

## کنترل شکل ناخالصیها و تأثیر آن بر خواص ضربه‌ای فولاد API X42

مهدی علیزاده و حسین ادريس\*\*

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۰/۹/۱۱ - دریافت نسخه نهایی: ۸۱/۶/۳)

چکیده - در سالهای اخیر تولیدکنندگان فولاد به منظور بالا بردن خواص انعطاف پذیری، استحکام ضربه‌ای و شکل پذیری فولاد، راههای بسیاری را مورد بررسی و آزمایش قرار داده‌اند که می‌توان در موارد عمده به تولید فولادهای با مقدار آخال خیلی پایین، آخالهای با اندازه کوچک و همچنین آخالهای اصلاح شده اشاره کرد. در این پژوهش آزمایشها بر روی فولاد API - X42 تولید شده در کوره‌های قوس الکتریک شرکت فولاد مبارکه انجام گرفته است. ابتدا فولاد مورد نظر در کوره قوس الکتریک تهیه و آماده‌سازی شده و سپس ذوب مربوطه در یک پاتیل با ظرفیت ۲۰۰ تن تخلیه و عملیات پاتیلی در واحد کوره پاتیلی (LF) کارگاه فولاد سازی شرکت فولاد مبارکه انجام گرفته است. در این بررسی تأثیر میزان و سرعت افزودن سیم CaSi بر مورفولوژی آخالها مشخص شد و شرایط بهینه افزودنی برای کنترل شکل آخالها به دست آمد. مطالعات انجام شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و انجام تحلیلهای عنصری EDS نشان داد که افزودن کلسیم به مذاب بر ترکیب ناخالصیهای موجود در فولاد مذاب تأثیر خواهد گذاشت. همچنین با انجام آزمایشها ضربه چارپی تأثیر اجرای عملیات تزریق سیم CaSi، میزان تزریق و کنترل شکل آخال بر خواص ضربه‌ای و شکل پذیری فولاد نشان داده شده است.

واژگان کلیدی: کنترل شکل ناخالصیها، عملیات کلسیم، کوره پاتیلی و اصلاح آخالها

## Inclusion Shape Control and its Effects on the Impact Property of the API X42 Steel

M. Alizadeh and H. Edriss

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

**Abstract:** In recent years many different ways have been investigated by steel producers to increase ductility, impact strength and formability of steels. More important ways are steels with very low amounts of inclusion, small size inclusions and modified inclusions. In this study, experiments have been performed on the API-X42 steel produced by the electric arc furnace in Mobarekeh Steel Co. After the preparation of the melt in the electric arc furnace, it is tapped in a 200-ton ladle and ladle treatment was performed in a ladle furnace (LF) in the steelmaking shop. In this study the effects of amount and the rate of CaSi wire addition on the shape and structure of inclusion were investigated. The optimum conditions for adding CaSi for inclusion shape control were also determined. Scanning electron microscope (SEM) and chemical energy analysis dispersive system (EDS) showed that adding calcium to the melt affects the chemical composition of inclusions present in steel melt. The effects of CaSi wire injection treatment, injection amount and inclusion shape control on the impact property and formability of steel were shown using Charpy impact test.

**Keywords:** Inclusion shape control, calcium treatment, ladle furnace and inclusion modification.

\*\* - استادیار

\* - دانشجوی دکترا

فولادسازی برای کنترل مقدار و شکل آخالها برای تولید فولاد تمیز به کار برده می‌شود استفاده از عملیات تزریق کلسیم به فولاد مذاب است. افزودن ترکیبات کلسیم‌دار در مراحل فولادسازی، امکان تولید فولاد تمیز با حداقل اکسیژن و گوگرد را فراهم می‌کند. افزودن کلسیم در واقع نقش کنترل مقدار و شکل آخالها در فولاد را خواهد داشت. به علت میل ترکیبی زیاد کلسیم با اکسیژن، استفاده از عملیات کلسیم در تولید فولادهای آرام شده با آلومینیم یا آلومینیم - سیلیسیم کاربرد دارد.

مطابق نمودار فازی  $Al_2O_3 - CaO$ ، شکل (۱) ترکیبات آلومینات کلسیم تشکیل شده می‌تواند به صورتهای مطابق  $CA_6^2$ ،  $CA_2$ ،  $CA$ ،  $C_{12}A_7$ ،  $C_3A$  باشد. اگر مقدار تزریق کلسیم به فولاد مذاب به اندازه کافی باشد، ترکیبات  $CA$ ،  $C_{12}A_7$  تشکیل می‌شود که در دمای فولادسازی این ترکیبات به صورت مذاب‌اند. اولاً در زمان ریخته‌گری فولاد، این آخالها چون به صورت مذاب هستند نمی‌توانند سبب بسته شدن نازل ریخته‌گری شوند. ثانیاً پس از انجماد، این آخالها گرد و سخت بوده و در طی نورد گرم تغییر شکل نمی‌دهند [۳]. آخالهای کمپلکس آلومینات کلسیم بر اساس نوع مورفولوژی و ترکیب شیمیایی به چهار گروه مختلف زیر دسته‌بندی می‌شوند [۴]:

نوع A: اکسی سولفیدهای حاوی کلسیم، آلومینیم، اکسیژن و گوگرد با توزیع یکنواخت (O.S). (Ca.Al)

نوع B: آلومینات کلسیم که اطراف آن را سولفید کلسیم احاطه کرده است (O.S). (Ca-Al)O-(Ca-Al)

نوع C: آلومینات کلسیم - O (Ca.Al)

نوع D: سولفید کلسیم (CaS)

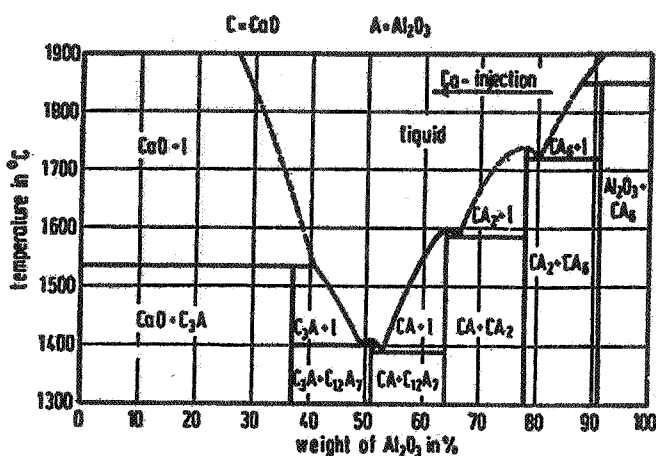
به این منظور شکل (۲) انواع مورفولوژی و ترکیب شیمیایی این آخالها را نشان می‌دهد. با افزایش تزریق کلسیم به داخل مذاب ابتدا آخالهای آلومینایی به آخالهای نوع C تبدیل شده و سپس آخالهای نوع B تشکیل می‌شوند. با افزایش میزان اضافه کردن کلسیم به مذاب، آخالهای نوع A نیز تشکیل می‌شود.

اساساً لازمه پیشرفت و توسعه در تکنولوژی مواد، داشتن یک پیشرفت پیوسته و مداوم در تولید فولادهای تمیز است. امروزه با پیدایش تکنولوژی مدرن، تقاضا در مورد تولید فولادهای با کیفیت بالا که تنها حاوی مقادیر قابل اغماض از گازها، آخالها و حفرات میکروسکوپی بوده و از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی بسیار همگن باشند روند فزاینده‌ای را پیش گرفته است. کاربرد این گونه فولادها در صنایع هوا - فضا، الکترونیک، ابزار دقیق، تجهیزات هسته‌ای و ساخت خطوط لوله مستلزم استفاده از روشهای ویژه فولادسازی ثانویه خواهد بود [۱].

از آنجا که خواص فیزیکی - مکانیکی آخالهای غیر فلزی موجود در ساختار فولاد با زمینه فولاد متفاوت است، معمولاً این آخالها بر خواص مکانیکی فولاد به شدت تأثیر می‌گذارند، به نحوی که باعث کاهش خواص انعطاف‌پذیری و مقاومت به ضربه فولاد می‌شوند، در سالهای اخیر تولیدکنندگان فولاد به منظور بالا بردن خواص انعطاف‌پذیری، استحکام ضربه‌ای و شکل‌پذیری فولاد راههای بسیاری را مورد بررسی و آزمایش قرار داده‌اند که می‌توان در موارد عمده به تولید فولادهای با مقدار آخال خیلی پایین، آخالهای با اندازه کوچک و همچنین آخالهای اصلاح شده اشاره نمود. از آنجایی که تولید فولادهای با مقدار آخال خیلی کم منوط به استفاده از تجهیزات تحت خلاء در فولادسازی ثانویه است و این عمل برای تولیدات با مقدار خیلی زیاد مقرون به صرفه نیست لذا عملیات اصلاح آخالها به منظور بهبود خواص فولاد از اهمیت به سزایی برخوردار خواهد بود [۲].

اساساً کنترل شکل آخالها با تغییر در ترکیب شیمیایی آنها صورت می‌گیرد که در عمل با اضافه کردن عناصر فعال به فولاد مذاب این امر قابل دستیابی است. مطابق نمودار انرژی آزاد استاندارد تشکیل اکسیدها و سولفیدها، عناصری که میل ترکیبی زیادی با اکسیژن و گوگرد دارند عبارت‌اند از: تیتانیم، زیرکونیم، منیزیم، کلسیم و عناصر نادر خاکی<sup>۱</sup> (RE).

یکی از روشهای متداول که در واحدهای مختلف



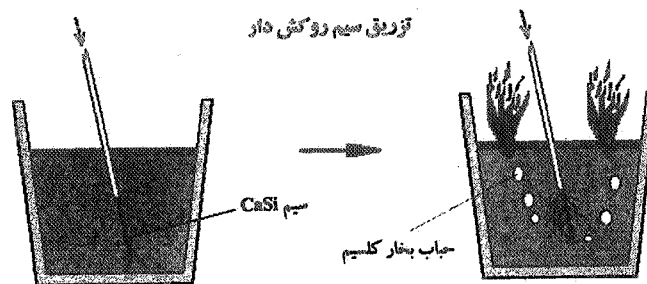
شکل ۱ - نمودار فاز تعادلی سیستم دوتایی  $CaO, Al_2O_3$  [۳]

	Optical	Ca	Al	S	O	Composition (%)
Type A						CaO : 30.2 CaS : 19.2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 45.0
Type B						out. in. CaO : 0.7 33.4 CaS : 88.4 — Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 3.2 63.4
Type C						CaO : 42.1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 54.4
Type D						CaO : 3.1 CaS : 91.8 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 3.2

شکل ۲ - انواع آخالهای مشاهده شده در ساختار فولاد پس از افزودن کلسیم به مذاب [۴]

محدودی آخال با اندازه تا حد  $20 \mu m$  مشاهده شده است [۴]. نقطه جوش پایین کلسیم و همچنین وزن مخصوص پایین آن سبب شده که وارد کردن کلسیم خالص به مذاب با مشکل

نهایتاً برای تشکیل آخال نوع D نیاز به مقادیر تزریق بالاست. متوسط اندازه هر کدام از آخالهای کمپلکس حاوی کلسیم در گستره  $3-5 \mu m$  قرار می‌گیرد و تنها تعداد بسیار



شکل ۳- تزریق سیم روکش دار CaSi در مذاب

مجددا دمش گاز آرگون از کف به مدت زمان ۱۰ دقیقه انجام گرفته است. پس از همگن شدن مذاب از نظر دما و ترکیب شیمیایی، سیمهای حاوی ترکیبات کلسیم دار به مذاب اضافه شده است. در این روش از سیمهای باروکش فولادی و با قطر ۱۳ میلیمتر استفاده شده است. هر متر از سیم تقریباً حاوی ۲۳۰ گرم پودر فشرده CaSi یا ترکیب اسمی  $Ca\ 2\% - Si\ 70\%$  است و دانه بندی پودر موجود در سیم در گستره  $0/5 - 0/1$  میلیمتر قرار دارد. پس از اجرای عملیات تزریق کلسیم مجدداً به مدت زمان ۳ دقیقه دمش گاز آرگون در مذاب صورت گرفته است. در نهایت پس از ریخته گری مذاب توسط ماشین ریخته گری مداوم، عملیات نورد گرم بر روی تختالهای ریخته گری شده صورت گرفته است. کلیه مشخصات و اطلاعات مربوط به هر یک از ذوبهای آزمایشی تهیه شده در جدول (۱) ارائه شده است.

در تمامی مراحل انجام عملیات، نمونه گیریهای لازم از ذوب، سرباره و ورق نورد گرم شده انجام گرفته و پس از تهیه و آماده سازی سطح نمونه های مورد نظر، بررسیهای متالوگرافی و مطالعه نوع مورفولوژی، توزیع، اندازه و مقدار آخالها توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شده است. تحلیل کیفی آخالها و تحلیل توزیع عناصر موجود در آنها به کمک دستگاه آنالیز EDXA نصب شده روی میکروسکوپ الکترونی روبشی صورت گرفته است. همچنین با

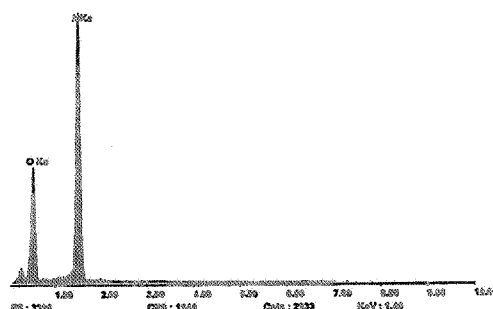
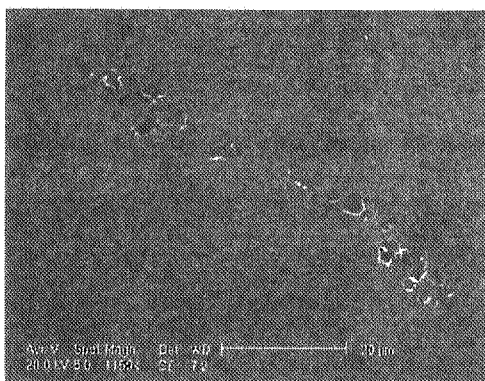
روبرو شود. بدین لحاظ سعی می شود، اولاً از آلیاژهای آن مانند سیلیسیم - کلسیم استفاده شود، ثانیاً تزریق کلسیم از طریق تکنیکهای مختلفی نظیر تزریق پودر همراه با گاز خنثی، تزریق سیم، شکل (۳) و شلیک کپسولهای حاوی کلسیم به داخل مذاب صورت بگیرد. در این پژوهش ابتدا کلسیم به روش تزریق سیم روکش دار CaSi به مذاب اضافه شده است. سپس تأثیر میزان افزودن بر روی مورفولوژی و ترکیب شیمیایی آخال و همچنین اثر آن بر روی خواص انرژی ضربه ای فولاد بررسی شده است.

## ۲- روش تحقیق

در این پژوهش آزمایشات بر روی فولاد API-X42 تولید شده در کوره های قوس الکتریک شرکت فولاد مبارکه انجام گرفته است. ابتداء فولاد مورد نظر در کوره قوس الکتریک با ظرفیت ۲۰۰ تن تهیه و آماده سازی شده است. سپس ذوب مربوطه در یک پاتیل با ظرفیت ۲۰۰ تن تخلیه و عملیات پاتیلی در واحد LF<sup>۳</sup> انجام گرفته است. در این مرحله پس از ورود ذوب به واحد LF ابتدا به مدت ۳ دقیقه دمش گاز آرگون از کف انجام شد و سپس فولاد مذاب به وسیله تزریق سیم آلومینیم اکسیژن زدایی شده است. در مرحله بعدی فروآلیاژهای مورد نیاز به اندازه کافی به ذوب افزوده شده است. (پس از تنظیم دما و ترکیب شیمیایی مذاب طبق روشهای مربوطه،

جدول ۱- مشخصه‌های ذوبهای آزمایشها

سرعت تزریق سیم (m/min) CaSi	میزان تزریق پودر CaSi (kg/Ton)	میزان تزریق سیم CaSi (m)	میزان آلومینیم افزوده شده (kg)	وزن ذوب (Ton)	شماره ذوب
-	-	-	۱۵۰	۱۹۰	۱
۲۵۰	۰/۷۳	۶۰۶	۱۷۰	۱۹۰	۲
۲۵۰	۰/۹۵	۷۷۳	۲۰۰	۱۹۵	۳
۲۵۰	۱/۲	۹۷۰	۱۴۰	۱۹۰	۴



شکل ۴- تصویر SEM و آنالیز EDS از آخالهای آلومینایی تشکیل شده در ریز ساختار ورق نورد گرم شده ذوب ۱


داده شده است. تحلیل کیفی EDS ذرات در شکل (۴) نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی آخالهای تشکیل شده از نوع آلومینایی است. حضور تجمعی ذرات زیر آلومینا و تشکیل خوشه‌های آلومینایی در هنگام انجماد فولاد از مشخصه مهم این گونه آخالهاست. نتایج به دست آمده در این زمینه نشان می‌دهند که در اثر اعمال کار گرم بر روی فولاد خوشه‌های آلومینایی شکسته شده و ذرات ناخالصی به صورت زنجیره‌ای در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و آخالهای رشته‌ای طویل را ایجاد کرده‌اند [۳]. همان‌طور که مشاهده می‌شود شکل ذرات آلومینایی به صورت غیرهندسی بوده و در فصل مشترک با زمینه فولاد دارای گوشه‌های تیزند. همچنین گروه دیگری از ناخالصیها که در ساختار

انجام آزمایشات ضربه چارپی تأثیر اجرای عملیات تزریق سیم CaSi، میزان تزریق و کنترل شکل آخال بر خواص ضربه‌ای و شکل‌پذیری فولاد بررسی شده است. بدین منظور برای انجام آزمایشات انرژی ضربه از نمونه‌های چارپی با شیار V شکل (V-Notch) و با اندازه  $\frac{1}{2}$  مطابق استاندارد E23 - ASTM استفاده شده است. آزمایشات ضربه‌ای در دماهای ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۷۰- درجه سانتیگراد انجام گرفته است.

### ۳- نتایج و بحث

نحوه توزیع و نوع مورفولوژی آخالهای تشکیل شده در زیر ساختار ورق نورد گرم شده ذوب ۱ در شکل‌های (۴) و (۵) نشان

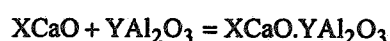
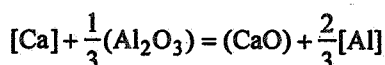
جدول ۲- نقطه ذوب ترکیبات مختلف آلومینات کلسیم

نقطه ذوب	ترکیب شیمیایی	لایه	آخال
۲۰۵۰	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱	
۱۸۲۰	CaO.6Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲	
۱۷۴۵	CaO.2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳	
۱۶۰۰	CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴	

آخالهای اصلاح شده را به طور شماتیک به صورت زیر نمایش داد، جدول (۲) [۷].

همان طور که مشاهده می شود، ترکیباتی که عمدتاً شامل Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> هستند دارای نقطه ذوب بالایی بوده و به عنوان مراکز جوانه زنی برای سایر ترکیبات عمل کرده است. به طوری که با کاهش دما در حین انجماد فولاد، آخال شامل چند لایه فاز مختلف با نقطه ذوبهای متفاوت خواهد بود. از آنجایی که فصل مشترک آخال با زمینه فولاد از نوع نامنظم است، چند فازی بودن آخال سبب می شود که آخال به منظور تعدیل در انرژی فصل مشترک خود با زمینه، شکل کروی به خود بگیرد و نسبت سطح به حجم را به حداقل رساند.

هنگامی که کلسیم به فولاد آرام شده با آلومینیم اضافه می شود، کلسیم به سرعت تبخیر شده و حبابهای بخار کلسیم در مذاب تشکیل می شود. در فصل مشترک بخار - مذاب مقداری از کلسیم در مذاب حل می شود. بخشی از کلسیم حل شده در مقابل گوگرد و اکسیژن فولاد مذاب قرار گرفته و با آنها واکنش می دهد. این واکنشها به عنوان واکنشهای اکسیژن زدایی و گوگرد زدایی محسوب می شوند. بخشی دیگر از کلسیم حل شده که در فصل مشترک بخار - مذاب واکنش نداده است به مناطق داخل درون مذاب نفوذ می کند و با آلومینیم جامد موجود در مذاب واکنش داده و طبق واکنش زیر به آلومیناتهای کلسیم تبدیل می شود [۸].

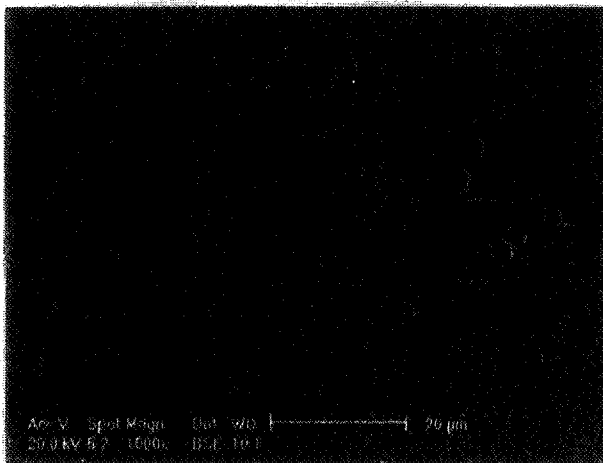


در شکلهای (۸) و (۹) تأثیر مقادیر مختلف تزریق سیم جهت طولی و عرضی ورق نورد شده نشان داده شده است.

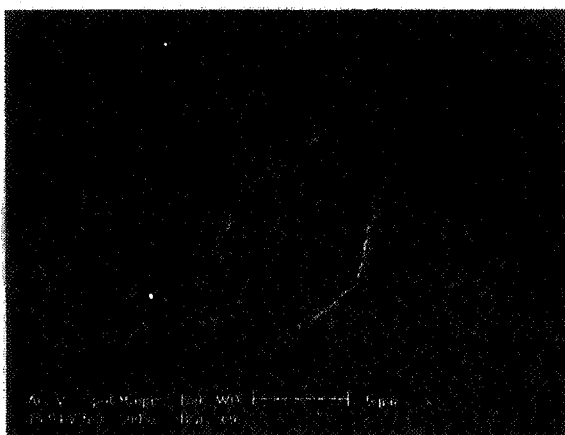
میکروسکوپی ورق نورد شده ذوب ۱ مشاهده شد، ناخالصی سولفید منگنز است، شکل (۵). همان طور که در تصویر دیده می شود ناخالصی سولفید منگنز در جهت نورد کشیده شده است. تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان می دهد که فازهای MnS و فولاد دارای ویژگیهای تقریباً یکسان تغییر شکل اند. لذا آخال سولفید منگنز در دمای نورد گرم قابلیت تغییر شکل بالایی دارد و در طی نورد گرم در جهت طولی نورد کشیده می شود و به صورت رشته های طویل در ساختار فولاد ظاهر می شود [۵]. بنابراین نوع مورفولوژی و نحوه توزیع آخالهای آلومینایی و سولفیدی از لحاظ تأثیر بر کیفیت فولاد از وضعیت مطلوبی برخوردار نبوده و مسلماً سبب کاهش کیفیت فولاد تولیدی خواهد شد. اساساً تشکیل این گونه آخالها در فولادهای کار شده سبب ایجاد عیوب سطحی در فولاد می شود که همراه آن افت شدید خواص ضربه و کاهش قابلیت شکل پذیری در جهت عرضی و ضخامت ورق را به همراه خواهد داشت [۶].

شکل (۶) نوع مورفولوژی و نحوه توزیع آخالها در فولادی که با استفاده از افزودن ترکیبات کلسیم دار اصلاح شده است را نشان می دهد (ورق نورد گرم شده ذوب ۳). همان طور که مشاهده می شود حضور رشته های طویل ناخالصی از بین رفته و آخالهای تقریباً کروی شکل با اندازه یکنواخت جایگزین آنها شده است. در تحلیل کیفی EDS آخالهای اصلاح شده، حضور پیک مربوط به عنصر کلسیم تشکیل فازهای آلومینات کلسیم در آخال را تایید می کند.

در شکل (۷) نقشه های اشعه ایکس، توزیع مربوط به عناصر آلومینیم، کلسیم، گوگرد و اکسیژن موجود در یک آخال آلومینات کلسیم را نشان می دهد. از مقایسه بین شکل های (۲) و (۷) چنین برمی آید که آخال آلومینات کلسیم تشکیل شده از نوع C بوده و ترکیبات سولفیدی و اکسی سولفیدی در آن تشکیل نشده است [۴]. با توجه به توزیع عناصر آلومینیم و کلسیم که از روی تحلیل های انجام شده و همچنین با توجه به دانسیته ذرات که در تصاویر اشعه ایکس مشخص شده است. می توان ترکیبات مختلف آلومینات کلسیم تشکیل شده در



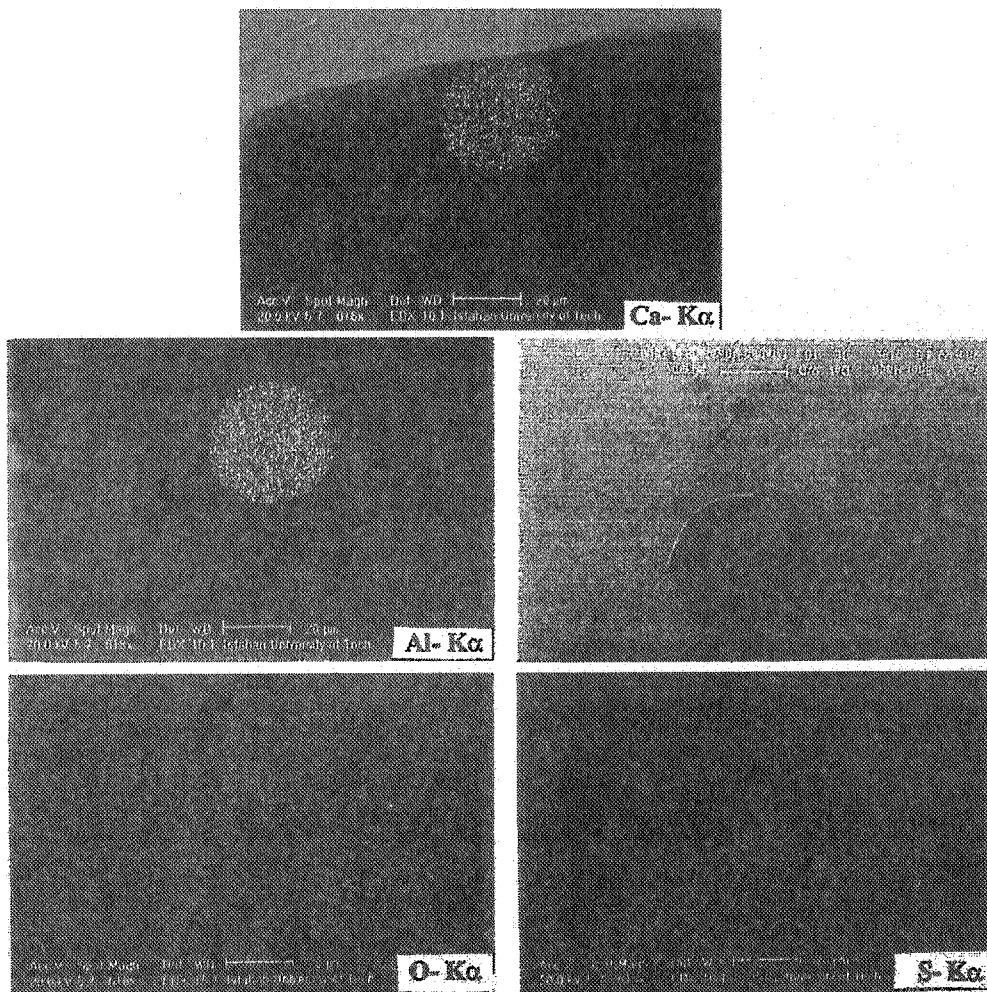
شکل ۵ - تصویر SEM و آنالیز EDS از آخالهای سولفیدی تشکیل شده در زیر ساختار ورق نورد گرم شده ذوب ۱



شکل ۶ - تصویر SEM و آنالیز EDS از آخالهای تشکیل شده در فولاد عملیات شده با تزریق سیم CaSi - ورق نورد گرم شده ذوب ۲

سبب بهبود خواص ضربه‌ای فولاد شده است ولی در مقادیر تزریق خیلی زیاد خواص ضربه‌ای فولاد افت پیدا کرده است زیرا مقادیر تزریق خیلی زیاد کلسیم در مذاب سبب افزایش میزان کلسیم حل شده در مذاب می‌شود لذا کلسیم حل شده

همانطور که ملاحظه می‌شود افزایش میزان تزریق کلسیم به مذاب با کاهش دمای انتقال نرمی به تسردی فولاد (DBTT) و همچنین افزایش انرژی شلف ضربه همراه بوده است. نکته قابل توجه این است که در ابتدا افزایش میزان تزریق کلسیم به مذاب

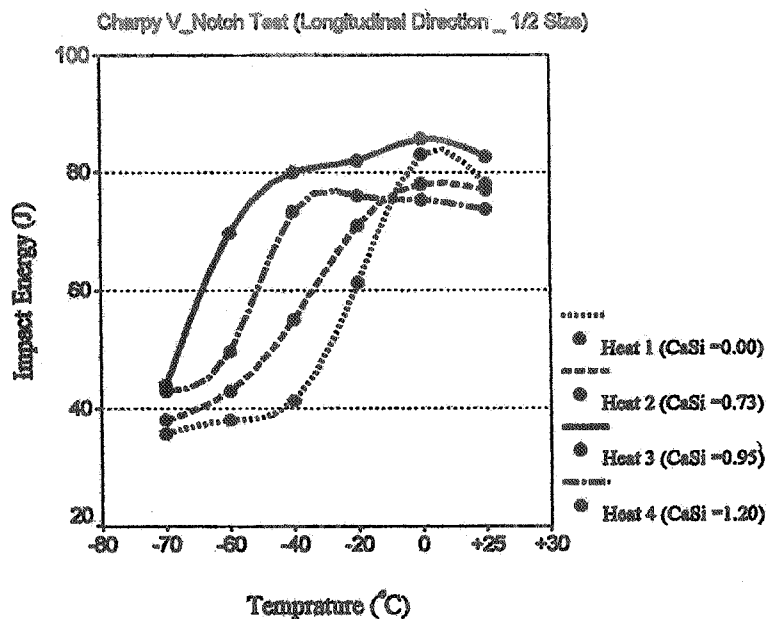


شکل ۷- تصاویر SEM و X-Ray Mapping از آخال اصلاح شده

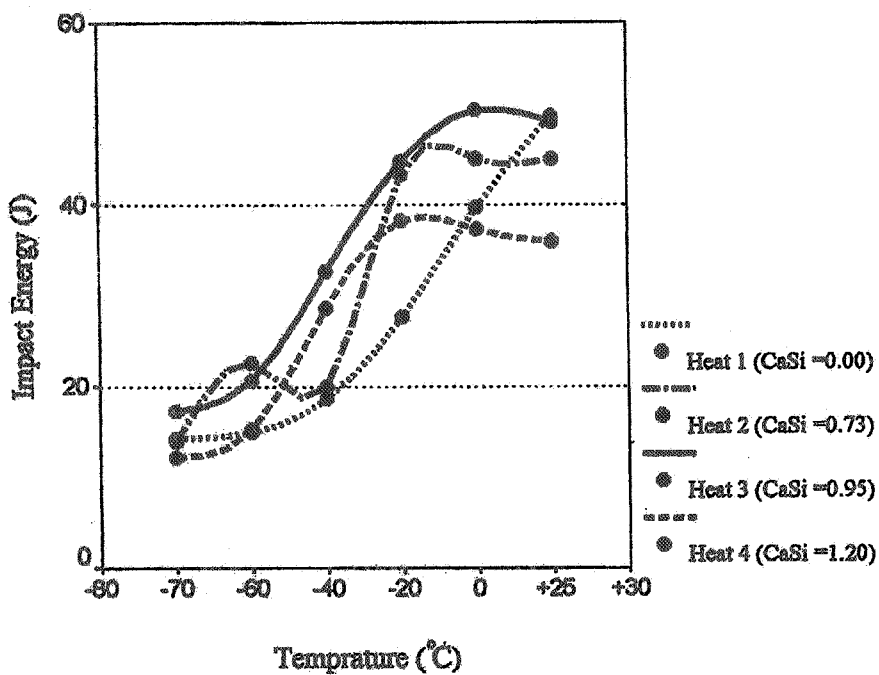
می‌شود در ابتدا با افزودن میزان کلسیم تزریق شده به مذاب دمای DBTT فولاد تا ۶۵- درجه سانتیگراد کاهش یافته و سپس با ادامه میزان تزریق بیشتر به مذاب این مقدار دما افزایش یافته است. لذا با توجه به نتایج به دست آمده چنین برمی‌آید که مقدار بهینه برای افزودن سیم CaSi به مذاب فولاد X42 در شرایط عملی کارگاه فولادسازی معادل ۱-۰/۹ کیلوگرم پودر CaSi به ازای یک تن فولاد مذاب است.

اضافی در مذاب به عنوان عامل اکسیژن‌زدا و گوگردزدا عمل کرده و با تشکیل آخالهای CaO و CaS باعث افزایش تعداد آخالها در ساختار فولاد می‌شود که افت خواص ضربه‌ای فولاد را نیز به همراه خواهد داشت. در این رابطه شکل (۱۰) نحوه تغییرات دمای DBTT در جهت طولی نورد ورق را با میزان تزریق سیم CaSi نشان می‌دهد (لازم به ذکر است که نقطه عطف منحنیهای رسم شده در شکل (۸) به عنوان دمای انتقال (DBTT) نمونه‌ها در نظر گرفته شده است). همان‌طور که دیده

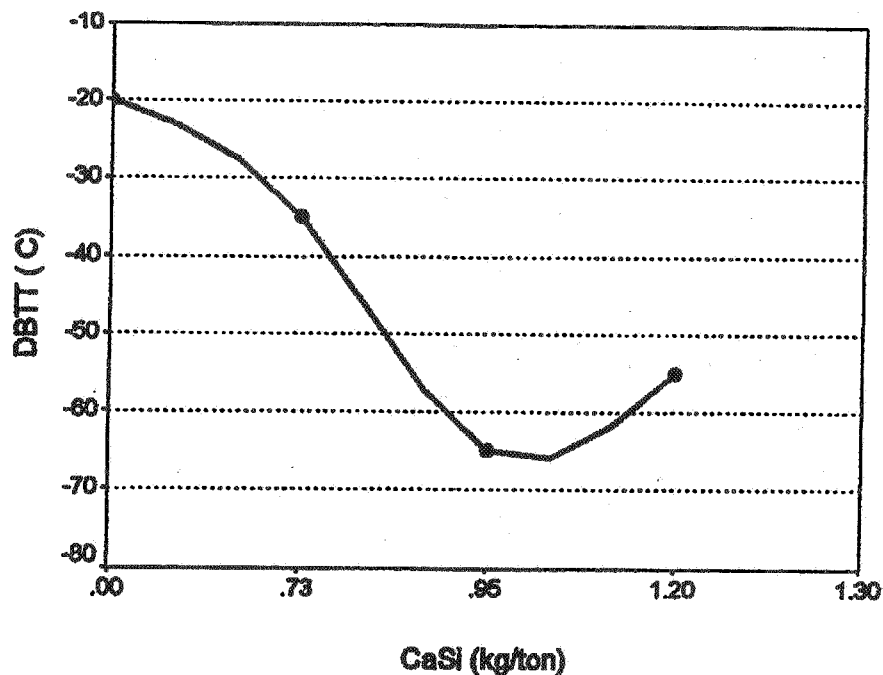




شکل ۸- تأثیر مقادیر مختلف تزریق سیم CaSi بر روی منحنیهای انرژی ضربه نسبت به دما برای جهت طولی نورد ورق



شکل ۹- تأثیر مقادیر مختلف تزریق سیم CaSi بر روی منحنیهای انرژی ضربه نسبت به دما برای جهت عرضی نورد ورق



شکل ۱۰- تأثیر مقادیر مختلف تزریق سیم CaSi بر روی دمای DBTT نمونه‌های جهت طولی نورد ورق

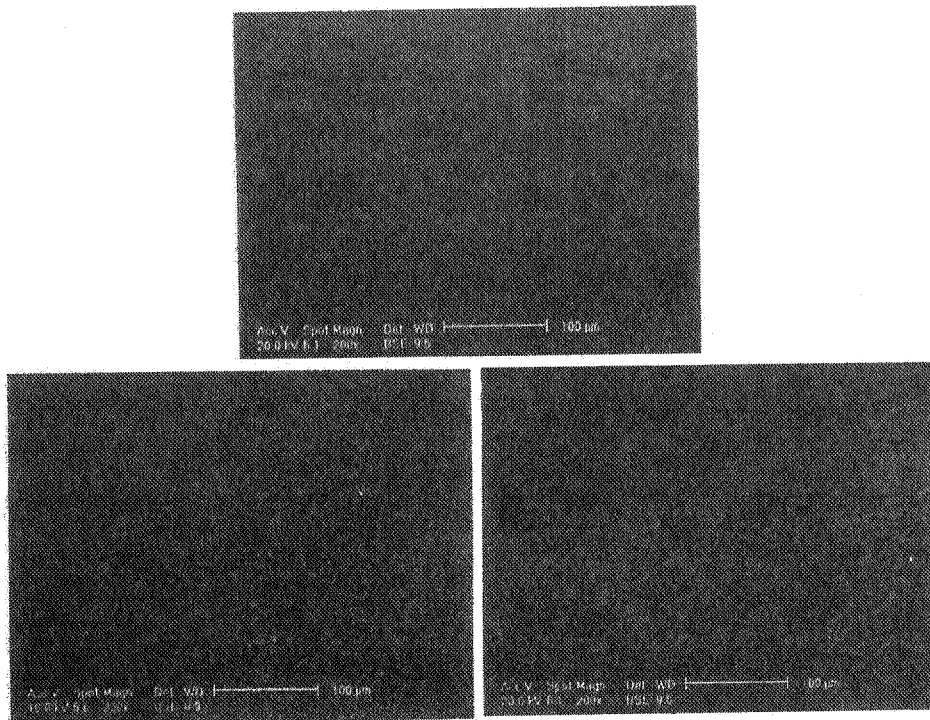
داشت. بنابراین سرعت شناور شدن ذرات کروی شکل بیشتر است. پارامتر دیگری که در اثر افزودن ترکیبات کلسیم‌دار به مذاب سبب کاهش تعداد آخالها شده کاهش وزن مخصوص آخالها است. نحوه تغییرات وزن مخصوص فازهای مختلف آلومینات کلسیم بر حسب غلظت  $Al_2O_3$  موجود در این ترکیبات در شکل (۱۲) نشان داده شده است. دیده می‌شود که در ابتدا با افزایش تزریق کلسیم به مذاب وزن مخصوص فازهای آلومینات کلسیم تشکیل شده به تدریج کاهش یافته است به طوری که اگر مقدار استفاده از کلسیم به اندازه کافی باشد کمترین وزن مخصوص را برای آخالهای آلومینات کلسیم که حاوی ترکیبات  $C_{12}A_7$  هستند، خواهیم داشت.

مطابق قانون استوکس ملاحظه می‌شود که با کاهش وزن مخصوص ذره ( $\rho_s$ ) سرعت شناور شدن آنها افزایش می‌یابد. بنابراین به طور کلی با کروی شدن آخالها و کاهش وزن مخصوص آنها، سرعت شناور شدن آنها به سمت سرباره افزایش یافته و به راحتی از مذاب جدا می‌شود.

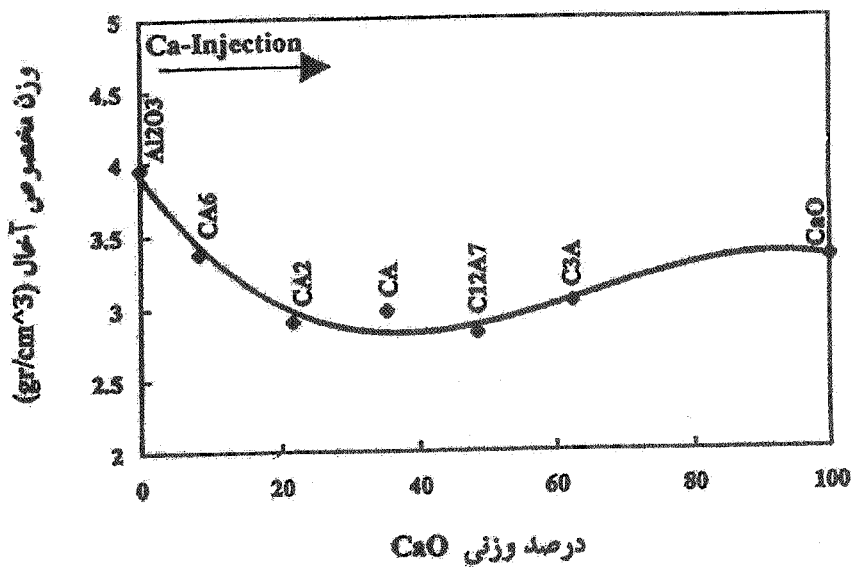
تصاویر میکروسکوپی ارائه شده در شکل (۱۱) مبین این موضوع است که افزودن بهینه کلسیم به مذاب سبب کاهش تعداد آخالها در ساختار میکروسکوپی ورقهای فولادی شده است که در این رابطه دو پارامتر مهم نقش اصلی را به عهده داشته‌اند. این دو عامل شکل آخال و وزن مخصوص فازهای موجود در آخال است. اساساً چگونگی شکل آخال یکی از پارامترهای بسیار مهمی است که بر روی سرعت شناور شدن آخال تأثیر به سزایی دارد. زیرا مطابق قانون استوکس [۳] داریم:

$$V_t = \frac{2R^2(\rho - \rho_s)}{9\mu}$$

که در این رابطه  $R$  شعاع ذره کروی  $P$  وزن مخصوص سیال،  $\rho_s$  وزن مخصوص ذره جامد،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی سیال و  $V_t$  سرعت حدی ذره جامد است، در ارتباط با ذرات با سطح خارجی مساری می‌توان گفت که مقدار  $V_t$  برای با شکل کروی بیشتر خواهد بود. زیرا این ذرات بیشترین نسبت حجم به سطح را در مقایسه با سایر ذرات یا اشکال هندسی مختلف خواهند



شکل ۱۱- نوع شکل و اندازه آخالها در نمونه‌های ورق نورد گرم شده ذوبهای مختلف



شکل ۱۲- نحوه تغییرات وزن مخصوص فازهای آلومینات کلسیم در طی فرایند تزریق CaSi

بهبود می یابد.  
 ۴- تزریق بیش از اندازه سیم CaSi به مذاب باعث افزایش تعداد آخالها و همچنین بزرگتر شدن اندازه آنها می شود، هر دو این عوامل کاهش انرژی شلف ضربه و افزایش دمای DBTT فولاد را به همراه خواهد داشت.  
 ۵- در اثر تزریق کافی ترکیبات کلسیم دار به فولاد مذاب، اولاً میزان کروی شدن آخالها افزایش می یابد و ثانیاً سبب کاهش وزن مخصوص آخالها نیز می شود. هر دو این عوامل باعث افزایش سرعت شناور شدن آخالها در مذاب می شود که نهایتاً حذف بهتر آخالها از مذاب را به همراه خواهد داشت.

۱- استفاده از عملیات تزریق کلسیم در فولاد مذاب باعث افزایش انرژی شلف ضربه تا ۸۳ ژول و همچنین باعث کاهش دمای انتقال نرمی به تدری فولاد تا ۶۵- درجه سانتیگراد شده است.  
 ۲- مقدار بهینه برای تزریق سیم CaSi در شرایط آزمایشهای انجام شده در واحد LF ناحیه فولادسازی در گستره ۱-۰/۹ کیلوگرم پودر CaSi به ازای یک تن مذاب فولاد X42 بوده است.  
 ۳- با کنترل اندازه و شکل آخالها و همچنین ایجاد توزیع مناسب آخالها در فولاد، خواص ضربه ای فولاد

واژه نامه

1. Rare Earth

2. C=CaO, A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

3. Lodal Furnace

4. Ductile to Brittle Transition Temperature

مراجع

- Vainola, R.V., Holappa, L.E.K. and Kearvonon, P.H.J., "Modern Steelmaking Technology for Special Steels," *Journal of Materials Processing Technology*, No. 53, PP. 453-456, 1995.
- Kiessling, R., Non-Metallic Inclusions in Steel, metal Society, London, Part I-IV, 1978.
- Cicutti, C.E., Madias, J., and Gonzalex, J.C., "Control of Microinclusions in Calcium Treated Aluminium Killed Steels," *Ironmaking and Steelmaking* vol. 24, No. 2, PP. 155 - 159, 1997
- Kitamura, M., Soejima, T., Kasasaki Sh., and Koyama, sh., "Desulfurization Process and shape Control of Inclusions by the Addition of Calcium Or Rare Earth Metals," *Steelmaking Conference Proceedings*, Vol. 63, Washington, D.C., 1980.
- Chen, Sh., Wei, F., Liou, H., and Chou, Ch., "Inclusion Shape Control and Its Application On the Property Improvement of Steel Plate," China Steel Technical Report, No. 4, PP. 13-23, 1990.
- Biswas, D.K., Venkatraman, M., and etc. "Influence of Sulfide Inclusion on Ductility and Fracture Behavior of Resulfurized HY-80 Steel," *Metallurgical Transactions A*, vol. 234, PP. 1479-1492, 1992.
- Maiti, R., and Hawbolt, E.B., "The Effect of Hot Rolling on the Inclusion Morphology of Semi-killed and a Calcium Treated X-70 Pipelin Steel," *J. Materials for Energy Systems*, Vol. 6, No. 4, PP. 251 - 262, 1985.
- Lu, D.L., Irons, G.A., and Lu, W.K., "Kinetics and Mechanisms of Calcium Dissolution and modification of Oxide and Sulphide Inclusions in Steel," *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 21, No. 5, PP. 362-371, 1994.