

# پیش‌بینی تنش سیلان در منطقه تبلور مجدد جزئی در یک فولاد DIN 1.7765

افشین باپری<sup>۱</sup>، عباس نجفی‌زاده<sup>۲</sup> و محمد موذنی<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، دانشکده مکانیک

۲- استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مواد

۳- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

Afshin\_bapari@yahoo.com

## چکیده

در این پژوهش به منظور دستیابی به شکل کامل نمودارهای تنش کرنش فولاد DIN 1.7765 در منطقه تبلور مجدد جزئی، از اصل ثابت بودن نسبت تنش بحرانی شروع تبلور مجدد دینامیکی به تنش حالت پایا در تغییر شکل گرم استفاده شد. ابتدا این نسبت برای فولاد مورد تحقیق تعیین و سپس با استفاده از یک مدل ریاضی، نمودارهای سیلان پیش‌بینی شد. مقایسه نتایج محاسباتی پیش‌بینی شده و نتایج تجربی تنش سیلان بیانگر توافق بسیار مناسب بین آنها است. همچنین تابعیت تنش حالت پایا از شرایط تغییر شکل برای این فولاد مورد بررسی قرار گرفت و معادله ریاضی آن تعیین شد.

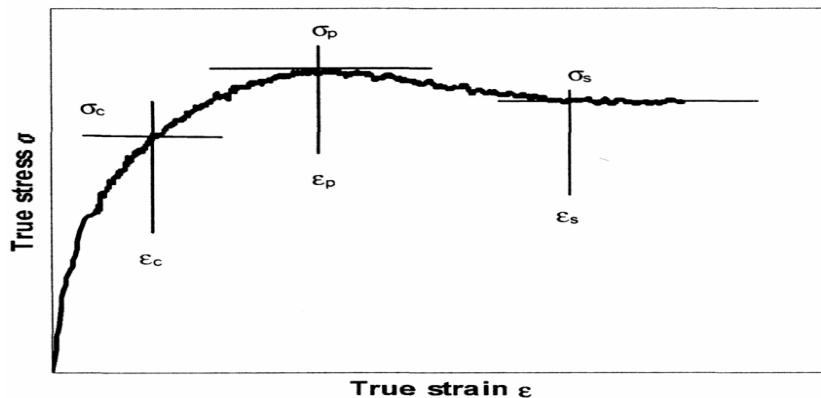
## واژه‌های کلیدی:

تغییر شکل گرم، معادلات مشخصه، فولاد DIN 1.7765، تبلور مجدد، انرژی اکتیواسیون

## ۱- مقدمه

هرگونه تنش و نابجایی در درون فلز ایجاد می‌شود [۱]. شکل (۱) به صورت شماتیک منحنی تنش کرنش حقیقی فلزی را که در حین تغییر شکل گرم دچار تبلور مجدد دینامیکی شده نشان می‌دهد. با توجه به این شکل سه نقطه مهم در نمودار وجود دارد که عبارتند از نقطه بحرانی شروع تبلور دینامیکی  $(\epsilon_c, \sigma_c)$ ، نقطه اوج  $(\epsilon_p, \sigma_p)$  و نقطه حالت پایا  $(\epsilon_s, \sigma_s)$  که از طریق رسم منحنی‌های تغییرات نرخ کار سختی بر حسب کرنش و تنش به‌طور دقیق قابل تعیین می‌باشد [۲].

در حین کار داغ همیشه بازیابی دینامیکی رخ می‌دهد اما در بعضی از مواد، نرم شدن به دلیل انرژی نقص در چیده شدن پایین با سرعت کمی انجام می‌شود. در این حالت فرآیندهایی مانند صعود و لغزش متقاطع به سختی صورت می‌گیرد و به این دلیل کار سختی نمی‌تواند تنها با بازیابی دینامیکی حتی در دماهای بالا به تعادل برسد. در این مواد دانسیته نابجایی‌ها با کرنش اعمال شده دائماً افزایش می‌یابد و بعد از اینکه انرژی داخلی به حد معینی رسید، تبلور مجدد آغاز شده و دانه‌های جدید عاری از



شکل (۱): شماتیک منحنی تنش- کرنش حقیقی در شرایطی که رفتار تبلور مجدد دینامیکی رخ می‌دهد.

$$\sigma = \sigma_s + (\sigma_p - \sigma_s) \times \exp\left[C_1\left(\varepsilon - \frac{\varepsilon_p}{2} - \frac{\varepsilon^2}{2\varepsilon_p}\right)\right] \quad (2)$$

در این معادله می‌توان از شرایط مرزی در نقطه بحرانی شروع تبلور مجدد دینامیکی استفاده نمود.

$$\varepsilon = \varepsilon_c \Rightarrow \sigma = \sigma_c \quad (3)$$

این روش توسط محققین برای پیشگویی تنش سیلان در یک فولاد IF ارایه شده و نتایج آن موفقیت آمیز بوده است [۵]. به منظور تعیین درجه دقت پیشگویی تنش سیلان در یک شرایط خاص از تغییر شکل، می‌توان از جذر متوسط مجموع مربع انحرافات (RMSSD) استفاده نمود. این رابطه به صورت زیر بیان

$$RMSSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{pred} - \sigma_{meas})^2}{n}} \quad (4) \quad \text{می‌شود [۶] (۴)}$$

در این رابطه  $\sigma_{pred}$  تنش پیش بینی شده،  $\sigma_{meas}$  تنش اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد نقاط مورد استفاده می‌باشد. اگر مقدار RMSSD حداکثر تا حدود ۵٪ تنش سیلان متوسط ( $\sigma_{mfs}$ ) باشد در این صورت می‌توان گفت پیشگویی با دقت مناسبی انجام شده است. تنش سیلان متوسط نیز به صورت زیر

$$\sigma_{mfs} = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon \quad (5) \quad \text{محاسبه می‌شود [۶] (۵)}$$

نسبت‌های کرنش و تنش هر یک از این نقاط برای یک فلز در تغییر شکل گرم معمولاً مقداری ثابت است [۳].

محدودیت آزمایش فشار در اعمال کرنش سبب می‌شود که در بعضی از شرایط تغییر شکل، منطقه تبلور مجدد جزئی (فاصله کرنش بحرانی شروع تبلور مجدد تا کرنش پایا) از کرنش قابل اعمال در این تجاوز آزمایش کند. با توجه به شکل کلاسیک منحنی‌های تنش کرنش در حین رخداد فرآیند تبلور دینامیکی و براساس تئوری معادلات مشخصه (Constitutive Equations) در حین تغییر شکل گرم، می‌توان معادلاتی را ارایه نمود که توانایی پیشگویی تنش را در هر میزان کرنش داشته باشد [۴]. با توجه به اینکه در هنگام رخداد فرآیندهای بازایی و تبلور مجدد دینامیکی به صورت همزمان مشتق منحنی تنش کرنش حقیقی (نرخ کارسختی) قبل و بعد از نقطه اوج به ترتیب مثبت و منفی می‌شود، بنابراین می‌توان

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = C_1(\sigma - \sigma_s) \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p}\right), \quad \varepsilon \geq \varepsilon_c \quad (5) \quad \text{نوشته [۵] (۱)}$$

در این رابطه  $\sigma$  تنش سیلان،  $\varepsilon$  میزان کرنش،  $\varepsilon_p$  کرنش نقطه اوج،  $\sigma_s$  تنش حالت پایا و  $C_1$  نیز ثابت معادله می‌باشد. این رابطه بعد از کرنش بحرانی شروع تبلور مجدد دینامیکی،  $\varepsilon_c$  صادق است. با انتگرال‌گیری از (۱) و اعمال شرایط مرزی  $\varepsilon = \varepsilon_p \Rightarrow \sigma = \sigma_p$  خواهیم داشت برای تعیین ثابت  $C_1$

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد DIN 1.7765.

Element	C	Cr	Mo	V	Si	Mn	P	S
Wt%	0.30- 0.35	2.80- 3.20	0.80- 1.20	0.25- 0.35	<0.35	<0.60	<0.025	<0.010

## ۲- روش تحقیق

فولاد DIN.1.7765، یک فولاد فوق مستحکم و کم آلیاژ CrMoV است به طوری که در دمای محیط استحکام کششی آن به بیش از ۱۸۰۰ MPa نیز می‌رسد. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول (۱) آورده شده است.

کاربرد عمده این فولاد در صنعت اتومبیل و خصوصاً در ساخت قطعاتی می باشد که در آنها نیاز به استحکام و تافنس بالا به موازات یکدیگر است.

از این فولاد می توان در ساخت پیچ و مهره، چرخ دنده، میل لنگ، قطعات با تلسورانس خیلی دقیق و قطعات هرز گرد استفاده نمود. این فولاد گرمکار بوده و فرآیندهای شکل دهی متداول آن نیز نورد داغ و فورج داغ شعاعی است [۷].

به منظور انجام آزمایشات فشار داغ، نمونه‌هایی استوانه‌ای شکل با ارتفاع ۷/۵ mm و قطر ۵ mm مطابق با استاندارد SEP 1681، از محصول آهنگری شده این فولاد که دارای قطر ۸۰ mm بود تهیه و برای کاهش اثر اصطکاک در حین آزمایش فشار، در دو انتهای نمونه‌ها از طراحی رسته گیو (Rastegaeve) استفاده شده است [۸]. آزمایشات فشار داغ نیز با استفاده از دستگاه دیلاتومتر BÄHR Thermoanalyse GmbH انجام شد. در ابتدا به منظور همگن سازی، نمونه‌ها به مدت زمان ۱۵ دقیقه در دمای ۱۲۰۰ °C قرار گرفتند.

سپس در محدوده دماهای ۱۰۰۰ تا ۱۲۲۵ °C، سرعت‌های کرنش ۰/۱ تا ۵ S<sup>-1</sup> و میزان کرنش ۰/۹ تحت تغییر شکل قرار گرفتند.

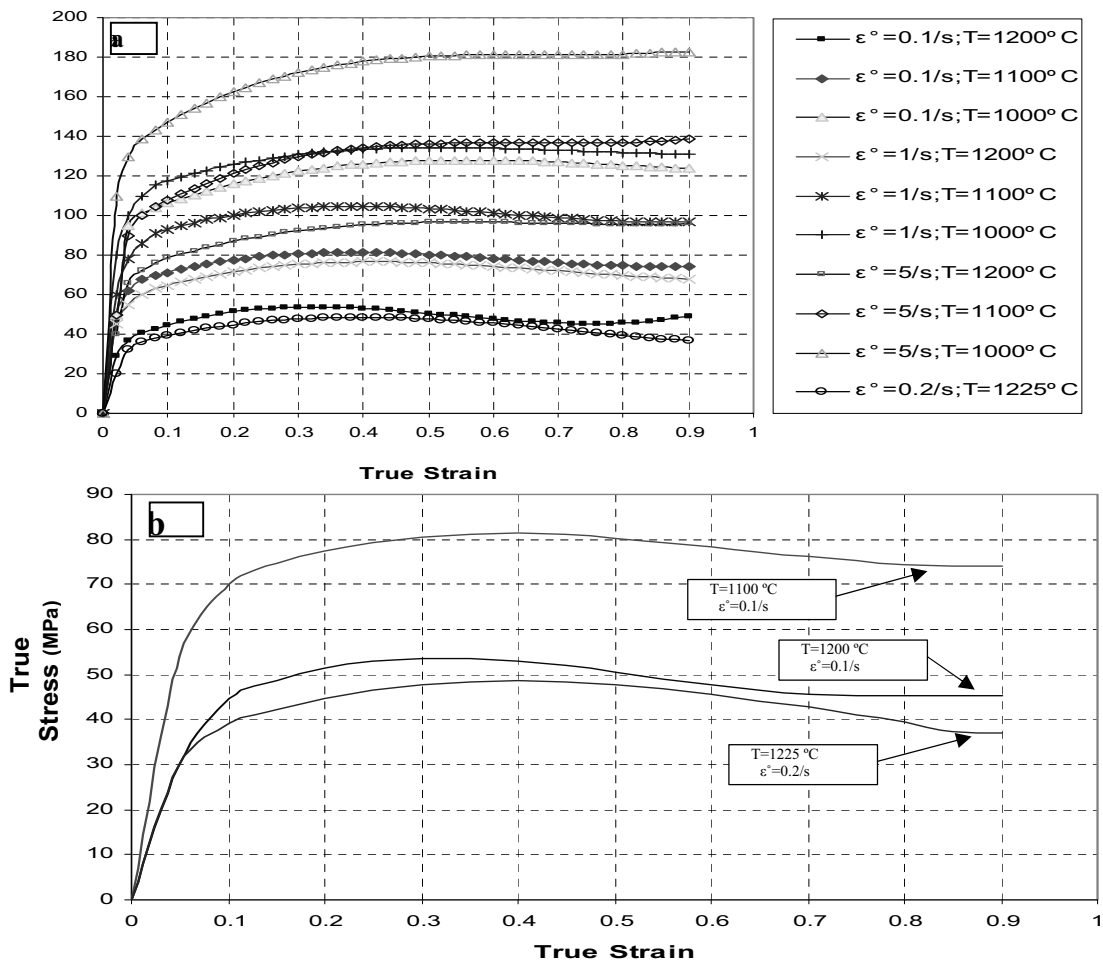
## ۳- نتایج و بحث

نمودارهای تنش- کرنش فولاد مورد تحقیق در شرایط تغییر شکل به کار برده شده، در شکل (۲) -a آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تنها در تعداد محدودی از شرایط تغییر شکل تنش به حالت پایا می‌رسد (تغییر فرم در دماهای ۱۲۰۰ °C و ۱۱۰۰ در سرعت کرنش ۰/۱ S<sup>-1</sup> و دمای ۱۲۲۵ °C در سرعت کرنش ۰/۲ S<sup>-1</sup>) و در بقیه موارد به علت محدودیت آزمایش فشار داغ، تنش قبل از رسیدن به حالت پایا حذف شده است (بنابر نتایج تحقیق قبلی بروی این فولاد، از دمای تغییر شکل ۱۰۰۰ °C به بالا تبلور مجدد دینامیکی آغاز می‌شود [۷]) که این سه مورد در شکل (۲) -b آورده شده است. مقادیر  $\sigma_C$  و  $\sigma_S$  از این نمودارها تعیین شده و برحسب پارامتر زرن هولمن (Z) در شکل (۳) -a رسم گردیده است. با رسم مقادیر  $\sigma_S$  بر حسب  $\sigma_C$  در شکل (۳) -b و برازش خطی، نسبت  $\sigma_S/\sigma_C$  برای این فولاد برابر ۰/۹۲ تعیین شد. پارامتر زرن هولمن به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود [۹]:

$$Z = \varepsilon^\circ \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A[\text{Sinh}(\alpha\sigma)]^n \quad (6)$$

که در این رابطه  $\varepsilon^\circ$  سرعت کرنش، Q انرژی اکتیواسیون تغییر شکل داغ، R ثابت جهانی گازها، T درجه حرارت در مقیاس مطلق و  $\sigma$  مقدار تنش در یک کرنش ثابت و مقادیر  $A, \alpha, n$  ثوابت فولاد می باشد.

در تحقیق قبلی تابعیت تنش بحرانی شروع تبلور مجدد دینامیکی فولاد DIN.1.7765 با شرایط تغییر شکل به صورت زیر تعیین شد [۷].



شکل (۲): a- منحنی‌های تنش- کرنش حقیقی فولاد مورد تحقیق در شرایط مختلف تغییر فرم (۲): b- نمودارها در شرایطی که تنش به حالت پایا رسیده است.

منطقه تبلور مجدد جزئی نیز در جدول (۲) آورده شده است. مطابق رابطه (۲) در شرایط تغییر شکل به کار رفته مقدار RMSD همواره کمتر از ۵٪ تنش سیلان متوسط می‌باشد و این امر نشان‌دهنده درجه پیشگویی مناسب تنش توسط رابطه (۲) می‌باشد.

با تعیین شدن نسبت  $\sigma_s/\sigma_c$  و به کمک رابطه (۷)، اکنون می‌توان تابعیت تنش حالت پایا را برحسب شرایط تغییر شکل تعیین نمود. بدین منظور شکل (۵) تغییرات پارامتر زرن هولمن را برحسب تنش پایا در شرایط مختلف تغییر شکل نشان می‌دهد و ثوابت تبلور مجدد دینامیکی (DRX) این فولاد نیز در

$$Z = 4.9831 \times 10^{17} \times [\text{Sinh}(0.0076 \cdot \sigma_c)]^{6.8159} = \varepsilon^{\circ} \exp\left(\frac{451.4866 \times 10^3}{RT}\right) \quad (7)$$

$$1000^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

با استفاده از این رابطه و نسبت  $\sigma_s/\sigma_c$  می‌توان تنش سیلان را توسط رابطه (۲) در منطقه تبلور مجدد جزئی پیش‌بینی نمود. این روند برای نمودارهای سیلان شکل (۲)-b انجام شده و نتایج آن در شکل (۴) نشان شده است.

همانطور که رابطه (۴) نشان می‌دهد توافق مناسبی بین نتایج تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده تنش وجود دارد. مقادیر تنش سیلان متوسط و RMSD برای موارد پیش‌بینی در محدوده

جدول (۳) آورده شده است. بنابراین اکنون می‌توان تابعیت تنش حالت پایا از شرایط تغییر شکل را برای این فولاد به صورت زیر نوشت:

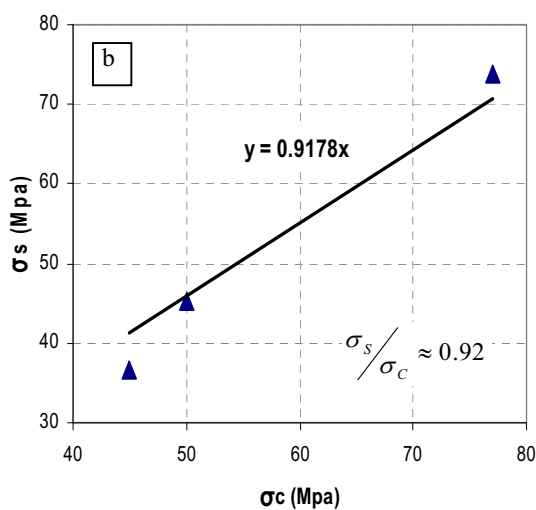
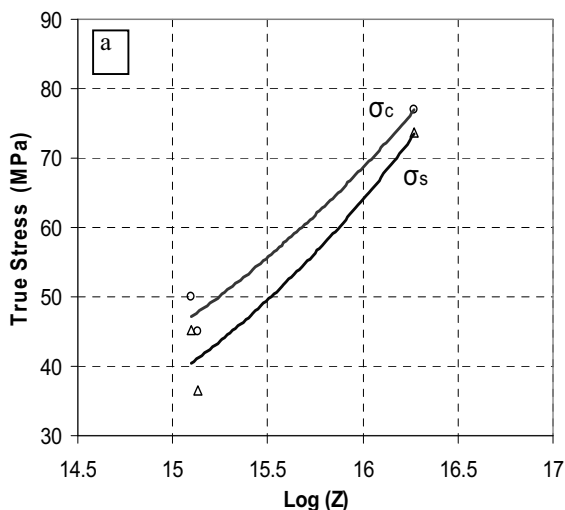
$$Z = 2.2797 \times 10^{17} \cdot [\text{Sinh}(0.0085 \cdot \sigma_s)]^{6.6811} = \varepsilon^{\circ} \exp\left(\frac{445.9476 \times 10^3}{RT}\right) \quad (8)$$

$$1000^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

مقادیر انرژی اکتیواسیون تغییر شکل داغ در سه نقطه شروع تبلور مجدد، نقطه اوج و نقطه پایا برای این فولاد به ترتیب برابر  $Q_{DRX} = 445.7866$ ،  $Q_{HW} = 453.9916$ ،  $Q_C = 451.4866$  کیلوژول بر مول است. این مقادیر انرژی اکتیواسیون تغییر شکل داغ قابل قیاس با فولادهای ابزاری مانند A2، D2 و M2 می‌باشد که در منطقه آستنیت در محدوده دمایی  $900 - 1200^{\circ}\text{C}$  تغییر شکل یافته‌اند و دارای کاربیدهایی با اندازه ۱ میکرومتر می‌باشند. کاربیدهایی با این اندازه باعث افزایش نرخ کارسختی از طریق توزیع سیلان در اطراف زمینه شده و تبلور مجدد دینامیکی را تشدید می‌کند [۱۰].

بر طبق تئوری Elfmork انرژی اکتیواسیون تبلور مجدد دینامیکی،  $Q_{DRX}$  حدود ۲۰٪ کمتر از  $Q_{HW}$  است [۱۱] که این امر به دلیل افزایش نیروی محرکه تبلور مجدد دینامیکی در کرنش‌های بالاتر از کرنش اوج می‌باشد.

اما در مورد فولاد مورد تحقیق مشاهده می‌شود که این اختلاف بسیار کم و در حدود ۲٪ است که حاکی از افت بسیار محدود تنش در نقطه پایا و قدرت کم مکانیزم‌های نرم شدن در این فولاد می‌باشد. این امر به دلیل وجود عناصر آلیاژی Mo، Cr و V در این فولاد است که باعث افزایش استحکام داغ می‌شود و اصولاً فولادهای کم آلیاژی گروه CrMoV دارای استحکام خزشی بسیار بالایی هستند [۱۲]. این امر از طریق استحکام دهی رسوبی با رسوب کاربیدها و کاربونیتریدهای وانادیم ( $V_4C_3$  و  $V(C,N)$ ) صورت می‌گیرد.

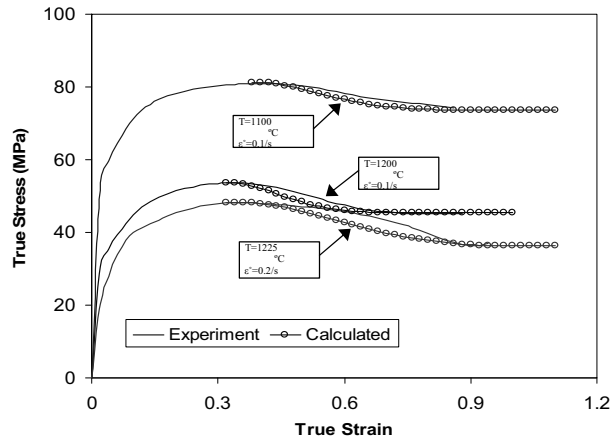


شکل (۳) a- تغییرات تنش بحرانی شروع تبلور مجدد دینامیکی و تنش پایا برحسب پارامتر زرن- هولمن  
شکل (۳) b- تغییرات تنش پایا برحسب تنش بحرانی شروع تبلور مجدد دینامیکی.

همچنین وجود عنصر مولیبدن به همراه وانادیم از طریق استحکام‌دهی محلول جامد نیز در این فرآیند موثر می‌باشد [۱۲].

جدول (۳): مقادیر ثوابت کار داغ فولاد مورد تحقیق که با استفاده از اطلاعات نقطه پایا تعیین شده است.

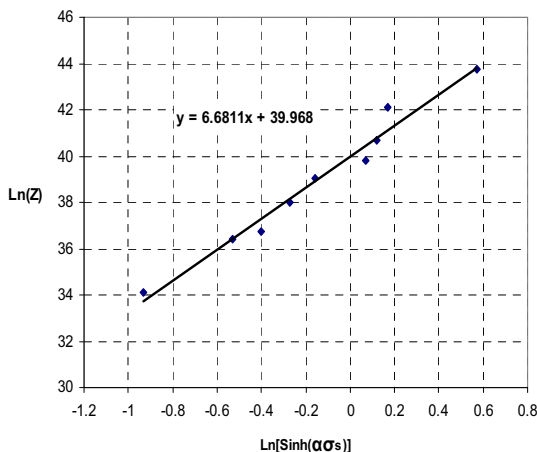
نوع ثابت	مقدار ثابت
m at High $\sigma$	۰/۰۸۷۹
m at Low $\sigma$	۰/۱۵۴۲
$\beta$	۰/۰۹۶۴
$\alpha$ ( $MPa^{-1}$ )	۰/۰۰۸۵
$Q_{DRX}$ (KJ/mole)	۴۴۵/۷۸۶۶
$n_{DRX}$	۶/۶۸۱۱
$A_{DRX}$ ( $S^{-1}$ )	$۲/۲۷۹۷ \times 10^{1۷}$



شکل (۴): نمودارهای تنش سیلان به همراه مقادیر محاسبه شده (پیش بینی شده) از طریق مدل ریاضی.

جدول (۲): مقادیر تنش سیلان متوسط،  $\sigma_{mfs}$  و RMSSD در شرایطی که تنش پیش‌بینی شده است.

شرایط تغییر فرم	$\sigma_{mfs}$ (Mpa)	RMSSD (MPa)	RMSSD/ ( $\sigma_{mfs}$ ) (%)
$\epsilon^0=0.1s^{-1}, T=1100^\circ C$	۷۷/۷۶	۱/۱۹	۱۵۳
$\epsilon^0=0.1s^{-1}, T=1200^\circ C$	۴۹/۵۳	۱/۴۳	۲/۸۹
$\epsilon^0=0.2s^{-1}, T=1225^\circ C$	۴۹/۰۵	۲/۱۷	۴/۴۲



شکل (۵): نمودار تغییرات پارامتر زرنر- هولمن بر حسب سینوس هیپربولیک تنش پایا در مقیاس لگاریتم طبیعی.

### ۳- نتیجه گیری

۱- با استفاده از یک مدل ریاضی منحنی‌های سیلان و مشخصات رفتار تبلور مجدد دینامیکی، تنش سیلان برای فولاد فوق مستحکم DIN.1.7765 در منطقه تبلور مجدد جزئی پیش‌بینی شد. مقایسه منحنی سیلان پیش‌بینی شده و تجربی نشان داد که توافق خوبی آنها وجود دارد.

۲- نسبت تنش بحرانی شروع تبلور مجدد دینامیکی به تنش حالت پایا در حین تغییر شکل گرم  $\sigma_s/\sigma_c$  برای این فولاد برابر ۰/۹۲ محاسبه شد.

۳- براساس معادلات مشخصه کار داغ، ارتباط ریاضی  $\sigma_s$  با شرایط مختلف تغییر شکل به صورت یک رابطه ریاضی تعیین شد و از آنجا مشخص شد  $Q_{DRX}$  این فولاد به دلیل استحکام داغ بالای آن بسیار نزدیک به  $Q_{HW}$  است.

## ۴- مراجع

- [1] Sakai, T, Jonas, J. J., "Dynamic Recrystallization: Mechanical and Microstructural Consideration", Acta Metall. Vol.32, pp. 189-209, 1984.
- [2] McQueen, H. J, Jonas, J. J., "Recent advances in Hot Working: Fundamental Dynamic Softening Mechanisms", J. Applied Metal Working Vol.4, No.3, pp.231-241, July 1984.
- [3] Poliak, E. I, Jonas, J. J., "Initiation of Dynamic Recrystallization in Constant Strain Rate Hot Deformation", ISIJ International Vol.43, No.5, pp.684-691, 2003.
- [4] Cingara, A, McQueen, H. J., "New Formula for Calculating Flow Curves form High Temperature Constitutive Data for 300 Austenitic Steels", J. Mater. Process. Tech., Vol.36, pp. 31-42, 1992.
- [5] Ebrahimi, R., Zahiri, S. H. and Najafizadeh, A., "Mathematical Modeling of the Stress-Strain Curves of Ti-IF Steel at High Temperature", J. of Mater. Proc. Tech. Volume 171, Issue 2, pp. 301-305, 20 January 2006.
- [6] Phaniraj, M. P., Lahiri, A. K., "The Applicability of Neural Network Model to Predict Flow Stress for Carbon Steels", J. of Mater. Proc. Tech. 141, pp.219-227, 2003.
- [7] ASM Handbook, "Mechanical Testing and Evaluation" Vol.8, p.143, 1985
- [8] ASM Handbook, "Mechanical Testing and Evaluation" Vol.8, pp.798, 1985
- [9] McQueen, H. J, Ryan, N. D., "Constitutive analysis in hot working", Materials Science and Engineering A322, pp. 43-63, 2002.
- [10] Elfmark, J, Czech J. Phys. B35 269-274, 1985.
- [11] Purmensky, J., Foldyna, V. and Kubon, Z., "Creep Resistance and Structural Stability of Low alloy CrMo and CrMoV Steels", Key Engineering Materials Vols. 171-174, pp. 419-426, 2000.