ارائه‌ی پارامتر قابلیت کارسختی در فولادهای چندفازی پایه فریتی: شاخصی حساس به ریزساختار برای توصیف رفتار کارسختی کششی

میمنت سادات محسن زاده*

استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

چکیده

کارسختی نقشی کلیدی در تعیین پایداری کششی، افزایش طول یکنواخت و شکل‌پذیری فولادهای پیشرفته ایفا می‌کند. با این حال، در فولادهای چندفازی پایه فریتی، توان کارسختی هولومان اغلب توصیف محدودی از رفتار کارسختی ارائه می‌دهد؛ زیرا به‌شدت به بازه برازش انتخاب‌شده وابسته است و رفتار کلی کارسختی را منعکس نمی‌کند. در این پژوهش، پارامتر جدیدی تحت عنوان پارامتر قابلیت کارسختی (SHCP) پیشنهاد شده است تا مشخصه‌یابی جامع‌تر و فیزیکی‌تری از کارسختی کششی در فولادهای چندفازی ارائه دهد. مجموعه‌ای از ریزساختارها با مقدارهای مختلفی از فازهای فریت، سمنتیت و مارتنزیت از طریق فرآیند ترمومکانیکی کنترل‌شده و عملیات میان‌بحرانی تولید شدند. ویژگی‌های ریزساختاری آن‌ها مشخصه‌یابی شد و رفتار کششی ارزیابی گردید. SHCP بر اساس پاسخ کارسختی نرمال‌شده، در محدوده ی تغییر شکل موم‌سان یکنواخت تعریف شد. از این طریق به جای نشان دادن قابلیت کارسختی با یک توان منفرد وابسته به برازش، قابلیت کارسختی کلی ماده به صورت یکپارچه در نظر گرفته می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که SHCP به شدت به ریزساختار حساس است و به طور مؤثر فولادهایی با کسر حجمی مختلف فاز سخت و پاسخ تغییر شکل متفاوت را از یکدیگر متمایز می‌کند. بنابراین، پارامتر پیشنهادی یک چارچوب قابل تفسیر از نظر فیزیکی برای ارزیابی رفتار کارسختی و مقایسه عملکرد کششی فولادهای چندفازی پایه فریتی فراهم می‌کند.

واژگان کلیدی: پارامتر قابلیت کارسختی؛ فولادهای چندفازی پایه فریتی؛ کارسختی؛ رفتار کششی؛ ناهمگنی ریزساختاری، توان کارسختی هولومان.

A strain hardening capability parameter for ferrite-based multiphase steels: A microstructure-sensitive descriptor of tensile hardening behavior

Abstract

Strain hardening plays a critical role in controlling the tensile stability, uniform elongation, and formability of advanced steels. However, in ferrite-based multiphase steels, where deformation is governed by phase interaction, strain partitioning, and evolving internal stresses, the conventional Hollomon strain hardening exponent (n) often provides only a limited description of hardening

behavior because of its sensitivity to the selected fitting interval and its inability to represent the full hardening evolution. In the present study, a new parameter, termed the strain hardening capability parameter (SHCP), is introduced to provide a more comprehensive and physically meaningful characterization of tensile strain hardening in heterogeneous ferrite-based steels. A series of microstructures with different combinations of ferrite, cementite, and martensite were produced through controlled thermomechanical processing and subsequent intercritical treatment. Their microstructural features were characterized and correlated with tensile response under uniaxial loading. The SHCP was defined on the basis of the normalized hardening response over the uniform plastic deformation regime, thereby integrating the overall hardening capability of the material rather than representing it through a single fitting-dependent exponent. The results demonstrate that SHCP is highly sensitive to microstructural constitution and effectively distinguishes steels with different hard-phase fractions and deformation responses. In contrast to the conventional n-value, SHCP provides a more robust measure of the ability of multiphase steels to sustain hardening prior to necking. The proposed parameter therefore offers a physically interpretable and microstructure-sensitive framework for evaluating strain hardening behavior and for comparing the tensile performance of ferrite-based multiphase steels.

Keywords: Strain hardening capability parameter; Ferrite-based multiphase steels; Work hardening; Tensile behavior; Microstructural heterogeneity; Hollomon exponent.

۱- مقدمه

فولادهای پیشرفته با استحکام بالا (AHSS) همچنان نقشی محوری در توسعه سیستم‌های سازه‌ای سبک‌وزن و مقاوم در برابر ضربه ایفا می‌کنند؛ چرا که توازن خوبی میان استحکام، شکل‌پذیری، قابلیت شکل‌دهی و مقرون‌به‌صرفه بودن ارائه می‌دهند. در این فولادها، عملکرد مکانیکی نه تنها توسط کسر فازی، بلکه به واسطه نحوه ی توزیع، مورفولوژی و تفاوت رفتار مکانیکی فازهای تشکیل‌دهنده تعیین می‌شود که در مجموع، تقسیم تنش بین فازها و کارسختی را در طول تغییر شکل موم‌سان کنترل می‌کنند [۴-۱]. در میان خانواده‌های مختلف AHSS، فولادهای چندفازی بر پایه فریت از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند؛ زیرا رفتار کششی آن‌ها را می‌توان از طریق مقدارهای کنترل‌شده‌ای از فریت نرم و فازهای سخت‌تر نظیر مارتنزیت، بینیت، آستنیت باقیمانده یا اجزای حاوی کاربید، در دامنه وسیعی تنظیم کرد [۱, ۳, ۵].

یک عامل کلیدی که زیربنای کاربرد سازه‌ای فولادهای چندفازی را تشکیل می‌دهد، توانایی آن‌ها در حفظ سیلان موم‌سان پایدار پیش از شروع گلویی شدن است. این قابلیت به طور بنیادی با کارسختی مرتبط است که با افزایش مداوم تنش سیلان در حین تغییر شکل، ناپایداری موم‌سان را به تأخیر می‌اندازد [۶, ۷]. با این حال، در فولادهای ناهمگن، کارسختی توسط یک مکانیزم واحد کنترل نمی‌شود. در عوض، این پدیده از اثرات ترکیبی نابجایی‌های

ذخیره‌شده آماری، نابجایی‌های ضروری از لحاظ هندسی (GNDs)، ایجاد تنش داخلی و سخت‌شوندگی ناشی از تنش برگشتی حاصل از ناسازگاری مکانیکی میان نواحی ریزساختاری نرم و سخت نشأت می‌گیرد [۲, ۴, ۱۲–۸]. این اثرات به طور مداوم با کرنش تکامل می‌یابند و به ریزساختار بسیار حساس هستند. در نتیجه، فولادهایی با مجموعه‌های فازی متفاوت، ممکن است نه تنها سطوح استحکام متفاوتی داشته باشند، بلکه مسیرهای سخت‌شوندگی متمایزی را نیز حتی در صورت مشابه بودن انعطاف‌پذیری کششی کلی، از خود نشان دهند.

از آنجا که کارسختی نقشی محوری در پایداری کششی و عملکرد مهندسی دارد، تلاش‌های قابل توجهی به کمی‌سازی آن اختصاص یافته است. پرکاربردترین پارامتر همچنان توان کارسختی هولومان (n) است که از رابطه ی توانی بین تنش و کرنش به دست می‌آید [۱۳]. علیرغم اهمیت تاریخی و سادگی کاربردی، مقدار n در هنگام استفاده برای فولادهای چندفازی دارای محدودیت‌های شناخته‌شده‌ای است. در ریزساختارهای چندفازی، پاسخ سخت‌شوندگی اغلب به دلیل تغییر تعاملات فازی، بازتوزیع تدریجی تنش و تمرکز کرنش، در محدوده ی مومسان به صورت غیرخطی تکامل می‌یابد. در چنین شرایطی، مقدار n استخراج‌شده به شدت به بازه ی برازش انتخاب‌شده بستگی دارد و ممکن است به طور منحصربه‌فرد نماینده رفتار کامل سخت‌شوندگی ماده نباشد [۱۷–۱۴].

یک شاخص قوی برای کارسختی باید دو شرط را برآورده کند. نخست، باید ارتباط فیزیکی خود را با مسیر واقعی کارسختی که ماده در طول تغییر شکل کششی تجربه می‌کند، حفظ نماید. دوم، باید به اندازه کافی نسبت به تغییرات ریزساختاری حساس باشد تا بتواند فولادهایی با ترکیبات فازی متفاوت را به شیوه‌ای پیوسته و قابل تفسیر متمایز سازد. پارامترهای مرسوم وابسته به بازه، این الزامات را به طور کامل برآورده نمی‌کنند، به ویژه در مورد فولادهای چندفازی پایه فریتی که در آن‌ها پاسخ کارسختی ذاتا وابسته به کرنش و حساس به ریزساختار است.

با توجه به این محدودیت‌ها، پژوهش حاضر پارامتر جدیدی تحت عنوان پارامتر قابلیت کارسختی (SHCP) را به منظور کمی‌سازی بازده متوسط کارسختی نسبی در سراسر محدوده‌ی مومسان یکنواخت معرفی می‌کند. پارامتر SHCP از پاسخ نرمال‌شده کارسختی، θ/σ، استخراج شده و به گونه‌ای فرمول‌بندی شده است که روند کامل کارسختی وابسته به کرنش پیش از گلویی شدن را در بر گیرد، نه اینکه صرفا یک مقدار محلی یا برازشی محدود به یک بازه باشد. بر اساس این ساختار، پارامتر مذکور ارتباط مستقیم خود را با پایداری کششی حفظ می‌کند و در عین حال، پیوستگی کارسختی را در سراسر تغییر شکل یکنواخت در نظر می‌گیرد. این فرمول‌بندی به ویژه برای فولادهای ناهمگن پایه فریتی حائز اهمیت است؛ جایی که کارسختی به جای یک پاسخ ساختاری تک‌مرحله‌ای، بازتاب‌دهنده تعاملات در حال تکامل میان فازهای نرم و سخت است.

نوآوری این مطالعه صرفا در ارائه یک شاخص دیگر نیست، بلکه در تثبیت SHCP به عنوان شاخصی با قابلیت تفسیر فیزیکی و حساس به ریزساختار است که پیوندی میان رفتار کارسختی کششی و ترکیب فازی در فولادهای چندفازی پایه فریتی برقرار می‌کند. بر خلاف توان مرسوم هولومان، SHCP تحت کنترل انتخاب بازه‌ی برازش نیست و از این رو برای موادی که رفتار کارسختی آن‌ها با یک توان منفرد هولومان در سراسر ناحیه‌ی موم‌سان قابل توصیف نیست، مناسب‌تر است. مهم‌تر از آن، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که SHCP همبستگی قدرتمندی با کسر حجمی مارتنزیت و همچنین با پارامترهای کلیدی کششی نظیر تنش حقیقی در لحظه آغاز ناپایداری موم‌سان و کرنش حقیقی یکنواخت دارد. به این ترتیب، SHCP به عنوان یک چارچوب کاربردی برای مقایسه‌ی ریزساختارهای فولادی ناهمگن بر اساس قابلیت کارسختی مؤثر آن‌ها جایگاه خود را پیدا می‌کند.

بر این اساس، هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی رفتار کششی و پاسخ کارسختی فولادهای چندفازی پایه فریتی با ترکیبات فازی متفاوت و بررسی قابلیت SHCP در توصیف رفتار تغییر شکل آن‌ها به شیوه‌ای دارای مفهوم فیزیکی و وابسته به ریزساختار است. این پژوهش با تلفیق مشخصه‌یابی ریزساختاری، تحلیل تغییرات تنش حقیقی بر حسب کرنش حقیقی و مسیرهای کارسختی نرمال‌شده، قصد دارد نشان دهد که SHCP پایه و اساس قوی‌تری را نسبت به تحلیل مرسوم مقادیر n برای تمایز قابلیت کارسختی در سیستم‌های فولادی چندفازی فراهم می‌آورد.

۲- مواد و روش تحقیق

ماده‌ی مورد بررسی، یک ورق فولاد کم‌کربن با ضخامت۴/۶ میلی‌متر و با ترکیب شیمیایی (بر حسب درصد وزنی) شامل ۰/۱۶۵ کربن، ۱/۱۵ منگنز، ۰/۴۱۱ سیلیسیم، ۰/۰۱۸ فسفر، ۰/۰۱ گوگرد، ۰/۰۳۵ کروم، ۰/۰۶۶ نیکل و باقی‌مانده آهن بود. برای ایجاد ریزساختارهای پایه فریتی با ترکیب فازی متفاوت، نمونه‌های مستطیلی با ابعاد ۸۰ در ۱۵ میلی‌متر از ورق برش داده شده و تحت عملیات ترمومکانیکی کنترل‌شده قرار گرفتند. نمونه‌ها ابتدا در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه آستنیته شده و سپس در آب‌نمک و یخ کوئنچ شدند تا یک ساختار کاملا مارتنزیتی به دست آید. نمونه‌های مارتنزیتی متعاقبا نورد سرد شده و در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت تمپر شدند که این امر به تولید یک زمینه فریتی حاوی ذرات سمنتیت منجر گردید. برای تولید ریزساختارهای چندفازی با مقادیر متفاوتی از فاز سخت، تعدادی از نمونه ها تحت تاب‌کاری میان‌بحرانی در دمای ۷۴۰ درجه سانتی‌گراد برای زمان‌های نگهداری مختلف قرار گرفت و سپس در آب‌نمک و یخ کوئنچ شد. از طریق این فرآیند، مجموعه‌ای از ریزساختارهای پایه فریتی با کسرهای متفاوتی از فریت، سمنتیت و مارتنزیت به دست آمد.

مشخصه‌یابی ریزساختاری با استفاده از روش‌های استاندارد آماده‌سازی متالوگرافی انجام شد. نمونه‌ها سنباده‌زنی و پولیش شده و برای آشکارسازی فازهای تشکیل‌دهنده، با نایتال ۲ درصد اچ شدند. ریزساختارها توسط میکروسکوپ

نوری بررسی گردیدند و تحلیل کمی تصویر نیز با استفاده از نرم‌افزار کلمکس به منظور ارزیابی ویژگی‌های مشخصه‌ی ریزساختاری در فولادهای فرآوری‌شده انجام پذیرفت. برای تعیین کسر حجمی مارتنزیت، نمونه‌ها به روش لپرا نیز اچ شدند. در این روش، نمونه‌های فولادی به مدت ۷ تا ۱۲ ثانیه در محلولی متشکل از محلول آبی متابای‌سولفات سدیم ۱ درصد و اسید پیکریک ۴ درصد در اتانول با نسبت ۱ به ۱ اچ می‌شوند.

آزمون‌های کشش تک‌محوری در دمای محیط و مطابق با استاندارد ASTM E8 با استفاده از دستگاه آزمون جامع Zwick Z250 با نرخ کرنش ثابت $۰/۰۰۲\ s^{-1}$ صورت گرفت. در این آزمون‌ها، طول سنجه ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. داده‌های تنش مهندسی-کرنش مهندسی در سراسر محدوده ی تغییر شکل یکنواخت به منحنی‌های تنش حقیقی-کرنش حقیقی تبدیل شدند و به عنوان مبنایی برای ارزیابی خواص کششی و پاسخ کارسختی ریزساختارهای ایجادشده مورد استفاده قرار گرفتند.

۳- تعریف و محاسبه‌ی پارامتر قابلیت کارسختی (SHCP)

برای توصیف کمی پاسخ کلی کارسختی در طول تغییر شکل موم‌سان یکنواخت توسط یک شاخص پیوسته و نرمال‌شده، پارامتر قابلیت کارسختی (SHCP) به صورت زیر تعریف شد:

$$\mathrm{SHCP} = \frac{1}{\varepsilon_u}\int_0^{\varepsilon_u}\frac{\theta}{\sigma}d\varepsilon \qquad (۱)$$

که در آن σ تنش حقیقی، ε کرنش حقیقی، $\theta = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ نرخ کارسختی، و ε_u کرنش یکنواخت حقیقی در آغاز گلویی شدن است. در این رابطه، $\frac{\theta}{\sigma}$ نشان‌دهنده‌ی نرخ کارسختی نسبی است و بنابراین، SHCP میانگین قابلیت کارسختی نسبی را در کل محدوده‌ی موم‌سان یکنواخت مشخص می‌کند.

برخلاف پارامترهای سخت‌شدگی موضعی یا وابسته به بازه، SHCP به گونه‌ای طراحی شده است که تکامل تجمعی کارسختی را از پایان تسلیم تا شروع ناپایداری موم‌سان منعکس کند. به این ترتیب، این شاخص توصیفی پیوسته از پاسخ کارسختی را بدون نیاز به تقسیم‌بندی دلخواه منحنی تغییر شکل به مراحل مجزا ارائه می‌دهد. نرمال‌سازی توسط ε_u نیز تضمین می‌کند که این پارامتر به جای یک مقدار انباشته‌ی ساده، بیانگر میانگین قابلیت کارسختی است؛ و از این طریق، مقایسه مستقیم میان مواد و ریزساختارهایی که بازه‌های کرنش یکنواخت متفاوتی از خود نشان می‌دهند را امکان‌پذیر می‌سازد.

برای هر نمونه، SHCP از داده‌های تنش حقیقی-کرنش حقیقی و داده‌های متناظر $\theta - \varepsilon$ در محدوده‌ی موم‌سان یکنواخت تعیین شد. روند محاسبه شامل چهار مرحله بود. ابتدا، بازه‌ی کرنشی تغییر شکل موم‌سان یکنواخت، که از نقطه ی تسلیم آغاز شده و تا کرنش حقیقی متناظر با استحکام کششی نهایی امتداد می‌یابد، مشخص گردید. دوم، نرخ

کارسختی نسبی، $\frac{\theta_i}{\sigma_i}$، در هر نقطه داده‌ی آزمایشگاهی درون این بازه محاسبه شد. سوم، از تغییرات $\frac{\theta}{\sigma}$ نسبت به کرنش، در بازه‌ی کرنشی انتخاب‌شده انتگرال‌گیری شد. در نهایت، مقدار انتگرال‌گیری‌شده بر ε_u تقسیم (نرمال‌سازی) شد تا مقدار SHCP برای هر نمونه به دست آید. برای تعیین نرخ کارسختی ($\theta = d\sigma/d\varepsilon$) در هر نقطه از منحنی تنش-کرنش، ابتدا داده‌های تنش حقیقی-کرنش حقیقی در محدوده‌ی تغییر شکل موم‌سان یکنواخت (از نقطه‌ی تسلیم تا استحکام کششی نهایی) با یک تابع چندجمله ای به صورت $\sigma = A\varepsilon^6 + B\varepsilon^5 + C\varepsilon^4 + D\varepsilon^3 + E\varepsilon^2 + F\varepsilon + G$ برازش شد. ضریب تعیین (R^2) این برازش در تمامی نمونه‌ها مقداری بسیار نزدیک به یک بود که نشان‌دهنده‌ی کیفیت بالای تقریب است. سپس با مشتق‌گیری تحلیلی از رابطه‌ی چندجمله ای برازش‌شده، نرخ کارسختی در هر مقدار کرنش ε_i به صورت زیر محاسبه شد:

$$\theta_i = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}\Big|_{\varepsilon_i} = 6A\varepsilon^5 + 5B\varepsilon^4 + 4C\varepsilon^3 + 3D\varepsilon^2 + 2E\varepsilon + F \qquad (۲)$$

با داشتن مقادیر θ_i و σ_i در هر نقطه داده، نرخ کارسختی نسبی (θ_i/σ_i) برای تمامی نقاط داخل بازه‌ی کرنشی انتخاب‌شده محاسبه گردید. انتگرال عددی این کمیت نسبت به کرنش حقیقی با استفاده از قانون ذوزنقه‌ای بر روی مجموعه نقاط گسسته‌ی آزمایشگاهی محاسبه شد. بر این اساس، مساحت بین هر دو نقطه متوالی $(i, i+1)$ به صورت زیر به دست آمد:

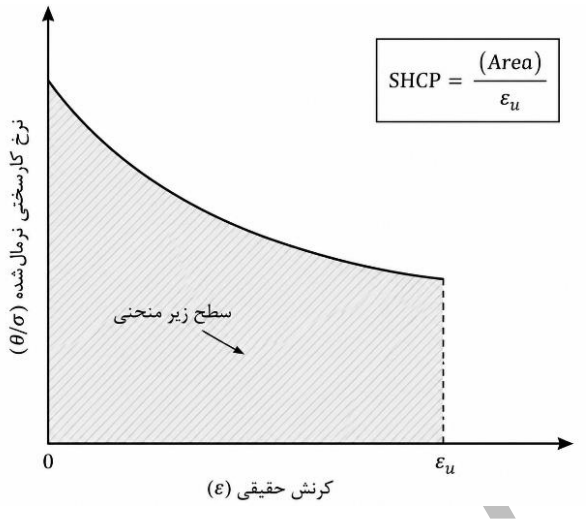
$$A_i = \frac{(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)}{2}\left(\frac{\theta_i}{\sigma_i} + \frac{\theta_{i+1}}{\sigma_{i+1}}\right) \qquad (۳)$$

و مقدار کل انتگرال از مجموع این مساحت‌های جزئی حاصل شد:

$$\int_{\varepsilon_y}^{\varepsilon_u} \frac{\theta}{\sigma}\, d\varepsilon \approx \sum_i A_i \qquad (۴)$$

با توجه به تعداد زیاد نقاط داده‌ی هر منحنی تنش-کرنش، دقت روش ذوزنقه‌ای در این محاسبات قابل قبول ارزیابی می‌شود. تمامی محاسبات ذکر شده با استفاده از نرم‌افزار مایکروسافت اکسل انجام گرفت.

از طریق این روند، SHCP معیاری با مفهوم فیزیکی و از نظر تحلیلی شفاف از قابلیت کلی کارسختی در طول تغییر شکل یکنواخت ارائه می‌دهد. نمایشی شماتیک از روش تعیین SHCP در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- تصویر شماتیک از روند تعیین پارامتر قابلیت کارسختی (SHCP). پارامتر SHCP به عنوان مساحت نرمال‌شده زیر منحنی $-\frac{\theta}{\sigma}$ در بازه تغییر شکل موم‌سان یکنواخت، از نقطه‌ی تسلیم تا آغاز گلویی شدن در ε_u تعریف می‌شود.

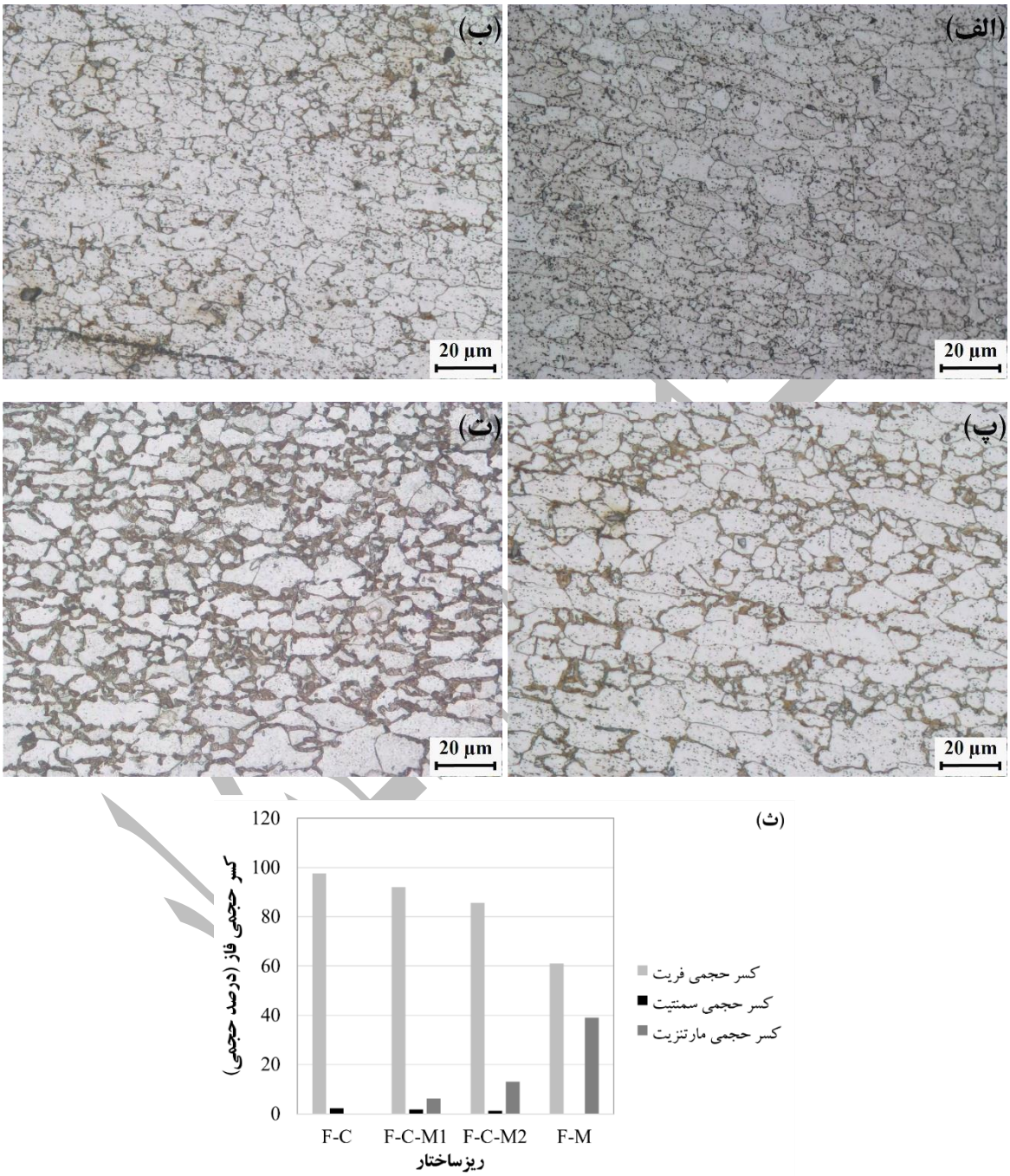
۴- نتایج و بحث

۴-۱- ساختار میکروسکوپی فولادهای مورد بررسی

شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فولادهای مورد بررسی را نشان می‌دهد. تمامی تصاویر ریزساختاری در شکل ۲، پس از اچ‌کردن با محلول نایتال ۲ درصد تهیه شده‌اند. برای اندازه‌گیری کمی کسر حجمی توسط نرم‌افزار تحلیل تصویر Clemex، به‌طور مجزا از محلول لپرا استفاده شد؛ شکل ۲-ث نمودار ستونی کسر حجمی هر یک از فازها را نمایش می دهد. چهار وضعیت ریزساختاری متمایز بر پایه فریت شناسایی شدند که عبارتند از: فریت-۲/۳٪ سمنتیت، فریت-۱/۸٪ سمنتیت-۶/۲ ٪ مارتنزیت، فریت-۱/۲ ٪ سمنتیت-۱۳/۱ ٪ مارتنزیت، و فریت-۳۹٪ مارتنزیت، که از این پس با نام‌های F-C، F-C-M1، F-C-M2، و F-M مشخص می‌شوند.

ریزساختار فریت-۲/۳٪ سمنتیت شامل زمینه فریتی حاوی ذرات ریز سمنتیت است که به صورت یکنواخت توزیع شده‌اند. در ریزساختارهای فریت-۱/۸ ٪ سمنتیت-۶/۲ ٪ مارتنزیت، و فریت-۱/۲ ٪ سمنتیت-۱۳/۱ ٪ مارتنزیت، فاز مارتنزیت نیز در ساختار تشکیل شده و هم‌زمان کسر حجمی ذرات ریز سمنتیت به دلیل شرکت در استحاله‌ی تشکیل مارتنزیت، کاهش یافته است. در نتیجه، این دو ریزساختار میانی شامل هر دو مورد ذرات سمنتیت پراکنده و جزایر

مارتنزیت قرارگرفته در زمینه‌ی فریتی هستند. در مقابل، مشخصه‌ی ریزساختار فریت–۳۹٪ مارتنزیت، حضور مارتنزیت در زمینه‌ی فریتی بدون وجود ذرات ریز سمنتیت قابل تشخیص است.



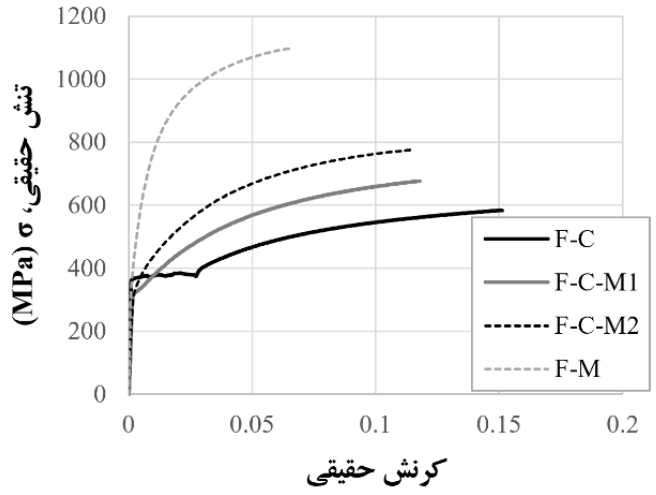
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری از فولادهای مورد بررسی (محلول حکاکی: نایتال ۲ درصد): (الف) F-C (فریت–۲/۳ ٪ سمنتیت)، (ب) F-C-M1 (فریت–۱/۸ ٪ سمنتیت–۶/۲ ٪ مارتنزیت)، (پ) F-C-M2 (فریت–۱/۲ ٪ سمنتیت–۱۳/۱ ٪ مارتنزیت)، و (ت) F-M فریت–۳۹٪ مارتنزیت؛ و ث) نمودار کسر حجمی فازها برای فولادهای مورد بررسی.

بر این اساس، مجموعه ریزساختاری مورد بررسی نه‌تنها شامل افزایش تدریجی کسر حجمی مارتنزیت است، بلکه تغییر هم‌زمان در حضور و مقدار ذرات ریز سمنتیت را نیز در بر می‌گیرد. این تمایز برای تحلیل‌های بعدی حائز اهمیت است؛ چرا که فولادهای مطالعه‌شده صرفا یک توالی دوتایی ساده از فریت–مارتنزیت را نشان نمی‌دهند، بلکه گستره‌ای از تشکیل فازهای فریت–سمنتیت، فریت–سمنتیت–مارتنزیت و فریت–مارتنزیت را شامل می‌شوند. چنین محدوده‌ی میکروسکوپی، مبنای مناسبی را برای بررسی تفاوت‌ها در پاسخ کششی و رفتار کارسختی در میان شرایط مورد بررسی فراهم می‌آورد.

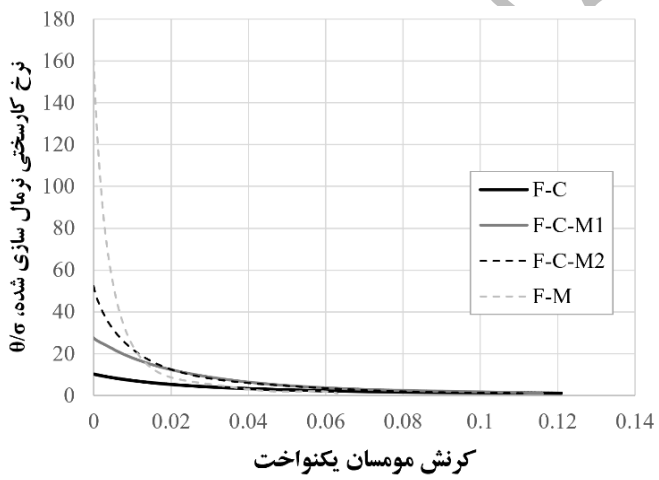
۲-۴- پاسخ کششی و قابلیت کارسختی فولادهای مورد بررسی

شکل ۳ منحنی‌های تنش حقیقی–کرنش حقیقی فولادهای مورد بررسی را نشان می‌دهد و شکل ۴ تغییرات نرخ کارسختی نرمال‌شده، θ/σ، را در محدوده‌ی تغییر شکل یکنواخت به تصویر می‌کشد. در هر دو شکل، پاسخ کششی به شدت به ترکیب فازی وابسته است.

فولاد F-C کم‌ترین تنش سیلان را در تمام محدوده‌ی کرنش، به همراه بیشترین کرنش حقیقی یکنواخت در میان شرایط بررسی‌شده نشان داد. منحنی تنش–کرنش آن با افزایش کرنش به تدریج صعود کرد که نشان‌دهنده پاسخ سخت‌شوندگی نسبتا پایدار اما متوسط است. با اضافه شدن فاز مارتنزیت، تنش سیلان به طور تدریجی افزایش یافت، به طوری‌که فولادهای F-C-M1 و F-C-M2 رفتاری میانی بین شرایط F-C و F-M از خود نشان دادند. فولاد F-M بالاترین سطح تنش را در طول تغییر شکل داشت، اما کرنش حقیقی یکنواخت آن کم‌تر از ریزساختار فریت–سمنتیت بود. این تکامل استحکام–انعطاف‌پذیری با اثر شناخته‌شده‌ی مارتنزیت بر افزایش استحکام و در عین حال کاهش انطباق کرنش در فولادهای چندفازی پایه فریت همخوانی دارد [۱۸, ۱۹].



شکل ۳- منحنی‌های تنش حقیقی-کرنش حقیقی فولادهای مورد بررسی با تشکیل فازهای مختلف.



شکل ۴- تکامل نرخ کارسختی نسبی نرمال‌شده (θ/σ) به عنوان تابعی از کرنش حقیقی در محدوده‌ی تغییر شکل یکنواخت برای فولادهای مورد بررسی.

منحنی‌های سخت‌شوندگی نرمال‌شده در شکل ۴، دیدگاه عمیق‌تری از رفتار تغییر شکل ارائه می‌دهند. برای تمامی فولادها، θ/σ در شروع سیلان مومسان در بالاترین حد بود و با افزایش کرنش به طور مداوم کاهش یافت. چنین رفتاری مورد انتظار است، زیرا تغییر شکل مومسان اولیه با تکثیر سریع نابجایی‌ها، انتقال مؤثر بار به جزایر مارتنزیت و بازدهی سخت‌شوندگی نسبتا بالا همراه است، در حالی که ادامه‌ی تغییر شکل با افزایش تنش سیلان، منجر به کاهش تدریجی نرخ سخت‌شوندگی نسبی به دلیل وقوع مکانیزم‌های آزادسازی مومسان می‌شود [۱۱]. با این حال، مقدار و تداوم θ/σ در میان ریزساختارهای بررسی‌شده به طور محسوسی متفاوت بود.

در میان فولادهای بررسی‌شده، حالت F-M بالاترین سطح سخت‌شوندگی نسبی را به‌ویژه در کرنش‌های پایین نشان داد و پس از آن F-C-M2 و F-C-M1 قرار گرفتند؛ در حالی که فولاد F-C کم‌ترین مقادیر θ/σ را در بیش‌تر محدوده‌ی تغییر شکل یکنواخت از خود نشان داد. این ترتیب با افزایش نقش مارتنزیت در ناهمگنی تغییر شکل، توسعه‌ی تنش داخلی و تقسیم‌بندی کرنش میان فاز زمینه نرم (فریت) و فاز ثانویه سخت‌تر سازگار است [۸, ۲۰]. در فولادهای دوفازی و فولادهای چندفازی پایه فریت مشابه، چنین ناهمگنی باعث افزایش ذخیره‌ی نابجایی‌ها، از جمله نابجایی‌های ضروری از لحاظ هندسی (GNDs) در نزدیکی مرز فازها شده و از این طریق پاسخ سخت‌شوندگی لحظه‌ای را تقویت می‌کند [۴, ۸]. نتایج حاضر نشان می‌دهد که این اثر با افزایش کسر مارتنزیت به تدریج قوی‌تر می‌شود.

در عین حال، مسیرهای سخت‌شوندگی در شکل ۴ نشان می‌دهند که پاسخ مکانیکی را نمی‌توان به طور کامل توسط یک شیب موضعی یا توصیف‌گری که از یک بازه‌ی کرنش محدود استخراج شده، مشخص کرد. اگرچه تمام منحنی‌های θ/σ با کرنش کاهش می‌یابند، اما آن‌ها نه تنها در مقادیر اولیه، بلکه در نرخ کاهش و میزان تغییر شکل یکنواختی که در آن سخت‌شوندگی پایدار می‌ماند، با هم تفاوت دارند. به طور خاص، فولاد F-C علیرغم سطح سخت‌شوندگی نسبی پایین‌تر، در محدوده‌ی کرنش بزرگ‌تری به طور یکنواخت تغییر شکل داد، در حالی که فولادهای حاوی مارتنزیت سخت‌شوندگی نسبی بسیار قوی‌تری را اما در فواصل کرنش یکنواخت کوتاه‌تری با افزایش میزان مارتنزیت نشان دادند. بنابراین، یک مقایسه‌ی فیزیکی معنادار مستلزم توصیف‌گری است که به طور هم‌زمان هم مقدار سخت‌شوندگی نسبی و هم تکامل آن را در کل محدوده‌ی موم‌سان یکنواخت ثبت کند.

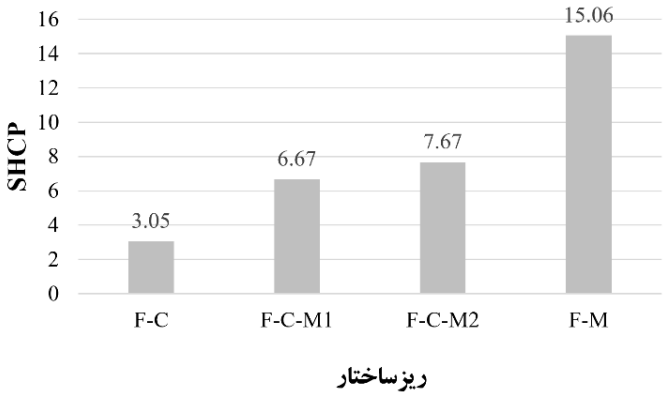
در این راستا، SHCP مبنای گویاتری برای مقایسه‌ی فولادهای مورد بررسی فراهم می‌کند. از آنجا که SHCP به عنوان مقدار متوسط θ/σ در محدوده‌ی کرنش حقیقی یکنواخت تعریف می‌شود، تمام مسیر سخت‌شوندگی را تا لحظه‌ی شروع ناپایداری در بر می‌گیرد، به جای آن‌که تنها بر بخش منتخبی از منحنی سیلان تأکید کند. این انتگرال‌گیری در کل محدوده به‌ویژه برای فولادهای چندفازی سودمند است. زیرا رفتار کارسختی آن‌ها اغلب به دلیل تغییر تقسیم کرنش، بازتوزیع تنش داخلی و ناسازگاری تغییر شکل میان فازهای تشکیل‌دهنده، به طور مداوم تغییر می‌یابد [۸, ۲۰, ۲۱].

به طور کلی، تفسیر ترکیبی شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد که فولادهای مورد بررسی مسیرهای کارسختی متمایزی را به عنوان تابعی از ترکیب فازی دنبال می‌کنند. فولاد F-C با استحکام کم‌تر و کارسختی نسبی پایین‌تر، اما کرنش یکنواخت بزرگ‌تر مشخص می‌شود. فولادهای F-C-M1 و F-C-M2 در یک محدوده‌ی میانی قرار می‌گیرند که در آن هم استحکام و هم کارسختی نسبی به واسطه‌ی حضور مارتنزیت تقویت شده‌اند. فولاد F-M بالاترین سطح تنش و قوی‌ترین پاسخ کارسختی نسبی را، ولو در یک فاصله‌ی کرنش یکنواخت کوتاه‌تر، از خود نشان می‌دهد. این تفاوت‌ها مبنای مکانیزمی را برای تحلیل SHCP که در بخش بعدی ارائه می‌شود، بنا می‌نهد.

۳-۴- ارتباط SHCP با پارامترهای ریزساختاری و پایداری کششی

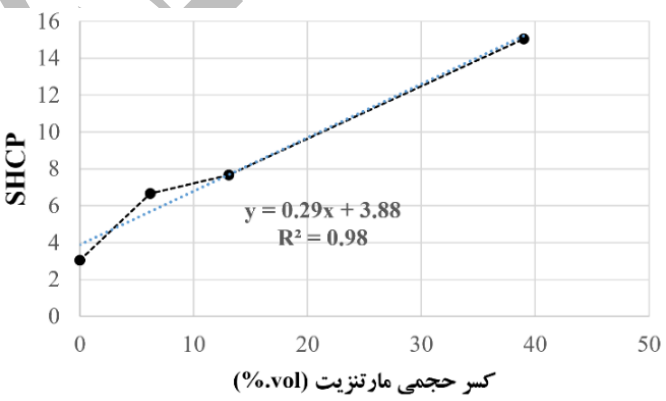
مقدارهای ظرفیت کارسختی (SHCP) محاسبه‌شده برای فولادهای مورد بررسی در شکل ۵ خلاصه شده است. با تغییر ریزساختار از فریت–سمنتیت به فریت–مارتنزیت، افزایش قابل‌توجهی در مقدار SHCP مشاهده شد. به‌طور مشخص، مقدار SHCP از ۳/۰۵ برای فولاد F-C به ۶/۶۷ برای F-C-M1، ۷/۶۷ برای F-C-M2 و ۱۵/۰۶ برای F-M افزایش یافت. این روند یکنواخت نشان می‌دهد که پارامتر SHCP – در محدوده‌ی ریزساختارهای مورد بررسی در پژوهش حاضر– حساسیت قابل توجهی به تغییرات ریزساختاری، به‌ویژه نقش فزاینده‌ی مارتنزیت در کنترل پاسخ کارسختی دارد.

افزایش مشاهده‌شده در مقدار SHCP تأیید می‌کند که پارامتر پیشنهادی به‌طور مؤثری بهبود قابلیت سخت‌شدگی نسبی وابسته به ریزساختار را نشان می‌دهد. اگرچه فولاد F-C بیشترین کرنش یکنواخت را از خود نشان داد، اما میانگین پاسخ کارسختی نرمال‌شده آن در محدوده‌ی موم‌سان یکنواخت نسبتا پایین باقی ماند که منجر به کوچک‌ترین مقدار SHCP شد. در مقابل، فولادهای حاوی مارتنزیت سطوح بسیار بالاتری از کارسختی نسبی را نشان دادند که علی‌رغم کاهش کرنش یکنواخت، باعث افزایش پاسخ تجمعی θ/σ شد. این روند به‌ویژه در فولاد F-M مشهود بود، جایی که کسر بالای مارتنزیت، بزرگ‌ترین میانگین قابلیت سخت‌شدگی را در میان تمامی شرایط مورد بررسی ایجاد کرد. چنین رفتاری با نقش شناخته‌شده ی مارتنزیت در افزایش کنتراست فازی، افزایش ناسازگاری تغییر شکل، و افزایش تجمع نابجایی‌ها و توسعه‌ی تنش برگشتی در ریزساختارهای چندفازی فریتی همخوانی دارد [۴, ۸, ۲۱].



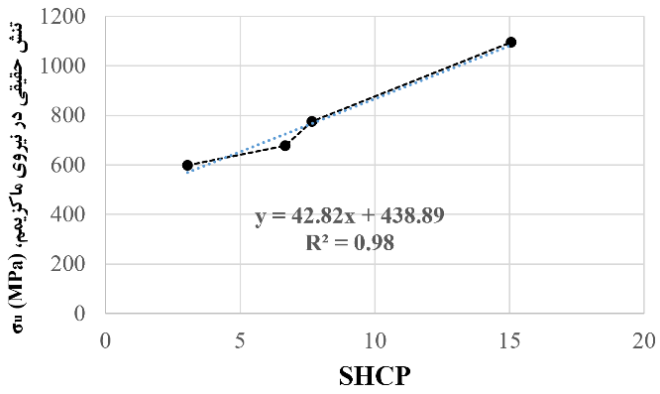
شکل ۵- مقادیر SHCP محاسبه‌شده برای فولادهای مورد بررسی که نشان‌دهنده اثر تشکیل فازها بر میانگین قابلیت کارسختی است.

همبستگی قوی بین SHCP و کسر حجمی مارتنزیت در شکل ۶ نشان داده شده است. این رابطه‌ی تقریبا خطی با ضریب تعیین نزدیک به ۰/۹۸، نشان می‌دهد که SHCP در مجموعه‌ی ریزساختاری فعلی، به‌صورت سیستماتیک با مقدار مارتنزیت تغییر می‌کند. این نتیجه از آن جهت حائز اهمیت است که نشان می‌دهد SHCP صرفا یک تبدیل ریاضی از منحنی کشش نیست، بلکه توصیف‌گری با حساسیت ریزساختاری آشکار است. در فولادهای مورد بررسی، افزایش مقدار مارتنزیت باعث تشدید تقسیم‌بندی کرنش بین زمینه فریت و جزء سخت‌تر می‌شود و از این طریق پاسخ کارسختی نسبی را در حین تغییر شکل موم‌سان یکنواخت افزایش می‌دهد [۸، ۲۰]. پارامتر SHCP بازتاب‌دهنده‌ی پیامد تجمعی این اثرات در کل بازه‌ی کرنش یکنواخت است.



شکل ۶- رابطه‌ی بین SHCP و کسر حجمی مارتنزیت برای فولادهای مورد بررسی. برازش خطی نشان‌دهنده همبستگی قوی بین SHCP و مقدار مارتنزیت است.

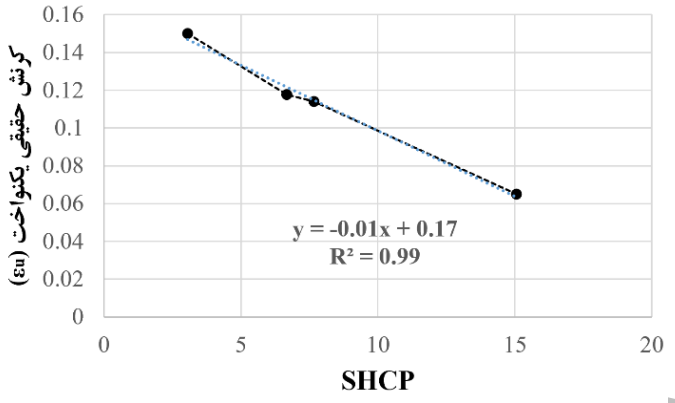
رابطه‌ی بین SHCP و پایداری کششی را می‌توان از طریق همبستگی آن با تنش حقیقی در شروع ناپایداری موم‌سان (σ_u) و کرنش یکنواخت حقیقی (ε_u) بیش‌تر ارزیابی کرد. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، SHCP به‌صورت خطی با σ_u افزایش یافت (با ضریب تعیین تقریبا ۰/۹۸). این روند پیشنهاد می‌کند فولادهایی که قادر به تحمل سطوح تنش بالاتر تا زمان شروع گلویی‌شدن هستند، میانگین قابلیت سخت‌شدگی نسبی بالاتری را نیز در طول تغییر شکل یکنواخت نشان می‌دهند. چنین تناظری از نظر فیزیکی منطقی است، زیرا پایداری کششی در فلزات اساسا با رقابت بین کارسختی و افزایش تنش سیلان در طول کرنش موم‌سان مرتبط است، همان‌گونه که در معیار کلاسیک کانسیدره بیان شده است. از آنجا که SHCP از پاسخ تجمعی θ/σ مشتق شده است، به‌طور طبیعی این پیوند بین بازدهی سخت‌شوندگی و پایداری کششی را حفظ می‌کند.



شکل ۷- همبستگی بین SHCP و تنش حقیقی در شروع ناپایداری موم‌سان (σ_u) برای فولادهای مورد بررسی.

در مقابل، شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش کرنش یکنواخت حقیقی، مقدار SHCP کاهش یافته است که در این مورد نیز ضریب تعیین بسیار بالایی (R^2=۰/۹۹) مشاهده می‌شود. اگرچه کرنش یکنواخت بزرگ اغلب با شکل‌پذیری کششی مطلوب مرتبط دانسته می‌شود، اما روند معکوس فعلی بر تمایز مهمی میان میزان تغییر شکل یکنواخت و میانگین بازدهی کارسختی در آن بازه تأکید دارد. فولاد F-C در محدوده‌ی کرنش وسیع‌تری به‌طور یکنواخت تغییر شکل یافت، اما سطح سخت‌شدگی نرمال‌شده نسبتا پایینی داشت. در مقابل، فولادهای حاوی مارتنزیت، به‌ویژه F-M، علی‌رغم مقادیر کمتر ε_u، سخت‌شدگی نسبی بسیار قوی‌تری از خود نشان دادند. بنابراین، SHCP نباید به عنوان جایگزینی برای خود افزایش طول یکنواخت تفسیر شود؛ بلکه این پارامتر تعیین می‌کند که ماده به‌طور میانگین در سرتاسر محدوده‌ی موم‌سان یکنواخت، تا چه حد به‌طور مؤثر سخت می‌شود. این تمایز به‌ویژه برای فولادهای چندفازی

ناهمگن که در آن‌ها بازدهی بالای سخت‌شدگی می‌تواند ناشی از تقسیم کرنش شدید باشد (حتی زمانی که کرنش یکنواخت محدود است)، اهمیت دارد [۸, ۲۰, ۲۱].

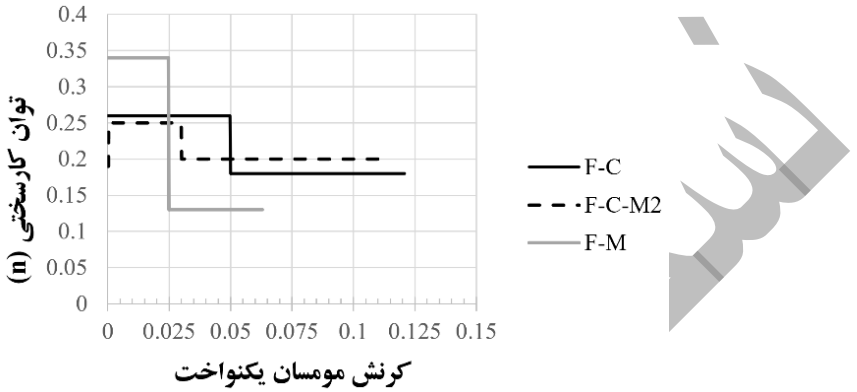


شکل ۸- همبستگی بین SHCP و کرنش یکنواخت حقیقی (ε_u) برای فولادهای مورد بررسی.

اهمیت SHCP زمانی روشن‌تر می‌شود که به‌صورت مفهومی با توان کارسختی متعارف (n) مقایسه شود. هرچند مدل هولومان یک توان n ثابت برای کل محدوده‌ی مومسان یکنواخت فرض می‌کند، اما منحنی‌های نرخ کارسختی نرمال‌شده (θ/σ) در شکل ۴ نشان می‌دهند که این نسبت در طول تغییر شکل به‌طور پیوسته تغییر می‌کند. بنابراین، مقدار n استخراج‌شده از برازش $\sigma = K\varepsilon^n$، به بازه‌ی کرنش انتخاب‌شده برای برازش بستگی دارد و نمی‌تواند نماینده‌ی منحصربه‌فرد رفتار کارسختی کامل باشد [۱۴, ۱۵]. شکل ۹ تغییرات n نسبت به کرنش مومسان یکنواخت را برای فولادهای مورد بررسی نشان می‌دهد که با استفاده از داده‌های ترسیم‌شده از تحلیل‌های گزارش‌شده قبلی (جهت اهداف مقایسه‌ای) تهیه شده است [۱۵]. مقادیر n نمایش‌داده‌شده در شکل ۹ این ویژگی را بازتاب می‌دهند: آن‌ها میانگین‌هایی هستند که بر پایه‌ی یک بازه‌ی برازش مشخص به دست آمده‌اند.

در این چارچوب، مزیت اصلی SHCP این است که با انتگرال‌گیری از پاسخ سخت‌شدگی نسبی نرمال‌شده در کل محدوده‌ی مومسان یکنواخت، از وابستگی به بازه اجتناب می‌کند. SHCP به‌جای تکیه بر شیب موضعی یا یک توان برازش‌شده از ناحیه‌ی محدودی از منحنی تنش-کرنش، یک معیار عددی پیوسته و غیرقطعه‌بندی‌شده از میانگین قابلیت سخت‌شدگی ارائه می‌دهد. این ویژگی به‌ویژه برای فولادهای چندفازی پایه فریتی مفید است، جایی که پاسخ کارسختی به‌شدت تحت تأثیر تکامل برهم‌کنش‌های فازی است و بنابراین ممکن است به‌درستی توسط مدل هولومان،

که یک توان کارسختی ثابت در سراسر محدوده‌ی مومسان یکنواخت فرض می‌کند، تقریب زده نشود [۸, ۲۰, ۲۱]. شایان ذکر است که هدف از مقایسه‌ی فعلی، بازبینی جزئیات روش‌شناسی متعارف مقدار n نیست، بلکه نشان دادن این مطلب است که SHCP توصیف‌گر وسیع‌تر و قوی‌تری برای ریزساختارهایی که سیلان مومسان ناهمگن دارند، ارائه می‌دهد.



شکل ۹- تغییرات توان کارسختی (n) نسبت به کرنش مومسان یکنواخت برای فولادهای مورد بررسی که جهت مقایسه با توصیف مبتنی بر SHCP نشان داده شده است. (بازترسیم‌شده از مرجع [۱۵] با استفاده از داده‌های گزارش‌شده قبلی).

به‌طور کلی، نتایج فعلی نشان می‌دهند که SHCP همبستگی قوی با کسر حجمی مارتنزیت و شاخص‌های پایداری کششی مانند σ_u و ε_u دارد. مهم‌تر از آن، SHCP فولادهای مورد بررسی را به گونه‌ای متمایز می‌کند که هم از نظر مکانیکی معنادار است و هم با مسیرهای کامل کارسختی آن‌ها مطابقت دارد. این یافته‌ها استفاده از SHCP را به عنوان یک توصیف‌گر کمی و مستحکم برای مقایسه‌ی قابلیت کارسختی در فولادهای چندفازی پایه فریتی تأیید می‌کنند.

۵- نتیجه‌گیری

پارامتر جدیدی تحت عنوان قابلیت کارسختی (SHCP) برای کمی‌سازی بازدهی متوسط کارسختی نسبی در کل محدوده‌ی مومسان یکنواخت فولادهای چندفازی پایه فریت معرفی شد. نتایج نشان داد که SHCP به طور سیستماتیک با افزایش کسر حجمی مارتنزیت افزایش یافته و همبستگی شدیدی با تنش حقیقی در لحظه‌ی شروع ناپایداری و همچنین کرنش حقیقی یکنواخت از خود نشان می‌دهد؛ امری که تأییدکننده حساسیت صریح این پارامتر به ترکیب ریزساختاری و پاسخ کششی است. برخلاف توان کارسختی هولومان (n) که به بازه‌ی برازش انتخاب‌شده بستگی دارد و ممکن است نتواند رفتار سخت‌شوندگی را که دائما در حال تحول است به‌طور منحصربه‌فرد نشان

دهد، SHCP تمام مسیر سخت‌شوندگی نرمال‌شده را پیش از گلویی شدن در قالب یک پارامتر عددی واحد ثبت می‌کند. از این رو، چارچوب پیشنهادی مبنایی مستحکم‌تر و از نظر فیزیکی معنادارتر برای مقایسه‌ی قابلیت کارسختی در ریزساختارهای فولادی ناهمگن فراهم آورده و ابزاری کاربردی جهت ارزیابی و طراحی فولادهای پیشرفته با استحکام بالا ارائه می‌دهد.

مراجع

[۱] O. Bouaziz, H. Zurob, and M. Huang, "Driving force and logic of development of advanced high strength steels for automotive applications," *Steel research international,* vol. 84, no. 10, pp. 937-947, 2013.

[۲] P. Jacques, Q. Furnémont, F. Lani, T. Pardoen, and F. Delannay, "Multiscale mechanics of TRIP-assisted multiphase steels: I. Characterization and mechanical testing," *Acta Materialia,* vol. 55, no. 11, pp. 3681-3693, 2007.

[۳] D. K. Matlock, J. G. Speer, E. De Moor, and P. J. Gibbs, "Recent developments in advanced high strength sheet steels for automotive applications: an overview," *Jestech,* vol. 15, no. 1, pp. 1-12, 2012.

[۴] C. C. Tasan *et al.*, "Integrated experimental–simulation analysis of stress and strain partitioning in multiphase alloys ",*Acta Materialia,* vol. 81, pp. 386-400, 2014.

[۵] D. Ivkovic, D. Adamovic, D. Arsić, N. Ratkovic, A. Mitrović, and R. Nikolic, "Review of the advanced high-strength steels used in automotive industry," 2023.

[۶] F. Ozturk, A. Polat, S. Toros, and R. Picu" ,Strain hardening and strain rate sensitivity behaviors of advanced high strength steels," *Journal of Iron and Steel Research International,* vol. 20, no. 6, pp. 68-74, 2013.

[۷] E. I. Samuel, B. Choudhary, and K. B. S. Rao, "Inter-relation between true stress at the onset of necking and true uniform strain in steels–A manifestation of onset to plastic instability," *Materials Science and Engineering: A,* vol. 480, no. 1-2, pp. 506-509, 2008.

[۸] M. Calcagnotto, D. Ponge, E. Demir, and D. Raabe, "Orientation gradients and geometrically necessary dislocations in ultrafine grained dual-phase steels studied by 2D and 3D EBSD," *Materials Science and Engineering: A,* vol. 527, no. 10-11, pp. 2738-2746, 2010.

[۹] X. Liu *et al.*, "Back-stress-induced strengthening and strain hardening in dual-phase steel," *Materialia,* vol. 7, p. 100376, 2019.

[۱۰] Y. Zhu *et al.*, "Heterostructured materials: superior properties from hetero-zone interaction," *Materials Research Letters,* vol. 9, no. 1, pp. 1-31, 2021.

[۱۱] M. Mohsenzadeh and M. Mazinani, "The effect of particles size on work hardening behavior of a low carbon steel with a composite-type microstructure," *Materials Science and engineering: a,* vol. 702, pp. 113-124, 2017.

[۱۲] X. Wu and Y. Zhu, "Heterogeneous materials: a new class of materials with unprecedented mechanical properties," in *Heterostructured Materials*: Jenny Stanford Publishing, 2021, pp. 3-16.

[۱۳] J. H. Hollomon, "Tensile deformation," *Aime Trans,* vol. 12, no. 4, pp. 1-22, 1945.

[۱۴] A. Lavakumar, S. S. Sarangi, V. Chilla, D. Narsimhachary, and R. K. Ray, "A “new” empirical equation to describe the strain hardening behavior of steels and other metallic materials," *Materials Science and Engineering: A,* vol. 802, p. 140641, 2021.

[۱۵] M. Mohsenzadeh, "Justification of the changes in Work hardening exponent Based on Micro-MechanisMs of deforMation in a plain carBon steel," *Archives of Metallurgy and Materials,* pp. 997-1003-997-1003, 2024.

[۱۶] K. Samuel, "Limitations of Hollomon and Ludwigson stress–strain relations in assessing the strain hardening parameters," *Journal of Physics D: Applied Physics,* vol. 39, no. 1, pp. 203-212, 2006.

[۱۷] M. Yang, Y. Pan, F. Yuan, Y. Zhu, and X. Wu, "Hetero-deformation-induced strengthening and strain hardening in gradient structure," in *Heterostructured Materials*: Jenny Stanford Publishing, 2021, pp. 105-118.

[۱۸] H. Ashrafi, M. Shamanian, R. Emadi, and N. Saeidi, "Correlation of tensile properties and strain hardening behavior with martensite volume fraction in dual-phase steels," *Transactions of the Indian Institute of Metals,* vol. 70, no. 6, pp. 1575-1584, 2017.

[۱۹] P. Chen *et al.*, "Duplex-Phase Fe-Mn-Al-C Low-Density Steels: A Review on Their Alloy Design, Processing, Mechanical and Application Performances," *Materials,* vol. 19, no. 5, p. 953, 2026.

[۲۰] J. Zhang, H. Di, Y. Deng, and R. Misra, "Effect of martensite morphology and volume fraction on strain hardening and fracture behavior of martensite–ferrite dual phase steel," *Materials Science and Engineering: A,* vol ,٦٢٧ .pp. 230-240, 2015.

[۲۱] E. Demir, D. Raabe, N. Zaafarani, and S. Zaefferer, "Investigation of the indentation size effect through the measurement of the geometrically necessary dislocations beneath small indents of different depths using EBSD tomography," *Acta Materialia,* vol. 57, no. 2, pp. 559-569, 2009.

واژه نامه

ردیف	اصطلاح تخصصی در متن (فارسی)	معادل انگلیسی (English Equivalent)
۱	آستنیت باقی‌مانده	Retained Austenite
۲	آستنیته کردن	Austenitizing (Austenitization)
۳	آنالیز کمی تصویر	Quantitative Image Analysis
۴	تابکاری میان‌بحرانی (عملیات حرارتی میان‌بحرانی)	Intercritical Annealing / Intercritical Treatment
۵	اچ کردن (حکاکی) / اچ لپرا	Etching / LePera Etching
۶	استحکام	Strength
۷	استحکام کششی نهایی (UTS)	Ultimate Tensile Strength (UTS)
۸	اسید پیکریک	Picric Acid
۹	افزایش طول یکنواخت	Uniform Elongation
۱۰	آماده‌سازی متالوگرافی	Metallographic Preparation
۱۱	انتقال بار مؤثر	Effective Load Transfer
۱۲	آزمون کشش تک‌محوری	Uniaxial Tensile Test
۱۳	بازتوزیع تنش داخلی	Internal Stress Redistribution
۱۴	بازدهی سخت‌شوندگی (کارسختی)	Hardening Efficiency
۱۵	بازه‌ی برازش / بازه‌ی برازش انتخاب‌شده	Fitting Range / Selected Fitting Range
۱۶	بازه‌ی کرنش	Strain Range
۱۷	بازه‌ی موم‌سان یکنواخت	Uniform Plastic Range
۱۸	برهم‌کنش‌های فازی	Phase Interactions
۱۹	تابع چندجمله ای	Polynomial Function
۲۰	ترکیب ریزساختاری	Microstructural Constitution
۲۱	ترکیب شیمیایی	Chemical Composition
۲۲	تضاد مکانیکی	Mechanical Contrast
۲۳	تکامل استحکام-شکل‌پذیری	Strength-Ductility Evolution
۲۴	تکامل تجمعی کارسختی	Cumulative Evolution of Strain Hardening
۲۵	تکثیر نابجایی‌ها	Dislocation Multiplication
۲۶	تمرکز کرنش (موضعی‌شدن کرنش)	Strain Localization (Strain Concentration)
۲۷	تمپر کردن (برگشت دادن)	Tempering
۲۸	تنش برگشتی	Back Stress
۲۹	تنش حقیقی	True Stress

۳۰	تنش حقیقی در شروع ناپایداری موم‌سان	True Stress at the Onset of Plastic Instability
۳۱	تنش داخلی	Internal Stress
۳۲	تنش سیلان	Flow Stress
۳۳	تنش مهندسی	Engineering Stress
۳۴	توان کارسختی هولومان	Hollomon Strain Hardening Exponent
۳۵	توزیع فازی	Phase Distribution
۳۶	توزیع یکنواخت	Uniform Distribution
۳۷	تغییر شکل موم‌سان (پلاستیک)	Plastic Deformation
۳۸	تغییر شکل موم‌سان یکنواخت	Uniform Plastic Deformation
۳۹	تغییر شکل ناهمگن	Deformation Heterogeneity
۴۰	تقسیم‌بندی تنش	Stress Partitioning
۴۱	تقسیم‌بندی کرنش	Strain Partitioning
۴۲	جزایر مارتنزیتی	Martensite Islands
۴۳	سیلان موم‌سان (پلاستیک) پایدار	Stable Plastic Flow
۴۴	چارچوب پیشنهادی	Proposed Framework
۴۵	چندفازی	Multiphase
۴۶	حساس به ریزساختار	Microstructure-Sensitive
۴۷	خواص کششی	Tensile Properties
۴۸	درصد وزنی	Weight Percent (wt.%)
۴۹	دستگاه تست کشش یونیورسال	Universal Testing Machine
۵۰	دمای محیط (دمای اتاق)	Ambient Temperature (Room Temperature)
۵۱	ذرات ریز سمنتیت	Fine Cementite Particles
۵۲	ذرات سمنتیت پراکنده	Dispersed Cementite Particles
۵۳	ذخیره‌سازی (تجمع) نابجایی‌ها	Dislocation Storage (Accumulation)
۵۴	رفتار کارسختی کششی	Tensile Strain Hardening Behavior
۵۵	رفتار کششی	Tensile Behavior
۵۶	روند یکنواخت	Monotonic Trend
۵۷	ریزساختار / ویژگی‌های ریزساختاری	Microstructure / Microstructural Features
۵۸	ریزساختارهای فولادی ناهمگن	Heterogeneous Steel Microstructures
۵۹	زمان نگهداری (هم‌دمایی)	Holding Time (Soaking Time)
۶۰	زمینه‌ی فریتی	Ferritic Matrix
۶۱	سخت‌شوندگی ناشی از تنش برگشتی	Back-Stress Hardening

نسخه پیش انتشار

۶۲	سمنتیت	Cementite
۶۳	سنباده‌زنی	Grinding
۶۴	سیلان موم‌سان (پلاستیک)	Plastic Flow
۶۵	شکل‌پذیری	Formability
۶۶	انعطاف‌پذیری کششی	Tensile Ductility
۶۷	شیب موضعی	Local Slope
۶۸	طول سنجه	Gauge Length
۶۹	عملیات حرارتی-مکانیکی (ترمومکانیکی) کنترل‌شده	Thermo-Mechanically Controlled Processing (TMCP)
۷۰	عملکرد کششی	Tensile Performance
۷۱	فاز ثانویه (فاز دوم)	Secondary Phase (Second Phase)
۷۲	فاز سخت	Hard Phase
۷۳	فازهای تشکیل‌دهنده	Constituent Phases
۷۴	فرآیند (استحاله) مارتنزیتی	Martensitic Transformation
۷۵	فریت	Ferrite
۷۶	فولاد کم‌کربن	Low-Carbon Steel
۷۷	فولادهای پیشرفته با استحکام بالا	Advanced High-Strength Steels (AHSS)
۷۸	فولادهای چندفازی پایه فریتی	Ferrite-Based Multiphase Steels
۷۹	فولادهای دوفازی	Dual-Phase (DP) Steels
۸۰	قابلیت کارسختی / قابلیت کارسختی مؤثر	Strain Hardening Capability / Effective Strain Hardening Capability
۸۱	پارامتر قابلیت کارسختی	Strain Hardening Capability Parameter (SHCP)
۸۲	پاسخ تغییر شکل	Deformation Response
۸۳	پاسخ سخت‌شوندگی لحظه‌ای	Instantaneous Hardening Response
۸۴	پاسخ کارسختی نرمال‌شده	Normalized Strain Hardening Response
۸۵	پاسخ کششی	Tensile Response
۸۶	پایداری کششی	Tensile Stability
۸۷	انطباق کرنش	Strain Accommodation
۸۸	پولیش‌کاری	Polishing
۸۹	کاربید / اجزای حاوی کاربید	Carbide / Carbide-Containing Constituents
۹۰	کارسختی (کرنش‌سختی)	Work Hardening (Strain Hardening)
۹۱	کارسختی نسبی	Relative Strain Hardening
۹۲	کرنش حقیقی	True Strain

۹۳	کرنش حقیقی یکنواخت	Uniform True Strain / True Uniform Strain
۹۴	کرنش مهندسی	Engineering Strain
۹۵	کسر حجمی / کسر فازی	Volume Fraction / Phase Fraction
۹۶	کسر حجمی مارتنزیت	Martensite Volume Fraction
۹۷	کمی‌سازی	Quantification
۹۸	کوئنچ‌کردن (سرد کردن سریع)	Quenching
۹۹	گلویی‌شدن (شروع گلویی‌شدن)	Necking (Onset of Necking)
۱۰۰	لحظه‌ی شروع ناپایداری	Onset of Instability
۱۰۱	مارتنزیت	Martensite
۱۰۲	محلول آبی	Aqueous Solution
۱۰۳	مرزهای فازی (مرزهای بین‌فازی)	Phase Boundaries (Interphase Boundaries)
۱۰۴	معیار کانسیدره	Considère Criterion
۱۰۵	مقاوم در برابر تصادف (ضربه‌پذیر)	Crash-Resistant (Crashworthy)
۱۰۶	مقایسه معنادار از نظر فیزیکی	Physically Meaningful Comparison
۱۰۷	مکانیزم‌های آزادسازی موم‌سان	Plastic Relaxation Mechanisms
۱۰۸	مورفولوژی (ریخت‌شناسی)	Morphology
۱۰۹	میانگین قابلیت سخت‌شدگی	Average Hardening Capability
۱۱۰	میکروسکوپ نوری	Optical Microscopy (OM)
۱۱۱	نابجایی‌های ذخیره‌شده از لحاظ آماری	Statistically Stored Dislocations (SSDs)
۱۱۲	نابجایی‌های ضروری از نظر هندسی	Geometrically Necessary Dislocations (GNDs)
۱۱۳	ناپایداری موم‌سان (پلاستیک)	Plastic Instability
۱۱۴	ناسازگاری تغییر شکل / ناسازگاری مکانیکی	Deformation Incompatibility / Mechanical Incompatibility
۱۱۵	ناهمگن / ناهمگنی ریزساختاری	Heterogeneous / Microstructural Heterogeneity
۱۱۶	نرخ کارسختی/ نرخ کارسختی نسبی	Strain Hardening Rate / Relative Strain Hardening Rate
۱۱۷	نرخ کرنش	Strain Rate
۱۱۸	نرم‌افزار کلمکس	Clemex Software (Clemex Vision)
۱۱۹	نرمال‌سازی	Normalization
۱۲۰	نقاط داده‌ی گسسته	Discrete Data Points
۱۲۱	نقطه تسلیم	Yield Point
۱۲۲	نورد سرد	Cold Rolling
۱۲۳	نایتال	Nital

۱۲۴	همبستگی / همبستگی شدید (قوی)	Correlation / Strong Correlation
۱۲۵	وابسته به کرنش	Strain-Dependent
۱۲۶	مشخصه‌یابی	Characterization

نسخه پیش انتشار