



دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی و علم مواد

آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد

آزمایش شماره 9 :

خزش

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 :

1401/03/2

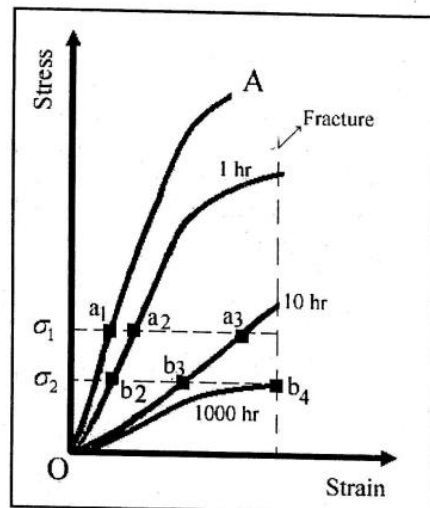
عنوان: آرمایش خزش

استحکام فلزات با افزایش دما کاهش پیدا می کند. وقتی که دما افزایش پیدا می کند، حرکت اتم ها هم به طور قابل توجهی افزایش می یابد. فرایندهای گسترش کننده نفوذ می تواند اثر محسوس به خواص مکانیکی دمای بالا داشته باشد. همچنین دمای بالا باعث حرکت بیشتر نابجایی ها با مکانیزم صعود می شود. غلظت تعادلی جاهای خالی هم به طور مشابه با افزایش دما، افزایش می یابد، همچنین مکانیزم های تغییر شکل جدید هم در دمای بالا می تواند نقش بازی کند، در برخی از فلزات سیستم های لغزش تغییر می کند و یا با افزایش دما سیستم های لغزش جدیدی به وجود می آید. همچنین تغییر شکل در برزده ها هم می تواند عامل دیگری در تغییر فرم دمای بالا فلزات باشد. هدف مورد هم بررسی که باید در نظر بگیریم واکنش فلز با محیط آن در دمای بالا می باشد. آرایش و برزده نفوذ آلیوها به داخل برزده ها را باید تا جای ممکن جلوی آنها را بگیریم.

در دماهای پایین خواص مکانیکی بیشتر فلزات مستقل از زمان می باشد اما در دماهای بالا استحکام به سرعت تغییر طول نسبی و زمان بستگی دارد. فلزی که در دمای بالا تحت نیروی ثابت کششی (تأثیر ثابت) قرار می گیرد، در آن پدیده خزش اتفاق می افتد.

خزش، تغییر شکل تدریجی مواد نسبت به زمان تحت تنش یا بار ثابت را می گویند. ممکن است دمای برای یک ماده، دمای بالا محسوب نشود، در حالی که برای یک ماده دیگر دمای بالا محسوب نشود.

در شکل زیر می توان اثر تنش و زمان بر ازدیاد طول نسبی



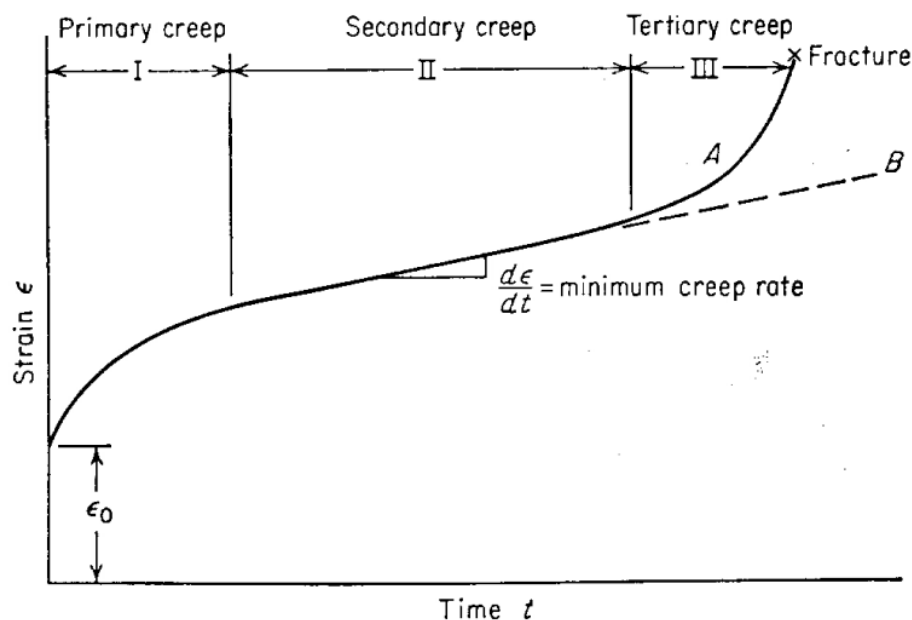
شکل 9.1 اثر تنش و زمان بر ازدیاد طول نسبی

همانطور که در شکل ۹.۲ در بینیم در صحنی ۵۸ آزمایش در دمای پایین متوقف شده و ظرفیت کرنش یا نیروی ثابت باقی مانده است. در این حالت اثری جزئی از خزش پدیدار نمی شود.

در یک کرنش ثابت و دمای ثابت و بینیم که هر چه در زمان در معرض قرار گرفتن ماده در این شرایط بیشتر طولانی تر باشد، کرنش حاصل هم بیشتر شود. پس در زمان های طولانی ما شاهد کرنش های بیشتر هستیم همچنین اگر کرنش را کاهش دهیم میزان کرنش ماده در یک کرنش ثابت و دمای ثابت کمتر از حالت کرنش بزرگ تر می باشد. و همانطور که می بینیم در کرنش کمتر در زمان های متناظر شاهد کرنش کمتر در این ماده هستیم.

حال قصد داریم به معرفی بخش های مختلف نمودار $\epsilon - t$ بپردازیم.

در شکل زیر همانطور که مشاهده می کنیم شاهد یک کرنش اولیه ناشی از کرنش قرار گرفتن ماده می باشیم که آنرا با ϵ_0 روی شکل نشان داده ایم. نمودار کرنش بر حسب زمان فاغ از کرنش اولیه، شامل سه بخش می باشد.



شکل ۹.۲ منحنی کرنش - زمان

بخش اول و یا مرحله اول را خزش اولیه و یا گذران نامند. سرعت خزش مرتب کاهش یافته و مقاومت خزش حواد به علت کار سختی ایجاد شده افزایش می یابد.

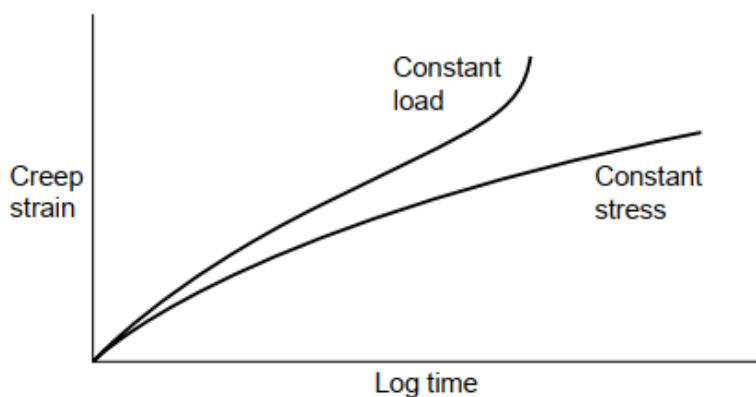
مرحله دوم که آنرا خزش ثانویه و یا حالت پایدار می نامند. این بخش مهم ترین مرحله خزش در عملیات صنعتی می باشد. در این مرحله مواد دارای سرعت خزش ثابتی هستند یعنی نرخ کرنش نسبت به زمان ثابت است. این مرحله ممکن است سالها طول بکشد. این مرحله که در مواردی خزش بازیابی نیز نامیده می شود وقتی رخ دهد که سرعت بازیابی به اندازه کافی زیاد و سرعت کار سختی (سخت شدن) برابر تغییر طول نسبی به اندازه کافی کم باشد، به طوریکه این دو به یک حالت توازن برسند، لذا در این مرحله داریم:

$$\left. \begin{aligned} d\sigma &= \frac{\partial \sigma}{\partial t} dt + \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} d\epsilon \\ \sigma &= cte \Rightarrow d\sigma = 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = - \frac{\frac{\partial \sigma}{\partial t}}{\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}} = - \frac{r}{h} \quad (9.1)$$

در رابطه فوق r آهنگ بازیابی و h آهنگ کار سختی می باشد.

مرحله سوم را به عنوان خزش سومین (Tertiary creep) می نامند. سرعت خزش افزایش یافته و بالاخره منجر به شکست نمونه خواهد شد. اگر در حین آزمایش تنش ثابت باشد، افزایش سرعت خزش در منطقه سوم شدید نبوده و طبق منحنی B [تغیله چمن] خواهد بود. مرحله سوم اغلب با رشد ترکهای میکروکلویی در ماده همراه است. اگرچه معمولاً منحنی های خزش در سه مرحله مشاهده شده است ولی گاهی صورتهای دیگری از تغییرات کرنش به زمان دیده می شود. بعضی مواقع سرعت خزش از آغاز آزمایش، خصوصاً وقتی که از تنش یا دمای بالا استفاده شود، پیوسته افزایش می یابد و گاهی سرعت خزش به طور مرتب کاهش یافته و در مرحله سوم بدون اینکه مرحله دوم را طی کند به شکست منجر می شود. این موارد اغلب مربوط به ناپایداری در ساختار مواد می باشد که در حین آزمایش، ماده سخت و یا نرم شده و در نتیجه باعث از بین رفتن مرحله دوم خزش می شود.

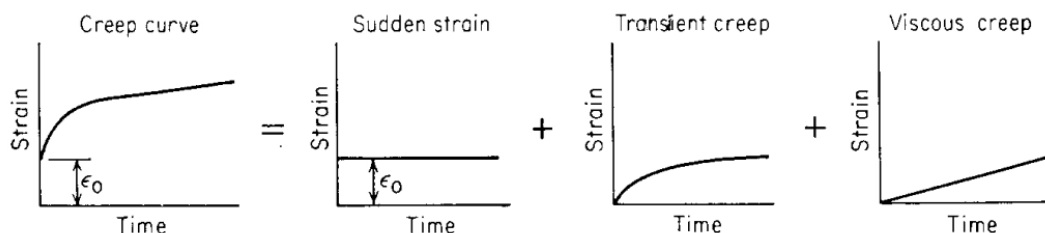
کنش ثابت و یا بار ثابت ؟
 به عنوان یک قاعده کلی ، اطلاعاتی که برای اهداف مهندسی مد نظر است از تست با بار ثابت استفاده
 می کنند ، در صورتی که برای مطالعات بنیادی شامل نوشتن روابط ریاضی برای تئوری خزش از کنش ثابت
 استفاده می کنند



شکل 9.3 منحنی کرنش خزش بر حسب زمان

کارهای پیچیده آندرا (Andrade) بر روی خزش ، تاثیر قابل توجهی بر فهم کردن به این موضوع گذاشته
 است.
 ایمان برای منحنی خزش تست کنش ثابت از قاعده جمع زدن دو فرایند خزشی از هم جدا کردن
 آنی ناشی از اعمال بار در نظر گرفته شد. جزء اول منحنی خزش یک خزش گذرا با نرخ کرنش گاهشی با زمان
 می باشد و جزء دوم مربوط به جزء خزش ویسکوز با نرخ ثابت می باشد. در شکل زیر این تئوری
 به وضوح نشان داده شده است. همچنین آندرا برای این منحنی خزش یک معادله تجربی هم ارائه
 داد.

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 + \beta t^{1/3}) e^{kt} \quad (9.2)$$



شکل 9.4 آنالیز آندرا و تعیین منحنی کرنش - زمان

در رابطه حقوق ϵ کرنش در زمان t ، k ثابت هست. کرنش کذا با k افزایش داده می شود.
معادله (9.2) به شکل وقتی که $k=0$ است برآورد.

ثابت k بیانگر از یاد طول به واحد طول در نرخ ثابت. همچنین یک معادله ای که به تراز معادله
آنرا با نمودار همخوانی دارد، اگرچه بر روی تعداد محدودی از مواد امتحان شده، توسط کاروفالو (Garofalo)
صورت شده.

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_f (1 - e^{-rt}) + \epsilon_s t \quad (9.3)$$

که در رابطه حقوق ϵ_0 همان کرنش آبی ناشی از اعمال بار است
 ϵ_f حد برای کرنش کذا - r نسبت کرنش کذا به کرنش کرنش کذا - ϵ_s نرخ کرنش
حالت پایدار.

در ادامه به عوامل مهم بر کرنش می پردازیم.

(1) اثر دما بر کرنش:

اصولاً کرنش در مواد مهندسی پدیده ای است که به دماهای بالا مربوط می شود ولی ~~همیشه~~ همواره قبل تر
اشاره کردیم دمای بالا عبارت رسائی نیست زیرا دمای که برای یک آلیاژ زیاد محسوب می شود

معین است برای آلیاژ دیکه کم باشد. دمای که در آن کرنش اهمیت دارد، به نقطه ذوب آلیاژ بستگی
دارد. در دماهای پایین هم تغییر شکل ناشی از کرنش انجام می گیرد اما در بیشتر موارد در دماهای بین صفر مطلق
و $0.4 T_m$ تغییر شکل ناشی از کرنش کمتر اهمیت دارد (T_m دمای مطلق ذوب است)
یا همان باشد که دماها را بر حسب کلوین بنویسیم. ولی به محض اینکه دما از $0.4 T_m$ فراتر می رود، کرنش باید
بیشتر مورد توجه قرار گیرد. بنابراین در فلزی مانند مس که دارای نقطه ذوب $327^\circ C$ یا $600 K$ است
کرنش در دمای اتاق نیز اهمیت دارد. از طرف دیگر فولاد که دارای نقطه ذوب $1773 K$ یا $1500^\circ C$ است تا $300^\circ C$
پدیده کرنش به صورت جدی مطرح نمی شود. باید در نظر داشت اگرچه نقطه ذوب از
مهمترین عوامل مؤثر بر کرنش و باشد اما فقط یکی از این عوامل و باشد. در دمای که کرنش اهمیت دارد
ساختار بلوری و مثالاً یک نیز نقش مهمی دارند. به عنوان مثال در فولاد های فربشی با ساختار BCC
کرنش در بالای $300^\circ C$ اهمیت دارد حال آنکه در فولاد های زنگ نزن آستنیتی (با ساختار بلوری FCC)
کرنش تا حوالی $600^\circ C$ مشکل ایجاد نخواهد کرد، با وجود اینکه دو فولاد نقاط ذوب مشابهی دارند.

اثر کنش بر خزش:

سرعت خزش بستگی به مقدار کنش دارد و در اکثر موارد سرعت خزش تا نوبه به صورت تابع توانی از کنش تقریباً می‌کند که توسط معادله $\dot{\epsilon} = k \sigma^n$ نشان داده می‌شود. $\dot{\epsilon}$ سرعت خزش، σ کنش، n و k ثابت ماده. بر اساس تحقیقات کوآکسون، برای بسیاری از فلزات و آلیاژها n در حدود 3-5 می‌باشد. با توجه به فرمول فوق اگر کنش در خزش 2 برابر شود سرعت خزش معمولاً 8 تا 32 برابر می‌شود. البته این قانون کلی دارای استثنایایی نیز می‌باشد. به عنوان مثال در نزدیکی نقطه ذوب به علت رفتار فلزات در این دما، سرعت خزش با کنش به صورت خطی تغییر می‌کند یعنی $n=1$ می‌شود. بنابراین کاملاً مشخص است که n بستگی به دما دارد. ضمناً بعضی از مواد دارای توان کنش بسیار بالایی هستند، برای مثال مقداری از n در حدود 20 نیز دیده شده است. در این صورت دیکر رابطه $\dot{\epsilon} = k \sigma^n$ صادق نیست و وابستگی سرعت خزش با کنش به صورت رابطه زیر در می‌آید.

$$\dot{\epsilon} = A \exp(B \sigma) \quad (9.4)$$

با وجود آنکه این فرمول غالباً برای خزش تا نوبه ذکر شده است، ولی در برخی خزش‌های ورنجهایی که بقله می‌رسد باید فرمول فوق صادق باشد. ممکن است هرگز سرعت‌های تا نوبه خزش واقعی

دیده نشده و خزش سومین روی دهد.

حال معادله‌ای که بتوان هم اثر دما و هم اثر کنش را بر نرخ کرنش بیان کند به صورت زیر نوشته می‌شود.

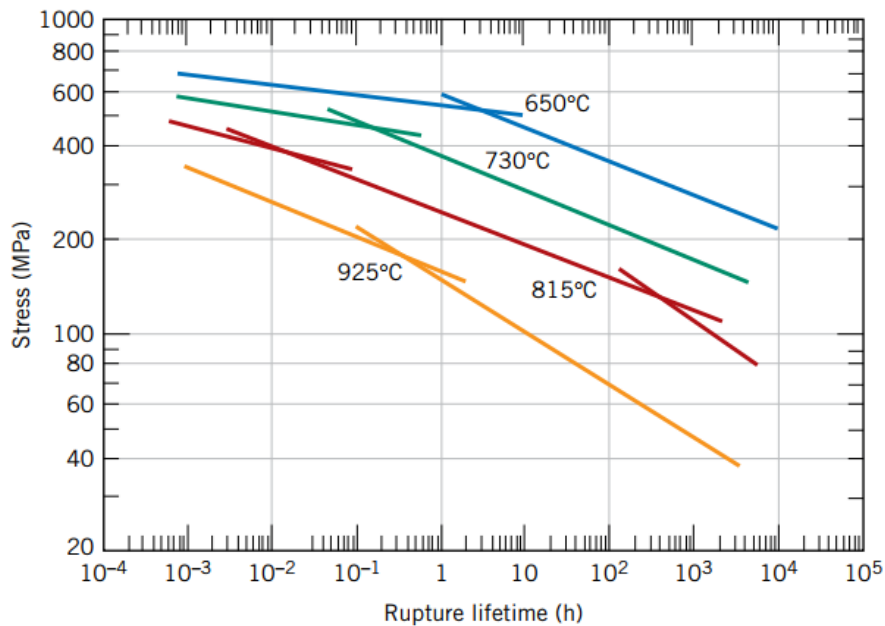
$$\dot{\epsilon}_s = k \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (9.5)$$

در رابطه فوق $\dot{\epsilon}_s$ ، نرخ کرنش مرحله تا نوبه، k ، n ، Q_c مقداری ثابت هستند. Q_c انرژی اکتیواسیون می‌باشد. این فرمول در دمای ثابت به صورت:

$$\ln \dot{\epsilon}_s = n \ln \sigma + C \quad (9.6)$$

و در کنش ثابت به صورت:

$$\frac{d \ln \dot{\epsilon}_s}{d\left(\frac{1}{T}\right)} = -\frac{Q_c}{R} \quad (9.7)$$



شکل 9.5 منحنی تنش - زمان شکست برای آلیاژ S-590
در چهار دمای متفاوت

حال شاید از خود پرسیده باشید رابطه (9.6) از کجا آمده.

یک رابطه‌ای برای $\dot{\epsilon}_s$ به صورت زیر تعریف شود.

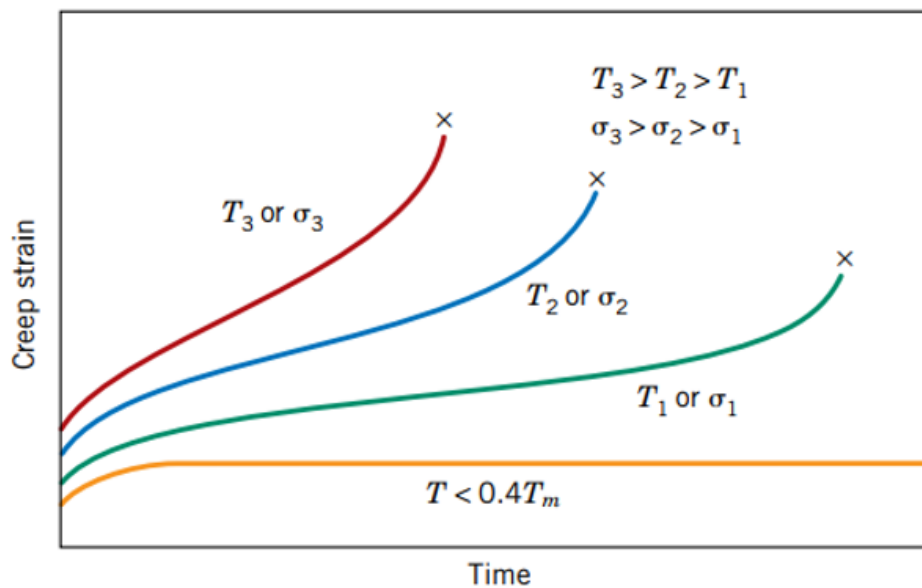
$$\dot{\epsilon}_s = \frac{A D_v G b}{k T} \left(\frac{\sigma}{G} \right)^n \quad (9.8)$$

$$D_v = D_0 \exp \left(\frac{-Q}{k T} \right) \quad (9.9)$$

$$\Rightarrow \dot{\epsilon}_s = k \sigma^n \exp \left(\frac{-Q}{RT} \right)$$

در رابطه (9.8) A و n ثابت‌های هستند که به مواد ما مرتبط و هستند. D_v ضریب نفوذ در خود شبکه یا بالک ماده - G مدول برشی - b بردار بزرگ نابجایی - k ثابت بولتزمن - σ تنش اعمالی.

در شکل زیر اثر تنش و دما بر رفتار خزشی نشان داده شده است.



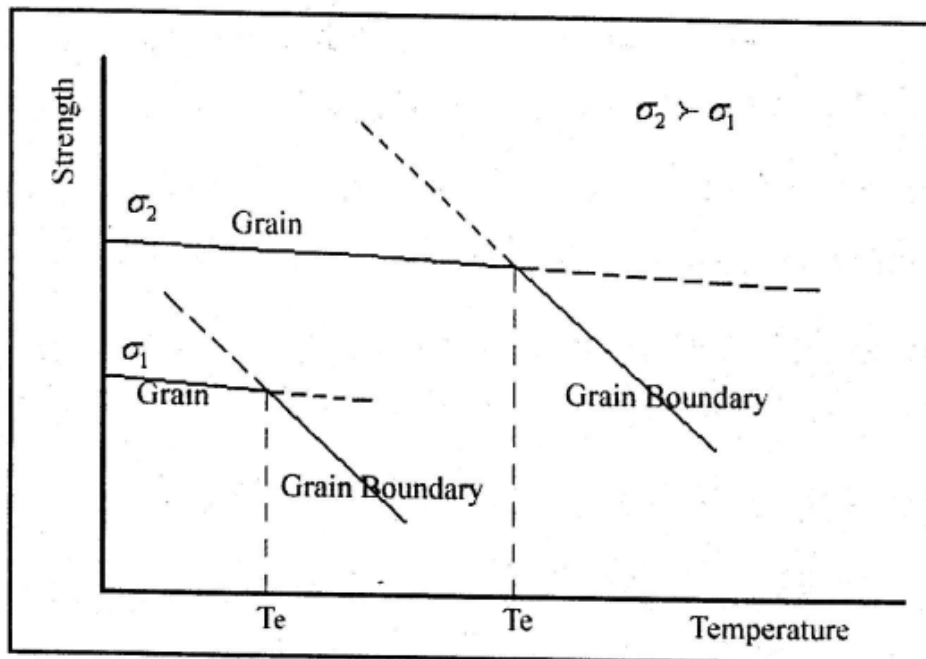
شکل 9.6 منحنی کرنش خزشی - زمان و مشاهده تاثیر دما و تنش های بالا بر این نمودار

نقش نرزدانه ها:

تغییرات استحکام دانه و نرزدانه نسبت به دما در شکل زیر دیده می شود. در اثر افزایش دما استحکام نرزدانه بیشتر از استحکام دانه کاهش می یابد و این دو منحنی در T_e (دمايي که استحکام دانه و نرزدانه با هم برابر است) همدیگر را قطع می کنند.

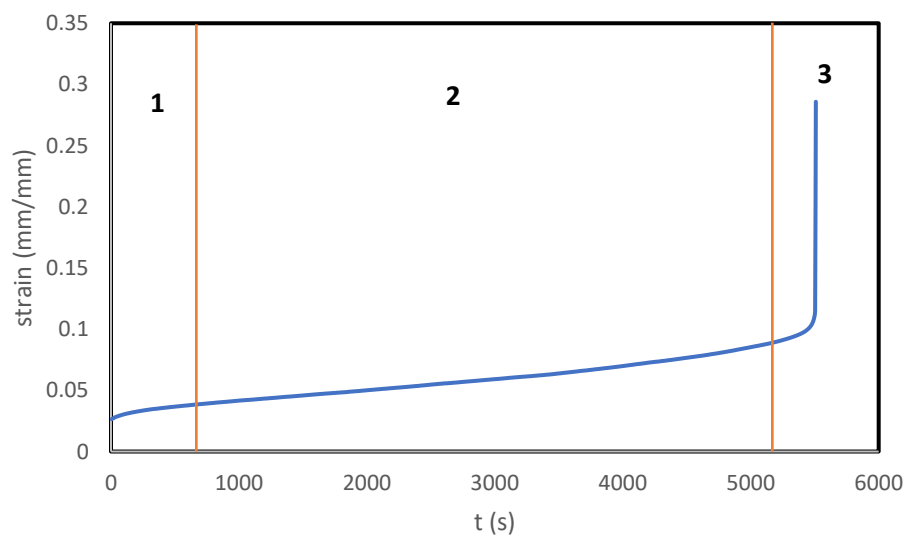
T_e با افزایش تنش اعمالی، سرعت اعمال کرنش و خلوص ماده تغییر می کند. هرچه تنش بالاتر باشد T_e نیز بالاتر است.

به آسانی میتوان دید که در دماهای پایینتر از T_e ، استحکام نرزدانه ها بیشتر بوده و هرچه نرزدانه ها بیشتر یعنی دانه ها کوچکتر باشند، استحکام و مقاومت در مقابل تغییر شکل نیز به طور چشمگیری زیادتر است و در دماهای بالا عکس این مطلب صادق است. یعنی نرزدانه منبع ضعف است و دانه بند نیز باعث کاهش استحکام خزش می شود. به خصوص وقتی که سرعت آزمایش کم باشد.

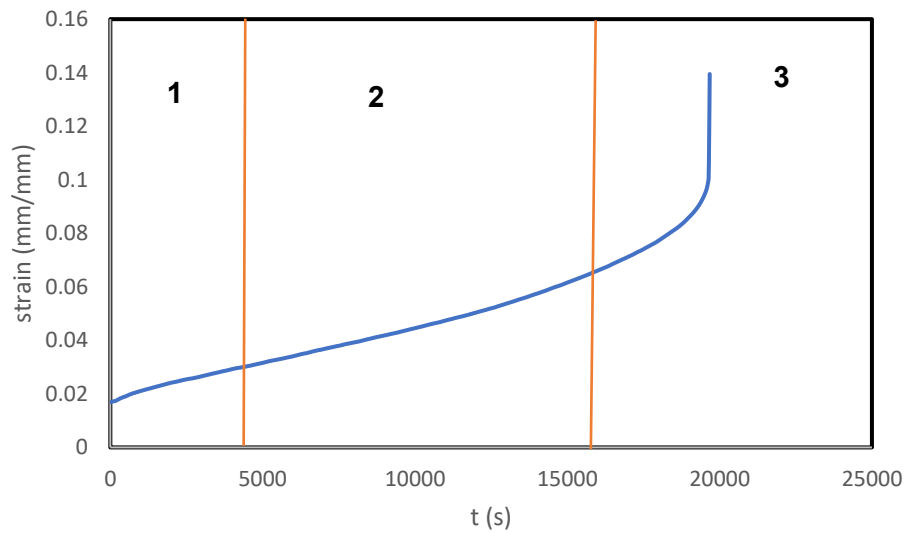


شکل 9.7 تغییرات استحکام دانه و مرزدانه نسبت به دما

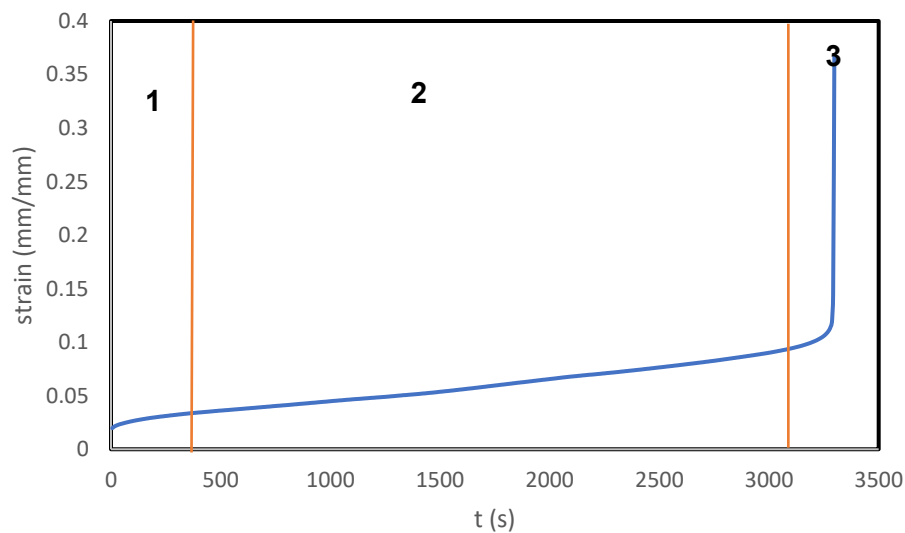
خواسته شماره 1 :



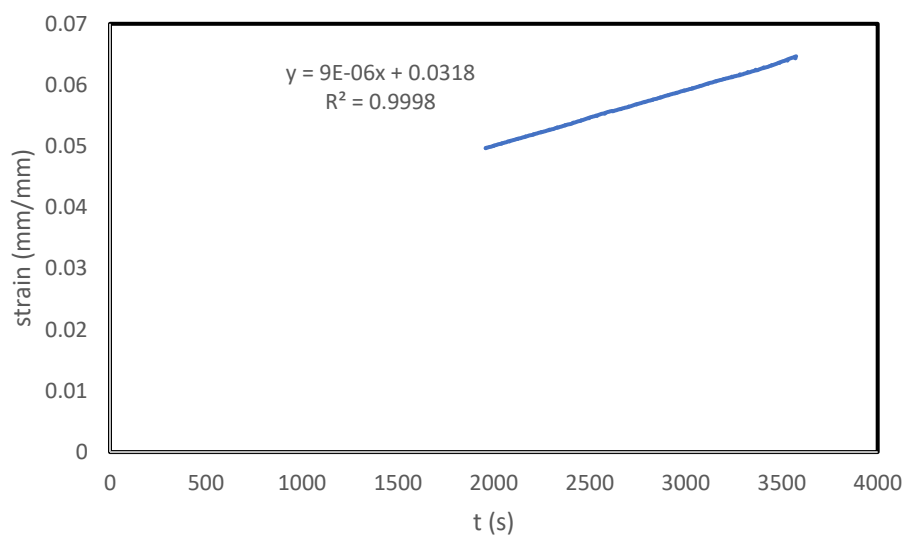
شکل 9.8 منحنی کرنش - زمان نمونه در دمای 240 درجه سانتی گراد و تنش 60 مگا پاسکال
ناحیه 1 مربوط به خزش اولیه ، ناحیه 2 مربوط به خزش ثانویه ، ناحیه 3 مربوط به خزش سومین



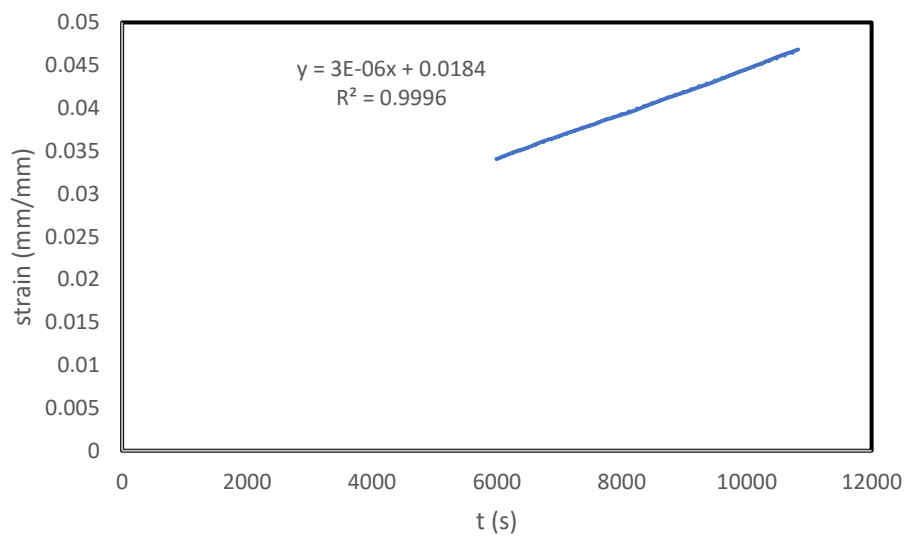
شکل 9.9 منحنی کرنش - زمان نمونه در دمای 240 درجه سانتی گراد و تنش 70 مگا پاسکال
ناحیه 1 مربوط به خزش اولیه ، ناحیه 2 مربوط به خزش ثانویه ، ناحیه 3 مربوط به خزش سومین



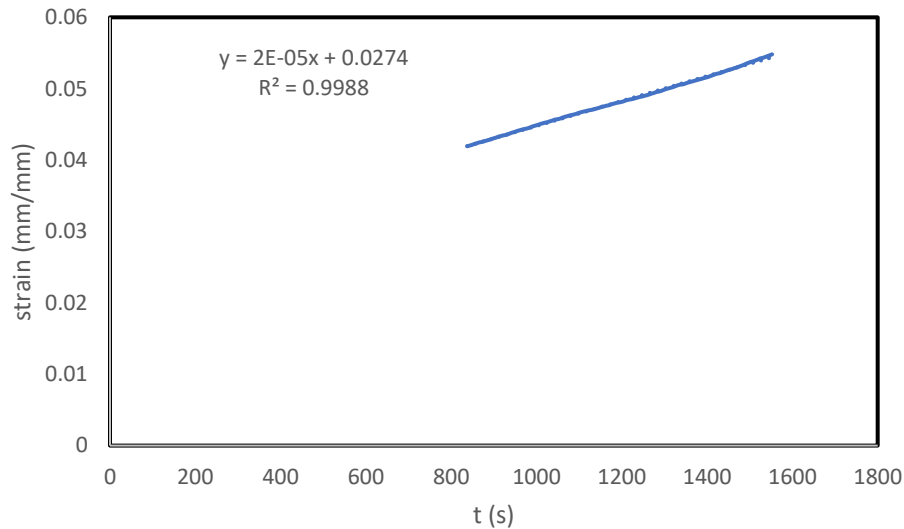
شکل 9.10 منحنی کرنش - زمان نمونه در دمای 260 درجه سانتی گراد و تنش 60 مگا پاسکال
ناحیه 1 مربوط به خزش اولیه ، ناحیه 2 مربوط به خزش ثانویه ، ناحیه 3 مربوط به خزش سومین



شکل 9.11 تعیین سرعت خزش پایدار برای نمونه 240 درجه سانتی گراد و تنش 60 مگا پاسکال



شکل 9.12 تعیین سرعت خزش پایدار برای نمونه 240 درجه سانتی گراد و تنش 70 مگا پاسکال



شکل 9.13 تعیین سرعت خزش پایدار برای نمونه 260 درجه سانتی گراد و تنش 60 مگا پاسکال

جدول 9.1 تعیین سرعت خزش پایدار نمونه ها

نمونه	240 سانتی گراد و تنش 60 مگا پاسکال	240 سانتی گراد و تنش 70 مگا پاسکال	260 سانتی گراد و تنش 60 مگا پاسکال
سرعت خزش پایدار	9×10^{-6}	3×10^{-6}	2×10^{-5}

خواسته شماره 2: برای رسم منحنی $\epsilon - \theta$ باید Q (انرژی آکتیواسیون) را بدست
 بیاوریم. برای اینکار در دو دمای متفاوت این کار را به صورت زیر انجام دادیم.

$\begin{cases} T_1 = 260 + 273 = 533 \text{ K}, \dot{\epsilon}_1 = 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \\ T_2 = 240 + 273 = 513 \text{ K}, \dot{\epsilon}_2 = 9 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \end{cases}$

$$Q = \frac{R \ln(\dot{\epsilon}_1 / \dot{\epsilon}_2)}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)}$$

$$\Rightarrow \dot{\epsilon}_1 = 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 7.2 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$$

$$\dot{\epsilon}_2 = 9 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 3.24 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$$

$$Q = \frac{8.314 \times \ln\left(\frac{7.2 \times 10^{-2}}{3.24 \times 10^{-2}}\right)}{\frac{1}{513} - \frac{1}{533}} = \boxed{90761.9 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}$$

البته اگر $\dot{\epsilon}_1$ و $\dot{\epsilon}_2$ را به ساعت تبدیل نمی کردیم و همان ثانیه می بود باز به همین جواب می رسیدیم.

حال برای رسم نمودار $\epsilon - \theta$ داریم:

$$\theta = t \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

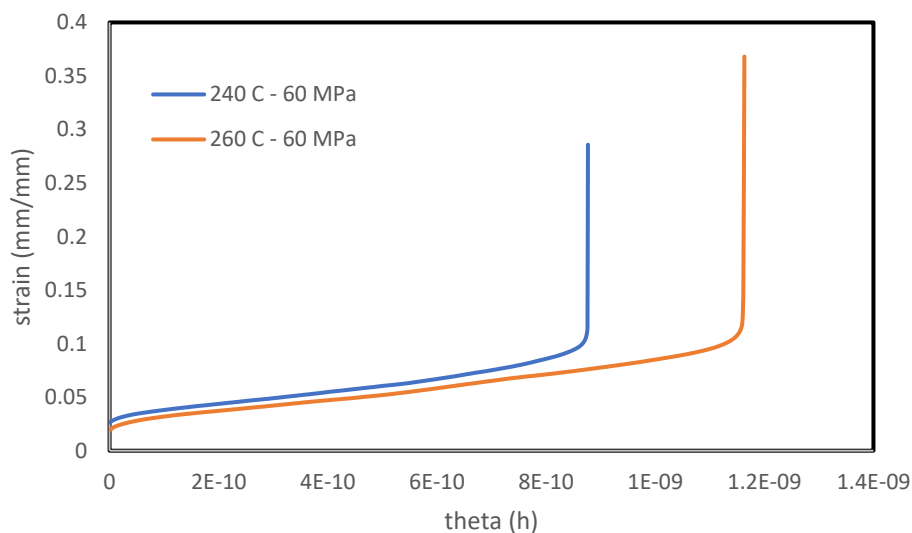
$$\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) = \exp\left(-\frac{90761.9}{8.314 \times (240+273)}\right) = \underline{\underline{572.95 \times 10^{-12}}}$$

$$\theta = \underline{\underline{572.95 \times 10^{-12} t}}$$

$$\text{for } T = 533 \text{ K} \Rightarrow \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) = \exp\left(-\frac{90761.9}{8.314 \times (260+273)}\right) = 1.27 \times 10^{-9}$$

$$\theta = 1.27 \times 10^{-9} t$$

همانطور که از شکل پیراست این دو منحنی به هم دیگر منطبق نیستند چرا که در دو دماهای متفاوت قرار دارند. انتظار کاملاً همین بود.



شکل 9.14 منحنی کرنش - تتا برای دو نمونه با دماهای متفاوت و تنش ثابت

خواسته شماره 3

$$\theta = t \exp \left| -\frac{Q}{RT} \right|$$

$$\ln \theta = \ln t - \frac{Q}{RT} \Rightarrow \ln \theta = \ln t - \frac{Q}{R} \frac{1}{T}$$

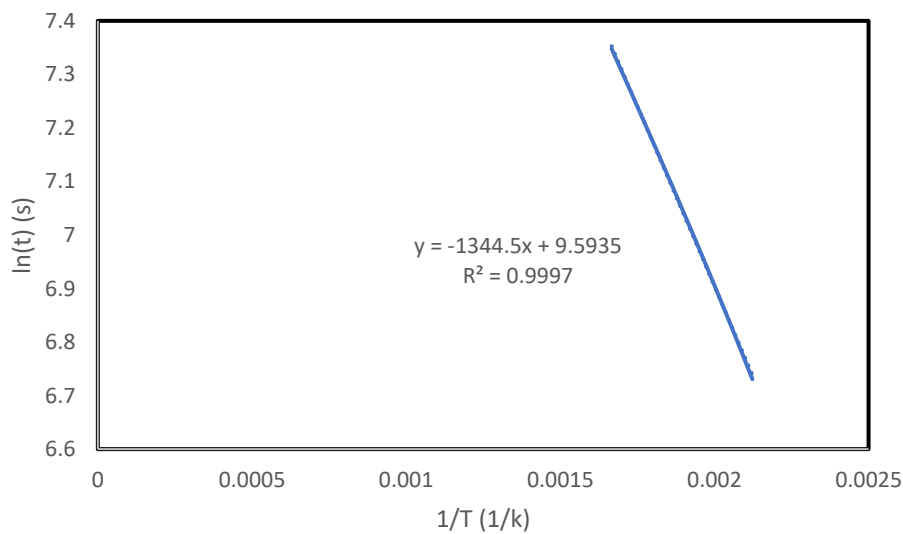
$$\ln t = \ln \theta + \frac{Q}{R} \frac{1}{T}$$

از وقت قبل t و θ را داریم. اگر منحنی $\ln t - \frac{1}{T}$ رسم کنیم، شیب نمودار به ما $\frac{Q}{R}$ را دهد که از آن طریق می‌توانیم ثابت آورد و در فرمول $Q = \frac{R \ln(\frac{\theta_2}{\theta_1})}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}$ از آن استفاده کرد.

سرعت خزش را برای دو دما یک بالاتر از دمای آزمایش دیگری پایین‌تر از آن را بدست آورد.

نکته این بخش را برای نمایش دوم در نظر می‌گیریم. و رسم منحنی $\ln t = \ln \theta + \frac{Q}{R} \frac{1}{T}$ را در زمان‌های طولانی که در منطقه خزش ثانویه هستیم انجام می‌دهیم.

مثلاً دمای آزمایش را 260°C در نظر می‌گیریم و حال قصد داریم بیشتر از 260°C مثلاً 300°C و در 220°C این رخ‌ها را بدست می‌آوریم پس داریم.



شکل 9.15 تعیین انرژی اکتیواسیون از روی نمودار

باتوجه به نمودار دایم:

$$-\frac{Q}{R} = \text{شیب} = -1344.5$$

$$\Rightarrow Q = 10756 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$Q = \frac{R \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_2} \right)}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}$$

$$\begin{cases} T_1 = 260^\circ\text{C} + 273 = 533 \text{ K}, \dot{\epsilon}_1 = 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \\ T_2 = 300 + 273 = 573 \text{ K}, \dot{\epsilon}_2 = ? \end{cases}$$

$$\Rightarrow 10756 = \frac{8.314 \ln \left(\frac{2 \times 10^{-5}}{\dot{\epsilon}_2} \right)}{\frac{1}{573} - \frac{1}{533}} \Rightarrow \boxed{\dot{\epsilon}_2 = 2.37 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}}$$

برای $T = 220^\circ\text{C}$ هم میخوانیم $\dot{\epsilon}_s$ را صاب

$$10756 = \frac{8.314 \ln \left(\frac{2 \times 10^{-5}}{\dot{\epsilon}_2} \right)}{\frac{1}{493} - \frac{1}{533}} \Rightarrow \boxed{\dot{\epsilon}_2 = 1.64 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}}$$

همانطور که میبینیم هر چه دما بالاتر رود $\dot{\epsilon}_s$ هم بیشتر شود و ما دقیقاً همین انتظار داریم.

T	220°C	260°C	300°C
$\dot{\epsilon}_s$	1.64×10^{-5}	2×10^{-5}	2.37×10^{-5}

باتوجه به شکل 9.6 اثر دما بر نمودار و بخش دوم نمودار خزش-زمان به وضوح مشخص است.

مراجع

کتاب دیتر

کتاب کلیستر

جزوه آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد