

بررسی اثر کربن بر مقاومت اکسایشی همدمای فولاد های آستنیتی مقاوم به حرارت سری (HK)

مهرداد عضو امینیانⁱ، جلال حجازیⁱⁱ، یوسف خرازیⁱⁱⁱ، رسول کفایی^{iv}

چکیده:

در این تحقیق، اثر کربن بر رفتار اکسایشی فولاد آستنیتی مقاوم به حرارت سری (HK) با ترکیب شیمیایی (Ni 20%، Cr 25%) در محدوده دمایی (1300-1000 °C) بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش کربن باعث کاهش مقاومت به اکسایش ناشی از پوسته‌ای شدن اکسید محافظ کروم روی سطح آلیاژ می‌شود. علاوه بر این، کربن سبب تشکیل اکسیدهای اسپینل متخلخل به جای اکسید محافظ پیوسته کروم می‌شود، زیرا کربن با تشکیل کاربیدهایی از جمله (Cr₂₃C₆) باعث تجمع مقدار زیادی از کروم زمینه می‌گردد. لذا غلظت کروم در زمینه یکنواخت نبوده و سبب کاهش مقاومت به اکسایش می‌شود. کربن، مکانیزم اکسایش را تغییر نمی‌دهد بلکه سبب افزایش ثابت سرعت اکسایش می‌شود. به طوری که اکسایش این آلیاژها از قانون سهمی گون تبعیت می‌کند.

کلمات کلیدی:

کربن، فولاد مقاوم به حرارت، فولاد آستنیتی، مقاومت اکسایش، کینتیک اکسایش.

The Effect of Carbon on Isothermal Oxidation Resistance of Austenitic Heat Resistant Steels

M. Ozve Aminian , J. Hedjazi , Y. Kharazi , R. Kaffae

ABSTRACT :

The effect of carbon on oxidation behaviour of austenitic heat resistant steels (20%Ni 25% Cr) has been evaluated in the temperature range (1000-1300 °C) .

The results indicate that the addition of carbon causes the poor oxidation resistance due to spalling of protective chromium oxide on the surface of alloy. Also addition of carbon cause spinel oxide to form on alloy replacing the protective, continuous Cr₂O₃ type oxide. Because produced carbides allocate a lot of chromium of matrix, the oxidation resistant of steel was decreased . Carbon doesn't change the behaviour of oxidation rate constant but increase it and these alloys obey the parabolic law .

KEYWORDS :

Heat resistant steel, Oxidation resistance, Kinetics of oxidation, Carbon, Spinel Oxides.

ⁱ مدیر عامل و عضو هیات مدیره شرکت گسترش سرامیک های پیشرفته دلماسا ، (Magmaaminian@yahoo.com) ؛ تلفن منزل : ۸۸۴۰۹۳۶۱ -

موبایل : ۰۹۱۲-۱۰۸۷۳۲۵ - تلفن محل کار : ۲۲۲۷۶۳۱۴)

ⁱⁱ استاد دانشگاه علم و صنعت ایران

ⁱⁱⁱ استاد دانشگاه علم و صنعت ایران

^{iv} مدیر عامل شرکت فولادریزان

دارد، به همین خاطر، لایه اکسید کروم تشکیل شده بر روی سطح چسبندگی کمی با زمینه آلیاژ دارد [۸].

سوپر آلیاژهای پایه کبالت و نیکل می‌توانند در دماهای بیش از (1000°C) در اتمسفرهای مشخص استفاده شوند، ولی گران قیمت بودن آنها باعث شده است که صنعت در پاره‌ای از موارد به سوپر آلیاژهای پایه آهن روی آورد.

با توجه به این که قطعات سوپر آلیاژ پایه آهن به صورت گسترده‌ای در صنایع سیمان و نیروگاهی کاربرد دارند، همیشه معضل خوردگی و اکسایش زود هنگام در این گونه قطعات وجود دارد.

از آنجا که در این آلیاژها، کربن نقش مضر در کاهش مقاومت به اکسایش آلیاژ پایه آهن دارد، دستیابی به آلیاژهای مقاوم به حرارت با کربن کم (0.1%) به تجهیزات و فرآیند گران قیمت‌تر از روش‌های متداول نیازمندانست. چه بسا که کاهش مقدار کربن آلیاژ سبب کاهش سیالیت و عدم تولید موفقیت آمیز قطعات مقاوم به حرارت با ضخامت‌های کم می‌شود، لذا در این تحقیق سعی شده است تا اثر کربن بر مقاومت به اکسایش و انتخاب بهینه ترین مقدار آن بررسی شود.

روش آزمایش :

الف) ترکیب شیمیایی :

ترکیب شیمیایی آلیاژهای بررسی شده در جدول (۱) آورده شده است. آلیاژها با شرایط کاملا صنعتی و با خلوص تجارتي در کوره‌های القایی ۱۰۰ کیلوگرمی فرکانس بالا در اتمسفر هوا تهیه و آلیاژ سازی شده‌اند.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژهای مطالعه شده (در صد)

آلیاژ	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Fe
B1	۰/۱	۰/۵۳	۰/۰۱۰	۰/۰۲۰	۰/۵۶	۲۰/۵۷	۲۴/۳۷	بقیه
B2	۰/۱۵	۰/۴۷	۰/۰۱۰	۰/۰۲۰	۰/۷۶	۲۰/۳۷	۲۴/۷۵	بقیه
B3	۰/۳۳	۰/۵۶	۰/۰۱۰	۰/۰۲۰	۰/۷۳	۲۰/۲۴	۲۴/۸۰	بقیه

همان طور که ملاحظه می‌شود مقدار کربن در آلیاژها از (0.1%) تا (0.3%) متغیر است تا اثر کربن بر مقاومت اکسایش آلیاژها مشخص شود.

علت کاهش مقدار سیلیسیم به حدود (0.5%) نسبت به (۲- 1%) سیلیسیم، که در آلیاژهای مقاوم به حرارت تجارتي متداول می‌باشد، به حضور همزمان کربن و سیلیسیم در آلیاژ مربوط است، زیرا کربن و سیلیسیم باعث افزایش پتانسیل کربن آلیاژ شده و مقاومت به اکسایش را بشدت کاهش می‌دهد [۹].

افزودن سیلیسیم سبب افزایش پتانسیل کربن آلیاژهای پایه

فولاد های مقاوم به حرارت (نسوز) گروهی از آلیاژ های فولادی هستند که به دلیل وجود عناصر آلیاژی چون کروم و نیکل ، از نظر تغییر شکل یا اکسید شدن و سایر واکنش های شیمیایی در دمای بالا مقاوم هستندو به همین دلیل کاربرد زیادی در ساخت کوره ها، توربین های گازی و بخار، تجهیزات شیمیایی و پتروشیمی دارند .

فولادهای مقاوم به حرارت به طور کلی به سه دسته عمده طبقه بندی می‌شوند که می‌توان به فولادهای آستنیتی، آستنیتی - فریتی، فریتی اشاره کرد. در مناطقی که فولادهای فریتی توانایی تحمل دمای بالا و یا استحکام زیادی را ندارند، فولادهای آستنیتی کاربرد گسترده ای پیدا می‌کنند [۱].

یکی از موثرترین راه‌های افزایش استحکام دمای بالا در فولادهای آستنیتی، تشکیل رسوبات کاربیدی ($\text{Cr}_{23}\text{C}_6 - \text{Cr}_7\text{C}_3$) است [۲].

شایان ذکر است که کاربید های بین دانه ای (Cr_{23}C_6) سبب رشد و اشاعه ترک در فولادها می‌شوند و استحکام را کاهش می‌دهند [۳] - [۲].

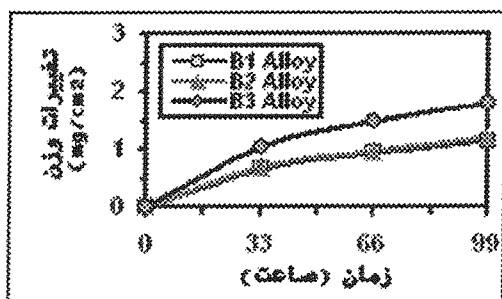
مقاومت اکسایش فولادهای مقاوم به حرارت مدیون تشکیل لایه اکسیدی محافظ و چسبیده کروم است. اگر سایش مکانیکی و یا شوک های حرارتی سبب پوسته ای شدن لایه اکسید کروم شود، زمینه فقیر از کروم در مجاورت اتمسفر اکسیدان قرار می‌گیرد، نتیجتا اکسید اسپینل متخلخل کروم و آهن تشکیل می‌شود و با ادامه اکسایش، فرورفتگی‌های به وجود آمده بر روی سطح آلیاژ، که شامل اکسید اسپینل است، عمیق‌تر می‌شوند تا این که غلظت کروم زمینه به میزان مناسبی برای تشکیل اکسید کروم برسد. در این مرحله است که رشد فرورفتگی‌ها در زمینه کم شده و سرعت اکسایش کاهش می‌یابد [۶] - [۵].

مقدار کروم لازم در زمینه آلیاژ برای تشکیل لایه محافظ اکسید کروم بر روی سطح آلیاژ به شرایط سطحی (زبری و یا صافی)، ریزساختار (اندازه دانه و...)، اکتیویته اکسیژن و دمای اکسایش بستگی دارد [۷] - [۶].

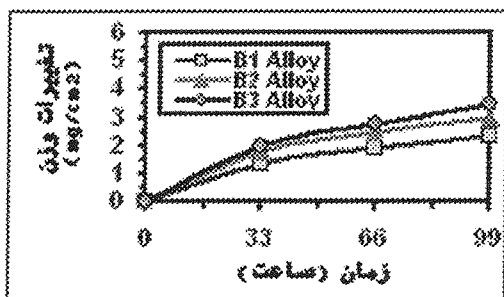
مولفین متعددی پیشنهاد کرده‌اند که وجود حفرات موجود در فصل مشترک اکسید - فلز، نتیجه مهاجرت جاهای خالی ناشی از فرآیند تشکیل اکسید و تجمع آنها در فصل مشترک است. انباشته شدن جاهای خالی در مناطق مرز دانه سبب به وجود آمدن رگه‌هایی در نواحی فوقانی مرز دانه در لایه اکسیدی می‌شود که در اثر سرمایش، ترک از محل رگه‌ها آغاز و باعث شکست لایه اکسید و پوسته‌ای شدن آن می‌شود. تمایل به تجمع حفرات در فصل مشترک با مقدار کروم رابطه مستقیم

وزن نمونه) افزایش می‌یابد و مقاومت به اکسایش کم می‌شود. بر اساس نظریه Hindam, Whittle، اگر توان دوم ضخامت لایه اکسید نسبت به زمان رسم شود، شیب خط مقدار ثابتی می‌باشد. حال اگر ضخامت لایه اکسید با افزایش وزن آلیاژ معادل در نظر گرفته شود، می‌توان انتظار داشت که رفتار اکسایش آلیاژهای مطالعه شده از قانون سهمی تبعیت می‌کند، زیرا رابطه خطی بین توان دوم تغییرات افزایش وزن آلیاژ نسبت به زمان اکسایش برقرار است (شکل ۳).

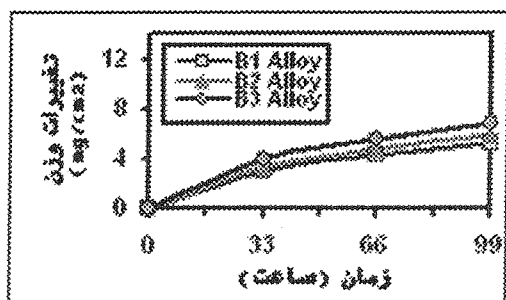
ثابت سرعت سهمی (شیب خطوط) برای آلیاژهای مختلف نیز در دماهای مختلف در جدول (۲) آورده شده است. می‌توان نتیجه گرفت که نه تنها رفتار اکسایش آلیاژهای بررسی شده از قانون سهمی گون تبعیت می‌کند، بلکه افزایش دمای اکسایش سبب افزایش مقادیر ثوابت سرعت می‌شود و مقاومت به اکسایش را کاهش می‌دهد.



(الف)



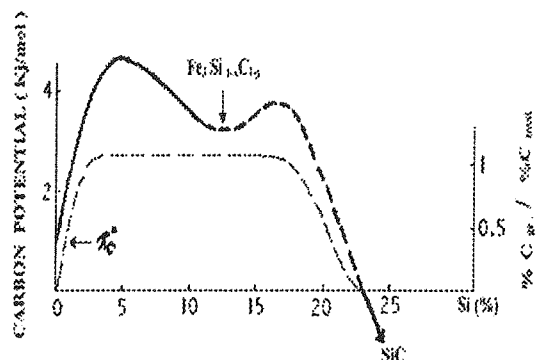
(ب)



(ج)

شکل (۲): تغییرات وزن آلیاژهای اکسید شده بر حسب زمان اکسایش در دماهای مختلف (الف) ۱۰۰۰ °C (ب) ۱۱۵۰ °C (ج) ۱۳۰۰ °C

آهن می‌شود، لذا برای جلوگیری از این امر، مقدار سیلیسیم تا حد ممکن کاهش داده شده است تا اثر کربن به تنهایی بر مقاومت به اکسایش آلیاژ بررسی گردد. (شکل ۱)



شکل (۱): اثر سیلیسیم بر پتانسیل کربن در آلیاژهای پایه آهن

ب) آزمایش‌های اکسیداسیون:

نمونه‌های آزمایشی استوانه‌ای با ابعاد $\{ (\pm 0.1) \}$ mm 10×15 برای آزمایش اکسیداسیون استفاده شده‌اند. سطوح این نمونه‌ها به طور مکانیکی با سمباده‌های شماره ۶۰۰ پولیش و پس از آن چندین بار با آب مقطر شستشو و تا زمان اکسایش در دسیکاتور نگهداری شده‌اند. قبل از آزمایش نمونه‌ها تا دقت (0.1) میلی‌گرم توزین شده‌اند، سپس نمونه‌ها درون کوره‌ای با المنتهای کاربید سیلیسیمی قرار داده شده‌اند و در دماهای ۱۰۰، ۱۱۵۰، ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد به مدت‌های ۲۳، ۶۶، ۹۹ ساعت در اتمسفر هوا تحت اکسایش قرار گرفته‌اند.

ج) متالوگرافی، تشخیص فازها:

ریز ساختار قطعات ریختگی با میکروسکوپ نوری، اکسیدها و فصل مشترک اکسید - فلز با میکروسکوپ الکترونی (Philips XL 40) مجهز به (EDAX) مطالعه و بررسی شده‌اند. فازهای موجود در زمینه ولایه‌های اکسیدی تشکیل شده بر روی آلیاژها نیز با پراش اشعه ایکس (XRD) مشخص شده‌اند. در این روش از اشعه $(Cu - k_{\alpha})$ با مشخصات 40 kV و 20 mA استفاده شده است.

نتایج تجربی:

الف) بررسی تغییرات وزن:

تغییرات وزن نمونه‌های اکسید شده در دما و زمان‌های مختلف در شکل (۲) آورده شده است. آلیاژی با کربن کم (B1) تغییرات وزن کمتری نسبت به سایر آلیاژها دارد، بنابراین می‌توان چنین دریافت کرد که علاوه بر افزایش دما و زمان اکسایش، با افزایش مقدار کربن آلیاژ نیز تغییرات وزن (ازدیاد

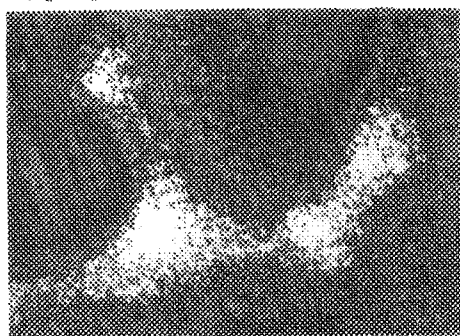
جدول (۲): ثوابت سرعت سهمی گون آلیاژهای بررسی شده در دماهای مختلف .

ثابت سرعت سهمی گون ($\text{mg}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$)			
درجه حرارت ($^{\circ}\text{C}$)			
آلیاژ	۱۰۰۰	۱۱۵۰	۱۳۰۰
B1	۳/۷۰	۱۵/۴	۷۸/۷
B2	۳/۹۳	۲۵/۲	۹۶/۹
B3	۹/۱۰	۲۳/۳	۱۳۰

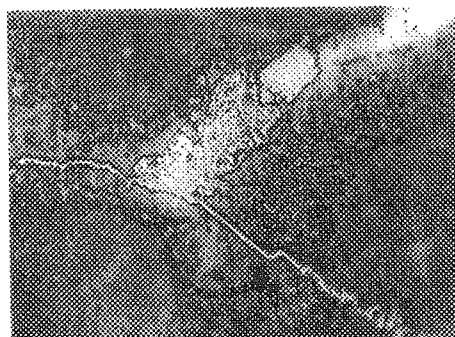
در شکل (الف - ۴) پتانسیل کربن در حدی است که کاربید تشکیل نمی‌شود و فقط غیر یکنواختی غلظتی را در زمینه آستنیت ایجاد کرده است. در حالی که با افزایش میزان کربن (پتانسیل کربن) در آلیاژهای دیگر، کاربیدها در مرز دانه‌های آستنیت تشکیل و راسب شده‌اند. شکل (ب-۴ و ج-۴).

غیر یکنواختی غلظتی در زمینه یک آلیاژ سبب عدم توزیع یکنواخت عناصر، از جمله عنصر مفید کروم، که وظیفه حفاظت از خوردگی و اکسایش آلیاژ ناشی از تشکیل لایه محافظ (Cr_2O_3) را به عهده دارد، می‌شود و سبب کاهش مقاومت به اکسایش آلیاژ (اکسایش موضعی) در مناطق فقیر از عنصر کروم می‌شود.

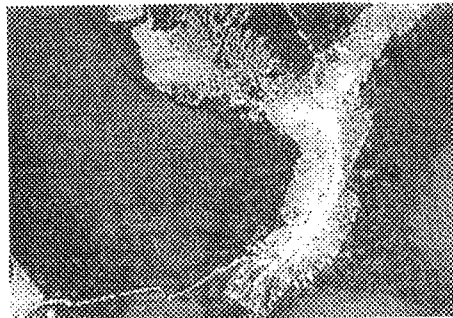
بدیهی است به دلیل یکنواختی غلظتی بیشتر آلیاژ B1، مقاومت به اکسایش این آلیاژ بالاتر از سایر آلیاژها است.



(الف)



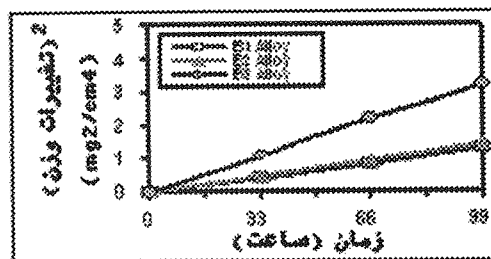
(ب)



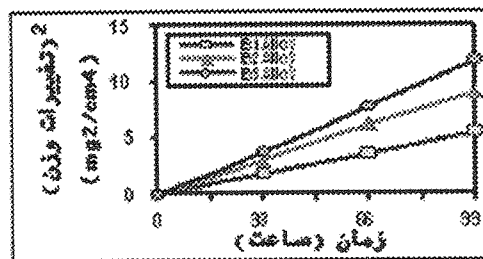
(ج)

شکل (۴): تصاویر ریز ساختار میکروسکوپ نوری فولاد های ریختگی (بزرگنمایی $\times 80$)

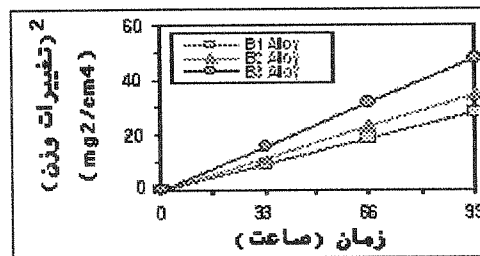
(الف) آلیاژ B1 (ب) آلیاژ B2 (ج) آلیاژ B3



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۳): ثوابت سرعت آلیاژهای اکسید شده بر حسب زمان اکسایش در دماهای مختلف .

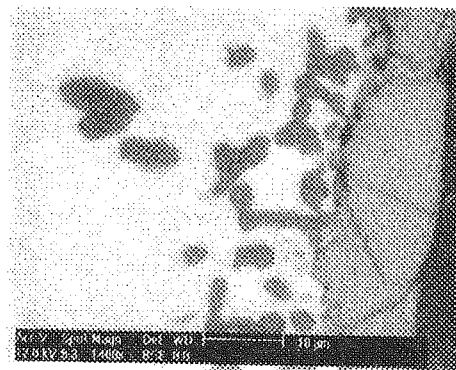
(الف) 1000°C (ب) 1150°C (ج) 1300°C

(ب) بررسی متالوگرافی، پراش اشعه ایکس:

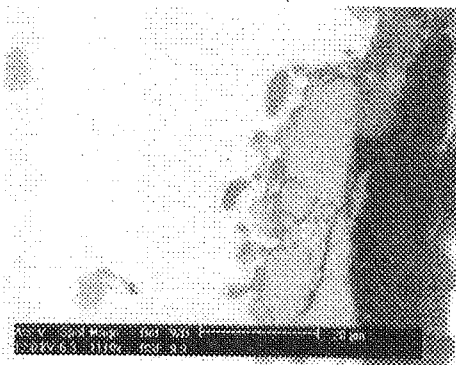
تصاویر میکروسکوپی نوری نمونه‌های اکسید شده آلیاژهای B1، B2، B3 در شکل (۴) و (۵) آورده شده‌اند.

افزایش کربن آلیاژ سبب تشکیل رسوبات کاربیدی زیادی در مرز دانه های آستنیت می‌شود و غیر یکنواختی غلظتی در زمینه را به وجود می‌آورد (مناطق سفید رنگ).

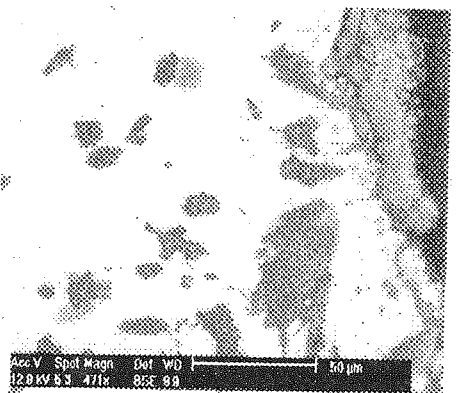
عدم یکنواختی در ترکیب زمینه باعث تشکیل لایه اکسیدی اسپینل متخلخل می‌شود که پیوستگی مناسبی نداشته و سبب افزایش سرعت اکسایش می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۵): تصاویر میکروسکوپ الکترونی لایه اکسیدی نمونه های اکسید شده بمدت ۹۹ ساعت در دمای $1150^{\circ}C$.

(الف) آلیاژ B1 (ب) آلیاژ B2 (ج) آلیاژ B3

بنابراین با افزایش مقدار کربن آلیاژ (پتانسیل کربن) به دلیل تشکیل لایه اکسیدی متخلخل و عدم پیوستگی نامناسب لایه اکسیدی و شکست این لایه ناشی از عوامل مختلف (شوک های حرارتی، مکانیکی و عدم چسبندگی مطلوب با زمینه آلیاژ) و نفوذ اکسیژن از این مناطق، مقاومت به اکسایش کاهش می‌یابد. پوسته‌های اکسیدی و شکست آنها در تصاویر (الف، ب و ج-۵) نشان داده شده است.

با توجه به اشکال مذکور مشخص می‌شود که میزان شکست و پوسته‌ای شدن لایه اکسیدی با افزایش کربن شدت می‌یابد، به طوری که هیچگونه اثری از لایه اکسیدی محافظ بر روی سطح آلیاژ نیست.

همچنین مشاهده شده است که خلوص لایه اکسید کروم، با افزایش مقدار کربن آلیاژ کاهش می‌یابد (شکل ۶). زیرا با افزایش مقدار کربن (پتانسیل کربن)، غلظت کروم مورد نیاز برای تشکیل اکسید کروم در ناحیه فصل مشترک به مقدار کافی نبوده و به جای تشکیل اکسید کروم، اکسیدهای مختلفی تشکیل می‌شود و باعث افزایش تخلخل لایه اکسیدی شده و سرعت اکسایش را افزایش می‌دهد. ذکر این نکته لازم است که با افزایش دمای اکسایش (شکل ۷) و زمان اکسایش (شکل ۸) نیز بر مقدار اکسیدهای مختلف افزوده شده و از خلوص لایه اکسیدی کاسته می‌شود و بدین ترتیب سرعت اکسایش افزایش می‌یابد.

بحث و سگالش:

کربن یکی از مهم ترین عناصر موجود در فولادها است که باعث پایداری ساختار آستنیتی و بهبود خواص خزشی آن در دمای بالا می‌شود.

به خاطر این که در آلیاژهای مقاوم به حرارت، کروم به مقدار زیادی وجود دارد، حضور کربن سبب تشکیل کاربید و جذب مقدار زیادی کروم از زمینه آلیاژ می‌شود. در نتیجه، مقدار کروم در زمینه آلیاژ کم شده و در مناطق مختلف یکسان نیست، لذا مقاومت به اکسایش آلیاژ، که مدیون کروم زمینه است، کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، مقدار کربن که برای تشکیل اکسید کروم پیوسته و محافظ در زمینه آلیاژ مورد نیاز است، کاهش یافته و تشکیل اکسید کروم به تاخیر می‌افتد.

در آلیاژهای (Fe-Cr-Ni)، کاربید کروم ($Cr_{23}C_6$) یکی از عمده ترین کاربیدها است که در مرز دانه‌های آستنیت رسوب می‌کند. با افزایش کربن، نه تنها بر مقدار کاربید کروم افزوده می‌شود بلکه اندازه آنها نیز کاهش می‌یابد، زیرا افزایش عناصر آلیاژی مانند کربن، سبب افزایش فوق تبرید ترکیبی مذاب شده و با کاهش نقطه ذوب آلیاژ سرعت انجماد را افزایش می‌دهد، بنابراین اندازه رسوبات کاربیدی کاهش می‌یابد، شکل (۴).

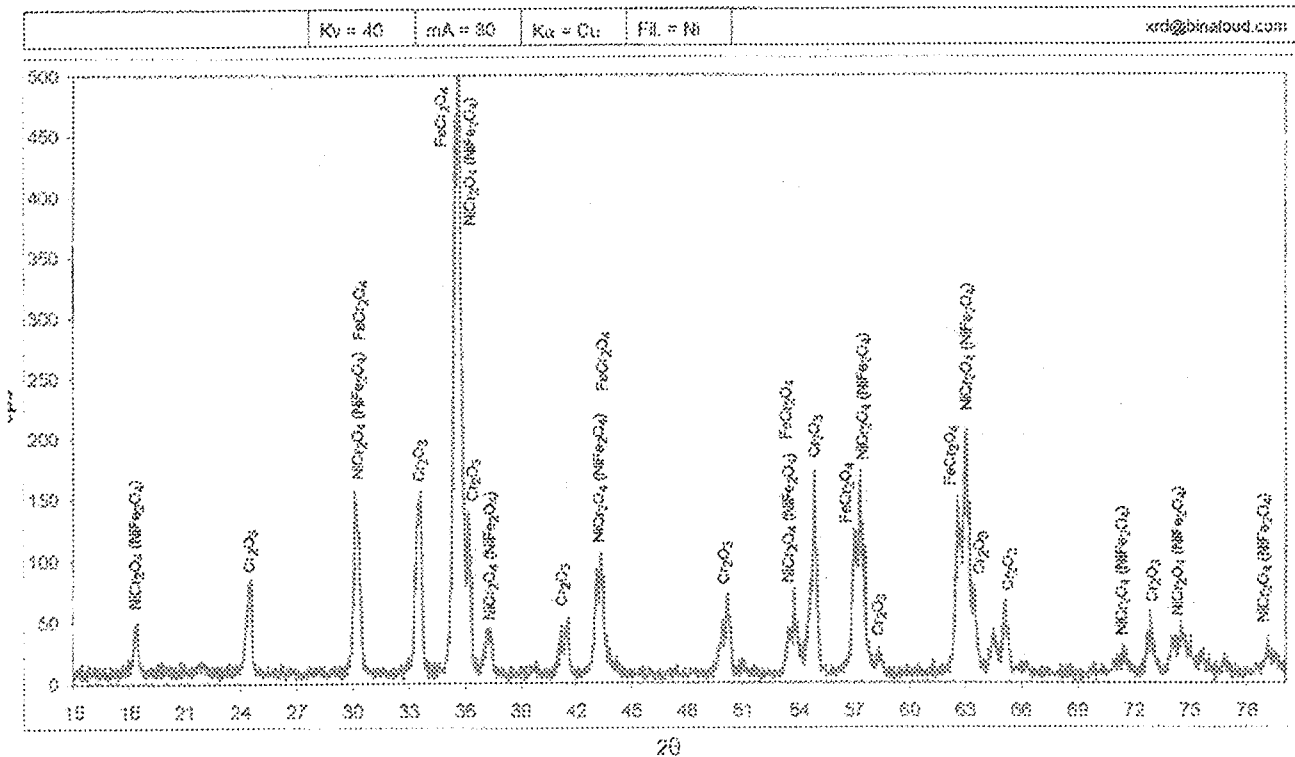
تشکیل لایه اکسید کروم بر روی آلیاژ ناشی از مهاجرت یون‌های کروم از زمینه به سمت سطح و واکنش آن با اکسیژن اتمسفر است. در حالتی که بعضی از مناطق زمینه فقیر از کروم باشد، قبل از اینکه کروم به غلظت مناسب برای تشکیل اکسید کروم پیوسته و محافظ برسد، عناصر دیگری مثل آهن اکسید شده و اکسیدهای مختلفی را تشکیل می‌دهند. این اکسیدها متخلخل بوده و تماس اکسیژن با آلیاژ را تسهیل کرده و سبب

اکسایش آلیاژ و کاهش مقاومت آن می‌شود. علاوه بر این، کربن بر اساس مکانیزم‌های دیگری که در این تحقیق به آن پرداخته نشده است، می‌تواند سبب کاهش مقاومت به اکسایش آلیاژ شود. در اتمسفرهای دکربوراسیون، کربن موجود در آلیاژ به شکل‌های CO ، CO_2 تبدیل می‌شود و در فصل مشترک اکسید - فلز باعث تشکیل حفراتی می‌شود که در ادامه فرآیند، حفرات به یکدیگر چسبیده و ترک در فصل مشترک را ایجاد می‌کنند و سبب پوسته‌ای شدن و شکست لایه اکسید از روی سطح آلیاژ می‌شوند. در این حالت، نفوذ اکسیژن به درون فلز با سهولت بیشتری انجام می‌گیرد [۱۰].

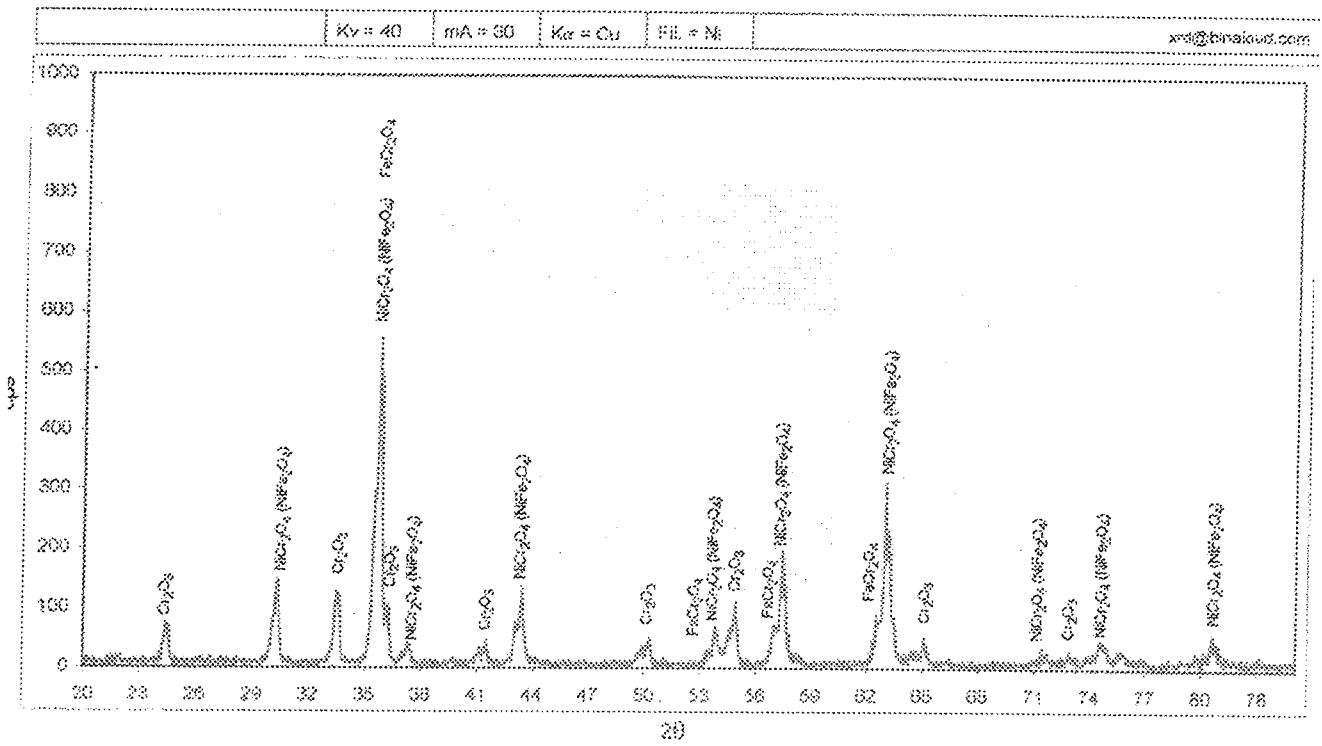
دما و زمان اکسایش نیز می‌تواند نقش بسزایی بر مقاومت به اکسایش آلیاژهای مقاوم به حرارت ایفا کند، به طوری که با افزایش آنها مقدار بیشتری از اکسید کروم تشکیل شده بر روی

سطح آلیاژ بخصوص در دماهای بالا، به (CrO_3) فرار تبدیل می‌شود. این عمل با افزایش کربن آلیاژ تشدید شده و بر مقدار اکسیدهای کمپلکس آهن، کروم و نیکل می‌افزاید، نتیجتاً خلوص لایه اکسید کروم در روی سطح کم شده و با گذشت زمان، کروم موجود در زمینه آلیاژ کاهش می‌یابد و بدین ترتیب، مقاومت به اکسایش آلیاژ، به دلیل عدم وجود مقدار لازم کروم برای ایجاد لایه اکسید محافظ بر روی سطح آلیاژ، افت می‌کند. کربن مکانیزم اکسایش آلیاژ را تغییر نمی‌دهد، فقط ثابت سرعت اکسایش را افزایش می‌دهد. با توجه به شکل (۳) معلوم می‌شود که رفتار اکسایش آلیاژهای $(Fe-Cr-Ni)$ از قانون سهمی گون تبعیت می‌کند.

دما و زمان اکسایش نیز می‌تواند نقش بسزایی بر مقاومت به اکسایش آلیاژهای مقاوم به حرارت ایفا کند، به طوری که با افزایش آنها مقدار بیشتری از اکسید کروم تشکیل شده بر روی



(الف)

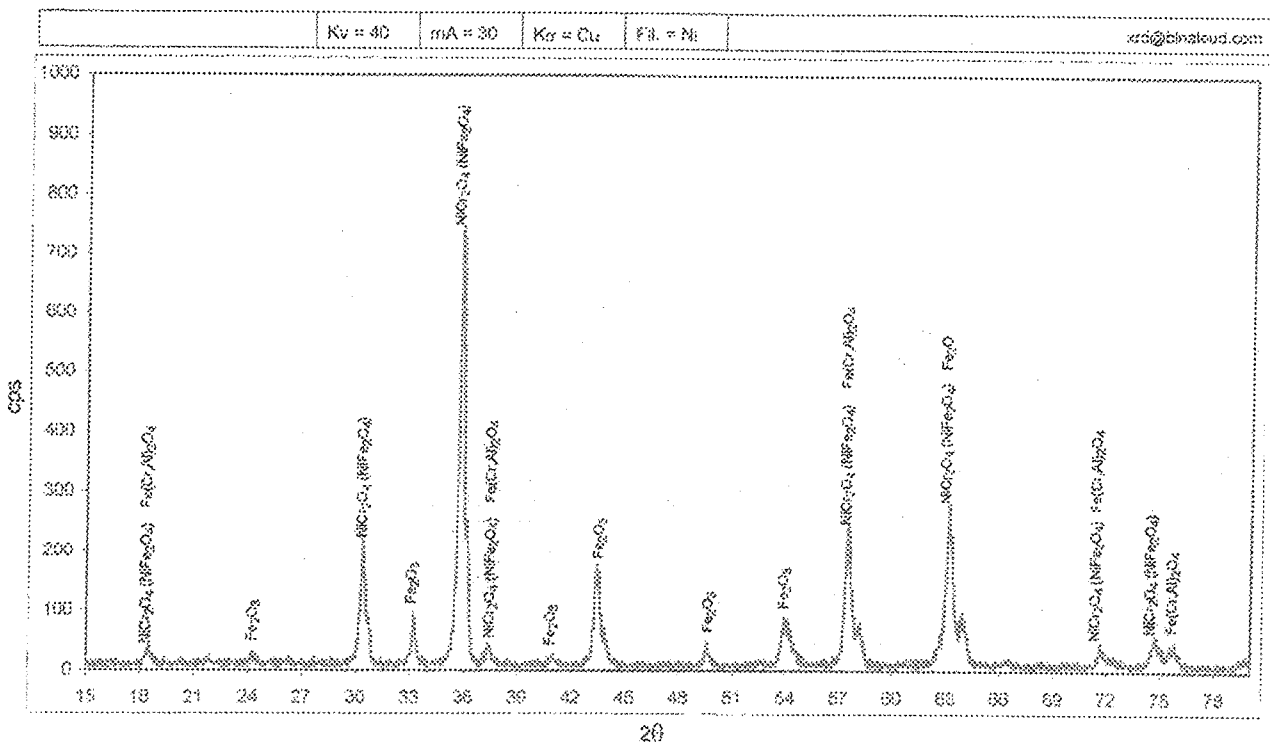


(ب)

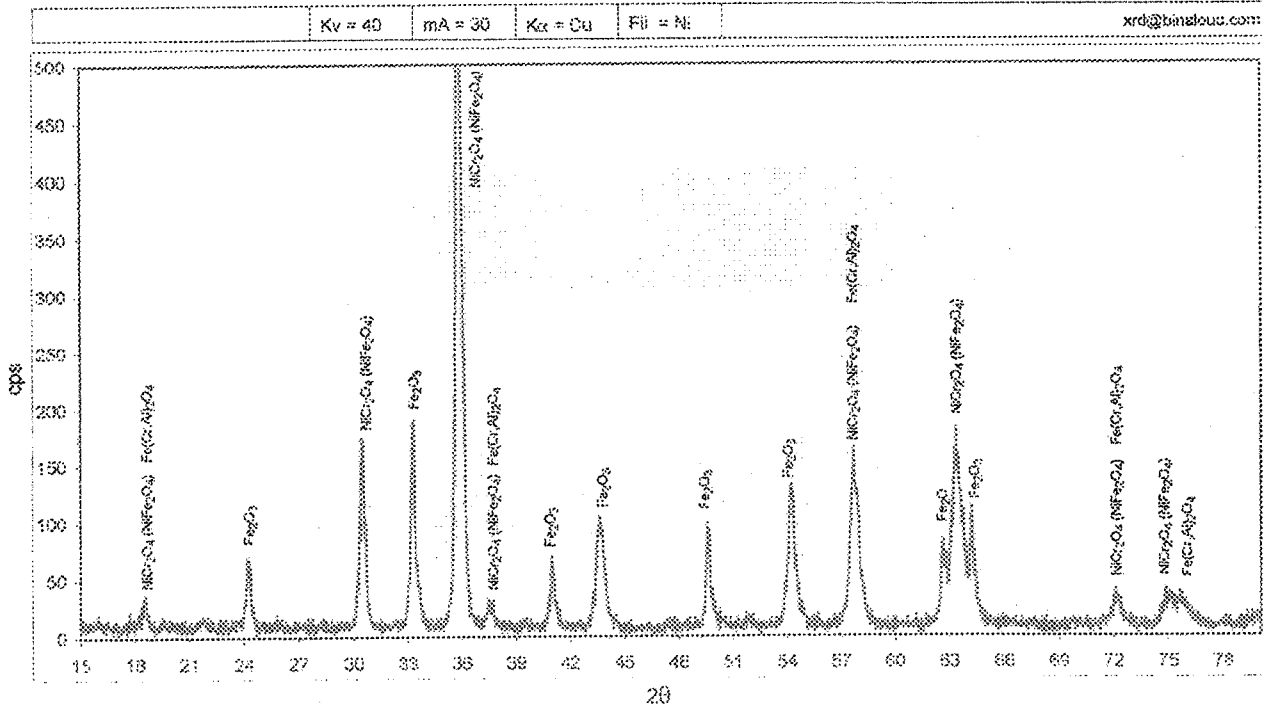
شکل (۶): آنالیز پراش اشعه ایکس نمونه‌های اکسید شده بمدت ۹۹ ساعت در دمای 1300°C .

ب) آلیاز B3

الف) آلیاز B1



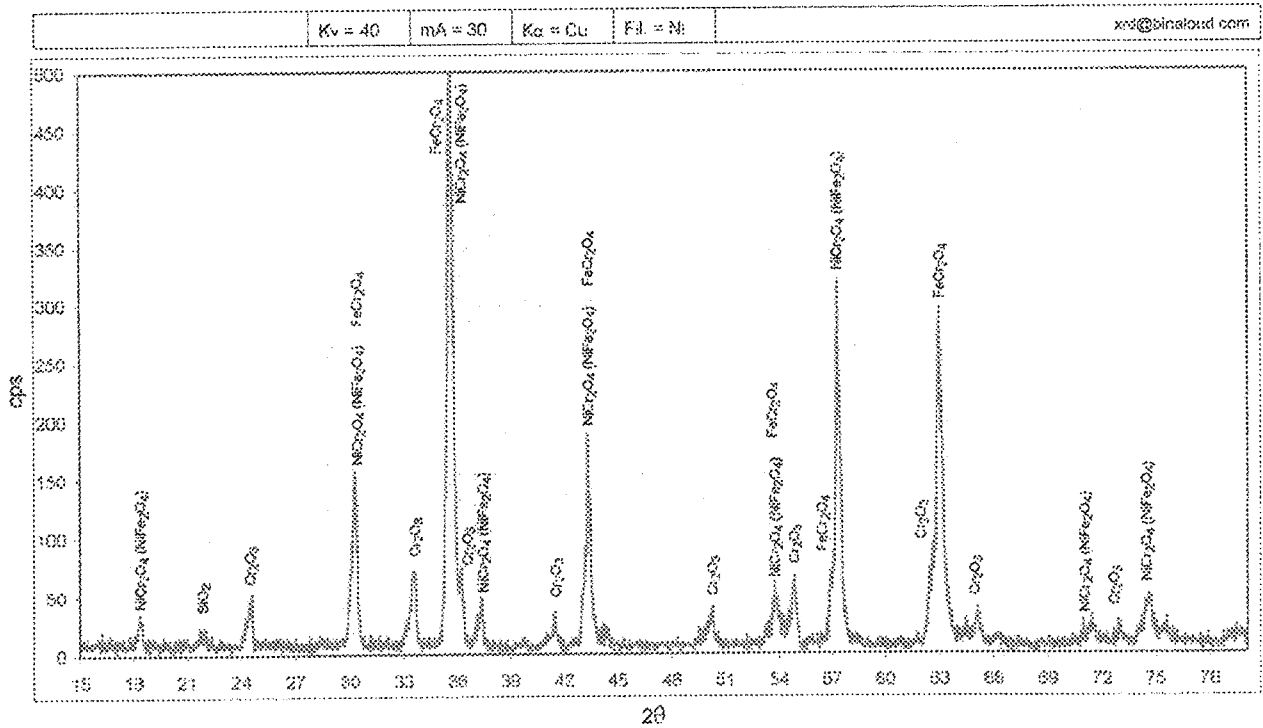
(الف)



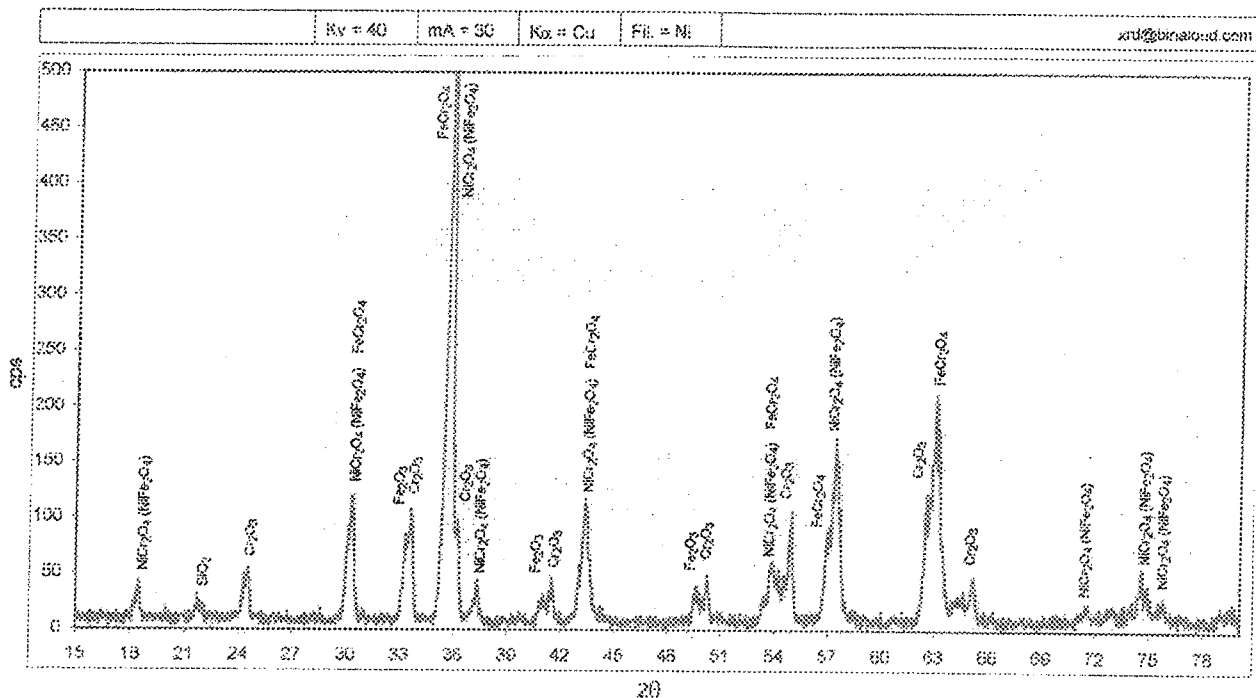
(ب)

شکل (۷): آنالیز پراش اشعه ایکس آلیاژ B3 اکسید شده بمدت ۳۳ ساعت در دماهای مختلف.

الف) دمای ۱۳۰۰ °C ب) دمای ۱۱۵۰ °C



(الف)



(ب)

شکل (۸): آنالیز پراش اشعه ایکس آلیاژ B1 اکسید شده در دمای 1300°C در مدت زمانهای مختلف .

(ب) ۳۳ ساعت

(الف) ۹۹ ساعت

مکانیزم اکسایش در آلیاژهای (Fe-Cr-Ni) از قانون سهمی گون تبعیت می کند و افزایش کربن در این آلیاژها هیچگونه اثری بر این مکانیزم ندارد و فقط ثابت سرعت اکسایش را افزایش می دهد، بنابراین، کربن فولادهای مقاوم به حرارت آستنیتی برای داشتن خواص اکسایشی مطلوب باید در کمترین مقدار ممکن باشد. بهترین مقدار کربن برای این منظور (۰/۱٪) ویا کمتر از آن است که این مهم به شرایط کاربردی بستگی دارد و متغیر است.

مراجع و منابع :

- [۱] Hindam H. , Whittle D.P. , " *Corrosion Behaviour Of Cr₂O₃ - Former Alloys In H₂-H₂S -H₂O Atmospheres* " , corrosion nace, vol. 38 No. 1 , pp 32 – 39 (jan. 1982)
- [۲] Baxter D.J. , Natesan K. , " *The Corrosion Behaviour Of Fe - Cr - Ni -Zr Alloys In Coal Gasification Environments At High Temperatures* " ,Corrosion Science, vol. 26 No. 2, pp 153 – 172 ,(198۴)
- [۳] Huang T.T., Peterson B. , Shores D.A. , Pfender E. , " *Xps And Aes Studies Of The High Temperature Corrosion Mechanism Of Fe - 3Cr Alloy* " Corrosion Science , vol. 24 , No. 3 , pp 167-183, (1984)
- [۴] Macgurtly J.A. , Nekkanti R. , Rosa E. , Mottef J. , " *Introduction Of A new Class Of High Aluminum Austenitic Stainless Steel* " High Temperature Alloy Theory And Design , AIME, pp 473-482 , (198۴)

بنابراین فولادهای مقاوم به حرارت آستنیتی باید کربن کمی برای افزایش مقاومت به اکسایش داشته باشند. بهترین مقدار کربن برای این گونه آلیاژها، که خواص مطلوبی را به ارمغان آورد، (۰/۱٪) و کمتر از آن است.

نتیجه گیری :

افزایش کربن در فولادهای مقاوم به حرارت آستنیتی سبب تشکیل کاربیدهای مختلفی خصوصا (Cr₂₃C₆) می-شود که در مرز دانه ها رسوب کرده و نتیجتاً زمینه آلیاژ را از عنصر کروم فقیر می کند و با تشکیل اکسید های کمپلکس متخلخل آهن و کروم به جای اکسید کروم پیوسته و محافظ بر روی سطح آلیاژ، باعث کاهش مقاومت به اکسایش می-شود .

با افزایش کربن، نه تنها بر مقدار کاربید کروم افزوده می شود بلکه اندازه آنها نیز کاهش می یابد، زیرا افزایش عناصر آلیاژی مانند کربن سبب افزایش فوق تبرید ترکیبی مذاب می شود و با افزایش سرعت انجماد، اندازه رسوبات کاربیدی را کاهش می دهد. با افزایش زمان اکسایش و دمای آن نیز بر مقدار اکسیدهای کمپلکس افزوده و از مقدار اکسید کروم محافظ کاسته می شود که کاهش مقاومت به اکسایش را به دنبال دارد.

- Yamanaka , Tsuchinaga , Tsuboi , “ Heat Resistant High Al Austenitic Steel Having Excellent Hot Working Properties “ , European Patent , No. 392011 , 1988 [5]
- Macgurdy J.A. , Nekkanti R. , Mottef J. , “ High Aluminum , Low Chromium Austenitic Stainless Steel “ , Jomal Of Metals, pp 22 – 25 (May 1988) [6]
- Macgurdy J.A. , Nekkanti R. , Mottef J. , “ The Oxidation Resistance Of The New High Aluminum , Low Chromium Content Austenitic Stainless Steel Superalloys “ , Pro. Alternate Alloying For Enviromental Resistance, New Orleans , (Mar. 1988) [7]
- Ramakirishnan V. , Macgurdy J.A. , Jayaraman N. . “ Oxidation Of High Aluminum Austenitic Stainless Steel “ , Oxidation Of Metals, vol. 30 , No. 3/4 , pp 185 – 200 , (1988) [8]
- Zhukov A.A. , “ Geometrical Thermodynamics Of Iron - Carbon Alloys Alloyed With Graphitising Elements “ , Udc , No. 6691122 , pp 164 – 170 [9]
- Zhukov A.A. , “ Thermodynamics Of Structure Formation In Cast Iron Alloyed With Graphitising Elements “ , Metals Forum, vol. 2 , No. 2 , pp 127 - 136 , (1979) [10]
- Zaizen , Takashi , Otoguro , Yasuo , Yamanaka , Mikio “ High Al Heat Resistant Alloy Steels Having Al Coating Thereon “ , United States Patent , No. 4535034 , (Aug. 1985) [11]
- Pivin J.C. , Delauncy D. , Huntz A.M. , Lacombe P. , “ Oxidation Mechanism Of Fe -20Ni -2Cr -5Al Alloys Influence Of Small Amount Of Yttrium On Oxidation Kinetic And Oxide Adherence “ , Corrosion Science, vol. 20 , pp 351 – 373 , (1988) [12]