

خواص مکانیکی مواد
(بخش ششم: مکانیزم‌های استحکام بخشی)

مکانیزم های استحکام بخشی

برخی روش های متداول افزایش استحکام فلزات عبارتند از:

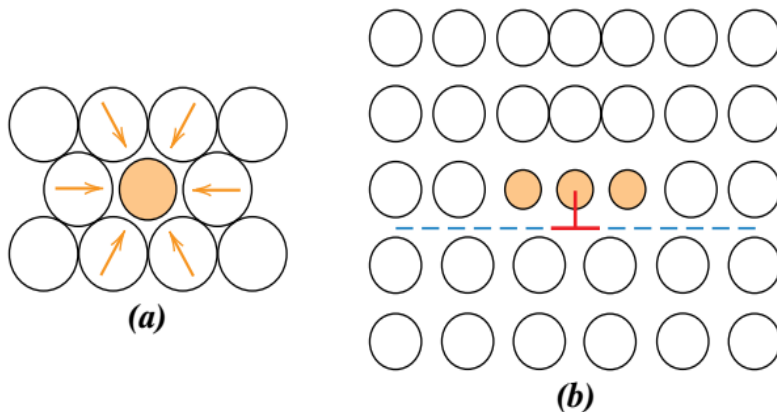
- ۱- آلیاژسازی (تشکیل محلول جامد)
- ۲- کارسختی (Work hardening)
- ۳- ریز کردن دانه ها
- ۴- ایجاد مرزهای فرعی
- ۵- رسوب سختی (رسوب فاز ثانویه در ماده)
- ۶- پراکنده سختی (توزیع فاز ثانویه خارجی در ماده)



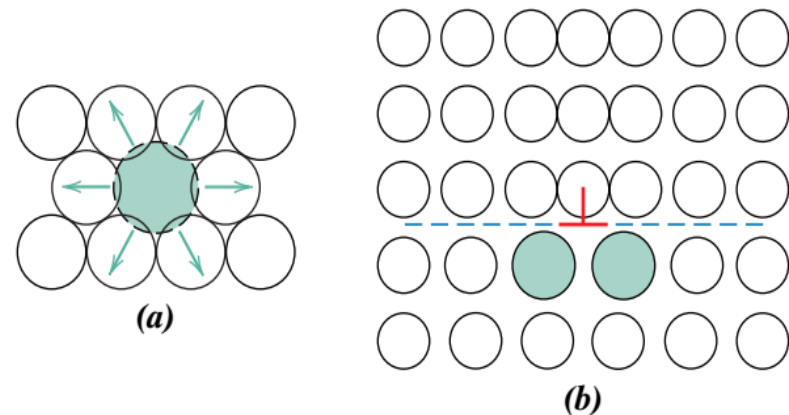
مکانیزم های استحکام بخشی

۱- آلیاژسازی

یکی از مکانیزم های افزایش استحکام و سختی فلزات حل شدن اتم های بین نشینی و جانشینی در ساختار فلز پایه است. اتم های عناصر آلیاژی وارد شده به شبکه بلوری فلز پایه، اندازه متفاوتی نسبت به اتم های اصلی (اتم های فلز پایه) دارند. در نتیجه باعث ایجاد اعوجاج و کرنش های شبکه ای در ساختار بلوری می شوند. برهم کنش میدان های کرنش شبکه ای میان نابجایی ها و اتم های عناصر آلیاژی منجر به محدود شدن حرکت نابجایی ها می شود.



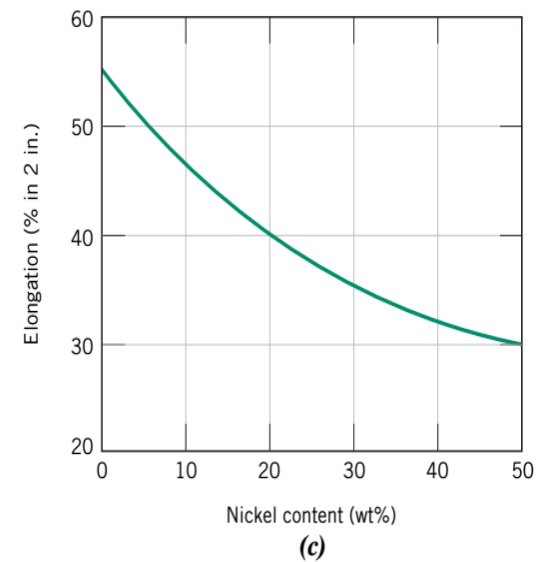
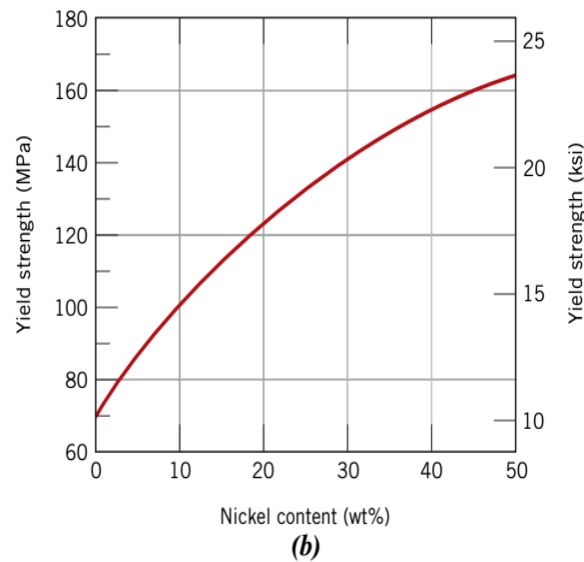
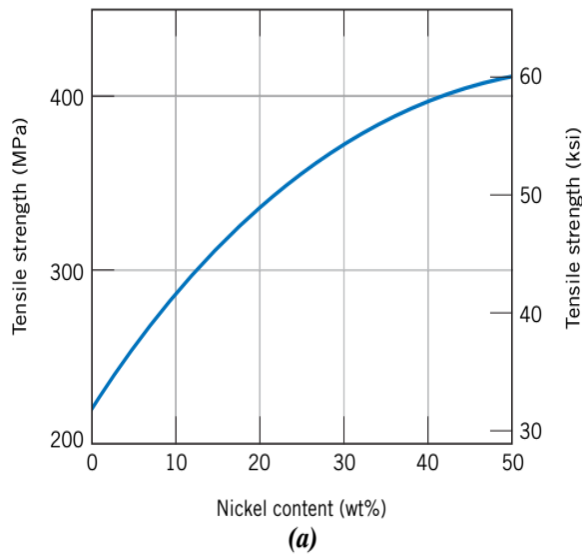
(a) Representation of tensile lattice strains imposed on host atoms by a smaller substitutional impurity atom. (b) Possible locations of smaller impurity atoms relative to an edge dislocation such that there is partial cancellation of impurity–dislocation lattice strains.



(a) Representation of compressive strains imposed on host atoms by a larger substitutional impurity atom. (b) Possible locations of larger impurity atoms relative to an edge dislocation such that there is partial cancellation of impurity–dislocation lattice strains.

مکانیزم های استحکام بخشی

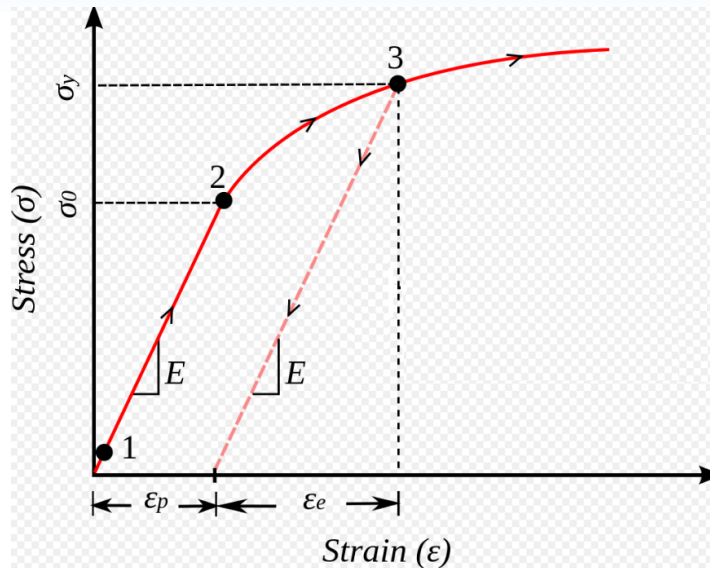
آلیاژها همیشه استحکام و سختی بیشتری نسبت به فلز خالص دارند و این ارتباط مستقیم با اختلاف اندازه عنصر حل شونده و حلال و میزان اعوجاج ایجاد شده در شبکه بلوری در اثر ورود اتم خارجی دارد.



Variation with nickel content of (a) tensile strength, (b) yield strength, and (c) ductility (%EL) for copper-nickel alloys, showing strengthening.

۲- کارسختی

اگر نمودار کششی آلیاژها را در نظر بگیریم:



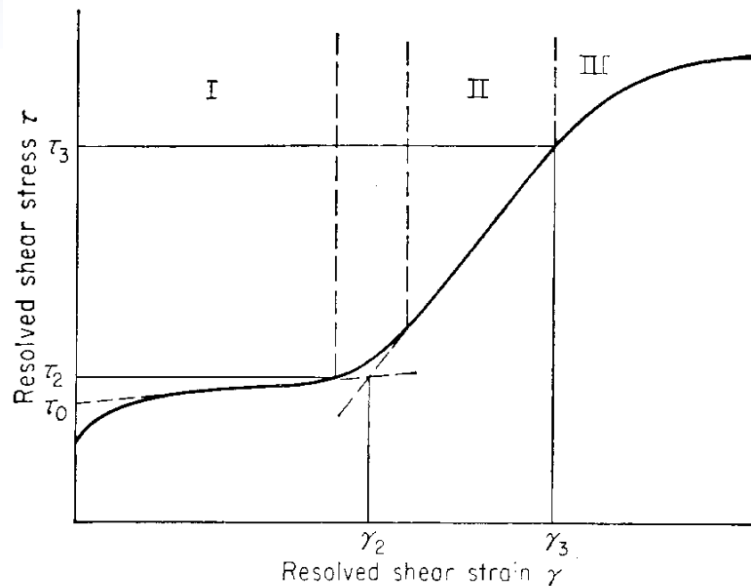
شیب نمودار در ناحیه پلاستیک (نرخ کارسختی):

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon}$$

مکانیزم های استحکام بخشی

الف) کارسختی در تک بلور

برای درک بهتر پدیده کارسختی در فلزات چندبلور ابتدا به بررسی کارسختی تک بلور FCC می پردازیم:
اگر منحنی تنش- کرنش یک تک کریستال FCC را رسم کنیم، به شکل زیر در می آید:



Generalized flow curve
for fcc single crystals.

نمودار را می توان به سه ناحیه تقسیم کرد:

ناحیه I یا مرحله لغزش آسان (Easy glide)

ناحیه II یا مرحله کارسختی خطی

ناحیه III یا ناحیه بازیابی دینامیکی (کاهش نرخ کارسختی)

مکانیزم های استمکام بخشی

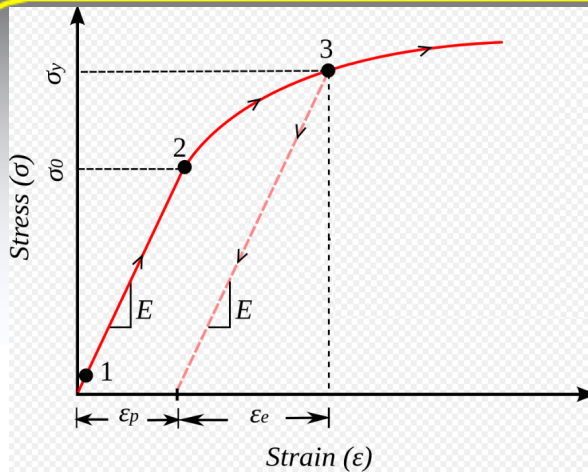
ناحیه I یا مرحله لغزش آسان (Easy glide): مرحله‌ای است که در آن بلور تحت کارسختی چندانی قرار نمی‌گیرد. در این مرحله، نابجایی‌ها می‌توانند بدون برخورد با موانع، در فواصل طولانی حرکت کنند. کارسختی بسیار کم در این مرحله نشان می‌دهد که بیشتر نابجایی‌ها از سطح آزاد بلور فرار می‌کنند. در مرحله لغزش آسان، لغزش نابجایی‌ها تنها روی یک سیستم اتفاق می‌افتد. به همین دلیل گاهی این مرحله را مرحله جریان لایه ای نیز می‌نامند.

ناحیه II یا مرحله کارسختی خطی: در این مرحله منحنی جریان تقریباً به صورت خطی در آمده و کارسختی به سرعت افزایش می‌یابد. در این مرحله، لغزش روی بیش از یک دسته صفحه اتفاق می‌افتد. در حقیقت سیستم‌های لغزش دیگر فعال می‌شوند، نابجایی‌های متحرک واقع در صفحات لغزش متقاطع با هم برخورد کرده و با ایجاد موانع لومر-کاترل از تحرک سایر نابجایی‌ها می‌کاهند. در این مرحله مکانیزم حاکم بر افزایش استحکام، تلاقی نابجایی‌ها است.

ناحیه III یا ناحیه بازیابی دینامیکی (کاهش نرخ کارسختی): در این مرحله نابجایی‌هایی که در مرحله II پشت موانع تجمع کرده بودند با افزایش تنش خارجی می‌توانند با انجام عمل لغزش متقاطع از مانع عبور نمایند. این عمل موجب کاهش نرخ کارسختی می‌شود.

مکانیزم های استحکام بخشی

(ب) کارسختی در چندبلورها



با مقایسه نمودارهای تنش-کرنش نمونه های تک بلور و چندبلور مشاهده می شود که کارسختی چندبلورها در حالت معمول شامل چند مرحله نیست و تنش تسلیم و سیلان نمونه چندبلور به مراتب بالاتر از تک بلور است. زیرا:

۱- برای شروع تغییر شکل پلاستیکی در چندبلورها لازم است حداقل ۵ سیستم لغزش مستقل در هر دانه فعال شود. بنابراین در صورتی که در تک بلور فعال شدن یک سیستم لغزش کافی است.

۲- مرزدانه ها خود مانعی برای حرکت نابجایی ها هستند. لذا هر شبکه که دانسیته مرزدانه هایش افزایش یابد یعنی دانه ریزتر دارد و استحکام بالاتر خواهد رفت.

با افزایش تغییر شکل پلاستیکی، دانسیته نابجایی ها افزایش یافته و در نتیجه استحکام ماده نیز افزایش خواهد یافت. ارتباط بین این دو را توسط رابطه زیر بیان می کنیم:

$$\sigma_y = \sigma_1 + \alpha G b \rho^{1/2}$$

ρ : چگالی نابجایی

b : بردار برگرز

G : مدول برشی

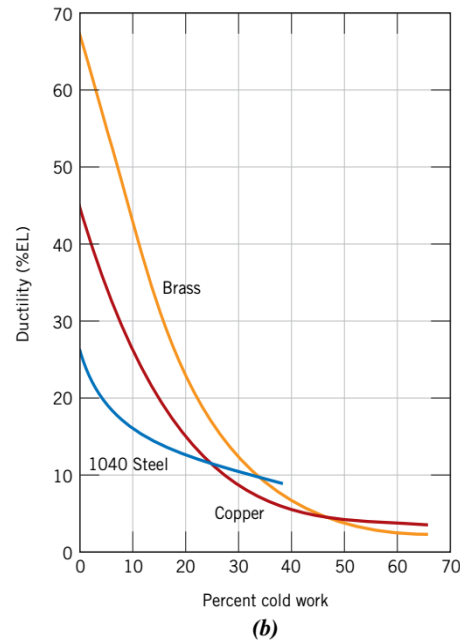
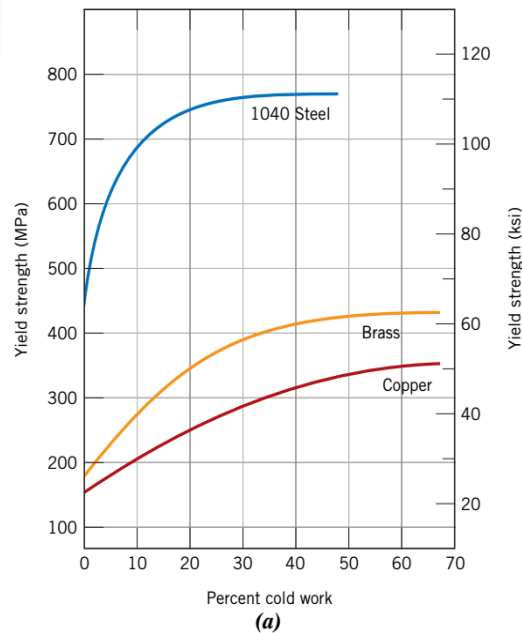
σ_y : تنش سیلان ماده

σ_1 : تنش اصطکاکی شبکه (تنش لازم برای حرکت نابجایی در غیاب مرزدانه)

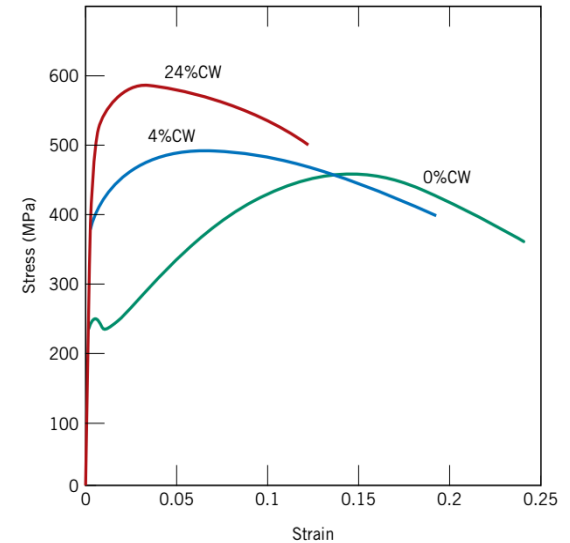
α : ثابت

مکانیزم های استحکام بخشی

تأثیر کار سرد بر خواص مکانیکی بعضی از فلزات



For 1040 steel, brass, and copper, (a) the increase in yield strength, (b) the decrease in ductility (%EL) with percent cold work.



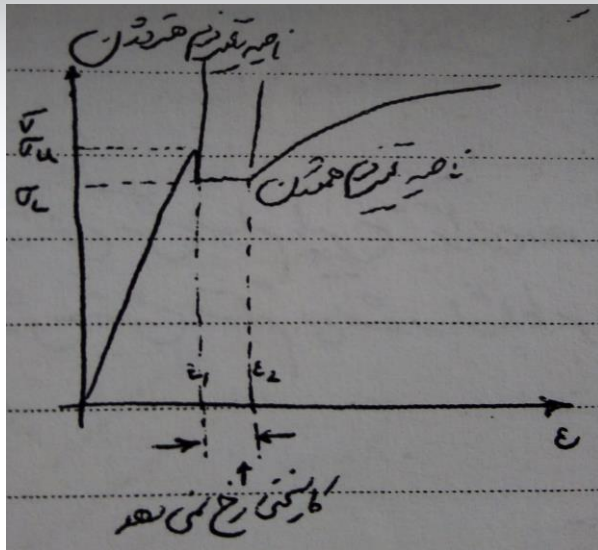
The influence of cold work on the stress-strain behavior of a low-carbon steel; curves are shown for 0%CW, 4%CW, and 24%CW.

مکانیزم های استمکام بخشی

بررسی پدیده نقطه تسلیم و پیر کرنشی در فولاد کم کربن

پدیده نقطه تسلیم:

نمودار کششی فولاد کم کربن به صورت روبرو است:



σ_u : تنش تسلیم بالایی (Upper yield strength)

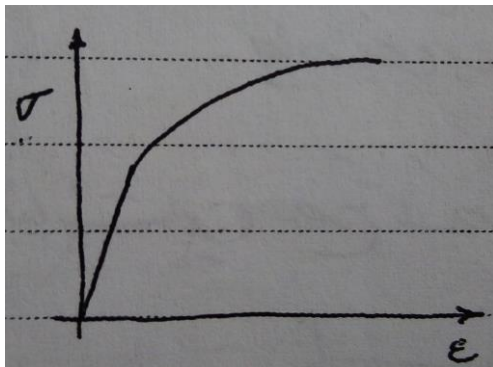
σ_L : تنش تسلیم پایینی (Lower yield strength)

با توجه به نمودار می توان گفت:

۱- پس از اینکه جسم به تنش تسلیم بالایی رسید یک باره تنش برای ادامه تغییر شکل پلاستیکی به سطح σ_L کاهش می یابد.

۲- در محدوده تغییر شکل ϵ_1 تا ϵ_2 تنش لازم برای ادامه تغییر شکل پلاستیکی تقریباً ثابت است.

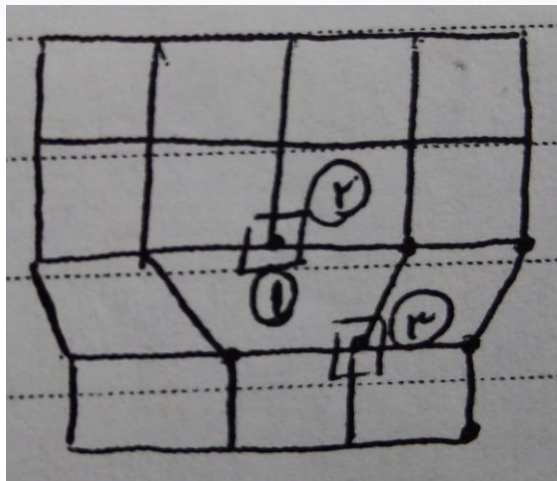
۳- از کرنش ϵ_2 به بعد، فولاد دارای رفتار کارسختی معمولی است.



اگر نمودار کشش آهن خالص را رسم کنیم، نمودار شبیه به روبرو به دست می آید:

تئوری نابجایی ها

پس نتیجه می گیریم علت رفتار را باید در عناصر آلیاژی اضافه شده به آهن که تولید فولاد کرده است جستجو کرد: برای یافتن علت، قسمتی از شبکه فولاد که حاوی یک خط نابجایی ساده باشد را در نظر می گیریم:



عناصر آلیاژی اصلی فولاد کم کربن عبارتند از کربن، ازت، سیلیسیم و منگنز وضعیت استقرار اتم های آلیاژی را در این قسمت از شبکه بررسی می کنیم:
۱- مناسب ترین موقعیت برای اتم های بین نشینی کربن و ازت موقعیت ۱ است.

۲- مناسب ترین موقعیت استقرار اتم های جانشینی عبارت است از:

الف) اگر $r_{\text{Substitutional}} < r_{\text{Fe}}$ ، موقعیت ۲

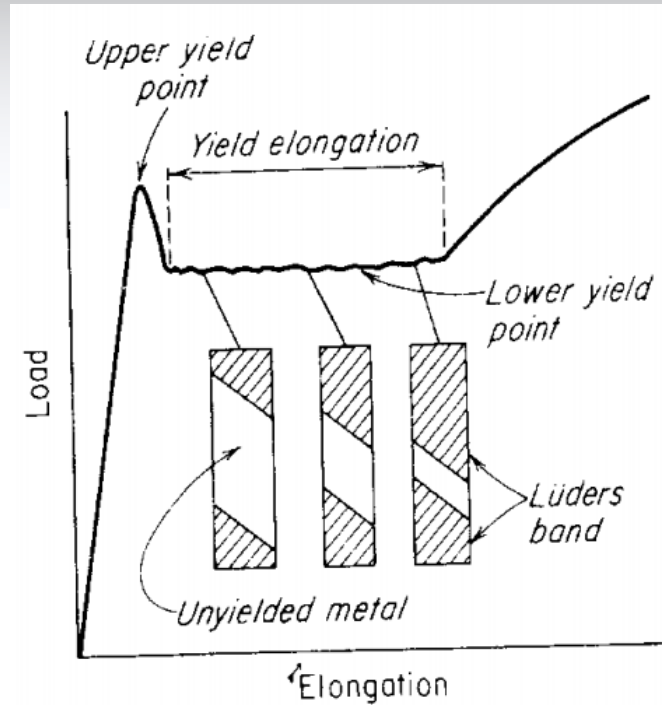
ب) اگر $r_{\text{Substitutional}} > r_{\text{Fe}}$ ، موقعیت ۳

ملاحظه می شود که در فولاد کم کربن پس از مدتی عناصر آلیاژی موجود در اطراف خطوط نابجایی مستقر خواهند شد و به چنین وضعیتی ایجاد اتمسفر کاترل (Cottrell) می گویند.

این اتمسفر موجب قفل شدن نابجایی ها می شود. برای شکستن این قفل لازم است تنش تسلیم به σ_u رسیده و پس از شکسته شدن قفل، تنش لازم برای ادامه تغییر شکل کاهش خواهد یافت (σ_L).

مکانیزم های استمکام بخشی

در این شرایط آزاد شدن نابجایی ها از قفل ها به صورت موضعی سبب ایجاد باندهای لغزشی روی سطح خارجی فولاد خواهند شد که به آنها باندهای لودرز (Luders bands) گویند.

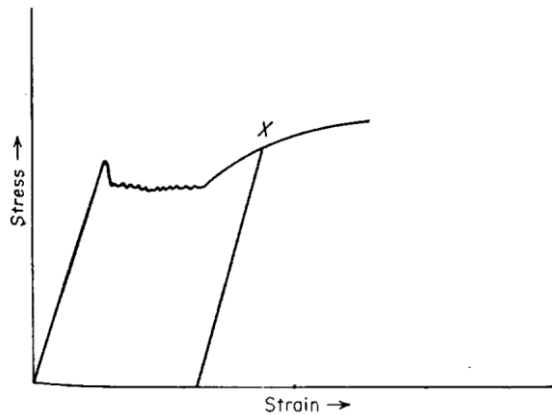


در فاصله ϵ_1 تا ϵ_2 باندهای لودرز در نواحی مختلف طول نمونه تشکیل شده و سرتاسر نمونه را می پوشانند. به همین دلیل تغییرشکل پلاستیکی در محدوده کرنش ذکر شده را تغییرشکل غیرهمگن می گویند. از کرنش ϵ_2 به بعد از آنجا که در همه نواحی نابجایی ها از قید عناصر آلیاژی رها شده اند، تغییرشکل یکنواخت و کارسختی معمول مطابق بقیه فلزات اتفاق می افتد.

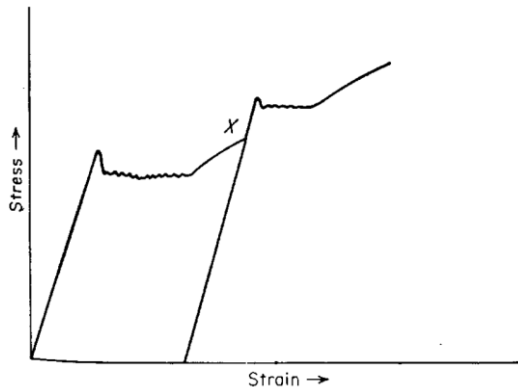
مکانیزم های استمکام بخشی

پیر کرنشی (Strain aging)

برای بررسی این پدیده ۲ نمونه کششی از یک فولاد کم کربن انتخاب می کنیم. اولی تا نقطه X تحت کشش قرار گرفته و سپس باربرداری می شود و بلافاصله بارگذاری مجدد می شود. ملاحظه می شود که پدیده نقطه تسلیم در بارگذاری مجدد ظاهر نمی شود.



نمونه دوم را تا نقطه X کشیده سپس باربرداری کرده و به مدت یک هفته نگهداری می کنیم. در این حالت ملاحظه می شود که پدیده نقطه تسلیم مجدداً ظاهر می شود.

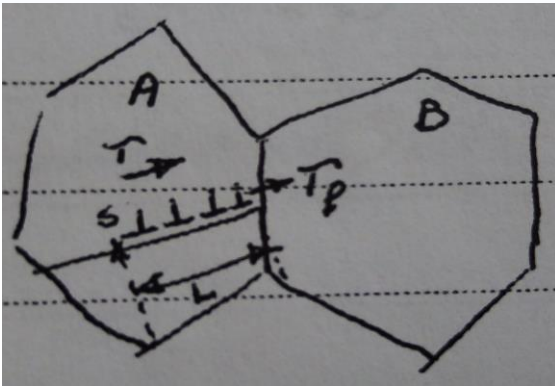


دلیل وقوع پدیده نقطه تسلیم در حالت دوم این است که اتم های کربن و ازت در فاصله زمانی داده شده از طریق نفوذ مجدداً در فضای اطراف خط نابجایی قرار گرفته و آنها را قفل می کنند.

مکانیزم های استحکام بخشی

۳- ریز کردن دانه ها

مشاهده شده است که هر چه دانه ها ریزتر باشند استحکام افزایش می یابد، ولی چرا؟
برای روشن شدن موضوع فرض می کنیم ۲ دانه A و B در یک چندبلور تحت اثر تنش قرار دارند و منبع فرانک-رید در دانه A فعال شود.



در این شرایط، تجمع نابجایی ها اتفاق می افتد، در نتیجه خواهیم داشت:

$$\tau_f = n\tau$$

τ_f : تنش برشی اعمالی از طرف نابجایی سر صف

n : تعداد نابجایی موجود در صف

τ : تنش اعمالی در صفحه لغزش

از طرف دیگر دیدیم حداکثر تعداد نابجایی ایجاد شده بین مانع و منبع را می توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$n = \frac{k\pi\tau L}{Gb}$$

مکانیزم های استمکام بخشی

با مقایسه دو رابطه می توان نتیجه گرفت:

$$L \uparrow \Rightarrow n \uparrow \Rightarrow \tau_f \uparrow$$

می دانیم زمانی دانه B از طرف A مجبور می شود وارد ناحیه پلاستیک شود که τ_f به حد معینی برسد. در نتیجه می توان گفت:

$$(\tau_f)_c = cte.$$

با توجه به اینکه تقریباً $L = \frac{1}{2}d$ (قطر متوسط دانه) می توان نتیجه گرفت:

$$d \uparrow \Rightarrow n \uparrow \Rightarrow \tau \downarrow$$

کمتر یعنی تنش تسلیم پایین تر، در نتیجه می توان گفت که افزایش اندازه قطر متوسط دانه ها موجب افزایش n و در نتیجه کاهش تنش تسلیم می شود. ارتباط بین تنش تسلیم و قطر متوسط دانه ها توسط رابطه معروف Hall-Petch به دست می آید.

$$\sigma_y = \sigma_1 + \frac{K}{\sqrt{d}}$$

σ_y : تنش سیلان ماده

σ_1 : تنش اصطکاکی شبکه (تنش لازم برای حرکت نابجایی در غیاب مرزدانه)

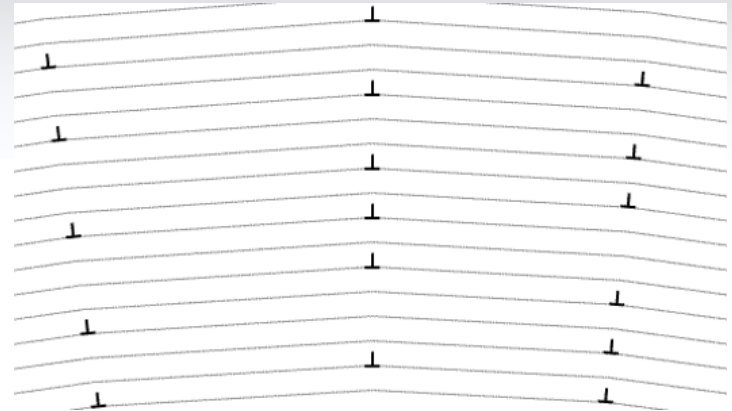
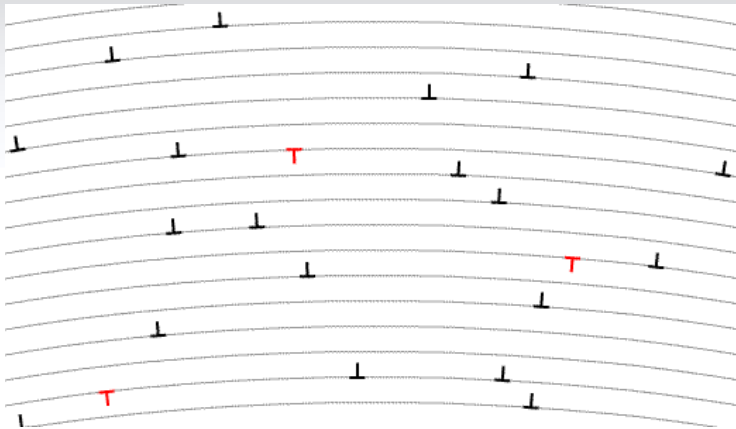
d : اندازه دانه

K : ثابت

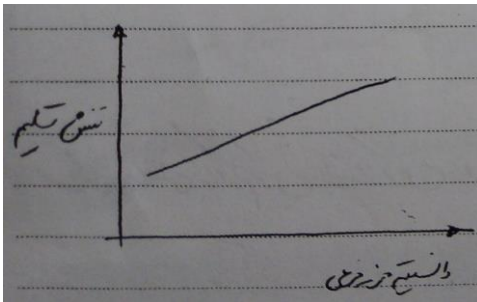
مکانیزم های استحکام بخشی

۴- ایجاد مرز فرعی

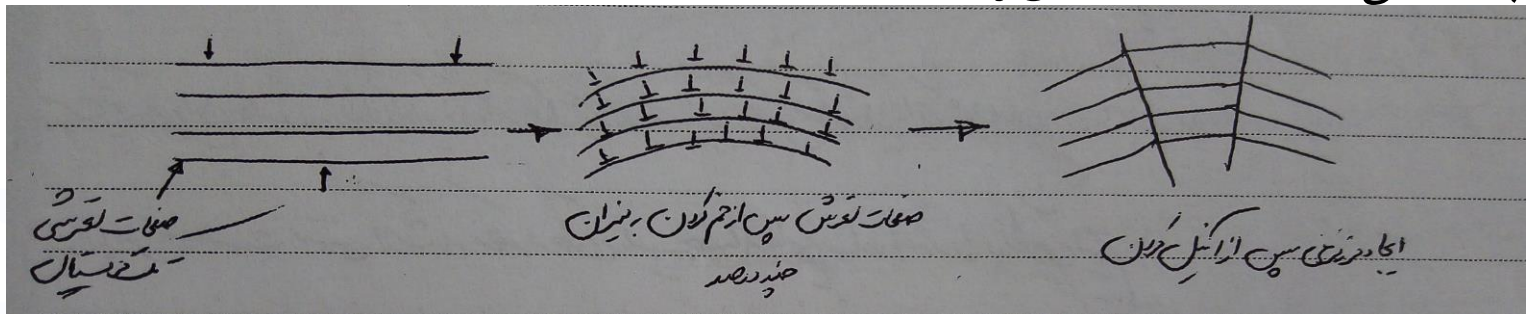
ایجاد مرز فرعی نیز می تواند استحکام آلیاژ را افزایش دهد.



هر چه دانسیته مرزهای فرعی افزایش یابد استحکام ماده نیز بالا خواهد رفت.



پدیده چند ضلعی شدن (Polygonization):

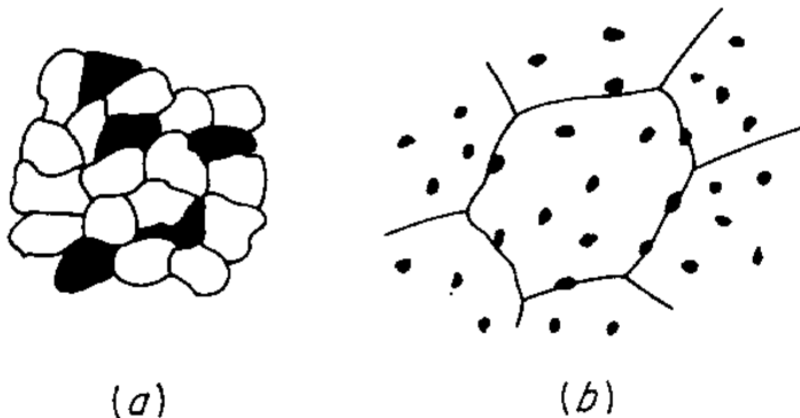


۵- پراکندن فاز ثانویه

بسیاری فلزات، ساختاری غیرهمگن متشکل از دو یا تعداد بیشتری فاز دارند. چنین فلزاتی ممکن است ساختارهای متنوعی داشته باشند اما به طور کلی آنها را به دو دسته زیر می توان طبقه بندی کرد:

Aggregated structure _ اندازه ذرات فاز ثانویه در حدود اندازه دانه فاز زمینه است مثل فاز بتای برنج در فاز آلفای برنج یا کلونی های پرلیت در فاز فریت فولاد

Dispersed structure _ هر ذره فاز ثانویه به طور کامل درون یک دانه از فاز زمینه قرار داشته باشد.



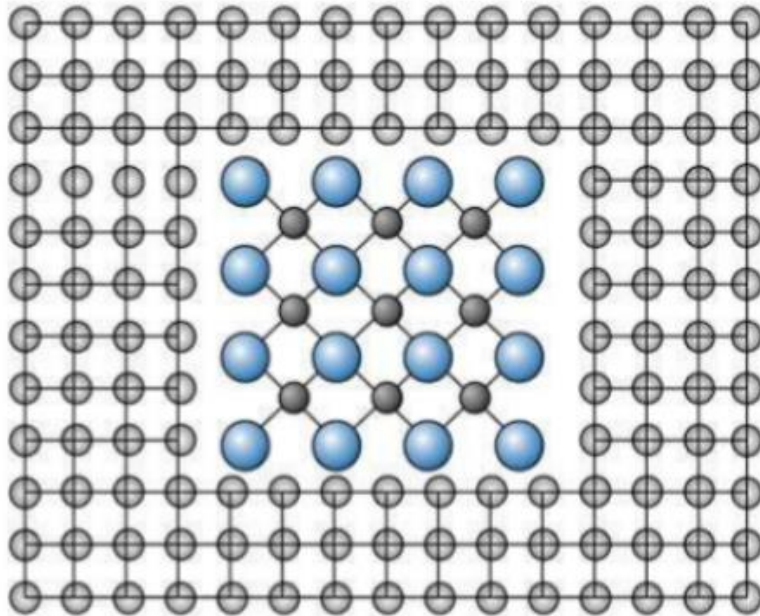
Types of two-phase microstructures. (a) Aggregated structure; (b) dispersed structure.

مکانیزم های استحکام بخشی

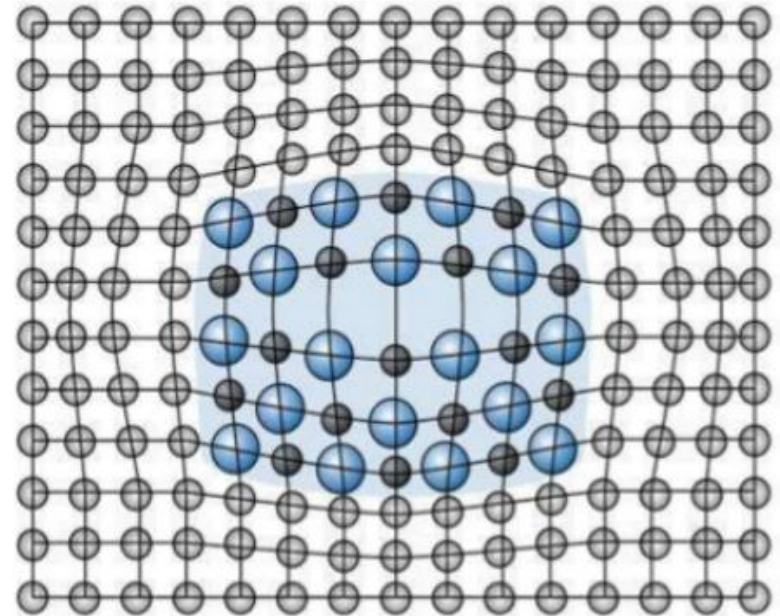
فاکتورهای زیادی بر مکانیزم و میزان استحکام بخشی ماده در اثر افزودن فاز ثانویه به آن تأثیر گذارند، به عنوان مثال:

- اندازه ذره فاز ثانویه
 - شکل ذره فاز ثانویه
 - تعداد ذرات فاز ثانویه
 - توزیع ذرات فاز ثانویه
 - استحکام، داکتیلیتی و رفتار کارسختی زمینه و فاز ثانویه
 - تطابق کریستالوگرافیک دو فاز در فصل مشترکشان
 - استحکام اتصال دو فاز در فصل مشترک
- به سختی می توان این پارامترها را در عمل به طور مستقل تغییر داد.





(a)



(b)

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[®] is a trademark used herein under license.

(a) A noncoherent precipitate has no relationship with the crystal structure of the surrounding matrix. (b) A coherent precipitate forms so that there is a definite relationship between the precipitate's and the matrix's crystal structure.

مکانیزم های استمکام بخشی

خواص ماده دو یا چند فازی:

اگر بتوان تأثیر هر فاز در خواص را مستقل در نظر گرفت، خواص ماده چندفازی میانگین وزنی خواص هر یک از فازها است. برای مثال چگالی ماده دوفازی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$M = M_1 + M_2$$

$$\rho_{avg} V = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2$$

$$\rho_{avg} = \rho_1 \frac{V_1}{V} + \rho_2 \frac{V_2}{V}$$

$$\rho_{avg} = v_1 \rho_1 + v_2 \rho_2$$

M : جرم

ρ : چگالی

V : حجم

v : کسر حجمی

مکانیزم های استحكام بخشی

برای خواص مکانیکی که وابسته به ساختار هستند، خواص ماده دو یا چندفازی بستگی به برهم کنش فازها دارد. یکی از روابط ساده‌ای که برای محاسبه استحکام یک ماده دو فازی با فازهای داکتیل به صورت زیر ارائه شده است که در آن فرض شده است کرنش های اتفاق افتاده در اثر اعمال تنش در دو فاز یکسان باشد:

$$\sigma_{avg} = v_1 \sigma_1 + v_2 \sigma_2$$

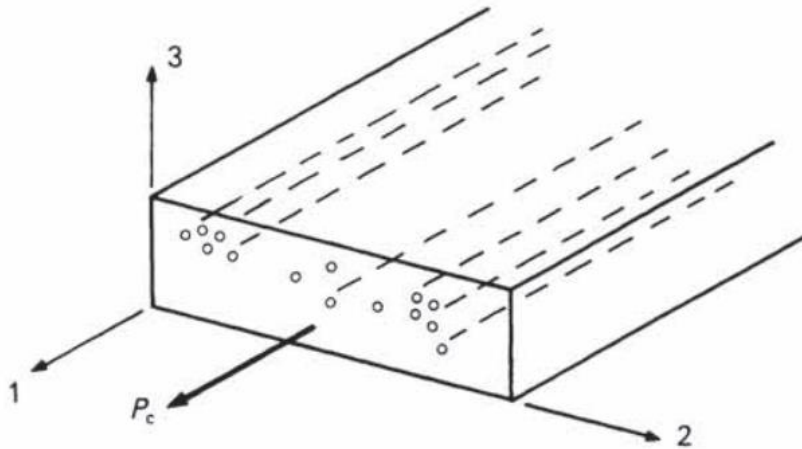
v_1 و v_2 : کسر حجمی های فازهای ۱ و ۲

σ_1 و σ_2 : تنش ها در فازهای ۱ و ۲

σ_{avg} : تنش میانگین در آلیاژ

مکانیزم های استمکام بخشی

برای مواد کامپوزیتی با تقویت کننده های رشته ای تک جهت (فاز ثانویه به صورت رشته دورن زمینه قرار گرفته است) روابط زیر را در جهت قرار گیری رشته ها می توان نوشت:



$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m,$$

$$P_c = \sigma_c A_c,$$

$$P_f = \sigma_f A_f,$$

$$P_m = \sigma_m A_m,$$

$$P_c = P_f + P_m$$

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$$

$$\sigma_c = \frac{\sigma_f A_f}{A_c} + \frac{\sigma_m A_m}{A_c}.$$

مکانیزم های استمکام بخشی

$$v_f = \frac{A_f}{A_c} \text{ and } v_m = \frac{A_m}{A_c}$$

$$\sigma_c = \sigma_f v_f + \sigma_m v_m.$$

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c, \quad \sigma_f = E_f \varepsilon_f, \quad \sigma_m = E_m \varepsilon_m,$$

$$E_c \varepsilon_c = E_f \varepsilon_f v_f + E_m \varepsilon_m v_m,$$

$$E_c = E_f v_f + E_m v_m$$

قانون مخلوط ها (Rule of mixture)

$$E_c = E_m v_m + E_{f_1} v_{f_1} + E_{f_2} v_{f_2} + \dots$$

مکانیزم های استحکام بخشی

راه های توزیع ذرات فاز ثانویه در زمینه:

یکی از راه های توزیع ذرات فاز ثانویه در ماده، پراکنده کردن ذرات فاز ثانویه در ماده زمینه در حین فرایند تولید با روش هایی مانند متالورژی پودر است. این روش افزایش سختی و استحکام را اصطلاحاً پراکنده سختی (Dispersion hardening) می گویند.

یکی از راه های توزیع ذرات فاز ثانویه در ماده، رسوب دادن ذرات فاز ثانویه درون ماده زمینه است و این روش افزایش سختی و استحکام را رسوب سختی (Precipitation hardening) یا پیرسختی (Age hardening) می گویند.

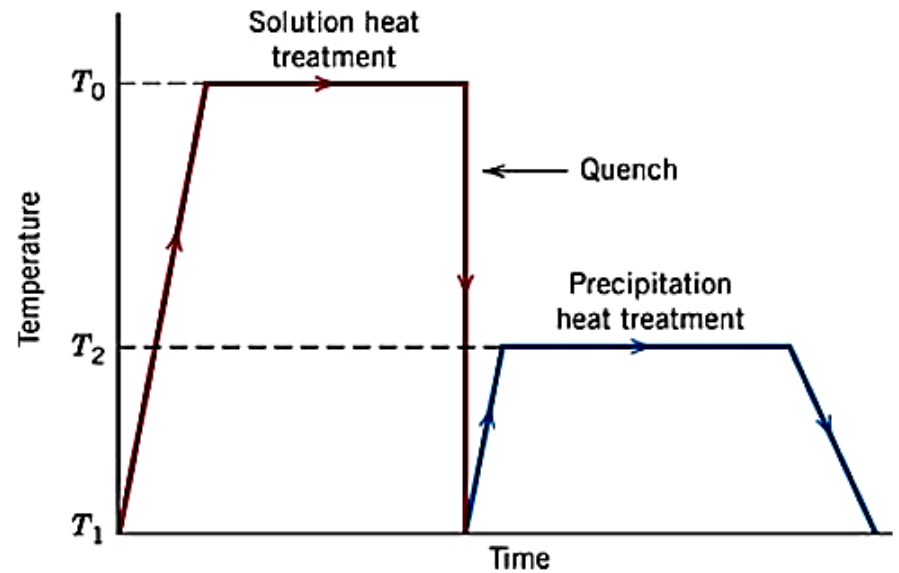
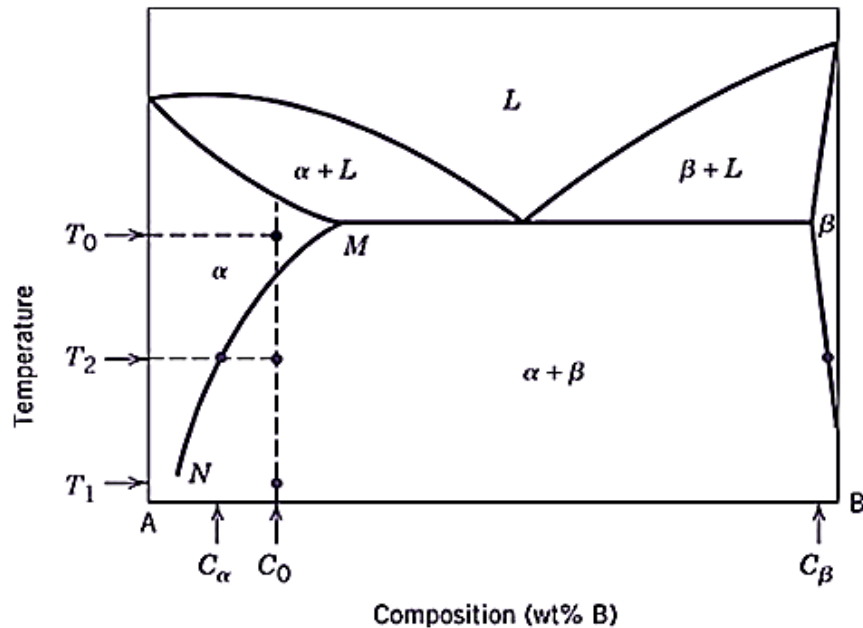
روش رسوب سختی از لحاظ صنعتی کاربرد زیادی دارد، در این روش از محلول جامد اشباع شده ذرات جامدی رسوب می کنند. این ذرات به صورت پراکنده داخل زمینه رسوب کرده و به عنوان موانعی در برابر حرکت نابجایی ها عمل می کنند.

دو مثال از آلیاژهایی که در آنها این مکانیزم افزایش سختی و استحکام استفاده می شود: آلیاژهای آلومینیم و آلیاژهای مس-بریلوم

مکانیزم های استمکام بخشی

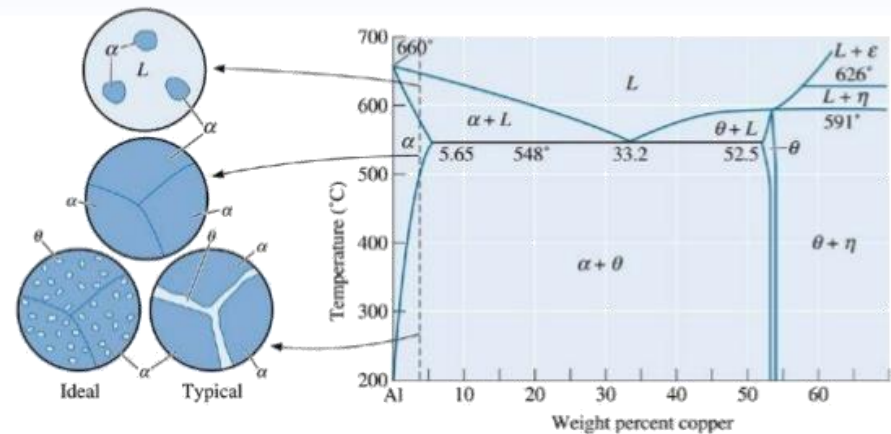
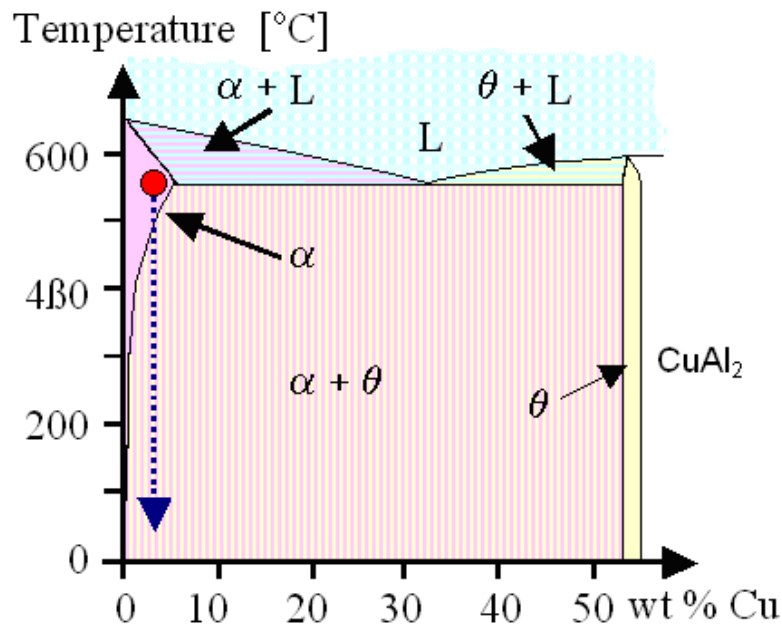
مکانیزم رسوب سختی برای سیستم های آلیاژی قابل استفاده است که انحلال جزئی در حالت جامد دارند و با کاهش دما، حد حلالیت کاهش می یابد.

در حقیقت فاز ثانویه حتی در دماهای بالا حلالیت بسیار کمی در زمینه دارد.



مکانیزم های استحکام بخشی

مراحل رسوب سختی در آلیاژهای آلومینیم-مس:



The aluminum-copper phase diagram and the microstructures that may develop during cooling of an Al-4% Cu alloy.

مکانیزم های استمکام بخشی

- پس از کوئنچ کردن از حالت محلول جامد، و شروع پیرسازی ابتدا نواحی کوچکی از جدایش عناصر حل شونده مشاهده می شود. این نواحی ابتدا توسط Guiner and Preston مشاهده شدند و به همین دلیل با نام "نواحی GP" شناخته می شوند. تشکیل این نواحی باعث ایجاد کرنش های موضعی شده و بنابراین سختی نواحی GP1 از سختی محلول جامد بیشتر است.

- با پیرسازی بیشتر، توده های بزرگتر از اتم های مس روی صفحات {100} زمینه قرار می گیرد و این ساختار تحت عنوان نواحی GP2 یا θ شناخته می شود. در این حالت سختی بیشتر افزایش می یابد.

- سپس رسوبات صفحه ای شکل مشخصی از $CuAl_2$ یا θ' که با زمینه تطابق اتمی دارند (رسوبات کوهرننت) روی صفحات {100} ایجاد می شوند. ذرات رسوب کوهرننت ایجاد شده میدان کرنشی بیشتری در زمینه ایجاد کرده و در نتیجه سختی را بیشتر افزایش می دهند.

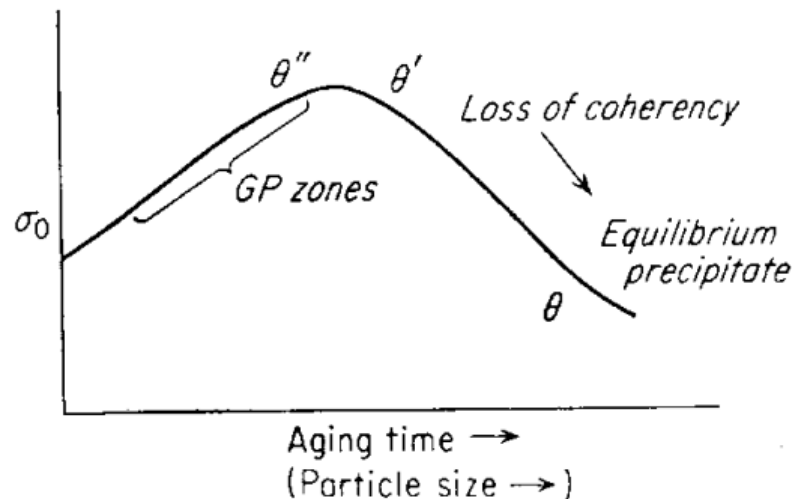
- با افزایش پیرسازی، فاز تعادلی $CuAl_2$ یا θ از شبکه انتقالی θ' تشکیل می شود. این ذرات دیگر با زمینه تطابق اتمی نداشته و بنابراین سختی کمتر از مرحله تشکیل θ' است.

مکانیزم های استحکام بخشی

برای بیشتر آلیاژها، رسوبات پس از دست دادن کوهیرنسی خود با زمینه قابل مشاهده با میکروسکوپ نوری می شوند.

ادامه فرایند پیرسازی منجر به رشد ذرات و رشد بیشتر سختی می شود. شکل زیر نشان دهنده تغییرات استحکام با تغییر زمان پیرسازی یا اندازه ذرات است.

مراحل تغییرات در سیستم Al-Cu پیچیده است با این وجود دیگر سیستم های رسوب سختی ممکن است چنین پیچیدگی ها و مراحل تغییراتی نداشته باشند. معمول است که ابتدا یک رسوب کوهیرنت شکل بگیرد و سپس در یک اندازه بحرانی کوهیرنسی خود را از دست بدهد.



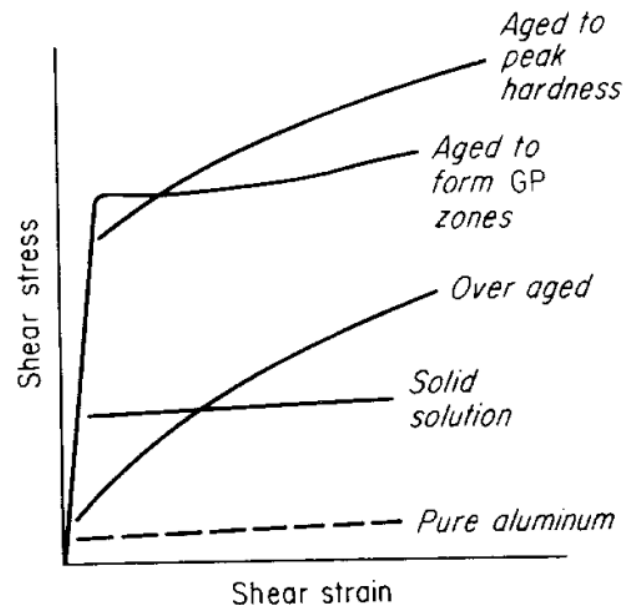
مکانیزم های استحکام بخشی

نمودارهای کشش مربوط به مراحل مختلف رسوب سختی در شکل نشان داده شده اند:

بعد از عملیات انحلالی و کوئنچ همه مس در حالت محلول جامد فوق اشباع است، استحکام تسلیم نسبت به آلومینیم خالص به میزان زیادی افزایش می یابد ولی نرخ کارسختی پایین است.

هنگامی که پیرسازی اتفاق می افتد و نواحی GP تشکیل می شوند استحکام تسلیم به میزان زیادی افزایش می یابد. نرخ کارسختی همچنان پایین است.

هنگامی که ماده پیرسازی شده به پیک سختی می رسد، استحکام تسلیم کمی افت می کند. با این حال، کارسختی به شدت افزایش می یابد.



مکانیزم های استمکام بخشی

مقایسه بین مکانیزم های رسوب سختی و پراکنده سختی:

- اندازه ذرات ایجاد شده در رسوب سختی بسیار ریز و در حد چندین نانومتر است.

- در رسوب سختی معمولاً یک انطباق اتمی یا کوهرنسی (Coherency) بین شبکه بلوری زمینه و رسوب وجود دارد. این در حالی است که در مکانیزم پراکنده سختی، تطابق اتمی بین زمینه و فاز افزوده شده وجود ندارد.

- کاهش حد حلالیت با کاهش دما، تعداد سیستم های آلیاژی که می توان رسوب سختی را در مورد آنها انجام داد محدود می کند در حالی که با مخلوط کردن پودرهای فلزی و ذرات فاز ثانویه (ذرات اکسیدی، کاربیدی، نیتريدی، بورایدی و ...) و متراکم و یکپارچه کردن آنها با استفاده از روش های متالورژی پودر می توان تقریباً بی نهایت سیستم به صورت پراکنده سختی ایجاد کرد.

- مزیت سیستم های پراکنده سختی این است که از نظر دمایی پایداری بوده و در دماهای بالا خواص خود را به راحتی از دست نمی دهند. چنین آلیاژهایی، به دلیل حضور ذرات فاز ثانویه نسبت به آلیاژ تک فاز در مقابل تبلور مجدد و رشد دانه بسیار مقاوم تر هستند. زیرا حلالیت فازهای ثانویه در این حالت در فاز زمینه بسیار کمتر است.