



دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی و علم مواد

آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد

آزمایش شماره 6 :

بررسی تاثیر اندازه دانه بر خواص کششی نمونه های فولادی

نگارش :

پیام مرادی بانیارانی

**98107728**

گروه :

دوشنبه ساعت 13:30 تا 16:30

اساتید :

دکتر سیامک سراج زاده

مهندس جعفر مهدی اخگر

تاریخ انجام آزمایش :

**1401/02/5**

عنوان 8 بررسی تأثیر اندازه دانه بر خواص کششی نمونه‌های فولادی

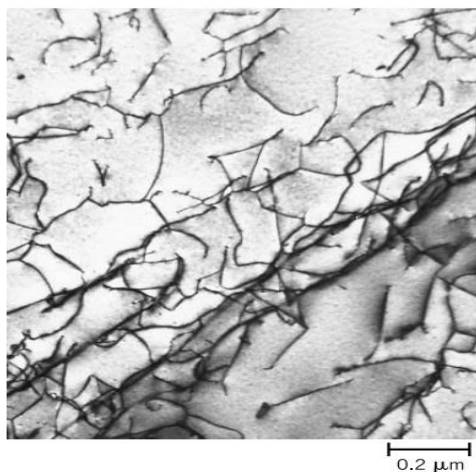
اکثر مواقع از مهندسين مواد و متالورژ خواسته می‌شود که آلیاژهای با استحکام بالا در عین حال چقرمه و انعطاف پذیری مناسبی داشته باشند، را طراحی کنند.

ما می‌دانیم که داشتن استحکام بالا باعث کاهش انعطاف پذیری ماده می‌شود. این موضوع در می‌توان با انرژی نابجایی‌ها توضیح کرد.

همانطور که می‌دانیم عامل اصلی و مهم در استحکام مواد نابجایی‌ها می‌باشند. اگر نابجایی‌ها انرژی لازم برای حرکت را از کنش برشی <sup>آنها</sup> <sup>حرکت</sup> بگذارد می‌شود را داشته باشند می‌توانند شروع به حرکت کنند، چرا که این کنش برشی انرژی لازم برای شکستن پیوندهای اتم‌ها موجود در نیم صفحه اضافی را تأمین می‌کند و باعث حرکت نابجایی‌ها می‌شود. هر چقدر که این نابجایی‌ها راحت‌تر حرکت کنند، یعنی به انرژی کمتری احتیاج دارند و در نتیجه در کنش‌های برشی کم شروع به حرکت می‌کنند.

حال قصد ما این است که بتوانیم جلوی حرکت این نابجایی‌ها را بگیریم تا مانع حرکت نابجایی‌ها شویم. یعنی آن کاری کنیم که انرژی بیشتری برای حرکت درآوردن و ادامه حرکت نابجایی‌ها ایجاد کنیم، یعنی درواقع کنش بیشتری احتیاج خواهیم داشت و در نتیجه استحکام ماده ما بالا می‌رود.

از همین جا می‌توان فهمید برای اینکه ماده ما نرم و انعطاف پذیر باشد، می‌بایست نابجایی‌ها به آسانی حرکت کنند از طرفی برای اینکه ماده ما دارای استحکام بالایی باشد، باید حرکت این نابجایی‌ها کند شود این دو خاصیت ضد و یار برعکس هم می‌باشند.

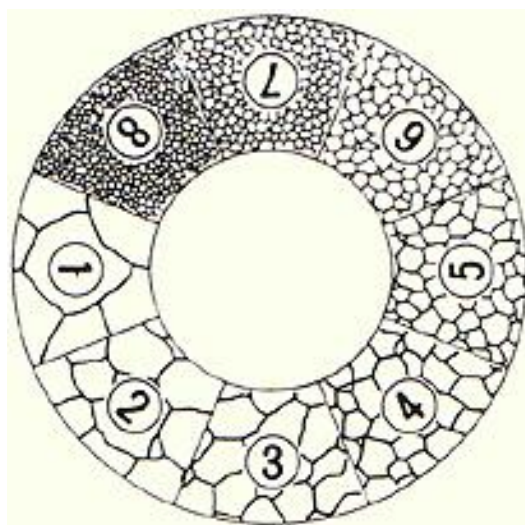


شکل 6.1 تصویر الکترون روبشی از آلیاژ تیتانیوم که در آن خطوط مشکی نابجایی‌ها هستند. بزرگنمایی 50000x

راه حلی که ما می توانیم هم استحکام و هم چقرمگی، انعطاف پذیری ماده را بهبود ببخشیم، از آن کردن دان  
 ها و یا نشد. البته باید بدانیم که توجه کنیم که منظور از بهبود استحکام و چقرمگی، انعطاف پذیری و یا  
 معنای افزایش همدان این پارامترها نیست، مثلاً فرض کنید که فولادی داریم با استحکام تسلیم  $400 \text{ MPa}$   
 و استحکام کششی  $600 \text{ MPa}$ ، انعطاف پذیری  $30\%$  بار از آن کردن دانها ما می توانیم مثلاً استحکام در حد  
 استحکام تسلیم  $600 \text{ MPa}$ ، استحکام کششی  $700 \text{ MPa}$ ، انعطاف پذیری  $27\%$  داشته باشیم.  
 (همه این اعداد فرض هستند) و اینجاست که  $UTS$  افزایش پیدا کرده ولی انعطاف پذیری کاهش  
 پیدا کرده. چقدر می تواند بود و چقدر مقدار انعطاف پذیری را از خود حفظ کند که این یک  
 دستاورد بزرگی است. برای همین خواص ماده بار از آن کردن دانها بهبود پیدا می کند.

پس متوجه شویم که باریز کردن دانه ها در واقع مساوی نرزدانه ها را افزایش داده ام و نرزدانه ها خود به عنوان عامل منع کننده حرکت نابجایی ها عمل می کنند. حال سوال پیش می آید که چگونه نرزدانه ها باعث کند کردن حرکت و یا مانع حرکت نابجایی ها می شود.

در شکل زیر می بینیم که هر چه که اندازه دانه های بزرگتر شده ، مساحت نرزدانه ها افزایش می یابد.



شکل 6.2 شکل شماتیک از کاهش اندازه دانه و در نتیجه افزایش مساحت مرز دانه ها

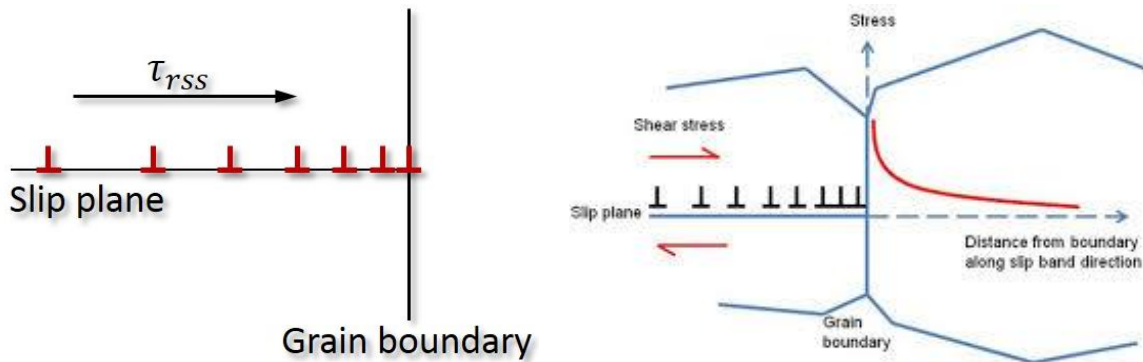


به دو دلیل می توان مرز دانه ها را موانع حرکتی نابجایی ها دانست :

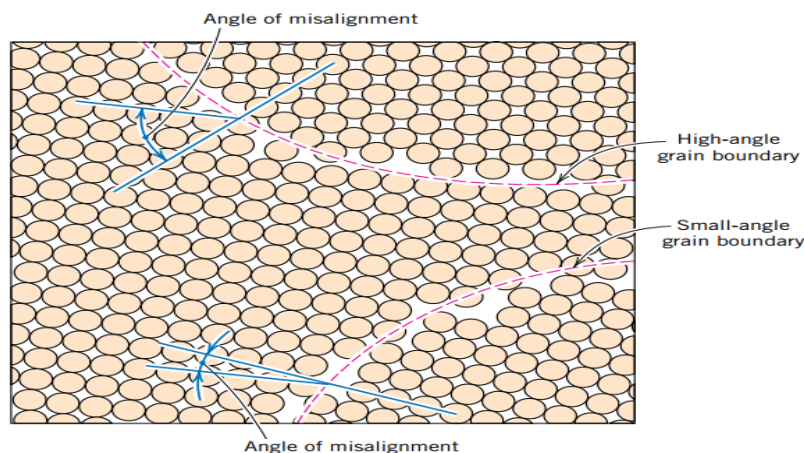
① به دلیل اینکه دو دانه بایکدیگر از لحاظ چینش اتمی متفاوت هستند، نابجایی برای ادامه حرکت خود می بایست جهتش را تغییر دهد. و دلایل دیگر از عوامل مهم تغییر شکل لغزش می باشد و این لغزش باید در سیستم های لغزش که دو ویژگی هم دارند اتفاق می افتد یکی صفحه فشرده و دیگری درجهت فشرده. پس حالا با رسیدن نابجایی ها به مرز دانه ها باید به حرکت نابجایی ها صفحات و جهات فشرده پیدا شود که این خود احتیاج به انرژی دارد، پس نابجایی ها جهت مرز دانه ها جمع می شوند.

② به دلیل نامنظم بودن اتمی این ناحیه و انرژی بالای این ناحیه، نابجایی ها در صفحات لغزش دچار ناپیوستگی می شوند از یک دانه به دانه دیگر. و نیاز به انرژی بیشتر برای عبور از این ناحیه دارند پس جهت مرز دانه جمع می شوند.

به طور کلی هر چه در زاویه این آرایش با فاصله کمتر دانه ها بیشتر شود، یعنی تفاوت بیشتر در چینش اتم ها در هر دانه، حرکت نابجایی ها سخت تر شده و در نتیجه استحکام ماده بالا می رود.

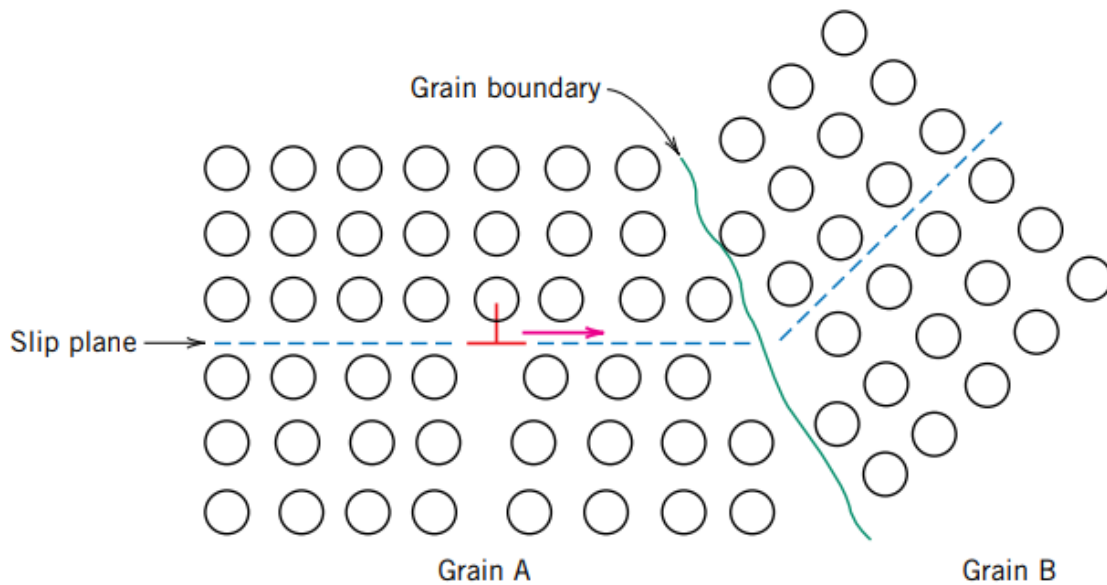


شکل 6.3 نمایش جمع شدن نابجایی ها پشت مرز دانه ها



شکل 6.4 مرز دانه ها با زاویه کم و زاویه زیاد

در شکل زیر شماتیکی از دو دانه متفاوت با چینش متفاوت را می بینیم.



شکل 6.5 شماتیکی از دو دانه متفاوت با چینش های اتمی متفاوت

حال باید به این سوال هم جواب بدهیم که چگونه بارزترین اثر از دانه، چقرمگی ما افزایش می یابد. چقرمگی یعنی توانایی ماده در جذب انرژی قبل از شکست، یعنی هر چقدر ماده مقاوم تر در برابر شکست باشد را ما ماده چقرم تر می گوئیم.

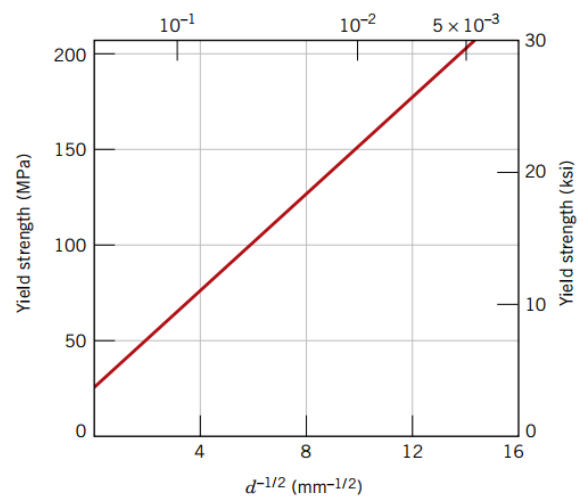
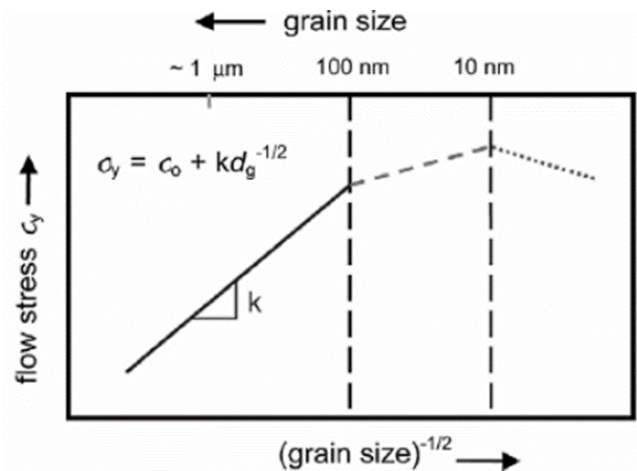
مکانیزم شکست، جوش زنی تردی و رشد تردی است. اگر تردی جوش بزند و بخوابد در شکست، با ریزش کردن دانه ها در واقع ما مساحت ریز دانه ها را افزایش داده ایم و این باعث می شود که جلوی حرکت و رشد تردی گرفته شود چنانچه برین ادامه ریزه نیاز به انرژی بیشتر و در نتیجه تنش بالاتر است. پس ماده قبل از شکست از توانایی بالایی برخوردار می باشد.

برای پیوسته‌حواد راجه‌ای اثر اندازه دانه را بر استحکام تسلیم نشان می‌دهد راجه‌ای "Hall-Petch" و باشد.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (6.1)$$

در این راجه  $\sigma_0$  استحکام تسلیم برپس نمونه دانه کریستالی،  $k_y$  مقاومت قبله در برابر حرکت نابیجانها که مقدار ثابتی دارد،  $k_y$  پارامتر کفلی "locking parameter"، یک سنجش، سختی نسبی برپس وجود و حرکت لیزرانه‌ها در این سخت شدن نسبی  $d$  متوسط قطر دانه که عکس ثابت است.

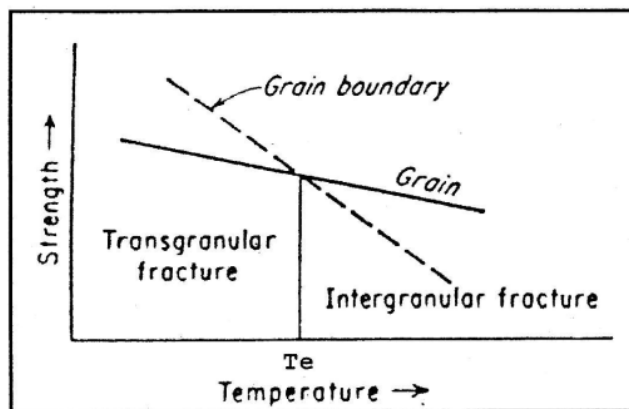
آیا با کاهش پیوسته قطر دانه‌ها، یعنی ریزتر شدن دانه‌ها، افزایش لیزر دانه‌ها، همواره باعث بهبود خواص مکانیکی می‌شود؟ خیر، معادله هال-پتچ برپس مقداری ریزتر  $d$  و خیلی کوچک  $d$  اعتبار ندارد. در رگله زیر اثر اندازه دانه را بر تنش سیلان می‌بینیم.



شکل 6.6 اثر کاهش اندازه دانه بر تنش سیلان و نمایش محدوده مجاز



همانطور که در دلیتم استحکام وابسته به دماست. ما می توانیم با ریز کردن دانه ها استحکام قطعه را افزایش دهیم، اما نکته بسیار مهم این است که درجه دما. اگر دما پایین باشد استحکام ریز دانه ها بیشتر از استحکام مناطق درون دانه ها می باشد و هر چه دانه ریزتر باشد به علت افزایش تعداد ریز دانه ها استحکام و مقاومت به تغییر شکل بیشتر می شود. برعکس در دماهای بالا ریز دانه ها ضعیفتر از مناطق درون دانه بوده و دانه بندی ریز باعث کاهش استحکام فلز می شود. در شکل زیر استحکام دانه و ریز دانه نسبت به دما رسم شده است.  $T_e$  دما می است که استحکام دانه و ریز دانه مساوی می شود. البته باید توجه داشت که  $T_e$  به سطح تنش اعمال شده به نمونه، سرعت تغییر شکل و خلوص آلیاژ بستگی دارد.



شکل 6.7 منحنی تغییرات استحکام با دما در مرز دانه ها و درون دانه ها

### معیار اندازه دانه

اندازه دانه متوسط یکی نمونه هیکه کوچک تری و به وسیله تقارن تعداد دانه های داخل یکی سطح معین، یا تعیین تعداد دانه های که طول مشخصی از یکی خط اختیاری را قطع می نمایند بدست می آید. برای بیان اندازه دانه مجموعه از عدد اندازه دانه استاندارد ASTM استفاده می شود که از مقایسه اندازه دانه بدست آمده با جدول استاندارد اندازه دانه استاندارد ASTM تعیین می شود.

همچنین اندازه گیری از روش های اندازه گیری ، اندازه دانه ، رسم خط مستقیم و ششون  
تعداد خط های ششون خطا توسط نرم افزارها است.

$$\bar{L} = \frac{L_T}{PM} \quad (6.2)$$

در رابطه بالا  $\bar{L}$  متوسط طول خط "mean intercept length" ، البته در واقعیت و ششون  
بزرگ فضای  $L_T$  طول تمام خطوط ،  $P$  تعداد برخورد ها با مرز دانه ها.  $M$  بزرگ فضای  
مجموع

برای محاسبه  $M$  به صورت زیر عمل کنیم :

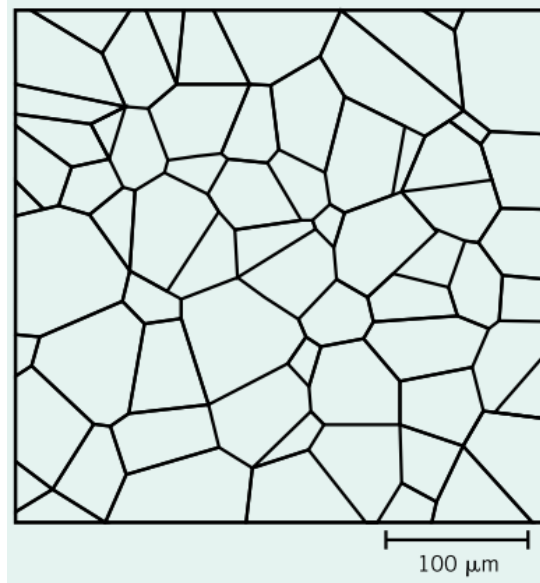
- ① اندازه گیری طول اسکالر بار ، Scale bar با خط کش به حسب میلی متر
- ② تبدیل این طول به میکرون

$$M = \frac{\text{طول اندازه گیری شده اسکالر بار به حسب میکرون}}{\text{عددی که اسکالر بار روی آن نوشته شده به حسب میکرون}}$$

به عنوان مثال ، در شکل زیر طول اسکالر بار  $16 \text{ mm}$  است ، عدد روی اسکالر بار  $100 \mu\text{m}$  می باشد

بزرگ فضای را اینگونه صاب کنیم.

$$M = \frac{16 \text{ mm} \times \frac{1 \text{ mm}}{10^{-3} \text{ mm}}}{100 \mu\text{m}} = 160 \times \Rightarrow 160 \text{ بزرگ فضای}$$



شکل 6.8 نمایش اسکالر بار در تصاویر میکروسکوپی



روش جدید، روش مقایسه اندازه دانه مورد حفظ با جدول استاندارد ASTM می باشد. در این جدول تصاویر عدد اندازه دانه از ۱ تا ۱۰ آورده شده و این تصاویر در بزرگنمایی ۱۰۰x می باشد. با مقایسه عکس متالوگراف خودتان با استاندارد، هر اندازه نزدیک تر بود عدد اندازه دانه و در مجموع مشخص می شود استفاده از عدد اندازه دانه بیشتر در مورد خولدها به کار رود.

از راجله زیری تقویم تعداد دانه ها در اینج مربع در بزرگنمایی ۱۰۰x را بدست می آوریم

$$(6.3) \quad n = 2^{G-1}$$

در راجله فوق  $n$  تعداد دانه ها در اینج مربع در بزرگنمایی ۱۰۰x،  $G$  عدد اندازه دانه می باشد.

حال اگر بزرگنمایی ما ۱۰۰x نباشد،  $n$  تقویم از راجله زیر برای دانه بزرگنمایی ها استفاده کنیم.

$$(6.4) \quad n_m \left( \frac{M}{100} \right)^2 = 2^{G-1}$$

در راجله فوق  $n_m$ ، تعداد دانه ها در اینج مربع در بزرگنمایی  $M$  می باشد.

همچنین  $n$  تقویم عدد اندازه دانه را هم از طریق  $\bar{L}$  بدست می آوریم.

$$(6.5) \quad G = -6.6457 \log \bar{L} - 3.298 \quad (\text{for } \bar{L} \text{ in mm})$$

$$(6.6) \quad G = -6.6353 \log \bar{L} - 12.6 \quad (\text{for } \bar{L} \text{ in in.})$$

**روش هایی برای کاهش اندازه دانه:**

روش های مختلفی برای ریز کردن دانه ها وجود دارد که ما قرار است در اینجا صرفاً اسم آنها را بیان کنیم.

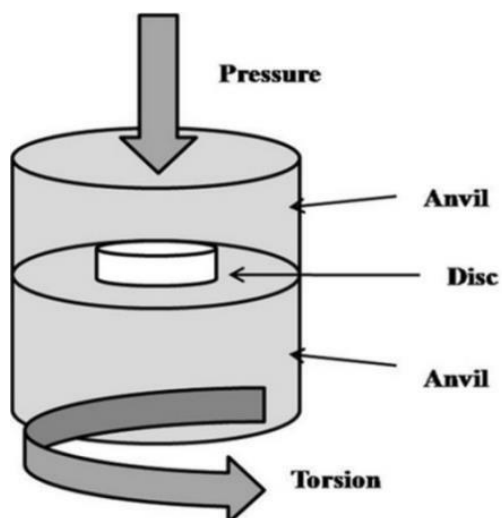
(۱) نخب سردایش (۲) تقویم شکل پلاستیکی و عملیات حرارتی مناسب

تقویم شکل پلاستیکی شدید (SPD) Severe plastic Deformation

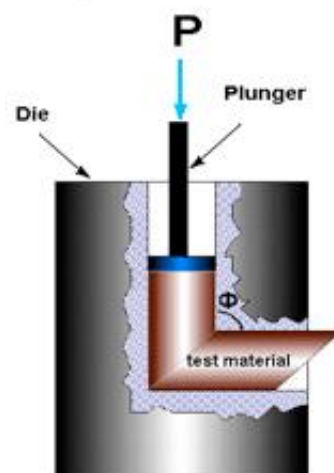
این کار را با تقویم به دوروش (۱) High Pressure Torsion (HPT)

(۲) Equal Channel Angular pressing (ECAP)

تصاویر زیر دو روش را نشان می دهد.

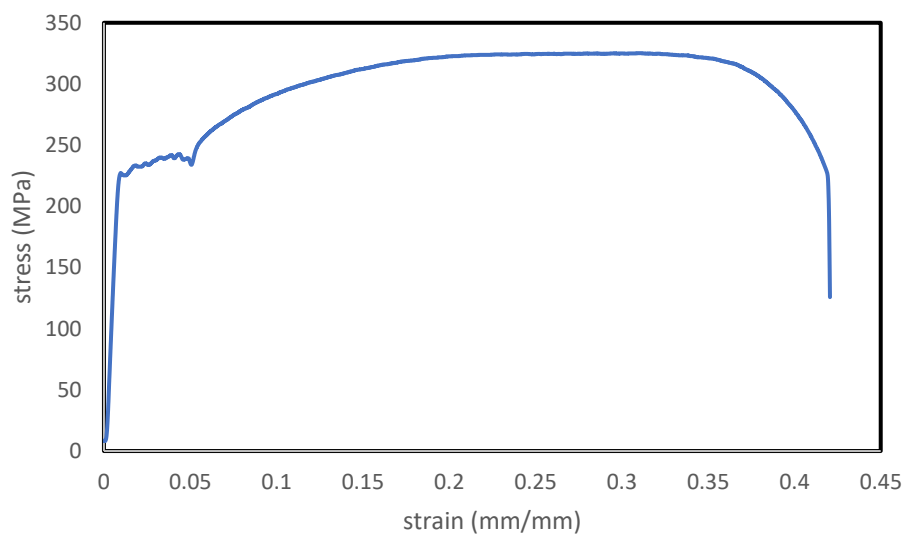


شکل 6.10 روش HPT

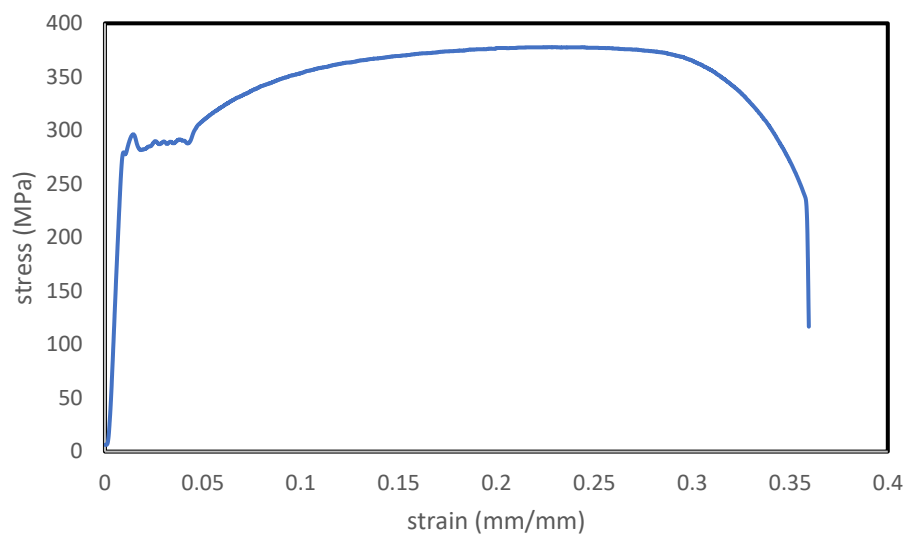


شکل 6.9 روش ECAP

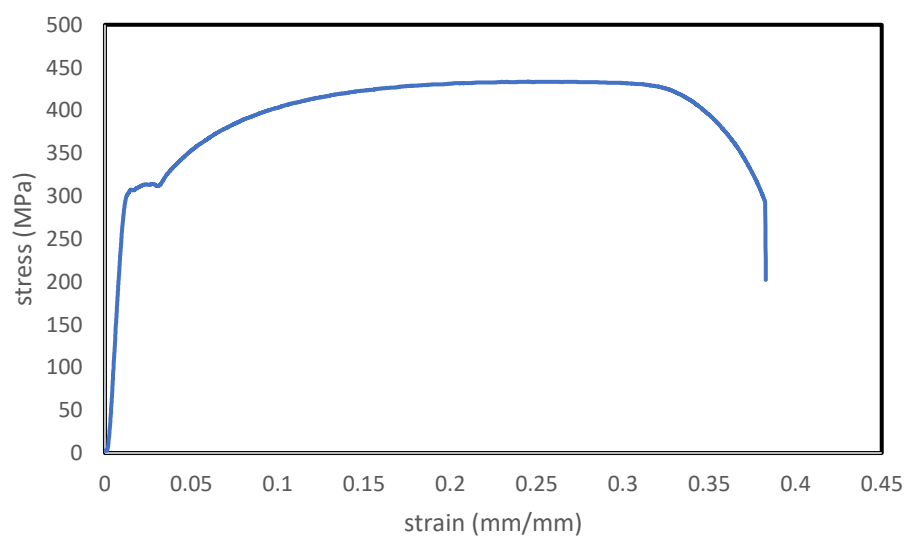
خواسته شماره 1 :



شکل 6.11 منحنی تغییرات تنش بر حسب کرنش مهندسی برای عدد اندازه دانه 6



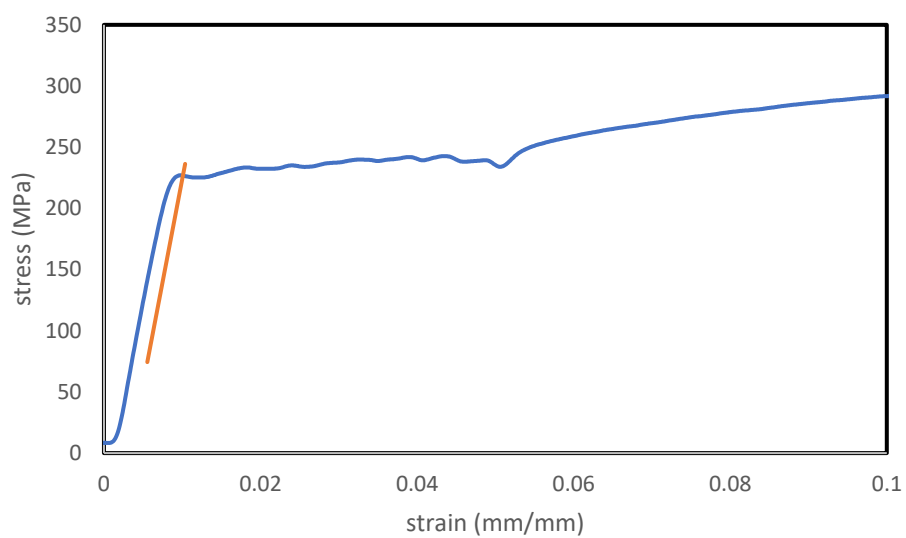
شکل 6.12 منحنی تغییرات تنش بر حسب کرنش مهندسی برای عدد اندازه دانه 7



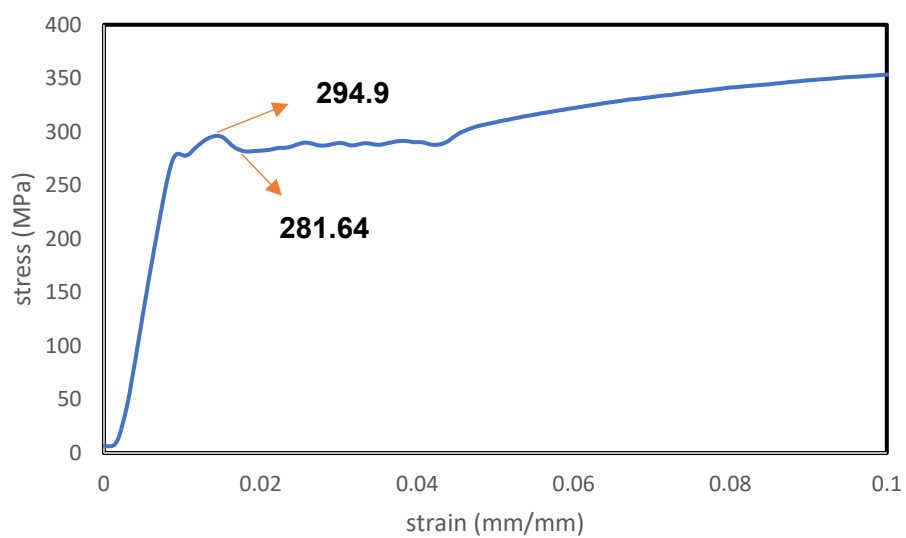
شکل 6.13 منحنی تغییرات تنش بر حسب کرنش مهندسی برای عدد اندازه دانه 8



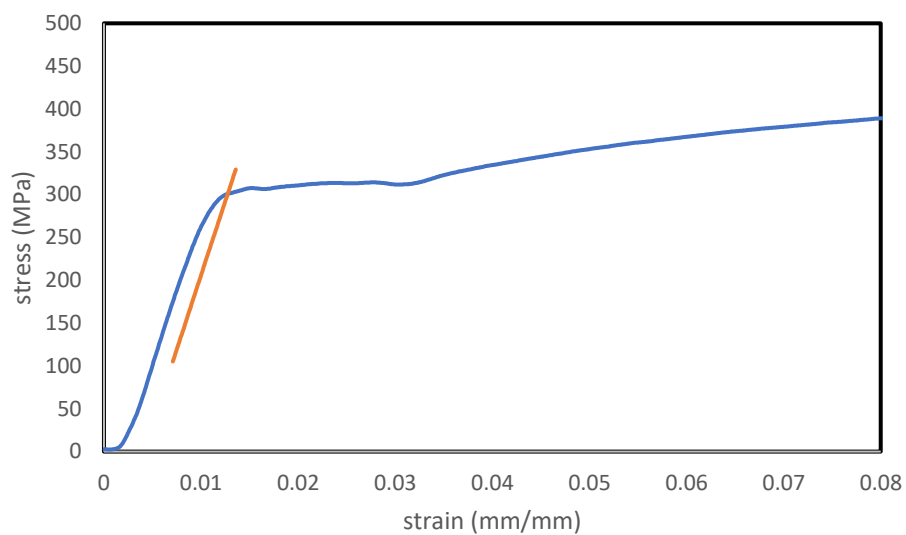
خواسته شماره 2 :



شکل 6.14 تعیین تنش تسلیم در نمونه با عدد اندازه دانه 6



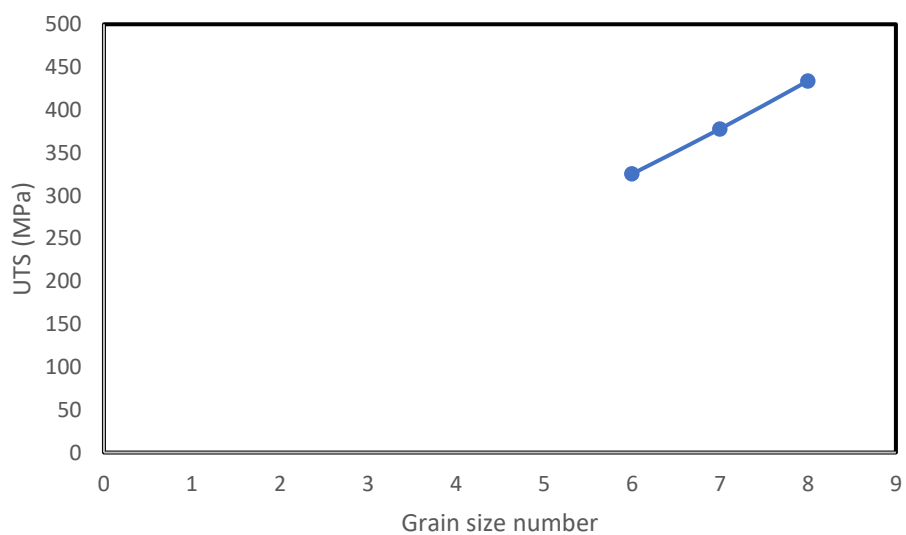
شکل 6.15 تعیین تنش تسلیم در نمونه با عدد اندازه دانه 7



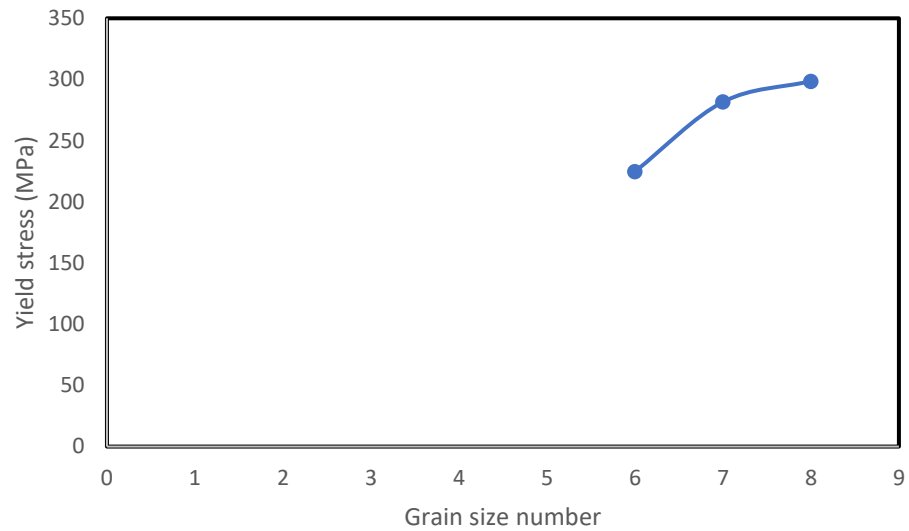
شکل 6.16 تعیین تنش تسلیم در نمونه با عدد اندازه دانه 8

جدول 6.1 تعیین مشخصات مکانیکی مواد

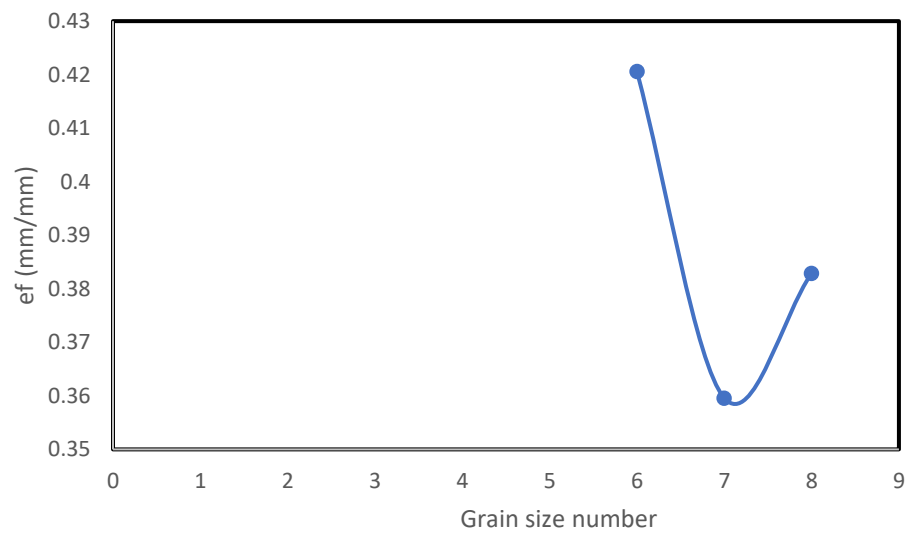
G	UTS (MPa)	Yield stress (MPa)	ef (mm/mm)
6	325.156	224.73	0.4206
7	377.763	281.64	0.3596
8	433.737	298.63	0.3829



شکل 6.17 منحنی تغییرات استحکام کششی بر حسب عدد اندازه دانه



شکل 6.18 منحنی تغییرات تنش تسلیم بر حسب عدد اندازه دانه



شکل 6.19 منحنی تغییرات کرنش در شکست بر حسب عدد اندازه دانه



همانطور که از نمودار  $UTS - G$  می بینیم که با افزایش عدد اندازه دانه میزان تنش  $UTS$  افزایش می یابد. چرا که عدد اندازه دانه بزرگ تر به معنای تعداد دانه های بیشتر در سطح مشخصی از ماده است. با توجه به فرمول هم می توان به این موضوع پی برد  $n = 2^{G-1}$ ، هر چه  $G$  افزایش یابد،  $n$  که تعداد دانه ها در اینج بزرگ در بزرگ فضای  $100\%$  است بیشتر شود، زیاد شدن تعداد دانه ها یعنی زیاد شدن میزان دانه ها و وقتی که میزان دانه ها زیاد شود یعنی موافق موجود به همراه حرکت نابجایی ها هم زیاد شده و در نتیجه حرکت نابجایی ها کند و یا متوقف شود و این یعنی بهر اندازه حرکت نابجایی ها نیاز به انرژی بیشتر و این انرژی بیشتر از تنش برشی بزرگ تر حاصل شود پس استحکام کمتری هم افزایش می یابد.

در مورد تنش تسلیم هم می توان همان توضیح بالا را مطرح نمود.

در مورد کرنش در حاکت، ابتدا با افزایش عدد اندازه دانه کاهش و سپس افزایش یافته، همانطور که قبلاً هم گفته شد، بهبود خواص مکانیکی، استحکام و چقرمگی لزوماً به معنای افزایش هر دو پارامتر نیست بلکه با ریز شدن دانه ها و افزایش مساحت دانه ها، استحکام زیاد شده ولی چقرمگی، انعطاف پذیری که در اینجا با کرنش در حاکت مطرح شد، کاهش چقرمگی می کند و همین که این ویژگی با افزایش استحکام کاهش چقرمگی ندارد یعنی بهبود خواص مکانیکی.

خواسته شماره 3 :

$$G=6 \Rightarrow n=2^{G-1} = 2^{6-1} = 32 \rightarrow \text{تعداد دانه‌ها در هر اینچ مربع در بزرگ‌نمایی 100x}$$

$$n_M \left( \frac{M}{100} \right)^2 = 2^{G-1} \Rightarrow n_1 \left( \frac{1}{100} \right)^2 = 32 \Rightarrow n_1 = 32 \times 10^4$$

تعداد دانه‌ها در هر اینچ مربع در بزرگ‌نمایی 1x

$$32 \times 10^4 \times \frac{\pi}{4} D^2 = 25.4 \times 25.4 \text{ mm}^2 \Rightarrow \boxed{D = 0.0507 \text{ mm}}$$

تعداد دانه‌ها در هر اینچ مربع در بزرگ‌نمایی 100x

$$G=7 \Rightarrow n=2^{G-1} = 2^{7-1} = 64 \Rightarrow$$

$$n_M \left( \frac{M}{100} \right)^2 = 2^{G-1} \Rightarrow n_1 \left( \frac{1}{100} \right)^2 = 64 \Rightarrow n_1 = 64 \times 10^4$$

تعداد دانه‌ها در هر اینچ مربع در بزرگ‌نمایی 1x

$$64 \times 10^4 \times \frac{\pi}{4} D^2 = 25.4 \times 25.4 \text{ mm}^2 \Rightarrow \boxed{D = 0.0358 \text{ mm}}$$

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{D}} \Rightarrow \begin{cases} G=6 \Rightarrow \sigma_y = 224.73 \text{ MPa}, D = 0.0507 \text{ mm} \\ G=7 \Rightarrow \sigma_y = 281.64 \text{ MPa}, D = 0.0358 \text{ mm} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} 224.73 \times 10^6 = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{5.07 \times 10^{-4}}} \\ 281.64 \times 10^6 = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{3.58 \times 10^{-4}}} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sigma_0 = 581.1 \text{ MPa} \\ k = -1.583 \times 10^{10} \end{cases}$$

خواسته شماره 4 :

$$D = 20 \times 10^{-3} \text{ mm} \times \frac{1 \text{ in}}{25.4 \text{ mm}} = 0.787 \times 10^{-3} \text{ in}$$

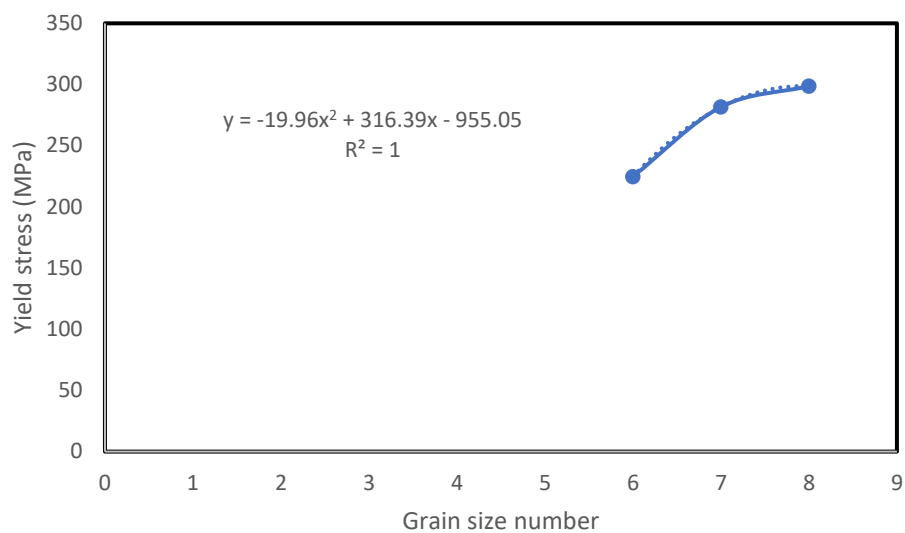
$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \times n \Rightarrow 1 = \frac{\pi}{4} (0.787 \times 10^{-3} \text{ m})^2 \times n \Rightarrow n = 2055704$$

$$n_M \left( \frac{1}{100} \right)^2 = 2^{G-1} \Rightarrow n_{100} = 2055704 = 2^{G-1} \times 10^4 \Rightarrow \boxed{G = 8.68}$$

با لگاریتم

$$\sigma_y = 287.381 \text{ MPa} \quad G=8.68 \text{ در معادله یونانی شده و تعویض به تنش تسلیم}$$

برسم



شکل 6.20 برونمایی برای تعیین تنش تسلیم از روی عدد اندازه دانه

مراجع :

کتاب کلیستر

کتاب دیتر

جزوه آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد