

## ارتباط بین کرنش دوقلوبی و پدیده‌ی چروکیدگی سطحی در تغییر شکل مومسان فولاد آستنیتی منگنزی\*

مجید عباسی<sup>(۱)</sup> شهرام خیراندیش<sup>(۲)</sup> جلال حجازی<sup>(۳)</sup> یوسف خرازی<sup>(۴)</sup>

## چکیده

در این مقاله، ارتباط بین پدیده‌های چروکیدگی و ترک‌دار شدن سطحی با کرنش دوقلوبی در تغییر شکل مومسان فولاد هادفیلد بررسی شده است. نقش عواملی مانند انرژی نقص چیدمان و میزان کرنش دوقلوبی در تحلیل این رفتار بررسی می‌شود. نمونه‌هایی از فولاد هادفیلد با مقادیر مشخصی از کربن، منگنز و آلومینیم (یعنی با انرژی‌های نقص چیدمان متفاوت)، به روش ریخته‌گری دقیق تولید شدند. نمونه‌ها در دمای محیط تحت آزمون کشش قرار گرفتند. چروکیدگی و ایجاد ترک‌های سطحی به همراه سازوکارهای تغییر شکل مومسان این فولادها، با استفاده از میکروسکپ‌های نوری و الکترونی روبشی ارزیابی شدند. مشاهدات نشان دادند که چروکیدگی در فولادهای آستنیتی منگنزی با سازوکار کرنش دوقلوبی در آن‌ها مرتبط است. این سازوکار تغییر شکل به‌علت ایجاد کرنش حجمی و چرخش دانه‌ها، سبب چروکیدگی سطوح آزاد دانه‌ها و در ادامه‌ی آن، ترک‌دار شدن نمونه شدند. افزون بر این، مشاهده شد که این چروکیدگی و ترک‌دار شدن با افزایش کرنش، بیش‌تر و خشن‌تر می‌شوند.

**واژه‌های کلیدی** چروکیدگی، دوقلوبی، فولاد آستنیتی منگنزی، انرژی نقص چیدمان.

### Correlation between Twinning and Surface Rumpling Phenomenon during Plastic Deformation of Austenitic Manganese Steel

M. Abbasi Sh. Kheirandish J. Hejazi Y. Kharrazi

**Abstract**

*In this paper, the correlation between the surface rumpling and cracking phenomena with twinning mechanism during plastic deformation of Hadfield steel has been investigated. The effect of stacking fault energy and the amount of strain are evaluated. The experimental samples with specific amounts of carbon, manganese and aluminum resulting in different stacking fault energies, were produced using investment casting process. The tensile tests were conducted at ambient temperature. The microscopic and macroscopic investigations were done using optical and scanning electron microscopes. The observations have shown that surface crinkling of austenitic manganese steels is related to twinning mechanism during plastic deformation. This plastic deformation mechanism causes rotation and inhomogeneous deformation of the grains and therefore, surface grains with free surfaces were becoming more crinkled and cracked. It was observed that crinkling and cracking phenomena takes place more and coarser with an increase in the strain.*

**Key Words** Rumpling, Twinning, Austenitic Manganese steel, Stacking fault energy.

\*نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۰/۰۶/۰۷ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۲/۱۱/۲۸ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(۲) استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

(۳) استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

(۴) استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

## مقدمه

فولادهای آستنیتی منگنزار موسوم به هادفیلد با ترکیب اسمی ۱۳ درصد وزنی منگنز و ۱/۲ درصد وزنی کربن، دارای ترکیب منحصر به فردی از خواص مکانیکی و مقاومت به سایش هستند [1]. طی چند سال اخیر، تحقیقات زیادی انجام شده است تا سازوکارهای تغییر شکل مومسان و کارسختی این فولادها که تا سالیان زیادی نامشخص و مبهم بود، به درستی شناخته شود. در برخی از موارد، مشاهده شده است که اشتباهها و تضادهایی در سازوکارهای معرفی شده وجود دارند. از جملهی آنها می توان به "استحاله‌ی مارتزیتی در اثر تغییر شکل مومسان (Transformation Induced Plasticity, TRIP)" اشاره کرد [2]. انتظار می رود که فلزاتی با ساختار FCC دستگاه‌های لغزش بیش تری داشته باشند و دوقلویی در آنها کم تر رخ دهد، اما بررسی‌ها نشان داده‌اند که در آلیاژهای با ساختار FCC و انرژی نقص چیدمان کم، دوقلویی در اثر تغییر شکل مومسان به وجود می آید. به چنین پدیده‌ای، "دوقلویی شدن در اثر کرنش مومسان (Twinning Induced Plasticity, TWIP)" گفته می شود [3,4]. تحقیقات جدید روی تک‌بلورها به کمک میکروسکپ‌های الکترونی عبوری (TEM) مشخص کرده‌اند که کرنش دوقلویی، سهم زیادی را در تغییر شکل مومسان فولاد هادفیلد داراست [5,6].

در فولاد هادفیلد، انرژی نقص چیدمان پایین (در حدود  $\lambda = 23 \text{ mJ/m}^2$  به ازای ۱۲ درصد منگنز) برای شبکه‌ی آستنیت فوق اشباع از کربن، سبب تقویت کرنش دوقلویی و هم‌چنین، پیرسازی کرنشی دینامیکی می شود [5]. برهم‌کنش این سازوکارها با لغزش نابجایی‌ها، سبب ایجاد رفتاری منحصر به فرد از جمله نرخ کارسختی، چقرمگی و مقاومت به سایش بسیار بالا می شود [1,7-9]. افزون بر این، افزودن آلومینیم سبب افزایش انرژی نقص چیدمان و در نتیجه، تضعیف کرنش دوقلویی در فولاد هادفیلد می شود [10-12].

چروکیدگی سطحی، پدیده‌ای است که حین تغییر شکل مومسان برخی از آلیاژها به‌ویژه فولاد هادفیلد،

مشاهده می شود. این پدیده، به "پوست پرتقالی شدن (Orange Peeling)" سطح نیز موسوم است. در اثر وقوع این پدیده، سطح تغییر شکل یافته دچار چین خوردگی، ناصافی‌ها و پستی-بلندی‌های متعددی می شود. در ادامه و با افزایش کرنش و افزایش چروکیدگی، سطح ترک‌دار می شود. محققان، این رفتار را به تغییر شکل ناهمگن دانه‌ها مرتبط دانسته‌اند و معتقدند که چروکیدگی زمانی رخ می دهد که تغییر شکل تنها در یک دستگاه لغزش رخ می دهد [13,14]. هر چند سازوکارهای تغییر شکل مومسان در فولادهای آستنیتی منگنزار به خوبی شناخته و تشریح شده است، ولی رابطه‌ی بین پدیده‌ی چروکیدگی و کرنش دوقلویی ارزیابی نشده است. بنابراین، هدف از انجام این تحقیق، بررسی و تحلیل دقیق تر مشخصات پدیده‌های چروکیدگی و ترک‌دار شدن سطحی و ارزیابی رابطه‌ی آنها با ایجاد دوقلویی است که در سه فولاد با اکتیویته‌ی نسبی متفاوت برای کرنش دوقلویی (بر اساس ترکیب شیمیایی و انرژی نقص چیدمان آنها) انجام شده است. سازوکارهای تغییر شکل مومسان و شکست این فولاد، در مقاله‌ی دیگری از همین نویسندگان بررسی شده است [15].

## روش تحقیق

جدول (۱)، ترکیب شیمیایی اسمی و انرژی نقص چیدمان محاسبه شده‌ی آلیاژهای منتخب برای تولید نمونه‌ها را نشان می دهد. از آلومینیم برای تغییر محسوس انرژی نقص چیدمان [10-12]، استفاده شده است. انرژی نقص چیدمان بر اساس ترکیب شیمیایی و با استفاده از رابطه‌ی (۱) محاسبه شده است [16,17].

$$\gamma_{sf} = 20 - 259X_{Fe} + 21X_{Mn} - 24595X_C + 297X_{Al} - 90X_{Si} - 466 \frac{X_{Fe}X_{Mn}}{X_{Fe} + X_{Mn}} + 2550 \frac{X_{Fe}X_C}{X_{Fe} + X_C} + 3323 \frac{X_{Fe}X_{Al}}{X_{Fe} + X_{Al}} + 107 \frac{X_{Fe}X_{Si}}{X_{Fe} + X_{Si}} \quad (1)$$

این روش حکاکی، وضعیت کلی ساختار و دانه‌ها را مشخص می‌کند. به‌طور خاص در صورت وجود کاربید، آن را به‌خوبی نمایان می‌سازد [18]. افزون بر این، از روش حکاکی الکتروشیمیایی شامل محلول ۳۰ درصد HCl در الکل، استفاده شد تا وضعیت دوقلوها در نمونه‌های تغییر شکل یافته بهتر نمایان شود. ویژگی این روش این است که تنها تأثیر مرز دانه و دوقلوهای مکانیکی مشخص می‌شود و باندهای لغزش نمایان نمی‌شوند. در این روش، نمونه به‌مدت زمان ۳۰ ثانیه تحت چگالی جریان  $0.25-0.5 \text{ A/cm}^2$  در ولتاژ ۴ تا ۶ ولت، حکاکی شد [18].

از میکروسکپ‌های نوری و الکترونی روبشی برای بررسی‌های ریزساختاری و مشاهده‌ی دوقلوهای مکانیکی در ساختار نمونه‌ی تغییر شکل یافته استفاده شد. این مطالعات شامل مشاهده‌ی سطوح چروک خورده‌ی نمونه‌های کشش نیز بوده است. افزون بر این، برای تحلیل ساختاری از دستگاه پراش پرتوی ایکس (XRD) مدل زایسرت (Seisert) آلمان با لامپ مس (پرتوی  $K\alpha$  با طول موج  $1/054$  آنگستروم تحت ولتاژ  $40 \text{ kV}$  و جریان  $30 \text{ mA}$ ) مجهز به فیلتر (از جنس نیکل) و تکرنگ کننده‌ی (از جنس گرافیت تک‌بلور) استفاده شد. تحلیل‌های ساختاری قبل و پس از تغییر شکل موم‌سان انجام شدند. اندازه‌گیری پراش پرتوی ایکس در محدوده‌ی ۱۰ تا ۱۲۰ درجه برای محور  $2\theta$  انجام شد و فاصله‌ی بین هر اندازه‌گیری  $0.17$  درجه و مدت زمان توقف برابر با  $2/1$  ثانیه در هر درجه بود.

که در آن،  $X_{Si}$ ،  $X_C$ ،  $X_{Al}$ ،  $X_{Mn}$ ،  $X_{Fe}$  کسر مولی عناصر مختلف در آلیاژ هستند.

برای عملیات ذوب، از کوره‌ی القائی فرکانس بالا با ظرفیت حداکثر ۲۵ کیلوگرم استفاده شد. نمونه‌ی کشش مطابق با استاندارد ASTM A 781/A-781M [24]، به‌صورت قطعه‌ای نزدیک به شکل نهایی، درون قالب‌های سرامیکی ریخته‌گری شد. همه‌ی نمونه‌های ریخته شده، به‌مدت زمان یک ساعت در محدوده دمای  $1075-1065 \text{ }^\circ\text{C}$  عملیات حرارتی انحلال قرار گرفتند و سپس، در آب سریع سرد شدند تا و ساختاری کاملاً آستنیتی با محدوده اندازه‌ی دانه‌ی ۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرومتر به‌دست آید. پس از عملیات حرارتی، ابعاد دقیق نمونه‌های کشش با سنگ‌زنی حاصل شد. در مرحله‌ی بعد، آزمون کشش در دمای محیط و با نرخ کرنش  $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ، برای بررسی رفتار کششی و چروکیدگی انجام شد. سختی‌سنجی قبل و بعد از آزمون کشش و به روش ویکرز انجام شد. هر آزمون حداقل سه بار تکرار شد.

برای انجام مطالعات میکروسکوپی، از روش حکاکی دومرحله‌ای استفاده شد. برای این منظور، نمونه در مرحله‌ی اول به‌مدت زمان چند ثانیه در محلول نایتال ۲ درصد غوطه‌ور شد و سپس، با الکل شسته و با جریان هوای گرم خشک شد. پس از آن، با غوطه‌وری نمونه در محلول ۱۰ درصد HCl در الکل، لایه‌ی نازک زرد-قهوه‌ای رنگ از روی سطح نمونه برداشته شد. این فرایند دو تا سه بار انجام شد. سپس، نمونه با الکل شسته و با جریان هوای گرم خشک شد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی و انرژی نقص چیدمان محاسبه شده برای آلیاژهای منتخب

SFE** mJ/m <sup>2</sup>	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)					کد اختصاری*	نوع فولاد
	Fe	Si	Al	Mn	C		
۲۹	۸۴/۴	۰/۱	۰	۱۴	۱/۴	L	L SFE
۳۵	۸۳/۲	۰/۱	۱/۵	۱۴	۱/۲	M	M SFE
۵۵	۸۱/۵	۰/۱	۳	۱۴	۱/۴	H	H SFE

\* کد گذاری بر اساس میزان انرژی نقص چیدمان است.  
\*\* مقدار انرژی نقص چیدمان بر اساس ترکیب شیمیایی محاسبه شده است. نحوه‌ی محاسبه به‌طور کامل در مراجع‌های [16] و [۱۷] آمده است.

## نتایج و بحث

### بررسی خواص کششی

در جدول (۲)، خواص کششی، سختی قبل و پس از آزمون کشش و محدوده اندازه‌ی دانه، در سه فولاد ریخته‌گری شده‌ی مورد تحقیق ارائه شده است. با توجه به این‌که نمونه‌ها در پوسته‌ی سرامیکی ریخته‌گری شدند، دارای دانه‌بندی غیریکنواخت، درشت و پراکنده بودند. البته، البته بزرگ بودن اندازه دانه سبب کاهش انرژی نقص انباشتگی می‌شود و از این طریق بازیابی دوقلویی‌ها آسان‌تر می‌شود [۱۹].

مطابق با نتایج ارائه شده در جدول (۲)، مشاهده می‌شود که فولاد L استحکام تسلیم و سختی اولیه‌ی پایینی دارد، ولی از استحکام کششی، ازدیاد طول نسبی و سختی نهایی بسیار بالاتری برخوردار است. به عبارت دیگر، فولاد L با انرژی نقص چیدمان کمتر، دارای چقرمگی و نرخ کارسختی بالاتری است. در مقابل در فولادهای M و H، با افزودن آلومینیم و افزایش انرژی نقص چیدمان، استحکام تسلیم و سختی اولیه کمی افزایش می‌یابند، اما استحکام کششی و ازدیاد طول نسبی کاهش می‌یابند. این کاهش در فولاد H بسیار محسوس است. این تغییر رفتار فولادها را می‌توان به تأثیر کرنش دوقلویی مرتبط دانست، چرا که وقوع سازوکار دوقلویی شدن در اثر کرنش موم‌سان به شدت تابعی از انرژی نقص چیدمان است، به طوری که با افزایش آلومینیم، انرژی نقص چیدمان افزایش یافته و کرنش دوقلویی تضعیف شده است [۱۶، ۱۹، ۲۰].

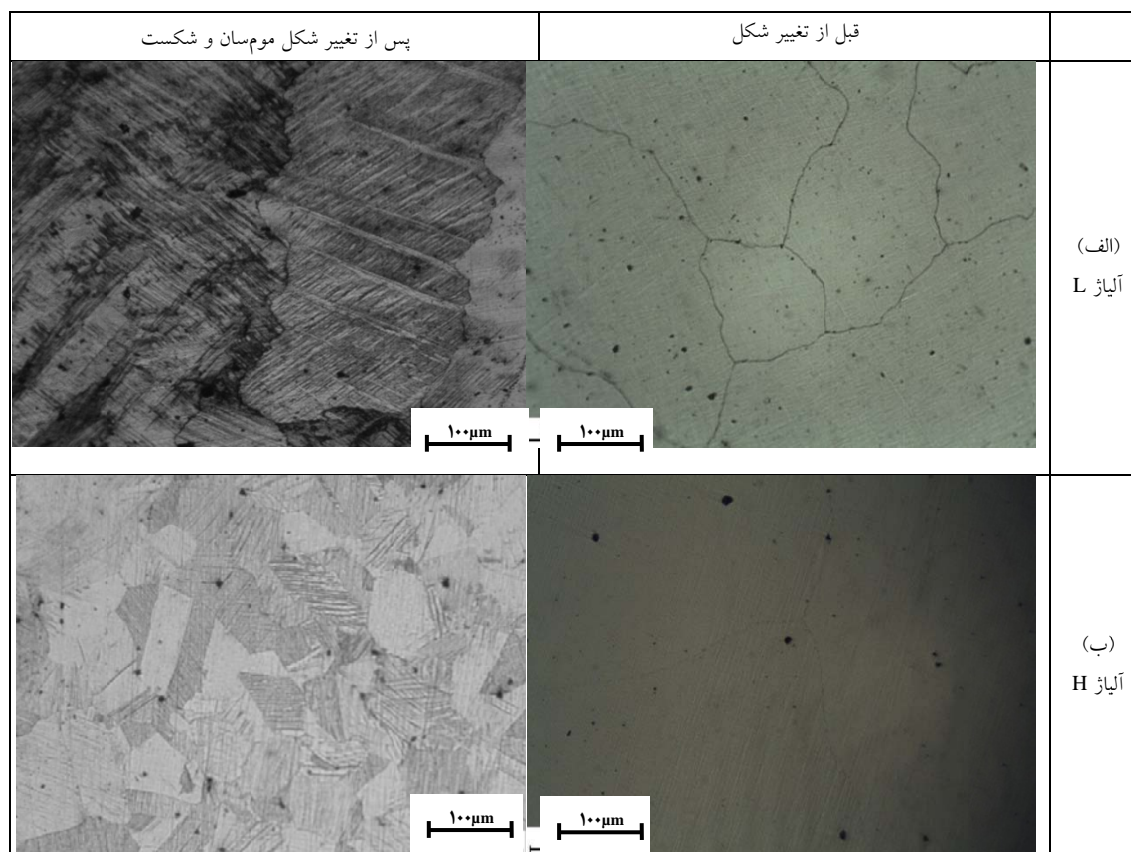
در فولاد L، میزان کم انرژی نقص چیدمان و غلظت بالای عناصر بین‌نشین (کربن به میزان ۱/۲ درصد وزنی یا ۵ تا ۸ درصد اتمی) سبب می‌شود تا تنش برشی لازم برای لغزش افزایش یابد و در مقابل، شرایط برای کرنش دوقلویی بالاتر تسهیل می‌شود. به بیان دیگر، اکتیویته‌ی نسبی دوقلویی بیش‌تر از لغزش است [21]. با افزودن آلومینیم و افزایش انرژی نقص چیدمان، اکتیویته‌ی نسبی دوقلویی در مقایسه با لغزش کاهش می‌یابد [10-12, 22]. بنابراین، میزان ازدیاد طول

نسبی و استحکام کششی کاهش می‌یابند [23-27]. در شکل (۱)، تصویرهای به‌دست آمده میکروسکپ نوری قبل و پس از تغییر شکل موم‌سان نمونه‌ها مشاهده می‌شوند. در این تصاویر، ریزساختار آستیتی فولاد بدون کاربیدها قبل از تغییر شکل موم‌سان و نشانه‌های تغییر شکل موم‌سان در زیر سطح شکست فولادهای L و H پس از تغییر شکل موم‌سان، کاملاً مشهود است. در شکل (۲)، نمودار پراش پرتوی ایکس نمونه‌ها قبل و پس از آزمون کشش نیز نشان می‌دهد که استحاله‌ی مارتنزیتی در اثر تغییر شکل موم‌سان در هیچ یک از سه فولاد مورد بررسی رخ نداده است و فاز آستیت اولیه در نتیجه‌ی اعمال کرنش، پایدار بوده است. بنابراین، این نشانه‌ها مؤید وقوع کرنش دوقلویی است. همان‌گونه که در شکل (۱-الف) مشاهده می‌شود، نشانه‌های کرنش دوقلویی در فولاد L شامل دوقلویی‌های ظریف‌تر و ریزتر (ریزدوقلویی) هستند و همچنین، در بخش دوقلویی شده نیز نشانه‌های ایجاد دوقلویی ثانویه نیز مشاهده می‌شود. این رفتار در تمامی طول سنجی نمونه کشش قابل مشاهده است. این در حالی است که رفتار کرنش دوقلویی در فولاد H، به دانه‌های کم‌تری محدود است، ولی به‌صورت یکنواخت در کل طول سنجی مشاهده نشد. افزون بر این، در تصویرهای شکل (۱) مربوط به پس از تغییر شکل موم‌سان، مشاهده می‌شود که وقوع کرنش‌های دوقلویی سبب ایجاد دانه‌های فرعی درون دانه‌های بزرگ اولیه شده‌اند. در ناحیه‌ی دوقلویی شده هم نشانه‌های زیادی از ریزدوقلویی‌های ثانویه به‌چشم می‌خورند. بنابراین، کرنش دوقلویی نه تنها سبب جلوگیری از رشد ترک‌ها و حفره‌های اولیه (عموماً ناشی از آخال‌ها) می‌شود، بلکه با ایجاد چرخش در دانه‌ها، سبب ایجاد دستگاه‌های لغزش جدید حول محور کشش می‌شود [19, 21]. به این ترتیب، تعامل سازگار دوقلویی شدن و لغزش نابجایی‌ها در شبکه‌ی

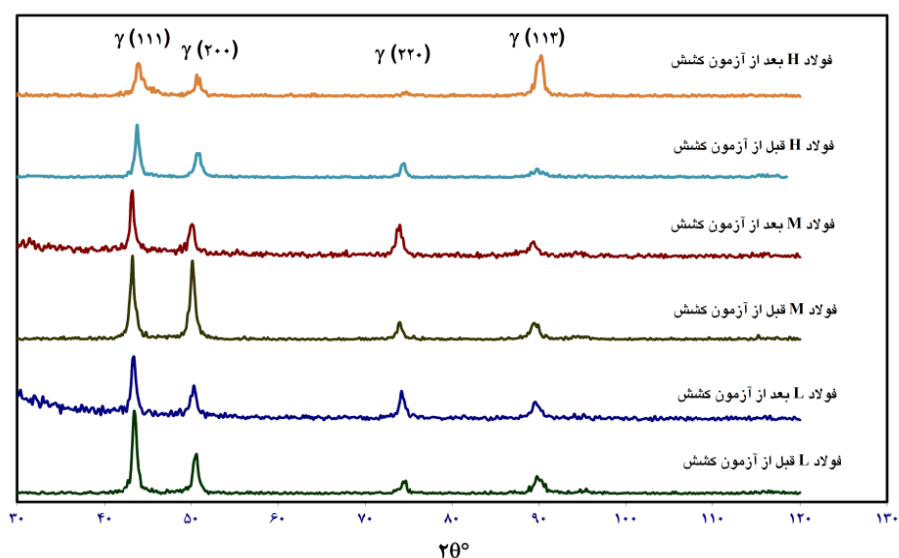
FCC فولاد هادفیلد سبب بهبود چقرمگی آن می‌شود. بین کرنش‌های دوقلوبی و لغزش کم‌تر می‌شود و در مقابل، با افزودن آلومینیم و کاهش سهم کرنش دوقلوبی، مطابق با شکل (۱-ب)، این تعامل سازنده سرانجام، فولاد از چقرمگی کم‌تری برخوردار می‌شود. داده‌های جدول ۲ نیز این مطلب را تأیید می‌کنند.

جدول ۲ خواص کششی، سختی و محدوده اندازه‌ی دانه در سه فولاد مورد تحقیق

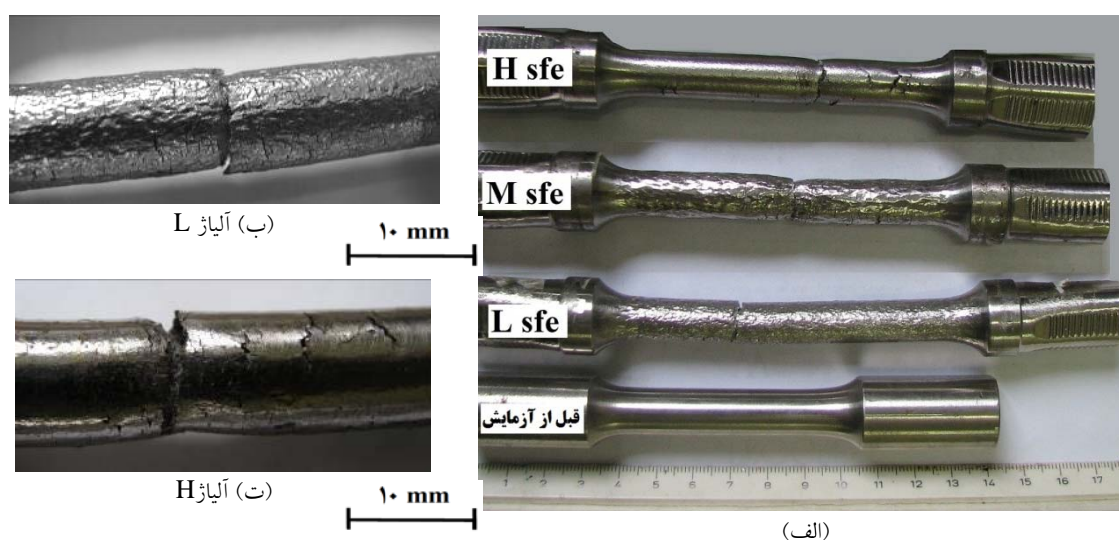
محدوده اندازه‌ی دانه‌ها ( $\mu\text{m}$ )	سختی پس از شکست (HV)		سختی اولیه (HV)		ازدیاد طول نسبی (%)		استحکام کششی (MPa)		استحکام تسلیم (MPa)		کد آلیاژ
	متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار	
۴۰۰-۱۰۰	۵۲۰	۱۱	۱۹۰	۵	۵۱	۱/۵	۱۵/۷	۹۰۵	۵/۶	۴۱۴	L
۴۰۰-۱۰۰	۴۶۰	۲۸	۲۱۸	۰/۶	۴۹	۲	۱۰/۱	۷۹۶	۱/۵	۴۲۷	M
۵۰۰-۱۰۰	۴۳۲	۶	۲۱۵	۴	۱۸/۸	۰/۳	۸/۶	۷۳۲	۱۱	۴۷۱	H



شکل ۱ تصویرهای میکروسکپ نوری قبل و پس از تغییر شکل موم‌سان؛ (الف) فولاد L و (ب) فولاد H (روش حکاکی: الکتریکی در محلول اسید کلریدریک ۳۰ درصد)



شکل ۲ نمودار پراش پرتوی ایکس مربوط به نمونه‌های منتخب قبل و پس از آزمون کشش که نشان‌دهنده‌ی پیک‌های ساختار FCC است (اندیس صفحه‌های مربوط به پیک‌ها بر روی نمودار مشخص شده است)



شکل ۳ (الف) تصویرهای نمونه‌های کشش قبل و پس از آزمون، (ب) و (ج) تصویرهایی از منطقه‌ی شکست در دو آلیاژ H و L. به چروکیدگی سطح و وجود ترک‌های سطحی ظریف و خشن به‌ویژه در منطقه‌ی گسیختگی، توجه کنید.

### مشاهدات چروکیدگی و ترک‌دار شدن سطحی

شکل (۳)، وضعیت ظاهری و ابعادی نمونه‌های کشش قبل و پس از آزمون کشش را نشان می‌دهد. مشخص است که در سرتاسر طول سنجه، چروکیدگی سطحی رخ داده است و افزون بر این، وجود ترک‌های سطحی به‌ویژه در منطقه‌ی گسیختگی، بسیار نمایان است. با این حال، این وضعیت در آلیاژهای مورد

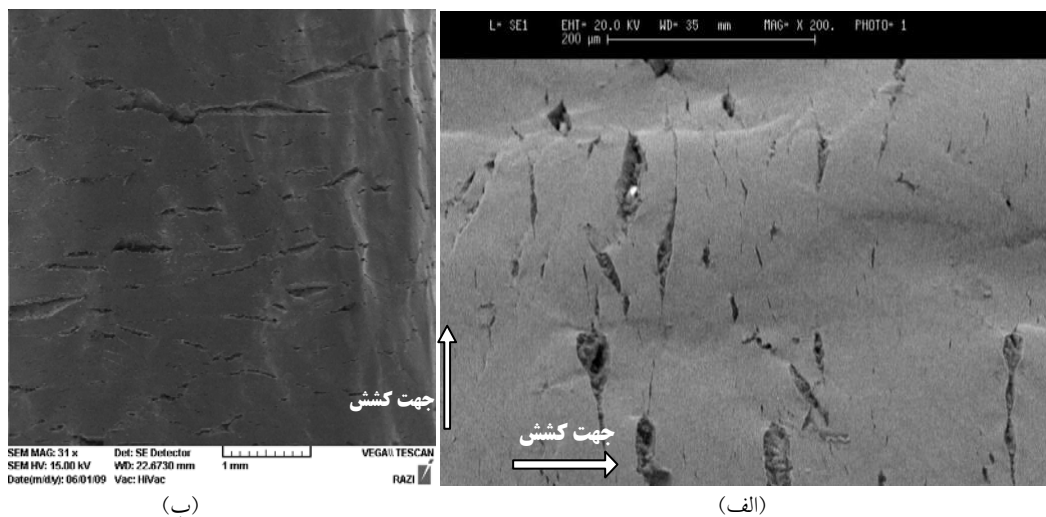
مطالعه به‌طور یکسان مشاهده نمی‌شود. چروکیدگی به‌طور یکنواخت در کل طول سنجه با ترک‌دار شدن، به دو صورت ظریف و خشن قابل مشاهده است. مطابق با شکل (۳-ب)، سطح نمونه‌ی کشش مربوط به آلیاژ L بعد از شکست، دارای ترک‌های سطحی ظریف‌تر با چروکیدگی یکنواخت در کل طول سنجه است، در حالی که در شکل (۳-ت)، آلیاژ حاوی مقادیر بالایی

دقیق تر ترک‌های سطحی بر روی سطح نمونه‌ی کشش آلیاژهای L و M را نشان می‌دهد. ترک‌های سطحی تقریباً پس از ۲۵ درصد ازدیاد طول قابل مشاهده بودند که عمود بر راستای کشش و به‌طور یکنواخت در کل طول سنجه گسترش یافته بودند. مشاهده‌ی این ترک‌ها نشان می‌دهد که ذراتی از جنس کاربیدها و یا ناخالصی‌های غیرفلزی، می‌توانند منشاء تشکیل آن‌ها باشند. افزون بر این، شکل آن‌ها تقریباً به‌صورت بیضی است، یعنی در مرکز پهن‌تر و در دو طرف باریک‌تر است. مطابق با تصویرهای شکل‌های (۵) و (۶) که از مقطع عمودی نمونه‌های کشش تهیه شده‌اند، این ترک‌ها رشد عمقی محدودی نسبت به سطح دارند و به درون نمونه گسترش چندانی نمی‌یابند. شکل (۷)، نمونه‌ای نادر از یک ترک سطحی را نشان می‌دهد که به‌طور چشم‌گیری توانسته است تا در داخل نمونه رشد کند. به‌راحتی می‌توان تغییر جهت‌های متوالی رشد این ترک را به‌دلیل حضور نشانه‌های تغییر شکل موم‌سان (دوقلویی شدن) مشاهده کرد.

از آلومینیم (آلیاژ H)، دارای ترک‌های سطحی بزرگ‌تری است و چروکیدگی در منطقه‌ی شکست متمرکز شده است. مشاهده‌ی چشمی حین آزمایش و پس از شکست نمونه‌های کشش آلیاژهای L و M که درصد ازدیاد طول مناسبی داشتند، نشان داد که سطح نمونه‌های کشش در همان مراحل اولیه‌ی تغییر شکل موم‌سان، شروع به چروکیدگی می‌کند و با افزایش میزان تغییر شکل، این چروکیدگی زیاد می‌شود. در ادامه، ترک‌های سطحی زیادی با ابعادی در حدود چند صد میکرومتر تا حدود چند میلی‌متر به‌وجود می‌آیند. بنابراین، برای تشریح این پدیده می‌توان به سازوکار تغییر شکل موم‌سان و پدیده‌ی کرنش دوقلویی در آن‌ها توجه کرد [15].

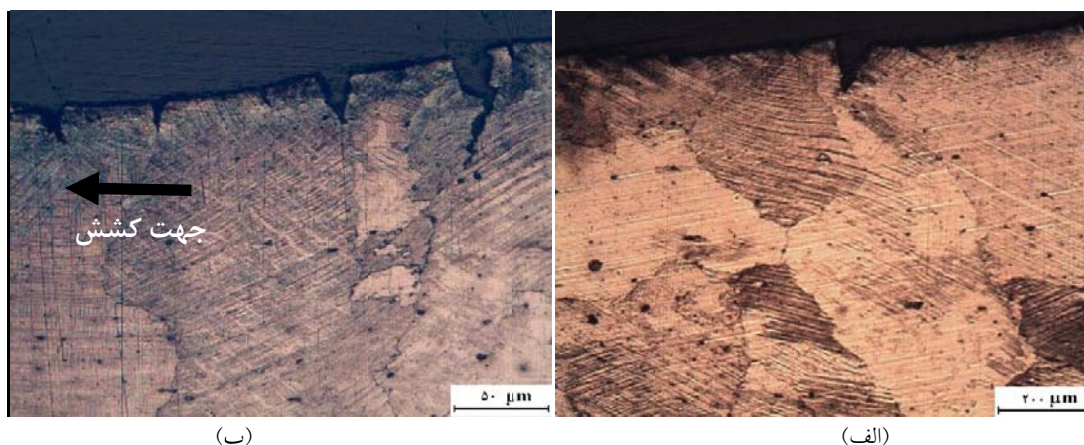
#### مشاهدات میکروسکوپی مربوط به چروکیدگی و ترک‌دار شدن سطح

شکل (۴)، تصویرهای میکروسکپ الکترونی روبشی مربوط به چروکیدگی سطح و مشخصات

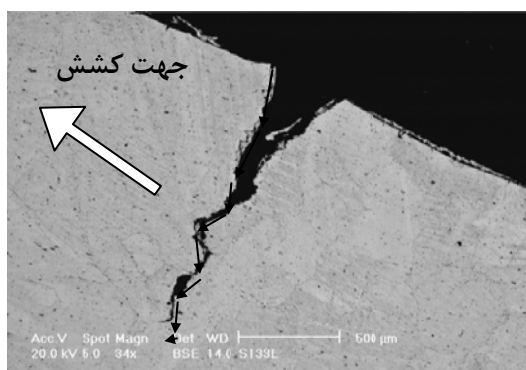


شکل ۴ تصویرهای میکروسکپ الکترونی روبشی از چروکیدگی و ترک‌های سطحی در نمونه‌ی کشش؛ (الف) آلیاژ L و (ب) آلیاژ M

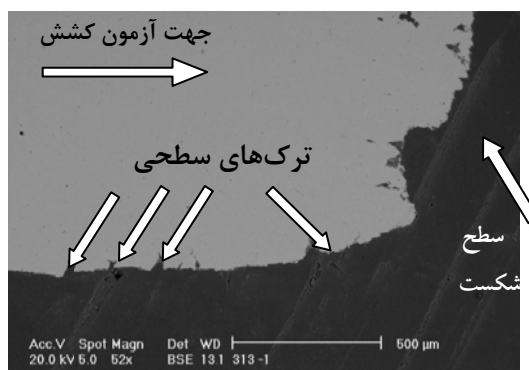




شکل ۵ تصویرهای میکروسکپ نوری از ترک‌های سطحی در مقطع طولی نمونه‌ی کشش مربوط به آلیاژ L در دو بزرگنمایی مختلف (بعد از حگاک‌ی الکتروشیمیایی، نشانه‌های ریزدوقلویی مشهودند)



شکل ۷ تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی از تغییر جهت‌های مداوم رشد ترک سطحی در مقطع طولی نمونه‌ی کشش مربوط به آلیاژ L پس از شکست



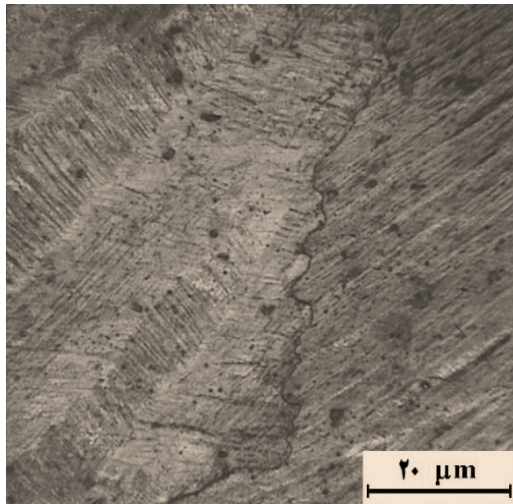
شکل ۶ تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی از ترک‌های سطحی در مقطع طولی نمونه‌ی کشش مربوط به آلیاژ H

سنجه مشاهده می‌شود. این رفتار سبب می‌شود تا شکست نمونه‌های کشش بدون گلوئی شدن اتفاق بیافتد [13-15]. هر چه سهم لغزش در ایجاد تغییر شکل بیش‌تر شود، به همان اندازه چروکیدگی سطحی کم‌تر می‌شود و فقط به منطقه‌ای محدود می‌شود که دانه‌های آن در شرایط دوقلویی شدن قرار دارند. بنابراین، در آلیاژ H که حاوی درصد بالایی از آلومینیم است و انرژی نقص چیدمان آن زیاد است، لغزش (بر خلاف دوقلویی شدن) سهم زیادی از تغییر شکل موم‌سان را بر عهده دارد [15]، و در نتیجه، چروکیدگی سطحی بسیار کمی رخ می‌دهد و این چروکیدگی معمولاً در نزدیکی منطقه‌ی شکست و به‌صورت خشن

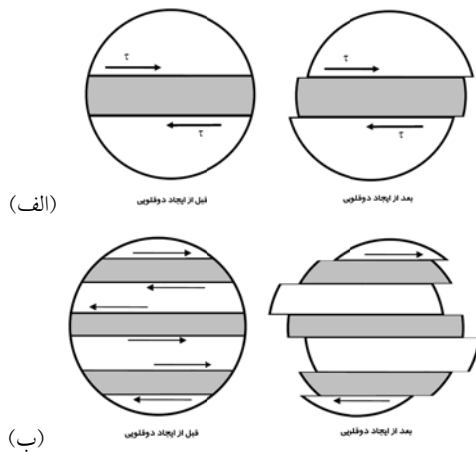
در آلیاژهای L و M که دارای انرژی نقص چیدمان کم و متوسطی هستند و دوقلویی شدن سازوکار اصلی تغییر شکل موم‌سان آنهاست [15,17]، چروکیدگی سطحی را می‌توان به‌خوبی در تمامی طول سنجه مشاهده کرد. در این آلیاژها، هر چه نیروی لازم برای ایجاد دوقلویی بیش‌تر باشد (با افزایش میزان کربن یا آلومینیم)، چروکیدگی سطحی خشن‌تر است [17]. در مقابل، هر چه دوقلویی شدن راحت‌تر صورت گیرد (با کاهش مقدار کربن و افزایش منگنز [15])، چروکیدگی سطحی ظریف‌تر صورت می‌گیرد. با این وجود، با توجه به نقش اصلی دوقلویی شدن در تغییر شکل موم‌سان، این چروکیدگی در کل سطح



زیر سطحی و چقرمگی بیش تر آن، ترک‌های تشکیل شده با برخورد با لایه‌های ریزدوقلویی، امکان نفوذ به عمق قطعه را ندارند و رشد آن‌ها در حد چند میکرومتر محدود می‌شود. بنابراین، ترک‌های سطحی قادر به رشد به درون دانه نیستند و به این ترتیب، عامل شکست نیستند [15].



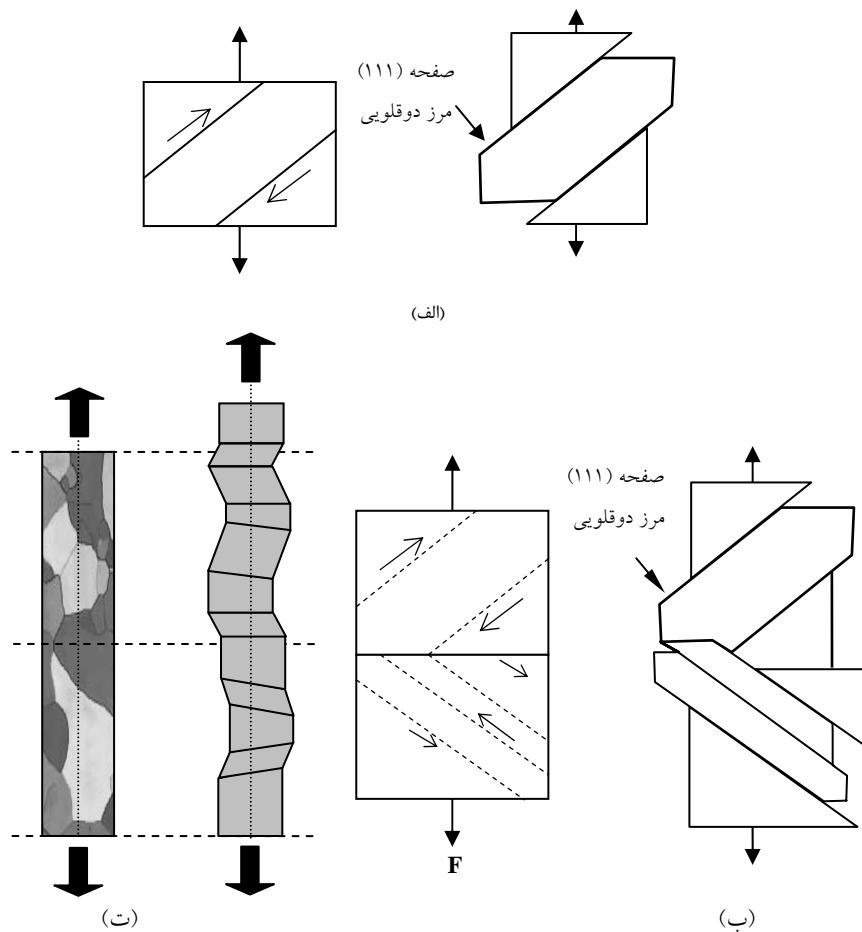
شکل ۸ تصویر میکروسکپ نوری از کرنش دوقلویی و اعوجاج و کنگره‌ای شدن مرز دانه در اثر وقوع کرنش حجمی دوقلویی در فولاد L



شکل ۹ تصویرهای نمادین از نقش دوقلویی در ایجاد چروکیدگی سطحی از مقطع عرضی؛ (الف) با ایجاد یک دوقلویی و (ب) با ایجاد سه دوقلویی که ظاهری زیگزاگی بر روی سطح آزاد ایجاد می‌کنند

مشاهده می‌شود. برای تحلیل نقش دوقلویی در چروکیدگی، باید توجه داشت که در اثر ایجاد دوقلویی، دانه‌ها شروع به چرخش و جهت‌گیری مجدد می‌کنند [۱۹]. از طرف دیگر، یک دانه حداقل به سه بخش تقسیم می‌شود. دو بخش با ساختار آینه‌ای و بخش دیگر آن دوقلویی است که بین دو بخش اول قرار دارد. دو بخش اول، در دو جهت مخالف یک‌دیگر بر روی صفحه‌ی دوقلویی جابه‌جا می‌شوند. این جابجایی، یک نوع کرنش و تغییر شکل حجمی است [۱۹، ۲۱]. تغییر شکل ناهمگن مرز دانه در اثر دوقلویی، سبب اعوجاج و کنگره‌ای شدن مرز دانه‌ها می‌شود [15]. شکل (۸)، نمونه‌ای از این پدیده را در فولاد L به خوبی نشان می‌دهد. اگر دانه‌ی دوقلویی شده به سطح آزاد قطعه راه داشته باشد، این تغییر شکل ناهمگن سبب ایجاد اعوجاج یا ناهمگنی (چروکیدگی) در سطح می‌شود. در چنین شرایطی، اگر در یک دانه دوقلویی زیادی به وجود آید (به صورت ریزدوقلویی)، آنگاه مطابق با شکل (۳-ب)، اعوجاج و چروکیدگی سطح و مرز دانه بیش تر و ظریف تر می‌شود. به بیان دیگر، کرنش دوقلویی در دانه‌های منتهی به سطح، سبب وقوع کرنش‌های حجمی در جهت‌های مختلف و در نتیجه، چروکیدگی سطحی می‌شود و با بیش تر شدن میزان کرنش، این چروکیدگی بیش تر می‌شود. برای تشریح بهتر این وضعیت، تصویرهایی نمادین از نقش دوقلویی در ایجاد چروکیدگی سطحی، در شکل‌های (۹) و (۱۰) ارائه شده‌اند.

کرنش و چروکیدگی سطحی سبب ایجاد تنش‌های برشی در سطح می‌شوند و در نتیجه، سطح که استحکام و چقرمگی کم‌تری نسبت به درون ماده دارد، ترک‌دار می‌شود [15]. در چنین شرایطی، وجود آخال‌ها و یا فازهای رسوبی حل نشده در نزدیکی سطح، سبب تسریع ترک‌دار شدن سطح می‌شوند [13, 14]. از سوی دیگر، به‌علت کار سخت شدن لایه‌های



شکل ۱۰ تصویرهای نمادین از نقش دوقلویی در ایجاد چروکیدگی سطحی در کشش نمونه از مقطع طولی؛ (الف) تک دانه، (ب) دو دانه و (ت) چند دانه

چروکیدگی و ترک‌دار شدن سطحی تضعیف می‌شوند و تنها به منطقه‌ی شکست محدود می‌شوند. در این شرایط، ترک‌های سطحی بزرگ و خشن به تعداد محدودی در طول سنجه مشاهده می‌شوند.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر خود را نسبت به مدیران و کارکنان محترم شرکت‌های ریخته‌گری فولاد طبرستان و ریخته‌گری دقیق ساری و جناب آقای دکتر محمود شریعتی عضو محترم هیأت علمی دانشگاه فردوسی مشهد، به واسطه‌ی حمایت‌ها و همکاری‌های ارزشمندشان اعلام می‌دارند.

### نتیجه‌گیری

- ۱- سطح فولاد هادفیلد در اثر وقوع کرنش دوقلویی، به شدت چروکیده می‌شود و با ادامه‌ی مراحل تغییر شکل تا شکست، ترک‌دار می‌شود. این چروکیدگی و ترک‌دار شدن، در سرتاسر طول سنجه به‌طور یکنواخت ایجاد می‌شود.
- ۲- در فولاد هادفیلد، رشد ترک‌های سطحی در اثر برخورد با لایه‌های دوقلویی در زیر سطح، محدود می‌شوند و در نتیجه، از عمق بسیار کم، عموماً کم‌تر از ۱۰۰ میکرومتر، برخوردارند.
- ۳- با افزودن آلومینیم و افزایش انرژی نقص چیدمان، کرنش دوقلویی تضعیف می‌شود. در نتیجه، پدیده‌های

## مراجع

1. ASM Handbook, Vol. 1, 10th Edition, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys, Section: Specialty Steels and Heat-Resistant Alloys: Austenitic Manganese Steels,(2005).
2. Dastur, Y.N. and Leslie, W.C., "Mechanism of work hardening in Hadfield manganese steel", *Metallurgical Transaction A*, Vol. 12, 749-759, May, (1981).
3. Asgari, S., El-Danaf, E., Kalidindi, S.R. and Doherty, R.D., "Strain hardening regimes and microstructural evolution during large strain compression of low stacking fault energy FCC alloys that form deformation twins", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 28, 1781-1795, September, (1997).
4. Kalidindi, S.R., "Modeling the strain hardening response of low SFE FCC alloys", *International Journal of Plasticity*, Vol. 14, No. 12, 1265-1277, (1998).
5. Karaman, I., Sehitoglu, H., Gall, K., Chumlyakov, Y.I. and Maier, H.J., "Deformation of single crystal Hadfield steel by twinning and slip", *ActaMaterialia*, Vol. 48, 1345-1359, (2000).
6. Karaman, I., Sehitoglu, H., Chumlyakov, Y.I., Maier, H.J. and Kireeva, I.V., "Extrinsic stacking faults and twinning in Hadfield manganese steel single crystals", *ScriptaMateriala*, Vol. 44, 337-343, (2001).
7. Abbasi, M., Kheirandish, Sh., Kharrazi, Y. and Hejazi, J., "On the comparison of the abrasive wear behavior of aluminum alloyed and standard Hadfield steels", *Wear*, 268, 202-207, (2010).
8. Karaman, I., Sehitoglu, H., Beaudoin, A.J., Chumlyakov, Y.I., Maier, H.J. and Tomea, C.N., "Modeling the deformation behavior of Hadfield steel single and polycrystals due to twinning and slip", *ActaMaterialia*, Vol. 48, 2031-2047, (2000).
9. Bayraktar, E., Khalid, F.A. and Levallant, C., "Deformation and fracture behaviour of high manganese austenitic steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 147, 145-154, (2004).
10. Lai H.J. and Wan C.M., "The study of deformation twins in the austenitic Fe-Mn-C and Fe-Mn-Al-C alloys", *Scripta Metallurgica*, Vol. 23, Issue 2, 179-182, February, (1989).
11. Zuidema, B.K., Subramanyam, D.K. and Leslie, W.C., "The effect of aluminum on the work hardening and wear resistance of Hadfield manganese steel", *Metallurgical Transaction A*, Vol. 18, 1629-1639, September, (1987).
12. Canadinc, D., Sehitoglu, H., Maier, H.J. and Chumlyakov, Y.I., "Strain hardening behavior of aluminum alloyed Hadfield steel single crystals", *ActaMaterialia*, Vol. 53, 1831-1842, (2005).
13. Rittel, D. and Roman, I., "Tensile fracture of coarse-grained cast austenitic manganese steels", *Metallurgical Transaction A*, Vol. 19, 2269-2277, September, (1988).
14. Rittel, D. and Roman, I., "Tensile deformation of coarse-grained cast austenitic manganese steels", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 110, 77-87, March, (1989).
15. Abbasi, M., Kheirandish, Sh., Kharrazi, Y. and Hejazi, J., "The fracture and plastic deformation of aluminum alloyed Hadfield steels", *Journal of Materials Science and Engineering A*, Vol. 513-514, 72-76, (2009).
16. Allain, S., Chateau, J.P., Bouaziz, O., Migot, S. and Guelton, N., "Correlations between the calculated stacking

- fault energy and the plasticity mechanisms in Fe–Mn–C alloys", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 387–389, 158–162, (2004).
۱۷. عباسی م.، بررسی تاثیر آلومینیم بر ساختار و خواص مکانیکی فولادهای آستنیتی منگنزی، پایان نامه دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۸۸).
18. ASM Handbook, Vol. 9, Metallography and Microstructures, Austenitic Manganese Steel Castings, (2004).
۱۹. هرتز برگ، رد.، تغییر شکل و مکانیک شکست مواد و آلیاژهای مهندسی، ترجمه علی کبر اکرامی، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۸۵).
۲۰. سجادی، س.ع. ک.، رفتار مکانیکی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۸۴).
21. Allain, S., Chateau, J.P. and Bouaziz, O., "A physical model of the twinning-induced plasticity effect in a high manganese austenitic steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 387–389, 143–147, (2004).
22. Oh, B.W., Cho, S.J., Kim, Y.G., Kim, Y.P., Kim, W.S. and Hong, S.H., "Effect of aluminum on deformation mode and mechanical properties of austenitic Fe-Mn-Cr-Al-C alloys", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 197, No. 2, 147-156, (1995).
23. Bouaziz, O., Allain, S., Scott, C.P., Cugy, P., Barbier, D., High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: A review of the microstructure properties relationships", *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 15, 141–168, (2011).