

استخراج معادله ساختاری قطعه کار در نورد گرم ورق

امیرحسین ادیبی سده^{۳*}

سمیرا سلیمی^۲

سحر سلیمی^۱

*نویسنده مسئول: amir.h.adibi@spiritaero.com

چکیده

کنترل ابعادی قطعه کار در صنایع فولاد اهمیت ویژه‌ای دارد. چالش اصلی در کنترل ضخامت ورق تغییرات در مقاومت ماده به خاطر تغییرات در ترکیب شیمیایی ماده‌ی قطعه کار، کاهش ضخامت و نرخ کرنش اعمال شده به قطعه کار است. در این مقاله بر مبنای پارامترهای اصلی موثر در نیروی نورد، راه حلی برای پیش بینی هرچه دقیق تر تنش جاری در یک واحد نورد نهایی گرم شده است. مقادیر پیش بینی شده توسط مدل با مقادیر تجربی مقایسه شده‌اند که تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهد.

واژه های کلیدی: تنش جاری، نورد گرم، تطبیق کمترین مربعات، معادله ساختاری.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی و مواد دانشگاه آلبرتا، کانادا.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه کالگری، کانادا.

۳- استادیار دانشکده صنایع و تولید دانشگاه ایالتی ویجیتا، ویجیتا، کانزاس، آمریکا.

۱- مقدمه

در حین تغییر شکل پلاستیک فولاد که معمولاً در دمایی بین ۸۵۰ تا ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد صورت می‌گیرد، تنش جاری بسیار به نرخ کرنش وابسته است [۱-۲]. برای دستیابی به محصول دقیق‌تر از لحاظ ابعادی در نورد گرم لازم است که یک مدل ریاضی دقیق برای معادله ساختاری ماده ارائه شود. روشن است که چون تنش جاری وابسته به دما و سرعت نورد است این پیش‌بینی باید به این پارامترها مربوط باشد. دقت پیش‌بینی مدل بستگی به توانایی مدل برای شبیه‌سازی پدیده‌های فیزیکی مانند تماس غلتک و ورق و انتقال حرارت هدایتی (به ابزار)، تابشی (به محیط)، جابه‌جایی (شامل پوسته‌شویی) خواهد داشت. از طرف دیگر انرژی حرارتی ایجاد شده به‌خاطر کار پلاستیک و اصطکاک و همچنین هر تبدیل اگزوترمیک را باید به حساب آورد. تاریخچه دمایی ورق به تعادل حرارت‌های از دست رفته و به‌دست آمده بستگی دارد که تأثیر به‌سزایی در رفتار تغییرشکل، تغییرات متالورژیکی و مشخصات نهایی ماده نورد شده خواهد داشت.

تغییر شکل فولاد در شکاف غلتک‌ها نیروی رانش برای تغییرات میکروساختاری را پدید می‌آورد. نیروی رانش برای اصلاح ساختار پدیده‌های متالورژیکی مانند بازیابی و تبلور مجدد عبارت از چگالی نابه‌جایی‌ها و انرژی کرنشی ناشی از تغییر شکل است که توزیع آن به وسیله کاهش سطح مقطع در هر عبور، سرعت نورد و توزیع دما مربوط می‌شود. دقت هر مدل تغییرشکل بستگی زیادی به این دارد که آن مدل چگونه و با چه تقریبی رفتار تغییر شکل ماده، غلتک‌ها، شرایط اصطکاک، تعامل بین دما و تغییرات ساختاری را مدل می‌کند. بنابراین مشخصه‌یابی کامل تنش جریان ماده نورد شده بسیار اهمیت دارد.

تاکنون مدل‌های زیادی برای پیش‌بینی معادله ساختاری فلزات ارائه شده است. به‌طور کلی این معادلات روابطی هستند که تنش را به‌صورت تابعی از کرنش، نرخ کرنش و

دما بیان می‌کنند. رابرتز [۳] مروری بر این مدل‌سازی‌ها را ارائه می‌نماید. معادله ساختاری فولاد با توجه ترکیب و درصد مواد تشکیل دهنده، رفتاری متفاوت و وابسته به دما، کرنش و نرخ کرنش وابسته است. با توجه به اینکه برای هر کیفیت ماده در شرایط یکسان ولی با تاریخچه و شرایط تولید متفاوت، این رفتار فرق خواهند داشت، به تعدادی زیادی آزمون مکانیکی در سرعت و دمای بالا نیاز است که هزینه و وقت زیادی را می‌طلبد. به دست آوردن پارامترهای معادله ساختاری که بتواند به شکل ساده‌ای بر مبنای رفتار مکانیکی فلز تحت تغییر شکل در دما و سرعت بالا، رفتار ماده را از دیدگاه مکانیکی (و نه از جنبه ساختاری) مدل نماید کار مشکلی است.

برای به‌دست آوردن پارامترهای معادله ساختاری لازم است تعداد زیادی تست ارزیابی رفتار مکانیکی مانند کشش ساده در دامنه دمای مورد نظر، با سرعت تغییر شکل متفاوت و در کرنش‌های مختلف انجام شود. سپس به کمک روش‌های مختلف تطبیقی پارامترهای مورد نظر را به‌دست آورد. انجام این آزمایش‌ها در دمای بالا با دقت مورد نظر ضمن توأم بودن با محدودیتهای هزینه با مشکلات عدم دقت توأم است.

در این مقاله روشی برای پیش‌بینی معادله ساختاری ماده تحت تغییر شکل در نورد گرم ورق با استفاده از اطلاعات خطوط نورد نهایی (شامل ۷ قفسه)، بدون اینکه نیازی به تحلیل‌های پیچیده و وقت‌گیر باشد ارائه می‌شود. مبنای کار استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده نیروی نورد در قفسه‌های نهایی واحد نورد گرم است که دامنه نسبتاً وسیعی از دما و سرعت را تحت پوشش قرار می‌دهد. طبق اطلاع نگارندگان این روش دستیابی پارامترهای تنش جاری برای اولین بار مطرح می‌شود.

تنش جاری

تئوری رفتار پلاستیک مواد در دماهای مختلف را به وسیله مطالعه عمیق فلزات خالص به دست آمده است [۴-۷].

که A شامل تاریخچه گذشته مانند تغییر شکل قبلی است. ترکیب اثر دما و سرعت تغییر شکل را می توان به وسیله رابطه زنر^۱ هولومون^۲ [۸] به صورت زیر بیان کرد.

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (۲)$$

که $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش R ثابت گازها ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)، T دمای مطلق (K) و Q انرژی فعال سازی تغییر شکل است.

اگرچه سعی زیادی در این زمینه به عمل آمده است اما تاکنون رابطه کلی که ارتباط بین تنش، کرنش و نرخ کرنش و دما و اندازه دانه های گریدهای مختلف فولاد را فراهم کند ارائه نشده است. مشاهده شده است که هیچ معادله ای نمی تواند به صورت صریح کلیه متغیرهای مهم شرکت کننده در رفتار فلز را بیان کند. روش معمول این است که متغیرهای غیر قابل دسترس را با پارامترهای تطبیق دهنده جبران نمود. به عنوان مثال با بیان پارامترها به صورت معادله هیبرولیکی به عنوان توابعی از کرنش، برای یک اندازه مشخص دانه و ترکیب فولاد ارائه یک منحنی کامل تنش کرنش را ممکن می سازد [۹]. در حالت عمومی تنش جاری در یک کرنش مشخص با افزایش نرخ کرنش و کاهش دما افزایش می یابد. تبلور مجدد دینامیکی در نرخ های کرنش پائین و دمای بالا توسعه می یابد. منابعی هم وجود دارد که اثر ترکیب شیمیایی و اندازه دانه روی تنش جاری را مطالعه کرده اند [۱۰-۱۱].

اثر ویژه کرنش در معادله متشکله در مواردی در نظر گرفته شده است. اثر اندازه دانه روی تنش جاری با کرنش سختی و بازیابی تئوری خزش همراه است و این مطلب که در دمای بالا انتقال مرزی سریع دانه ایجاد شبکه نابجایی زیادی را در نزدیک مرز دانه ها قبل از پخش آن در داخل دانه ها بوجود می آورد مد نظر قرار می دهد [۱۱].

مدل های میکروساختاری به توصیف مقداری تغییرات ساختاری حین نوردداغ و خنک شدن در بخش خنک کاری

این مکانیزم ها شامل انتشار نابه جایی ها، پخش حفره ها در شبکه و یا مرزدانه هاست. در حال حاضر علوم پدیده شناسی کلاسیک امکان پیش بینی دقیق پاسخ الاستیک-پلاستیک ماده واقعی را در دامنه وسیعی از تغییرات پارامترهای هندسی و فیزیکی فراهم نیاورده است. از این رو تعیین تجربی تنش جریان و کرنش واقعی برای دامنه ای از نرخ کرنش و دماها، روش متداول در اغلب موارد است.

منحنی های اندازه گیری شده تنش کرنش فولادها در دامنه آستنیتی منعکس کننده رقابت بین فرایندهای کرنش سختی و نرم شدن دینامیکی است. در تمام موارد تغییر شکل پلاستیک با کار سختی شروع می شود به طوریکه به خاطر بالا رفتن چگالی نابه جایی ها، در تعامل آنها با هم و مرزها در شبکه کریستالی تنش، با کرنش افزایش می یابد. با افزایش بیشتر کرنش یکی از سه تغییر زیر مشاهده می شود.

الف- منحنی جریان در دمای بالا و نرخ کرنش کم به یک قله یا چند قله می رسد که به دنبال آن شرایط پایدار یا مقدار حداقلی بخاطر تبلور مجدد دینامیکی اتفاق می افتد.

ب- منحنی جریان به خاطر تعادل بین سخت شدن و بازیابی در ترکیب مطلوب دما و نرخ کرنش در شرایط مقدار پایدار قرار می گیرد.

ج- منحنی جریان به خاطر غالب بودن سخت شدن وقتی نرخ بازیابی کم است با کرنش افزایش می یابد.

برای ساختن یک مدل ریاضی برای فرایند نوردد گرم لازم است اطلاعات تجربی را به معادلات متشکله تبدیل کنیم تا بتوان تنش جاری را برای یک مجموعه شرایط نوردد پیش بینی کرد. توسعه این معادلات به هیچ وجه کاری ساده نیست زیرا باید بیانگر تغییر طبیعت سه فرایند کار سختی، بازیابی دینامیک و تبلور مجدد علاوه بر به حساب آوردن سایر متغیرها باشد. تنش جاری ماده به صورت کلی بستگی به پارامترهایی مانند ترکیب شیمیایی (C)، دما (T)، کرنش (ϵ) و نرخ کرنش ($\dot{\epsilon}$)، اندازه دانه (d) و تاریخچه قبلی بستگی دارد. معادله تنش جاری به صورت زیر بیان می شود.

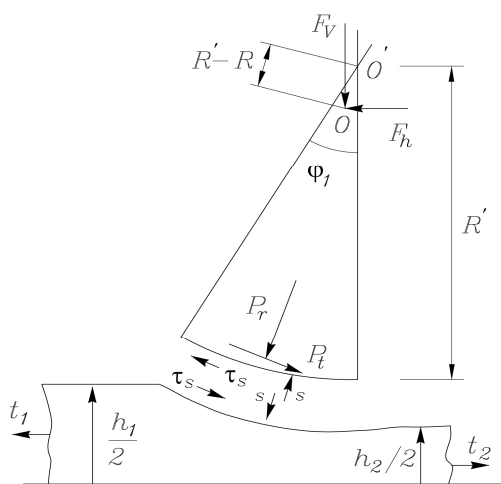
$$\sigma = Af(C, T, \epsilon, \dot{\epsilon}, d) \quad (۱)$$

1- Zener

2- Hollomon

که r کاهش ضخامت در هر پاس (%)، w عرض نوار (mm)، d قطر غلتک کار (mm)، h_1 ضخامت ورودی نوار (mm)، t_1 و t_2 کشش از جلو و عقب و (MPa) و v_r سرعت غلتک کار (mm/s) و T دمای قطعه کار (K) می باشد.

برای یک ماده مشخص و پارامترهای ورودی و خروجی معین، در ابتدا شکاف غلتکها بر اساس مقادیر پیش محاسبه شده قبل از نورد تنظیم می شوند. پس از اینکه نورد شروع شد نقاط تنظیم به وسیله مقادیر اندازه گیری شده و یا بهینه شده در حین نورد کنترل می شوند. برای هر کلاس کیفیت و شماره کیفیت فولاد، فاکتورهای اصلاح این معادله بوسیله مقایسه با مقادیر اندازه گیری شده بهینه سازی و به روز می شوند. بیشتر مدل های تخمین نیروی نورد بر اساس نیروی بر واحد عرض محصول پی ریزی شده اند و شامل تنش تسلیم ماده نیستند. در این روش مقادیر پس محاسبه برای محاسبه تنش متوسط تسلیم ماده در هر ایستگاه به کار گرفته می شوند. بر اساس حل تغییر شکل همگن توسط گاناسکرا و الکساندر [۱۳]، و توسعه یافته توسط فرش واتر [۱۴] تنش های اصلی یک المان قاچی p (مؤلفه افقی) و q (مؤلفه عمودی) به فشار s غلتک، تنش تسلیم برشی متوسط k و زاویه تماس کمان φ طبق شکل (۱) به صورت زیر مربوط می شوند.



شکل (۱) ناحیه تماس در شکاف غلتکها

$$p = s - \nu k \mp \tau_s \tan \varphi \quad (۶)$$

$$q - p = \nu k \quad (۷)$$

مانند تبلور مجدد، رشد دانه ها، ته نشینی و تجزیه آستنیت مربوط می شود [۱۰].

۳-مدلسازی ریاضی

مدل های ریاضی بر حسب تعداد محدودی پارامتر، که اثر ریزساختار در تغییر شکل ها را ارائه کند، ساخته می شوند. تعدادی از محققین برای استخراج معادله ساختاری از مقادیر تجربی به دست آمده برای منحنی های جریان، به روابط تجربی روی آورده اند که تنش جاری را به پارامترهای فرایند ارتباط می دهد. بعضی دیگر شبکه عصبی را به کار برده اند تا تنش جاری را گزارش نمایند. در این مقاله تنش جاری با اطلاعات بدست آمده از خط نورد تخمین زده می شوند. رابطه اینووی^۱ [۱۲] برای توصیف رفتار یک فولاد مشخص حین نورد داغ مورد استفاده قرار می گیرد. شکل معادله چنین است:

$$\sigma = \sigma_0 \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \exp(A/TK) \quad (۳)$$

که σ_0, A, m, K مقادیر ثابتی هستند. این رابطه را می توان به صورت زیر تبدیل کرد.

$$\ln \sigma = C + n \ln \varepsilon + m \ln \dot{\varepsilon} + g/T \quad (۴)$$

به طریق مشابه c, m, n, g برای یک گرید فولاد به خصوص مقادیر مشخصی هستند.

مقاومت در مقابل تغییر شکل در شکاف غلتکها به صورت مستقیم به خواص مواد و همچنین مقادیر ابعادی مربوط می شوند. در روش حاضر تجهیزات موجود در واحد نورد گرم فولاد مبار که اصفهان برای ارزیابی این پارامترهای ثابت به کار گرفته شد. کارخانه های نورد فولاد به وسایل اندازه گیری نیروی نورد در هر لحظه به صورت دقیق مجهزند. نرم افزارهای کامپیوتری این کارگاهها که کنترل فرایند نورد را به عهده دارند، مقادیر اندازه گیری شده و مقادیر محاسبه شده را به صورت یک رابطه تجربی برای هر شماره کیفیت ماده به صورت زیر بیان می کنند:

$$F = f(r, w, d, h_1, t_1, t_2, v_r, T) \quad (۵)$$

شکاف غلتک مقادیر مؤثر مربوطه استفاده شده است و از تغییرات آن صرف نظر می شود. فرمول بندی فوق و روش اصلاح شده آن توسط فرشواتر [۱۴] در یک کد برنامه نویسی وارد شده و پارامترهای مجهول شامل تنش تسلیم ماده نورد شده محاسبه شده اند. در هر ایستگاه عملیات با مساوی قراردادن نیروی نورد (اندازه گیری شده) و مؤلفه قائم نیرو که بوسیله رابطه (۸) ارائه شده است شروع می شود. برای تخمین ضریب اصطکاک و یکنواختی در تحلیل از روابط ارائه شده توسط کاپلان^۲ و پرسیازانی^۳ [۱۶] استفاده شده است. کاپلان و پرسیازانی بر اساس مدل های تئوری ضریب اصطکاک بین غلتک و قطعه کار را به پارامترهای متنوعی مانند جنس غلتک؛ فلز تحت تغییر شکل؛ زبری سطح غلتک، درصد کربن، منگنز، کروم، مولیبدن، وانادیم، نیکل و مس موجود در فولاد، نوع روانساز، زاویه تماس بین ورق و غلتک، دمای ورق و سرعت نورد ارتباط داده اند.

با توجه به اینکه کاهش ضخامت در هر قفسه مشخص است می باشد زاویه تماس در آن ایستگاه قابل محاسبه است. دمای قطعه کار در تعدادی از موقعیتهای به خصوص اندازه گیری می شود. تخمین مقادیر دمای ایستگاههای میانی از طریق خطی سازی صورت می گیرد. سرعت غلتکهای نورد بر اساس شرایط پایدار فرایند نورد در هر ایستگاه به صورت پیچیده تحت کنترل قرار می گیرد و بر اساس تئوریهای موجود سرعت ورق را می توان به دست آورد.

۴- روش استخراج پارامترها و نتایج

در این مقاله معادله تجربی شرکت فولاد مبارکه برای تخمینی از نیروی نورد ورق در هر لحظه برای تخمین تنش جاری ماده ورق در حین نورد مورد استفاده قرار گرفت. این موضوع با گرفتن تعداد کافی اطلاعات خروجی ماده نورد شده انجام شد. نمونه ای از این اطلاعات در جدول (۱) ارائه شده است. از اطلاعات ۵ ستون سمت چپ جدول، تنش

با در نظر گرفتن ماده صلب پلاستیک، مؤلفه های قائم و افقی نیروی عکس العمل F_v و F_h بوسیله روابط زیر ارائه شده اند، شکل (۱) را ببینید.

$$F_v = P_r \cos \frac{\varphi_r}{2} + P_r \sin \frac{\varphi_r}{2} \quad (۸)$$

$$F_h = P_r \sin \frac{\varphi_r}{2} - P_r \cos \frac{\varphi_r}{2} \quad (۹)$$

φ_r زاویه تغییر شکل پلاستیک بوده و P_r نیروی وارد شد به واحد عرض در جهت شعاعی در طول کمان تماس بوده و توسط رابطه زیر ارائه شده است:

(۱۰)

$$P_r = R' \int_{\varphi_n}^{\varphi_r} s \cos(\varphi - \frac{\varphi_r}{2}) + R' \left\{ \int_{\varphi_n}^{\varphi_r} \tau_s \sin(\varphi - \frac{\varphi_r}{2}) d\varphi - \int_{\varphi_n}^{\varphi_r} \tau_s \sin(-\frac{\varphi_r}{2}) d\varphi \right\}$$

به طریق مشابه مؤلفه نیرو در جهت عمود به P_r بوسیله رابطه زیر داده شده است.

$$P_r = -R' \int_{\varphi_n}^{\varphi_r} s \sin(\varphi - \frac{\varphi_r}{2}) d\varphi + \quad (۱۱)$$

$$R' \left\{ \int_{\varphi_n}^{\varphi_r} \tau_s \cos(\varphi - \frac{\varphi_r}{2}) d\varphi - \int_{\varphi_n}^{\varphi_r} \tau_s \cos(\varphi - \frac{\varphi_r}{2}) d\varphi \right\}$$

در این معادلات R' شعاع غلتک تغییر شکل یافته است، φ موقعیت زاویه ای در کمان تماس و اندیس n به نقطه خنثی مربوط می گردد. τ_s تنش برش در سطح تماس نوار و غلتک است. تنش برشی در سطح غلتک طبق شرایط چسبیده لغزنده که $\tau_s = \mu_s$ برای $\mu_s \leq k$ و $\tau_s = k$ برای $\mu_s \geq k$ (که μ ضریب اصطکاک است) در نظر گرفته شده است. شعاع غلتک تغییر شکل یافته از فرمول معروف هیچکاک^۱ [۱۵] قابل محاسبه است.

با مراجعه به شکل (۱)، برای تعادل لازم است که رابطه زیر برقرار باشد:

$$F_h = \frac{t_2 h_2 - t_1 h_1}{2} \quad (۱۲)$$

که t_1 و t_2 تنش های کششی در ورودی و خروجی از شکاف غلتک ها می باشند. تغییرات تنش تسلیم در هر ایستگاه بخاطر اثر کرنش، نرخ کرنش و دما خواهد بود که برای هر

جدول (۱) مقادیر تجربی بدست آمده از نورد ورق ها و مقادیر متناظر محاسبه شده

مقادیر لاگهای کامپیوتری ماده نورد شده				مقادیر محاسبه شده				
$r\%$	$P(N/mm)$	$T(K)$	$L(mm)$	$V_r (mm/s)$	$h_1(mm)$	$\varepsilon = \ln h_1/h_2$	$\dot{\varepsilon}(1/s)$	$\bar{\sigma} (MPa)$
۲۸/۵۴	۸۰۹۱/۱۱	۵۱/۰۸	۵۱/۰۸	۹۶۶/۵	۲۵/۰۲	-۰/۳۳۶	۶/۴۹	۱۰۵/۸۷
۲۲/۹۸	۶۷۹۹/۱۷	۱۳۴۹/۸۷	۳۸/۹۲	۱۳۴۶/۵	۱۸/۱۲	-۰/۲۶۱	۹/۰۳	۱۱۴/۷۸
۲۰/۸۶	۶۴۵۷/۱۴	۱۲۲۴/۲۳	۳۳/۰۴	۱۷۸۰/۰	۱۴/۱۳	-۰/۲۳۴	۱۲/۳۳	۱۲۴/۱۰
۱۲/۸۹	۵۰۱۱/۸۸	۱۱۸۸/۴۴	۲۱/۹۶	۲۲۹۹/۰	۰/۶۷	-۰/۱۳۸	۱۴/۴۵	۱۴۹/۱۴
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

جدول (۲) مقادیر متناظر پارامترهای رابطه اینوی

$P_i = \ln \sigma_i$	$Q_i = \ln \dot{\varepsilon}_i$	$R_i = \ln \varepsilon_i$
۴/۶۶۲۲۱	۱/۸۷۰۲	۱/۰۹۰۶
۴/۷۴۳۸۰	۲/۲۰۰۶	-۱/۳۴۴۲
۴/۸۲۱۰۸	۲/۵۱۲۰	-۱/۴۵۲۴
۲/۰۰۴۸۸	۲/۶۷۰۷	-۱/۹۸۰۵
-----	-----	-----

با ساده سازی این معادلات خواهیم داشت :

(۱۵)

$$NC + \left(\sum_{i=1}^N Q_i\right)n + \left(\sum_{i=1}^N R_i\right)m + \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{T_i}\right)g = \sum_{i=1}^N P_i$$

$$\left(\sum_{i=1}^N Q_i\right)C + \left(\sum_{i=1}^N Q_i^2\right)n + \left(\sum_{i=1}^N Q_i R_i\right)m + \left(\sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{T_i}\right)g = \sum_{i=1}^N Q_i P_i$$

$$\left(\sum_{i=1}^N R_i\right)C + \left(\sum_{i=1}^N R_i Q_i\right)n + \left(\sum_{i=1}^N R_i^2\right)m + \left(\sum_{i=1}^N \frac{R_i}{T_i}\right)g = \sum_{i=1}^N R_i P_i$$

$$\left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{T_i}\right)C + \left(\sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{T_i}\right)n + \left(\sum_{i=1}^N \frac{R_i}{T_i}\right)m + \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{T_i^2}\right)g = \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{T_i}$$

با جایگذاری برای R_i ، P_i و Q_i از جدول ۲ و T_i از

$$جدول ۱ مقادیر ثابت $C = ۲/۴۴۹۸۹$ و $n = ۳/۱۲۹۳ \times ۱۰^{-۴}$$$

و $m = ۰/۲۰۷۴۲$ و $g = ۲۵۳۷/۰۷$ بدست می آیند. لازم به ذکر

است که در این مقاله تعدادی محدودی از اطلاعات بدست آمده از خط برای روند بررسی معادله ساختاری آورده شد برای دستیابی به جواب هر چه دقیق تر می بایست تعداد قابل توجهی از اطلاعات را در رابطه (۱۵) وارد نمود. با توجه به نتایج بدست آمده، اگرچه ضریب n بسیار کوچک به نظر می رسد اما به دلیل اینکه $\dot{\varepsilon}$ در قفسه های نهایی اعداد بزرگی را اختیار می کند مقادیر حاصل قابل توجه و قابل صرف نظر

تسلیم میانگین $\bar{\sigma} = \bar{k} \sqrt{3}$ به کمک کد نوشته شده و بر

اساس سعی و خطا برای رسیدن به مقادیر نیروی اندازه گیری شده استفاده می شوند.

معادله مشخصه برای هر شماره کیفیت به شکل رابطه اینوی بوسیله روش مینیمم مربعات به شرح زیر استخراج شده است. با کارگیری روش مینیمم مربعات برای معادله (۴) مقادیر $P_i = \ln \sigma_i$ ، $Q_i = \ln \dot{\varepsilon}_i$ و $R_i = \ln \varepsilon_i$ به شرح ارائه شده در جدول (۲) بدست می آیند. از رگرسیون مینیمم مربعات جمع مربعات باقیمانده ها بوسیله رابطه زیر داده شده است.

$$E = \sum_{i=1}^N [P_i - (C + nQ_i + mR_i + \frac{g}{T_i})]^2 \quad (۱۳)$$

با دیفرانسیل گیری این معادله نسبت به پارامترهای مجهول چهار معادله زیر بدست می آید.

(۱۴)

$$\frac{\partial E}{\partial C} = 0 \Rightarrow -2 \sum_{i=1}^N [P_i - C - nQ_i - mR_i - \frac{g}{T_i}] = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial n} = 0 \Rightarrow -2 \sum_{i=1}^N Q_i [P_i - C - nQ_i - mR_i - \frac{g}{T_i}] = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial m} = 0 \Rightarrow -2 \sum_{i=1}^N R_i [P_i - C - nQ_i - mR_i - \frac{g}{T_i}] = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial g} = 0 \Rightarrow -2 \sum_{i=1}^N \frac{1}{T_i} [P_i - C - nQ_i - mR_i - \frac{g}{T_i}] = 0$$

و وقت گیرمانند انجام زیادی تست مکانیکی در شرایط مختلف برای پیش بینی مقاومت ماده در مقابل تغییر شکل، کاملاً رضایت بخش بودن و آن را برای کاربردهای صنعتی مناسب می سازد.

نیستند. برای آزمون این مطلب دو رابطه زیر نیز به عنوان معادلات جایگزین در نظر گرفته می شوند.

$$\ln \sigma = C_1 + n_1 \ln \dot{\epsilon} + \frac{g_1}{T} \quad (16)$$

$$\ln \sigma = C_2 + m_2 \ln \epsilon + \frac{g_2}{T} \quad (17)$$

با اعمال روش مشابه مقادیر ثابت این روابط نیز به دست می آیند.

۵- فهرست علائم اصلی

k	تنش تسلیم برشی
F_v, F_h	مؤلفه های قائم و افقی نیرو
h_1, h_2	ضخامت ورودی و خروجی نوار ورق
g, m, n	ثابتهای معادله ساختاری
P_t, P_r	نیروی شعاعی و مماسی به واحد عرض
R	شعاع غلتک کار
T	دمای قطعه کار (K)
t_1, t_2	کشش از جلو و عقب
v_r	سرعت غلتک کار
w	عرض نوار
ϵ	کرنش
$\dot{\epsilon}$	نرخ کرنش
σ	تنش
ϕ_1	زاویه تماس
τ_s	تنش برش در سطح تماس

جدول (۳) مقایسه بین تنش جاری از روابط (۴)، (۱۶) و (۱۷)

$\bar{\sigma}$ رابطه (۱۷)	$\bar{\sigma}$ رابطه (۱۶)	$\bar{\sigma}$ رابطه (۴)	$\bar{\sigma}$ بازتولید نیروی اندازه گیری شده (MPa)
۱۰۳/۵۸	۱۰۲/۳۶	۱۰۵/۱۳	۱۰۵
۱۱۳/۰۱	۱۱۲/۹۳	۱۱۵/۵۹	۱۱۵/۱۸
۱۲۴/۱۹	۱۲۴/۲۷	۱۲۳/۵۷	۱۲۳/۶
۱۱۰/۵	۱۱۰/۰۹	۱۱۱/۶۲	۱۱۲/۳۸
-----	-----	-----	-----
Max error	٪۶/۱	٪۳/۱	

در جدول (۳) مقایسه ای بین تنش جاری به دست آمده بر حسب MPa به وسیله روابط (۴)، (۱۶) و (۱۷) ارائه شده است. مقادیر به دست آمده از روابط (۴)، (۱۶) و (۱۷) مقادیر متنوعی را در قبال هر نیروی اندازه گیری شده ارائه می نمایند. اگرچه عموماً مقادیر $\bar{\sigma}$ از معادله (۱۷) از معادله (۱۶) بیشتر است اما به دلیل اینکه این دو رابطه به پارامترهای متفاوتی ($\dot{\epsilon}$ و ϵ) وابسته اند نمی توان از اختلاف این دو معادله نتیجه خاصی استخراج کرد. با توجه به درصد خطای این سه رابطه به این ترتیب نتیجه گیری شده است که رابطه مطلوب برای معادله مشخصه تجربی به وسیله رابطه (۴) ارائه می شود. در این مقاله یک نمونه فولاد کم کربن *St12* مورد بررسی قرار گرفت. طبعاً برای گریدهای دیگر فولاد باید چنین روندی را مجدداً تکرار نمود.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک راهکار ریاضی برای به دست آوردن پارامترهای معادله ساختاری توصیف و عبارات ریاضی ساده ای برای وابستگی تنش جاری به کرنش، نرخ کرنش و دما استخراج شد. دقت این شیوه بستگی زیادی به دقت مقادیر اندازه گیری شده و همچنین نحوه محاسبه نیروی مورد خواهد داشت. نتایج این مدل در مقایسه با روش های پیچیده

مراجع

- [1] Anderson J.G., Evans R.W., Modeling flow stress evolution during elevated temperature deformation of two low carbon steels, Iron making and Steelmaking, Vol. 23(2) 1996, pp. 130-135.
- [2] Avrami M., Kinetics of phase change: I. General theory, *J. Chemical Physics*, Vol.7, 1939, pp. 1103-1112.
- [3] Roberts W.L., Hot rolling of steel, Marcel Dekker Inc., New York, 1983.
- [4] Mohamed F.A., Langdon T.G., The transition from dislocation climb to viscous glide in creep of solid solution alloys, *Acta Metallurgic*, Vol. 22 (6), 1974, pp. 779-788.
- [5] Frost H.J., Ashby M.F., Deformation Mechanism Maps, Pergamon Press, Oxford, 1982.

- [6] Park J. , Prediction of the flow stress and grain size of steel during thick-plate rolling, *J. Materials Processing Technology*, Vol. 113 (1-3), 2001, pp. 581-586.
- [7] Xu G., Wan L., Zhang X., Xue Z., Study on flow stress model of a micro alloyed high strength steel in CSP hot rolling, *Materials Science Forum*, PART 1, 2008, pp. 267-272
- [8] Zener C., Hollomon H., Effect of strain rate upon plastic flow of steel, *J. Applied Physics*, Vol. 15 ,1944, pp.22-28.
- [9] Sellars C.M., Basics of modeling for control of microstructure in thermo- mechanical controlled processing, *Iron making and steelmaking*, Vol. 22 (6), 1995, pp. 459-464.
- [10] Wang S.R., Tseng A.A., Macro and Micro Modeling of Hot Rolling of Steel Coupled by a Micro Constitutive Relationship, *Iron and Steelmaker*, (I and SM) 23, 1996.
- [11] Zheng C., Xiao N., Li D., Li Y., Microstructure prediction of the austenite recrystallization during multi-pass steel strip hot rolling: A cellular automaton modeling, *Computational Materials Science*, Vol. 44 (2), 2008, pp. 507-514.
- [12] Inouye K., Studies on the hot working strength of steels. *Tetsu to Hagane*, Vol. 41, 1955, pp.593-607.
- [13] Gunasekera J.S., Alexander J.M., Analysis of Rolling, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 36 (1), 1987, pp. 203-206.
- [14] Freshwater I.J., Simplified theories of flat rolling- I. The calculation of roll pressure, roll force and roll torque, *Int. J. Mechanics. Science*, Vol.38 (6), 1996, pp. 633-648.
- [15] Hitchcock H., *Roll neck bearings*, New York. App. I. ASME, 1935.
- [16] Kaplanov V. I. , Prisyazhnyi A. G., Simulation of contact friction in the hot rolling of steel sheet, *Steel in Translation*, Vol. 38(9), 2008, pp.714-718.