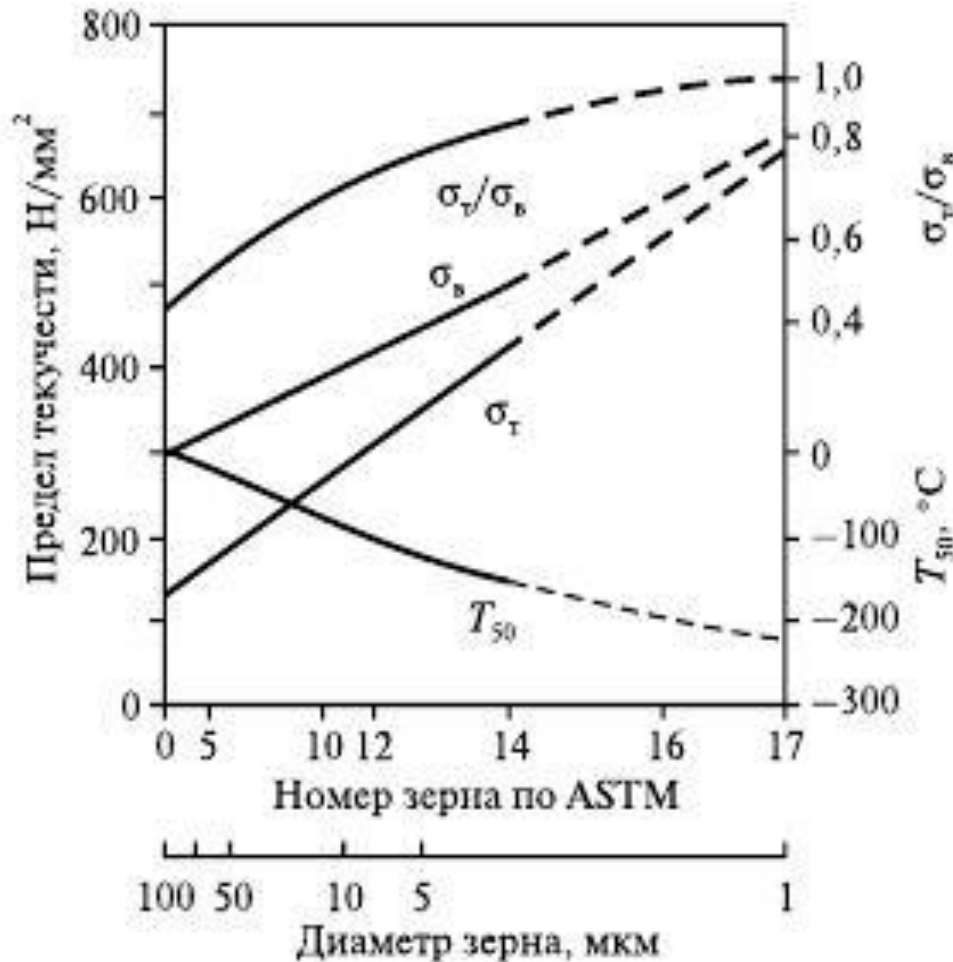
за счет дисперсионного твердения $T_{хл}$ повышается на $3,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ($k = +3,5$);

при измельчении зерна $T_{хл}$ уменьшается на $6 \text{ }^\circ\text{C}$ ($k = -6$);

за счет твердого раствора $T_{хл}$ повышается на $3,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ($k = +3,5$);

$T_{хл}$ не повышается, если упрочнение за счет измельчения зерна составляет не менее 40%. Субструктура влияет в том же направлении.

Влияние размера зерна феррита на механические свойства низколегированной стали



Измельчение зерна – уникальный структурный механизм воздействия на свойства стали, поскольку позволяет одновременно повысить предел текучести и снизить температуру перехода стали от вязкого разрушения к хрупкому.

Уравнение Петча, показывающее, что измельчение зерна сопровождается снижением критической температуры хрупкости:

$$\Delta T_{xp} = -A d^{-1/2}$$

Коэффициент $A = 11,5-12,5 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{мм}^{1/2}$.