

چسبندگی پوسته های اکسیدی در فولادهای کم کربن

عباس زارعی هنزکی

استادیار گروه مهندسی متالورژی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

علیرضا شکوهی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد - گروه مهندسی متالورژی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

احمد علی آماده

استادیار گروه مهندسی متالورژی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۰/۷/۲۵، تاریخ تصویب ۸۱/۱/۲۴)

چکیده

فرایند پیشگرم در صنعت فولاد سازی به مجموعه عملیاتی اطلاق می گردد که طی آن مقاطع مختلف فولادی به طور پیوسته تا دمای کار گرم تحت گرمایش قرار می گیرند. از جمله پدیده های جانبی مهمی که در این فرایند رخ می دهند، می توان به پوسته زایی و اکسیداسیون سطح تختالها اشاره نمود. در این میان آنچه که بیش از پدیده پوسته زایی اهمیت می یابد، چسبندگی پوسته های حاصله به سطح تختال می باشد. در تحقیق حاضر، با رهیافتی کاملاً جدید اثر ترکیب شیمیایی و شکل فصل مشترک بر چسبندگی پوسته های اکسیدی در سه فولاد کم کربن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهند که وجود عنصر Si در فولاد نه تنها با تشکیل فاز واسطه فایلیت و ایجاد پیوندهای شیمیایی باعث افزایش چسبندگی پوسته شده، بلکه با افزایش تخریب فصل مشترک نیز بر میزان چسبندگی مکانیکی می افزاید.

واژه های کلیدی: اکسیداسیون، پوسته زایی، چسبندگی پوسته های اکسیدی، نورد گرم

مقدمه

به طور معمول محصولات اصلی احتراق در کوره های پیشگرم از پتانسیل بالای اکسید کنندگی برخوردار بوده که به همراه دمای بالای محیط کوره موجب واکنش های شدید اکسایش در سطح تختالهای فولادی می شوند. اصطلاحاً محصولات این واکنش را "پوسته" می نامند. چسبندگی پوسته های مذکور پس از خروج تختالها از کوره منجر به نورد همزمان آنها با تختال و در نتیجه فرو رفتن آنها در ورق تولیدی می شود. این پدیده از بین رفتن کیفیت سطحی ورق همراه با خسارات متعدد دیگر را به دنبال دارد. این عیوب به پوسته های نورد شده به داخل^۱ معروف بوده و تاکنون بیش از ۲۸ دسته از آنها شناخته شده اند [۱-۳].

امروزه تعریفی دقیق و کمی از واژه چسبندگی^۲ پوسته های اکسیدی به تختالها وجود ندارد. اصولی ترین تعریف در این زمینه بر مبنای انرژی پیوند ترمودینامیکی بین دو

سطح آزاد A و B، که فصل مشترک را تشکیل می دهند، قابل ارائه بوده و با رابطه زیر بیان می شود:

$$W_{\text{adhesion}} = \gamma_a + \gamma_b - \gamma_{ab}$$

(۱)

که در آن γ انرژی ویژه سطح (بر واحد سطح) مربوط به سطوح و فصل مشترک بوده و W_{adhesion} کار برگشت پذیر لازم برای جدا کردن فصل مشترک می باشد. بدین ترتیب پارامتر W_{adhesion} معیاری کمی از نیروهای پیوندی در فصل مشترک را بیان می کند [۴]. حضور عناصر آلیاژی و ناخالصیهای حاصل از ترکیبات آنها در فصل مشترک نقش مهمی در تقویت یا تضعیف پیوندهای این ناحیه خواهد داشت. به عنوان مثال مقادیر جزئی مس، قلع، آرسنیک، آنتیموان، یا فسفر می تواند در فصل مشترک فلز / پوسته، رسوب کرده و چسبندگی پوسته را کاهش دهند [۵]. تحقیقات گذشته مبین تأثیر پارامترهای فرآیند پیش گرمایش بر میزان چسبندگی و نوع و

استفاده شد. دهانه قالب به کار رفته ۴ سانتیمتر بوده و محدوده معیار برای اندازه گیری میزان چسبندگی نیز همین اندازه در نظر گرفته شد. ابتدا نمونه ها در کوره مافلی در سه دمای 1000°C ، 1100°C ، 1200°C ، و به مدت ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ دقیقه در هوا تحت گرمایش قرار داده شدند و سپس بلافاصله پس از خروج از کوره تحت آزمایش خمش با زاویه ۶۰ درجه قرار گرفتند. با انجام این عملیات بخشهایی از پوسته ها جدا شده و بخشهایی نیز بر روی ورق باقی می ماند. با استفاده از روش شمارش نقاط، نسبت سطحی که پوسته خود را از دست داده به کل سطح در نظر گرفته شده در محدوده ۴ سانتیمتری دهانه قالب تعیین شد.

تحلیلگر تصویر

جهت بررسی اثر تضرس^۳ فصل مشترک بر چسبندگی و خواص مکانیکی آن، طول فصل مشترک به عنوان معیار دیگری مد نظر قرار گرفته و با تکیه بر قابلیت های نرم افزار تحلیلگر تصویر^۴ مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس نمونه هایی به ابعاد $5 \times 5 \times 5$ میلیمتر از شمش جدا و آماده سازی شدند و تحت اکسایش در کوره مافلی و در اتمسفر هوا در دماهای 1050°C ، 1100°C ، 1150°C ، 1200°C ، به مدت ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ دقیقه قرار گرفته سپس در هوا سرد شدند. پس از آماده سازی اولیه، تصویر فصل مشترک به طور مستقیم مورد بررسی واقع شد. در این خصوص حداقل ده منطقه متفاوت از هر نمونه بررسی گردیده و طول فصل مشترک در آنها اندازه گیری شد. سپس میانگین نتایج حاصله تعیین و عدد حاصل بر طول تصویر تقسیم گردید (شکل ۲). عدد بدست آمده عددی بدون بعد بوده و به عنوان معیاری برای مقایسه توان چسبندگی پوسته در نظر گرفته شد.

آزمایش TG

جهت مقایسه روند و سینتیک اکسایش در فولادهای مورد آزمایش در دماها و زمانهای مختلف، از دستگاه Thermal Gravimetry استفاده گردید. از این طریق تغییرات وزن نمونه ها در دماهای مختلف بر

پراکندگی پوسته های نورد شده به داخل می باشد. در این بین فرآوری فولاد و در نتیجه ترکیب شیمیایی آن نقش تعیین کننده داشته و جهت کنترل پوسته زائی و چسبندگی آن، محصولات هر کارخانه باید جداگانه مورد تحقیق و جستجو قرار گیرد. در این راستا تحقیقات گسترده ای بر روی چندین محصول مجتمع فولاد مبارکه برنامه ریزی شد و در مقاله حاضر که بخشی از مطالعات و بررسیهای مؤلفین در این زمینه را به رشته تحریر در آورده است، اثر سیلیسیم بر چسبندگی پوسته های حاصل از اکسایش سه نمونه فولاد کم کربن محصول آن مجتمع تشریح گردیده است.

روشهای انجام آزمایش

مواد اولیه

فولادهای بکار رفته در این تحقیق سه نوع فولاد کم کربن محصول مجتمع فولاد مبارکه می باشند که ترکیب شیمیایی آنها در جدول (۱) داده شده است. همانطور که مشاهده می شود اختلاف عمده این سه فولاد علاوه بر کربن در میزان سیلیسیم و منگنز آنها می باشد. همچنین اختلاف جزئی در میزان نیکل و آلومینیم دیده می شود.

آزمایش خمش گرم

اگرچه تکنیکهای متفاوتی برای دستیابی به میزان چسبندگی گرم بر مبنای آزمایشهای کشش، پیچش، خمش و کوبش طراحی شده اند، اما هیچ یک در تعیین دقیق نیروی چسبندگی بین داخلی ترین لایه های پوسته های ضخیم و فلز پایه موفق نبوده اند. دلیل عمده این امر، اثرات موازی پارامترهایی است که بر چسبندگی مؤثرند و از آن جمله می توان به انقباض حرارتی اشاره نمود. با این همه با توجه به امکانات موجود و قابلیت های آزمایش خمش گرم، از جمله سادگی آن و امکان اعمال تنش فشاری بر پوسته حاصل (که شبیه سازی فرآیند پوسته زدائی^۲ را ممکن میسازد) این تکنیک جهت ارزیابی و مقایسه چسبندگی پوسته فولاد های مختلف برگزیده شد (شکل ۱). برای انجام این آزمایش از ورقهای نورد گرم، نمونه هایی به ابعاد $2 \times 50 \times 200$ میلیمتر جدا و

نتایج و بحث

حسب زمان ثبت و به صورت نمودار اکسایش قابل ارائه

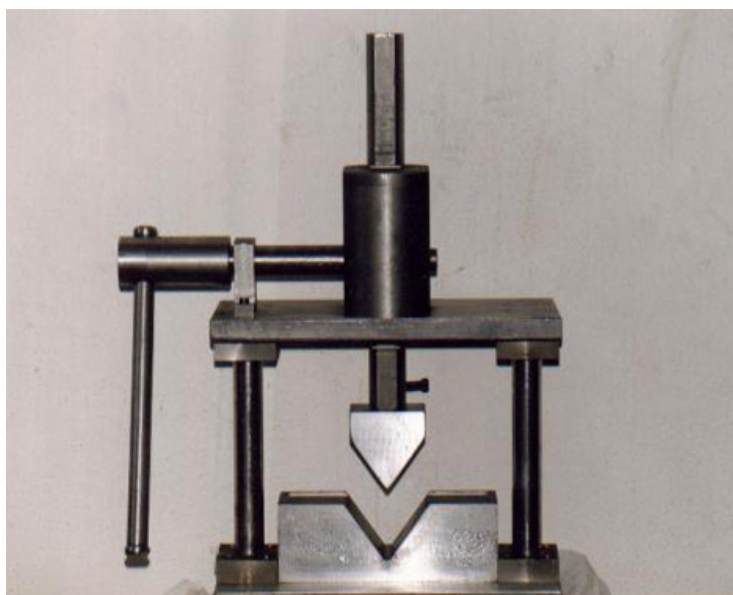
نتایج آزمایش خمش گرم در شکلهای (۳، ۵، ۷، ۹)

گردید.

ارائه شده اند. همانگونه که مشاهده می شود، در فولاد A

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولادهای مورد تحقیق.

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Ti	Nb/V
A	0.025	0.200	0.010	0.020	0.024	0.040	0.040	0.010	0.040	0.070	0.010	0.002
B	0.115	0.550	0.150	0.025	0.025	0.120	0.070	0.070	0.120	0.070	0.010	0.004
C	0.120	1.300	0.270	0.025	0.075	0.070	0.070	0.070	0.070	0.030	0.010	0.040



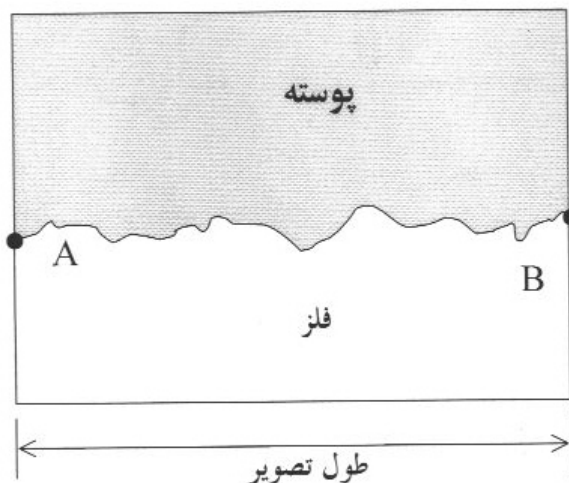
شکل ۱: دستگاه خمش گرم.

گرمایش به راحتی خزش کرده و موجب حذف تنشهای باقیمانده از مراحل قبل در پوسته اکسیدی گردد. از آنجائیکه این اکسید نزدیکترین لایه به فلز در حین اکسایش می باشد و در شرایط اکسایش گرم بیش از ۹۰٪ پوسته را نیز تشکیل می دهد، خواص فوق، این اکسید را در حفظ چسبندگی پوسته در شرایط عادی یاری می نماید [۶].

اما پدیده دیگری که باید در نظر گرفته شود، اثرات ذرات فازهای دومی است که در حین اکسایش در فصل مشترک تشکیل می شوند. با توجه به وجود عنصر Si در نمونه های مورد آزمایش و تشکیل SiO_2 به هنگام اکسایش در فصل مشترک، این ترکیب می تواند قابلیت

خزش پوسته را تحت تأثیر قرار دهد و توان آن را در سازگاری و تحمل تنشهای ایجاد شده در حین رشد در داخل کوره کاهش دهد. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش TG بر روی فولادهای مذکور، همانطور که در شکل (۱۱) نیز دیده می شود، در دمای 1000°C ، سطح اکسایش فولاد B نسبت به فولاد A پایینتر است. این پدیده می تواند بخوبی به تشکیل و رشد فاز SiO_2 در فصل مشترک پوسته و فلز نسبت داده شود. تشکیل جزایر SiO_2 در فصل مشترک پوسته و فلز علیرغم پراکندگی، منجر به اختلال در پدیده رشد پوسته و ادامه اکسایش در این دما می گردد. نتایج حاصل شده از آزمایش خمش گرم در این تحقیقات، مبین این واقعیت می باشند که تشکیل فازهای ترد سیلیکاتی در فصل مشترک در بستر FeO تا دمای 1100°C باعث تولید و انتشار ترک در فصل مشترک و سهولت نسبی جدایش پوسته از فلز شده اند.

از سوی دیگر واکنش بین FeO و SiO_2 منجر به تشکیل فاز جدیدی به نام فایلایت (Fe_2SiO_4) می شود که با توجه به نقص فراوان ساختاری ناشی از شکل گیری از FeO ، سرعت بالاتری به اکسایش می دهد و درعین حال با افزایش دما در دمای 1176°C ذوب میگردد [۷]. این موضوع با نزدیک شدن سطح اکسایش دو فولاد A و B در دمای 1200°C (شکل ۱۱) تأیید می گردد.

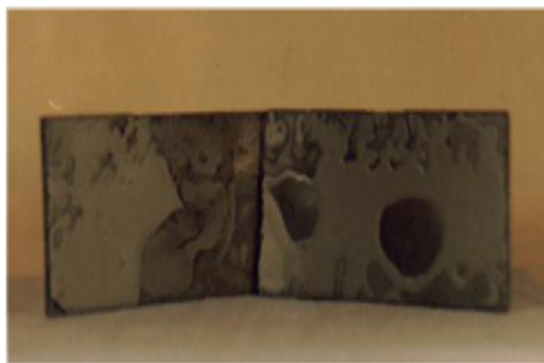


شکل ۲: روش اندازه گیری فصل مشترک.

با کمترین مقدار سیلیسیم نسبت به دو فولاد دیگر، چسبندگی در تمام زمانها و دماها یکسان می باشد. از سوی دیگر نتایج آزمایش خمش گرم در فولاد B (شکلهای ۸، ۶، ۴ و ۱۰) با مقدار بیشتر سیلیسیم نسبت به فولاد A، کاهش تدریجی چسبندگی تا دمای 1100°C و افزایش ناگهانی آن را در 1200°C نشان میدهد. در توضیح این نتایج باید اشاره نمود که چسبندگی نهایی پوسته های اکسیدی رابطه ای قوی با چسبندگی آنها در حین گرمایش و در داخل کوره دارد. چسبندگی در محیط کوره نیز به میزان زیادی به مکانیزمهای تغییر شکل در دمای بالا که عمده آنها مبتنی بر لغزش مرز دانه ای و خزش می باشند، بستگی دارد. از طرف دیگر بخوبی دانسته شده است که ساختارهایی که در آنها تعدد سیستمهای لغزشی وجود دارد، مقاومت کمتری در برابر خزش و سیلان از خود نشان می دهند. بعلاوه از میان اکسیدهای سه گانه آهن، ووستیت (FeO) به دلیل تعدد سیستمهای لغزشی خود از پلاستیسیته بیشتری نسبت به دو اکسید دیگر یعنی Fe_2O_3 و Fe_3O_4 برخوردار است [۶]. تفاوت دیگر این اکسید با دو اکسید دیگر آهن، وجود نقائص فراوان در ساختار آن است، که قابلیت تراکم آن را نسبت به دو اکسید دیگر بالا می برد. مجموعه این خواص باعث می شود این اکسید در دماهای بالاتر از 900°C با سهولت بیشتری سیلان پلاستیک کرده و در حین رشد تحت تنشهای ایجاد شده در طول فرایند



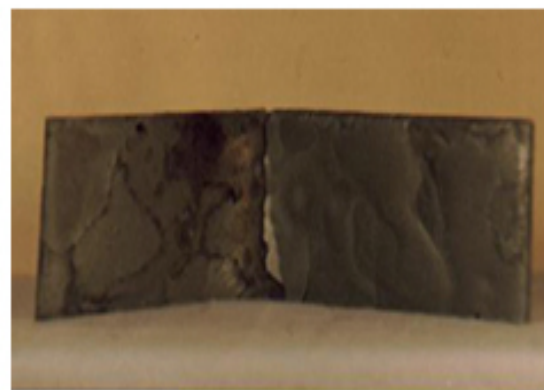
شکل ۴: نمونه خمش گرم فولاد B در دمای 1000°C با زمان گرمایش ۹۰ دقیقه .



شکل ۳: نمونه خمش گرم فولاد A در دمای 1000°C با زمان گرمایش ۹۰ دقیقه .



شکل ۶: نمونه خمش گرم فولاد B در دمای 1100°C با زمان گرمایش ۹۰ دقیقه



شکل ۵: نمونه خمش گرم فولاد A در دمای 1100°C با زمان گرمایش ۹۰ دقیقه

هندسی خود را حفظ کرده است، چسبندگی پوسته به فلز ، هم به لحاظ پیوندهای شیمیایی و هم به لحاظ درهم گیر شدن مکانیکی بیشتر می شود. به همین دلیل نیز در نمونه های آزمایش خمش گرم در دمای 1200°C ، چسبندگی به اندازه ای افزایش یافته است که حتی پس از خروج از کوره، با وجود تنشهای مختلف از جمله شوک حرارتی و تنش خمشی حاصل از آزمایش ، همچنان پوسته چسبندگی خود را حفظ کرده است ، (شکلهای ۸ و

ذوب شدن فایلیت از دیدگاه چسبندگی دو اثر مختلف دارد. اثر اول که در کوره قابل تشخیص است ، سهولت تحمل تنشهای موجود به دلیل حالت مذاب این فاز در فصل مشترک و افزایش شدید توان سازگاری پوسته و فلز می باشد. اثر دوم در مرحله بعدی و در خارج از کوره بروز می کند. در این مرحله به دلیل تشکیل نواحی ذوب موضعی نسبتاً عمیقی که بر روی فلز در فصل مشترک در کوره بوجود آمده است و در حین سرد شدن پروفیل

اکسایش درون دانه ای و هم از هجوم اکسیدها به اعماق فلز پایه به دلیل اکسایش مرزخانه ای در دانه های آستنیت سرچشمه می گیرد. اما مکانیزم تشدید تخرس هر چه باشد، تشکیل مورفولوژی خاص "ریزبرآمدگی"^۵ استحکام اتصال پوسته را به فلز با مکانیزم "میخکوب کنندگی" بالا می برد.

نکته دیگری که در فولاد C در دمای 1200°C غیر عادی به نظر می رسد، افزایش شدید تخرس و ناهمواری در فصل مشترک می باشد. به نظر می رسد این پدیده بدلیل حضور بیشتر Si در این فولاد و تشکیل فایلیت مذاب بیشتر به طور موضعی در فصل مشترک و تأثیر بعدی آن بر مورفولوژی فصل مشترک و افزایش ناهمواری مؤثر است. افزایش ناهمواری فصل مشترک به نوبه خود باعث افزایش چسبندگی پوسته به فلز در این دسته از فولادها در این دما میشود. بعلاوه از مقایسه این فولاد با فولاد B، استنتاج می گردد که اثر فایلیت بر تخرس فصل مشترک در مقادیر خاص Si بروز می کند و اثر دما در این فولادها بیش از فولادهای با سیلیسیم کمتر می باشد. این نظر با توجه به تحقیقات Asai قوت می گیرد [۹]. نتایج آن تحقیقات مبین عدم تأثیر عنصر Si در محدوده $0.1/0.1$ الی $0.1/0.1$ درصد می باشد. با این همه تعیین نقش مورفولوژی ویژه حاصل از فایلیت مذاب در تشدید تخرس و اثر میزان سیلیسیم بر این پدیده نیاز به بررسی ویژه دارد. بعلاوه باید متذکر شد که با مقایسه نمودارها در سه زمان مختلف، تغییرات ویژه ای در سطوح فصل مشترک دیده نمی شود. لذا می توان نتیجه گرفت که زمان بر تشدید تخرس تأثیر فوق العاده ای نداشته است.

با توجه به نکات اشاره شده، چنین استنتاج می شود که حضور عنصر سیلیسیم در مقادیر خاص، نقش تعیین کننده ای در چسبندگی پوسته های اکسیدی شکل گرفته در دمای بالا بر روی فولاد دارد. این عنصر نه تنها منشاء تشکیل اسپینلهای زود ذوبی چون فایلیت می باشد که در اثر ذوب موضعی در دماهای بالای 1200°C پیوندهای شیمیایی مستحکمی را در فصل مشترک بین پوسته و فلز ایجاد می کنند، بلکه با مخرس کردن فصل مشترک ضمن ایجاد پیوندهای مکانیکی قوی، مسیر انتشار

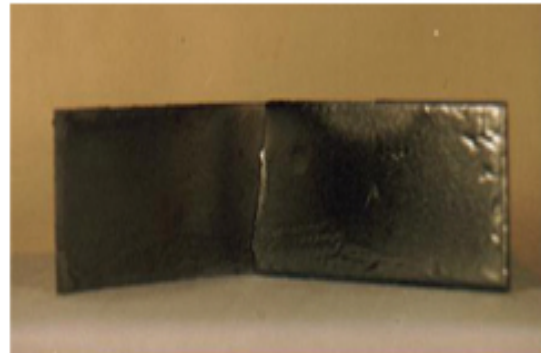
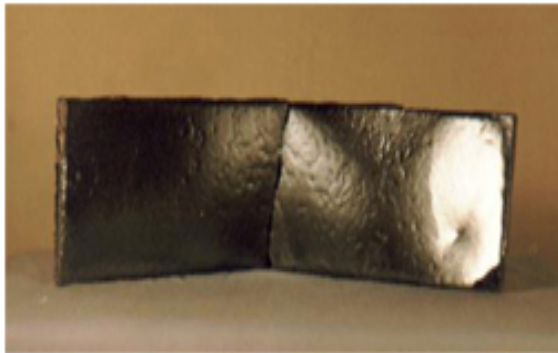
(۱۰).

کاهش چسبندگی تدریجی تا دمای 1100°C در فولاد B از دیدگاه شکست نیز قابل بررسی می باشد. بر اساس این دیدگاه، برای از بین رفتن چسبندگی و کنده شدن پوسته، وجود ترک با هندسه مناسب در فصل مشترک و رشد بعدی آن تا قطع پیوندهای موجود، ضروری می باشد. این فرایند نیازمند حضور تنشهای کششی عمود بر فصل مشترک و تنشهای برشی در فصل مشترک و رسیدن آنها به مقادیر بحرانی خود می باشد [۸]. معمولاً ذرات فاز دوم مثل Al_2O_3 و SiO_2 می توانند هر دو مرحله شکست، یعنی جوانه زنی و رشد را تحت تأثیر قرار دهند. از یک طرف آنها می توانند با ایجاد تمرکز تنش موضعی (درون پوسته و در فصل مشترک) باعث تشویق جوانه زنی شوند و از طرف دیگر به دلیل ماهیت تردتر خود نسبت به زمینه FeO باعث ترغیب و تسهیل رشد و انتشار ترک گردند. بنابراین تا زمان تشکیل فایلیت، حضور ذرات SiO_2 باعث افزایش پتانسیل جوانه زنی و رشد ترک شده و چسبندگی را کاهش می دهند. بر همین اساس نقش هندسه فصل مشترک و مورفولوژی آن بر چسبندگی باید مورد بررسی قرار گیرد. بر اساس تحقیقات Sheppard مسیر انتشار ترک در حفظ یا از بین بردن چسبندگی حائز اهمیت است. بعلاوه تخرس و خشونت سطحی در فصل مشترک، عاملی مؤثر در توقف ترک بحساب آمده و اصولاً مورفولوژی فصل مشترک تنش آستانه ای لازم برای جوانه زنی ترک را تحت تأثیر قرار داده و با افزایش تخرس این تنش آستانه ای افزایش می یابد [۹].

با توجه به نتایج بدست آمده از آنالیز تصویری (شکل ۱۲) دیده می شود، که فصل مشترک در دو فولاد B و C در دماهای مختلف دارای طول بیشتری نسبت به فولاد A میباشد و این خود نشان دهنده تخرس بیشتر در آنها است. نتیجتاً این دو فولاد به دلیل تخرس بیشتر فصل مشترک خود می توانند مقاومت بیشتری نسبت به رشد ترک در فصل مشترک نشان داده، از چسبندگی بیشتری در خارج از کوره برخوردار باشند. در خصوص علل تخرس سطحی در فصل مشترک و دلایل تشدید آن بحثهای مختلفی صورت گرفته است. بر اساس گزارش Tanigushi و Asai [۹]، تخرس سطحی هم از

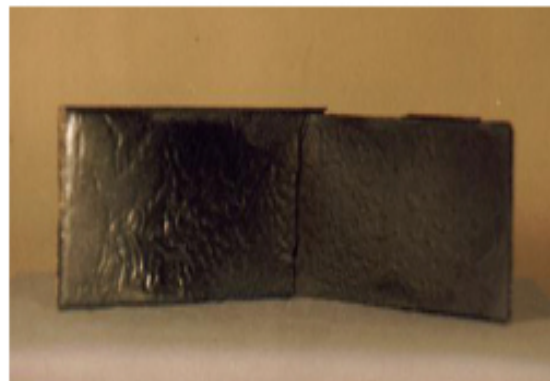
فولادها پس از خروج از کوره ، حتی پس از اعمال تنشهای خمشی جهت پوسته زدایی ، دور از انتظار نخواهد بود.

ترک را از حالت افقی و مستقیم خارج و جدایش پوسته را دشوار می سازد. به همین دلیل حصول پوسته های اکسیدی به شدت چسبنده و پایدار بر روی این نوع از



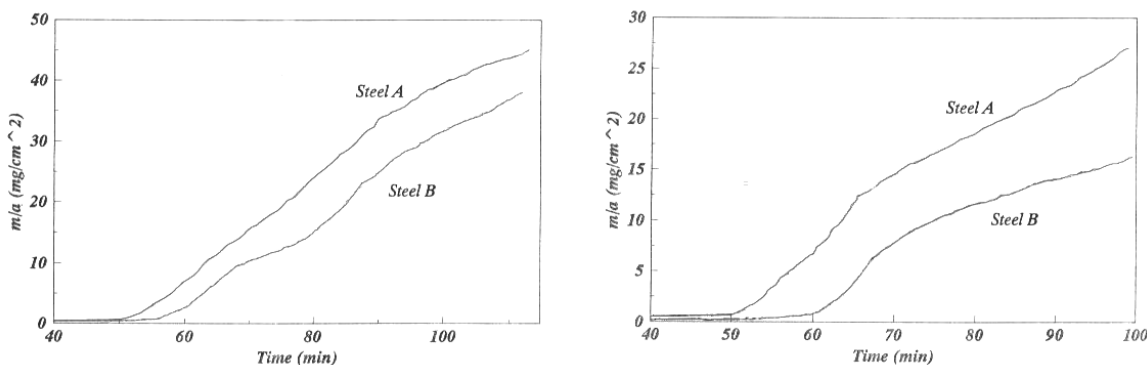
شکل ۸ : نمونه خمش گرم فولاد B در دمای °C ۱۲۰۰ با زمان گرمایش ۹۰ دقیقه

شکل ۷ : نمونه خمش گرم فولاد A در دمای °C ۱۲۰۰ با زمان گرمایش ۹۰ دقیقه.



شکل ۱۰ : نمونه خمش گرم فولاد B در دمای °C ۱۲۰۰ با زمان گرمایش ۱۲۰ دقیقه .

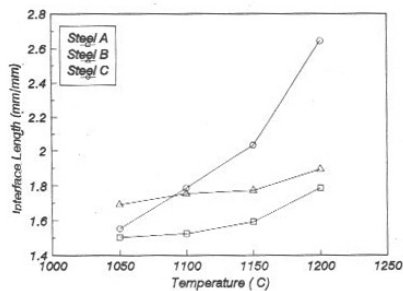
شکل ۹ : نمونه خمش گرم فولاد A در دمای °C ۱۲۰۰ با زمان گرمایش ۱۲۰ دقیقه .



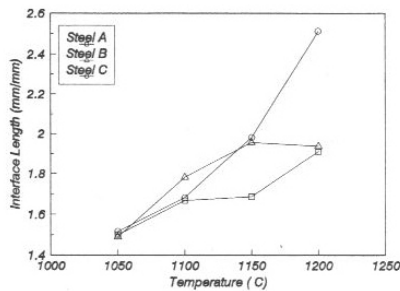
شکل ۱۱: نمودار اکسایش فولادها (الف) در ۱۰۰۰°C (ب) در ۱۲۰۰°C.

نتیجه گیری

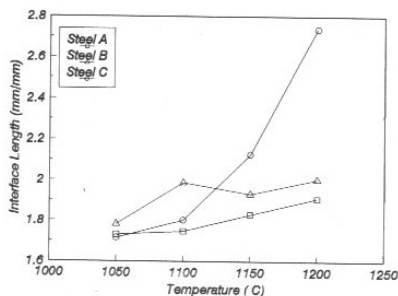
- ۱ - نتایج آزمایش خمش گرم نشان می دهد که پوسته های فولاد A تقریباً در تمام زمانها و دماها چسبندگی یکسانی دارند ولی در فولاد B با درصد Si بالاتر تا دمای ۱۱۰۰ °C کاهش چسبندگی داشته و در ۱۲۰۰ °C افزایش ناگهانی چسبندگی دیده می شود.
- ۲ - با توجه به نتایج آنالیز تصویری دیده می شود که تخریب در فولادهای B و C در دماهای مختلف بیش از فولاد A بوده و در مورد فولاد C در محدوده ۱۱۵۰ °C الی ۱۲۰۰ °C افزایش ناگهانی می دهد. به نظر می رسد



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۲: نمودار طول فصل مشترک فولادها در زمان گرمایش (الف) ۶۰ (ب) ۹۰ (ج) ۱۲۰ دقیقه.

مراجع

- 1 - Blazevic, D. T. (1986). *Rolled in scale , the continual problem*, Part I , unpublished.
- 2 - Blazevic, D. T. (1996). "Tertiary rolled in scale the hot strip mill surface problem of the 1990's." *Proc. , 34 th MWSP, Vol XXXIII , ISS AIME*, Montreal, Canada, PP. 33-38
- 3 - Grinbrg, V. B. (1989). *Steel rolling technology, Theory & Practice* , Mir Pub., PP. 327-352.
- 4 - Ohring, M. (1992)., *The materials science of thin films*. Academic Press, PP. 142-148.
- 5 - Sachs, K. and Tuck , C. W. (1960). "Surface oxidation of steel in industrial furnaces." *Iron & Steel Inst.* ,Pub 111, PP. 1-18.
- 6 - Douglass, D. L. (1970). "Oxidation of metals & alloys." *ASM edition* , PP. 321-340.
- 7 - Chang, Y. N. (1989). "High temperature oxidation of low alloy steels." *J. of Mat. Sci.*, Vol. 24 , No. 1, PP.14 –18.
- 8 - Evans, H. E. (1995). "Stress effect in high temperature oxidation of metals." *Int. Mat. Rev.*, Vol. 40 No. 1, PP. 1-40.
- 9 - Asai, T., Soshiroda, T. and Miyahara, M. (1997). "Influence of Ni impurity in steel on the removability of primary scale." *ISIJ Int.*, Vol. 37, No. 3 , PP. 272-278.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 – Rolled in Scale
- 2 – Adhesion
- 3 – Roughness
- 4 – Image Analyser
- 5 - Micropegs