



بررسی تأثیر ترکیب شیمیایی بر ریزساختار و سختی غلتک های چدنی مورد استفاده در نورد گرم ورق با استفاده از مدل سازی نرم افزار متلب

فرهاد منفردی^۱، مریم کمائی^۲، روح الله پهلوان^۳، محمدرضا شریفیان^۴

[.monfaredifarhad@yahoo.com](mailto:monfaredifarhad@yahoo.com)

چکیده

غلتک های چدنی یکی از متداولترین و پرمصرف ترین غلتک های بکار رفته در خطوط نورد می باشند. در پژوهش حاضر تأثیر ترکیب شیمیایی از طریق مدل سازی متلب، بر سختی غلتک های چدنی استند سه غلتکه نورد ورق مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که موضوع اساسی در غلتک های چدنی با گرافیت کروی دستیابی به مقدار بهینه از کاربید و گرافیت کروی در تقابل با یکدیگر می باشد لذا از طریق تغییر مقدار عناصر مشارکت کننده در آنالیز شیمیایی نهایی، دستیابی به مقدار مناسب سختی در خط نورد متناسب با استند بکارگیری آن را می توان انتظار داشت. در این پژوهش داده های مربوط به آنالیز و ساختار متالوگرافی نمونه های بدست آمده از ۳۰ غلتک چدنی مورد استفاده در استند سه غلتکه نورد ورق که به روش استاتیک تک لایه ریخته گری شده اند، مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج بدست آمده مطابق با مدل سازی داده های بدست آمده در نرم افزار MATLAB و بررسی ساختار از طریق نرم افزار MIP حاکی از آن است که با افزایش مقدار Ni، افزایش C*Cr و افزایش C/Si، افزایش سختی بهینه در کنار گرافیت زایی متناسب در غلتک های چدنی را می توان انتظار داشت.

کلمات کلیدی: غلتک میانی، نورد ورق، استند سه غلتکه، چدن، آنالیز شیمیایی.

- ۱- دانشجوی دکتری مکانیک، دانشگاه کاشان، عضو هیئت مدیره شرکت ایران غلتک.
- ۲- کارشناسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، کارشناس واحد تحقیق و توسعه شرکت ایران غلتک.
- ۳- کارشناسی ارشد مواد، مدیر واحد کنترل کیفی و آزمایشگاه شرکت نورد و قطعات فولادی.
- ۴- کارشناسی ارشد مواد، مدیر واحد تحقیق و توسعه شرکت ایران غلتک.

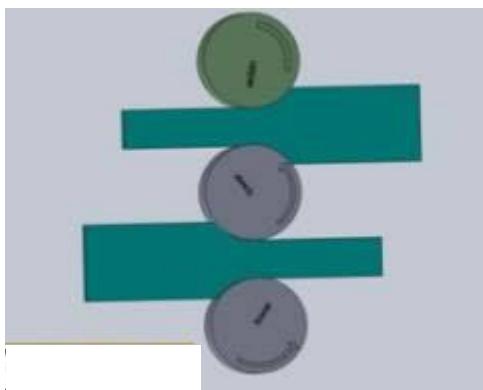


۱- مقدمه

غلtek های چدنی با گرافیت کروی در محدوده گسترده ای از غلtek های گرافیتی- ریخته گری می باشد که دارای استحکام بالا، داکتیلیته و مقاومت در برابر شوک های حرارتی هستند [۱]. این غلtek ها بعنوان یکی از مهم ترین انواع غلtek های ریخته گری مطرح می باشند که تفاوت آنها با غلtek های چدن خاکستری در تشکیل گرافیت کروی در آن ها می باشد به عبارت دیگر غلtek های چدنی بهمراه گرافیت کروی بجهت افزودن ترکیبات منیزیم دار، در ساختار قابل تشخیص هستند. از سوی دیگر خواص مکانیکی مطلوب این غلtek ها شامل مقاومت آن ها در برابر ترک های مربوط به بارگذاری های فیزیکی و مقاومت در برابر شوک های حرارتی و مکانیکی است که در مقایسه با غلtek های چدن خاکستری خصوصیات بهتری را نشان می دهد. این خصوصیت غلtek های چدنی در غلtek های میانی نورد گرم ورق در استند سه غلtekه (مطابق با شکل ۱) به این دلیل قابل اهمیت می باشد که به جهت محل قرار گیری این غلtek ها خنک سازی آن ها با مشکلاتی مواجه می باشد و آن ها را در معرض مجموعه ای از شوک های حرارتی و مکانیکی قرار می دهد. از دیگر خصوصیات مهم غلtek های چدنی همراه با گرافیت کروی، مقاومت به سایش آنها می باشد که این خصوصیت قابلیت مقایسه آن ها با بهترین رده های فولادی را فراهم می کند همچنین در مقایسه با چدن خاکستری از کیفیت مطلوب تری برخوردار هستند [۲-۴]. از نظر مقایسه قیمت تمام شده نیز به لحاظ روند تولید و ترکیب شیمیایی بکار رفته در میان دو ترکیب چدن خاکستری و فولاد گرافیته قرار دارد. جهت تشکیل گرافیت کروی نسبت مشخص وزنی منیزیم به شکل های نیکل- منیزیم و یا ترکیب فروسیلیکو منیزیم با درصد و ترکیب مناسب افزوده می گردد که منجر به تبدیل گرافیت ورقه ای به گرافیت کروی می شود و در نهایت می توان گفت غلtek های چدن گرافیت کروی رفتار مقاومت در برابر سایش مطلوبی از خود بروز می دهند. [۵] از دیگر ویژگی های نامطلوب این غلtek ها در مقایسه با غلtek های فولادی، می توان به کاهش تدریجی سختی در راستای کاهش قطر غلtek در لایه کاری آن ها اشاره کرد. که مربوط به تغییر درصد حضور گرافیت و کاربید می باشد. این غلtek ها به دلیل مزیت های گسترده آن ها گستره وسیعی از غلtek های خطوط نوردی جهت تولید انواع محصولات نوردی را تأمین می کنند. تنظیم عناصر آلیاژی نیکل، مولیبدن و کروم بهمراه عملیات حرارتی مناسب تنوعی از غلtek های چدن گرافیته نودولار را بهمراه دارد. دو گروه وسیع از این نوع غلtek ها غلtek های چدن گرافیته نودولار با زمینه پرلیتی و آسیکولار می باشد که همه آنها استحکام بالا و خصوصیات حرارتی خوبی را دارا می باشند [۶-۷]. غلtek های چدنی به روش استاتیک، دینامیک و دینامیک- استاتیک ریخته گری می شوند که روش ریخته گری این نوع غلtek ها در پژوهش حاضر روش استاتیک تک لایه می باشد. همچنین از پارامترهای مؤثر بر کیفیت نهایی غلtek ریخته گری می توان به ریزساختار اشاره کرد که در روند انجماد قطعه در قالب ریخته گری تشکیل می شود و تحت تأثیر آنالیز و سرعت انجماد که مهم ترین پارامترهای کلیدی هستند نهایتاً منجر به خواص مکانیکی مناسب در روند به کارگیری می گردد. نهایتاً در نظر گرفتن کلیه پارامترهای مؤثر در این فرایند، دستیابی به غلtek های با کیفیت جهت استفاده در



قفسه مشخص را نتیجه می دهد. از سویی در نظر نگرفتن قفسه مورد استفاده و سختی متناسب و خواص سایشی مناسب منجر به ناکارآمدی محصول تولیدی خواهد شد. با توجه به موارد ذکر شده در پژوهش حاضر نسبت بهینه عناصر آلیاژی جهت دستیابی به ارتباط میزان عناصر آلیاژی و سختی نهایی در غلتک های میانی نورد سه غلتکه ورق بررسی شده است. [۷، ۲-۹]



شکل ۱. نحوه قرار گیری غلتک میانی در نورد سه غلتکه گرم ورق

۲- مواد و روش تحقیق

محدوده ترکیب شیمیایی غلتک های چدنی مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ آمده است. به منظور ریخته گری این غلتک ها فرایند آماده سازی ذوب انجام شد و بعد از آن ریخته گری به روش ثقلی صورت گرفت. در ادامه ضمن تراشکاری غلتک ها نمونه های لازم جهت انجام آزمون های سختی سنجی و متالوگرافی تهیه شدند. عکس برداری از نمونه ها توسط میکروسکوپ نوری مدل Euromax انجام شد و در ادامه درصد فازهای موجود با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویر MIP مورد بررسی قرار گرفت. آزمون سختی نیز با استفاده از دستگاه Equotip به منظور بررسی سختی نمونه ها انجام شد. همچنین بررسی ارتباط آنالیز و سختی از طریق نرم افزار متلب مدل سازی شد.

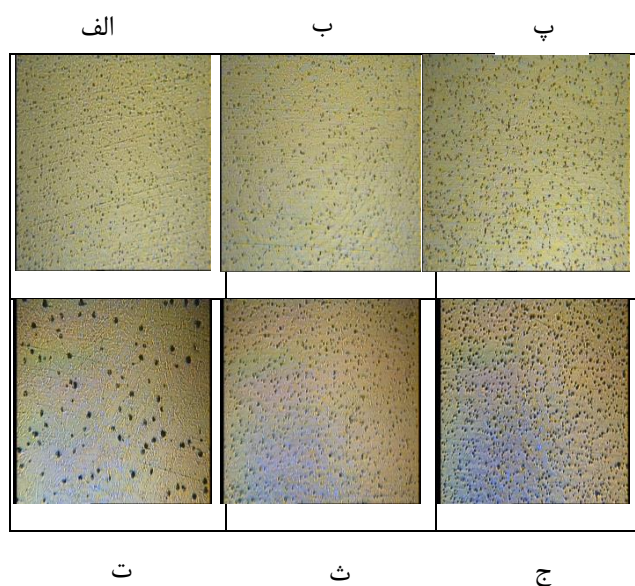
جدول ۱. محدوده ترکیب شیمیایی نمونه های ریخته گری شده

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
3.0	1.0	0.4	1.5	0.2	0.2
4.0	2.0	1.0	3.0	1.0	0.6

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمون متالوگرافی و آنالیز تصویر MIP

شکل های ۲. الف- ۲. ج مربوط به ریزساختار شش نمونه در بزرگنمایی ۲۰۰ با آنالیزهای متفاوت از غلتک های میانی استند سه غلتکه نورد گرم ورق می باشد. با توجه به این تصاویر می توان توزیع مناسب تر و یکنواخت تر گرافیت کروی در غلتک گرید های ت، ث، ج را مشاهده نمود.



شکل ۲. ریزساختار شش نمونه غلتک چدن گرافیت در بزرگنمایی ۲۰۰.

جدول ۳. درصد گرافیت کروی در در نمونه های الف- ج.

نمونه	درصد گرافیت	درصد کرویت
الف	٪۳/۴	٪۹۰
ب	٪۲/۵	٪۸۰
پ	٪۲/۲	٪۸۷
ت	٪۱/۷	٪۸۲
ث	٪۲/۳	٪۹۱
ج	٪۳/۴	٪۸۷



مطابق با نتایج مربوط به آنالیز MIP مشاهده می شود با افزایش مقدار گرافیت های موجود در سطح و درصد کرویت آنها افت سختی با توجه به نتایج مربوط به آزمون سختی سنجی ۶ نمونه که در جدول ۴ گزارش شده است، بدست می آید. همچنین نتایج حاکی از بالاتر بودن سختی نمونه D می باشد. شایان ذکر است تأثیر گرافیت زایی بر این غلتک ها، همزمان استحکام و مقاومت حرارتی را افزایش می دهد.

در ادامه با توجه به نتایج به دست آمده از مدل سازی نرم افزار متلب روابط بدست آمده از ارتباط ترکیب شیمیایی و سختی غلتک های ریخته گری شده در راستای نتایج به دست آمده در این بخش می باشد.

جدول ۴. مقایسه سختی غلتک استند سه غلتکه نورد ورق ریخته گری شده به روش ثقلی در مرحله پایان تراشکاری

نمونه	Hardness (ShC)
الف	(50-54) ShC
ب	(54-58) ShC
پ	(52-55) ShC
ت	(60-63) ShC
ث	(53-57) ShC
ج	(50-54) ShC

۲-۳- مدل سازی با استفاده از نرم افزار MATLAB

از طریق توابع بدست آمده از نرم افزار متلب نمودارهای دو بعدی و سه بعدی از ارتباط آنالیز و سختی نهایی بدست می آید. که در شکل های ۳ تا ۸ قابل مشاهده می باشند. تابع ۴ بعدی مربوط به ارتباط سختی و اجزاء مورد نظر در پژوهش حاضر (Ni, C*Cr, C/Si) از طریق ۳۰ آنالیز مربوط به نمونه های غلتک های میانی استند سه غلتکه نورد ورق مطابق با رابطه زیر قابل برداشت می باشد. لازم به ذکر است عناصر آلیاژی مطابق با جدول ۱ در محدوده اشاره شده قرار دارند و نیز مقادیر متوسط هر کدام از عناصر مطابق با مقادیر زیر قابل استحصال می باشد.

$$Ni_{med}: 2.142593 \quad (C*Cr)_{med}: 2.3127 \quad (C/Si)_{med}: 3.748706$$

جهت مدل سازی مقادیر از مجموع داده ها در قالب نرم افزار متلب نهایتاً از رابطه ۱ به رابطه ۲ دست یافتیم که پوسته ای متشکل از تابعیت سختی از سه جزء Ni, C*Cr, C/Si می باشد.



$$U = C_1.X^2 + C_2.Y^2 + C_3.Z^2 + C_4.X.Y + C_5.Y.Z + C_6.X.Z + C_7.X + C_8.Y + C_9.Z + C_{10}$$

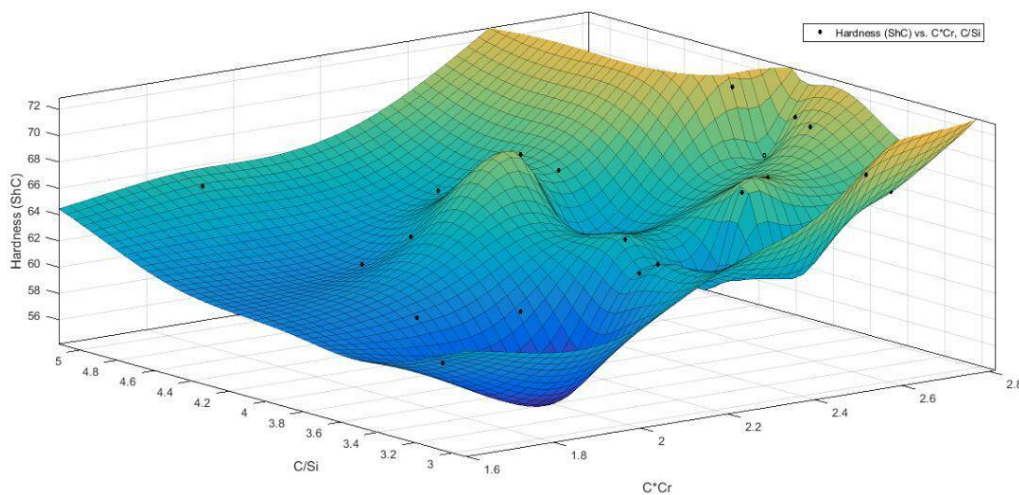
رابطه ۱

$$\text{Hardness (shore C)}: C_1 Ni^2 + C_2 (C*Cr)^2 + C_3 (C/Si)^2 + C_4 (C/Si) Ni + C_5 (C/Si) (C*Cr) + C_6 Ni (C*Cr) + C_7 Cr + C_8 Ni + C_9 Si + C_{10}$$

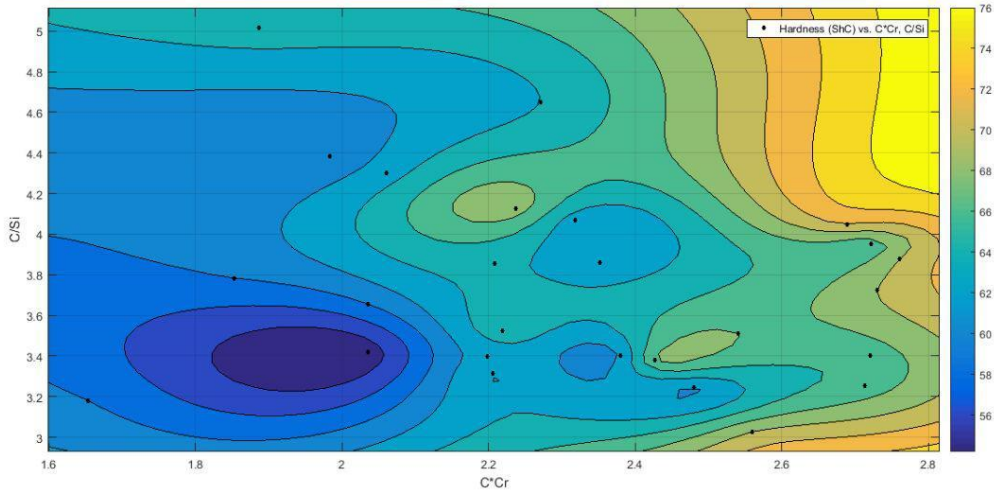
$$(C_1: 2.4317, C_2: 1.0286, C_3: 0.0901, C_4: 1.6236, C_5: 1.7597, C_6: 1.0602, C_7: 0.3217, C_8: 1.6711, C_9: 1.8911, C_{10}: 0.8496)$$

رابطه ۲

در ادامه رفتار این رویه ۴ بعدی در اطراف نقاط میانه و با فرض مستقل در نظر گرفتن هر کدام از این مقادیر جهت محاسبه رویه سه بعدی و ترسیم آن در سه بعد مطابق با روابط ۳ و ۴ و ۵ انجام شده است.



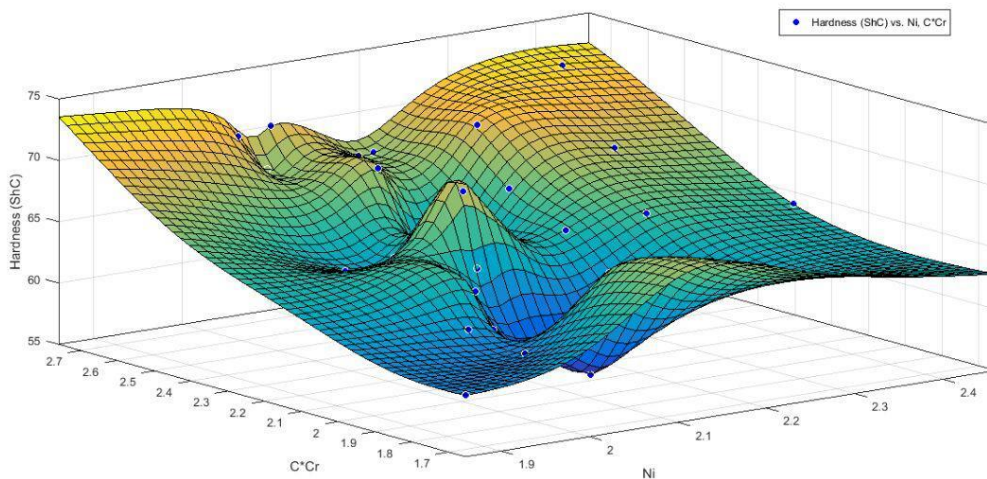
شکل ۳. رویه سه بعدی مربوط به ارتباط سختی و C/Si و C*Cr در Ni=Ni_{med}



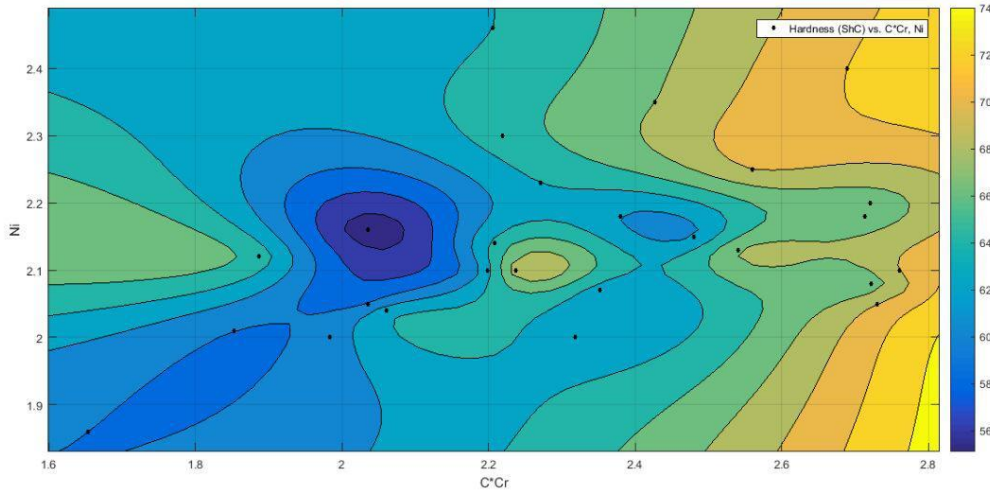
شکل ۴. رویه دو بعدی مربوط به ارتباط سختی و C/Si و C*Cr در Ni=Ni_{med}

$$\text{Hardness (Ni med = 2.142593)} = C_1 (C^*Cr)^2 + C_2 (C/Si)^2 + C_3 (C/Si) (C^*Cr) + C_4 (C^*Cr) + C_5 (C/Si) + C_6$$

رابطه ۳ (C₁: 1.0286, C₂: 0.0901, C₃: 1.7597, C₄: 2.5932771, C₅: 5.36981399, C₆: 15.5933039)



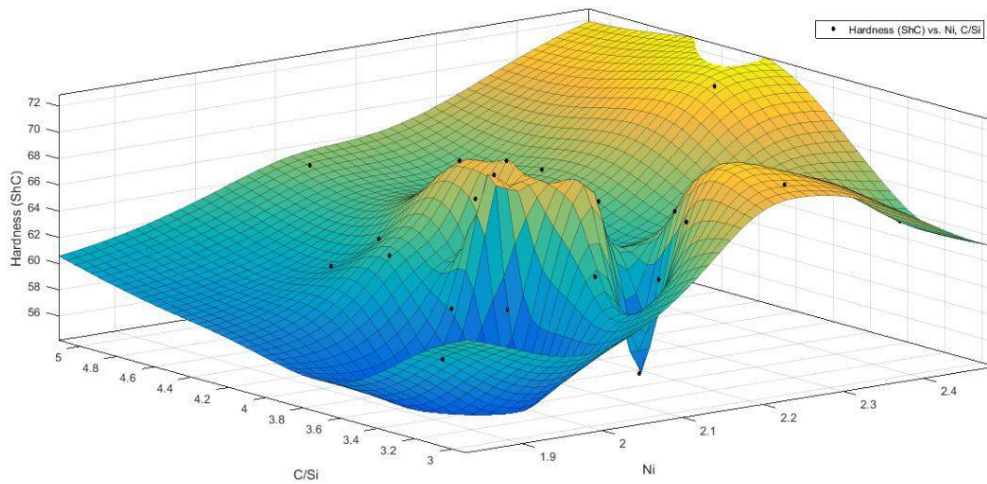
شکل ۵. رویه سه بعدی مربوط به ارتباط سختی و C*Cr و Ni در C/Si=C/Si_{med}



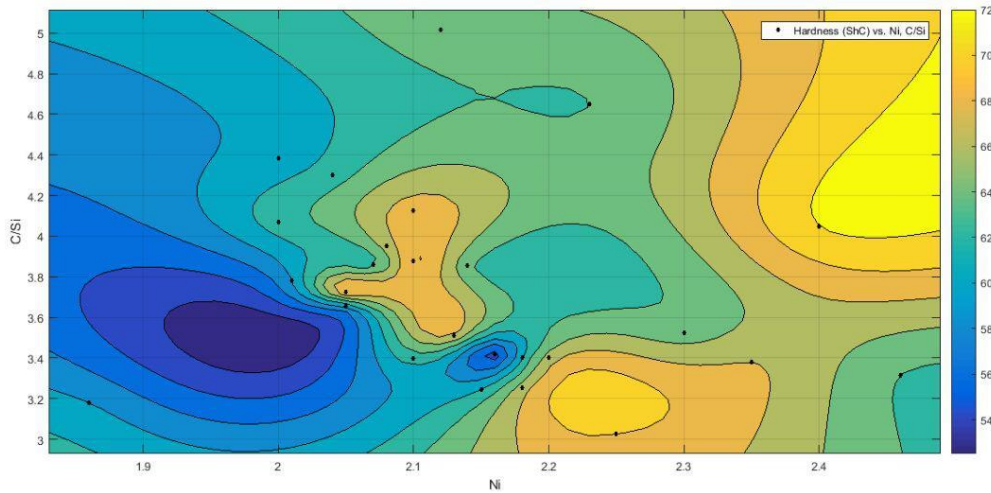
شکل ۶. رویه دو بعدی مربوط به ارتباط سختی و C^*Cr و Ni در $C/Si=C/Si_{med}$

$$\text{Hardness } (C^*Cr_{med}=2.312756) = C_1 (Ni)^2 + C_2 (C/Si)^2 + C_3 (C/Si) (Ni) + C_4 (Ni) + C_5 (C/Si) + C_6$$

رابطه ۴ ($C_1: 2.4317, C_2: 0.0901, C_3: 1.6236, C_4: 4.12308391, C_5: 5.96085673, C_6: 7.09543076$)



شکل ۷. رویه سه بعدی مربوط به ارتباط سختی و C/Si و Ni در $C^*Cr=C^*Cr_{med}$



شکل ۸. رویه دو بعدی مربوط به ارتباط سختی و C/Si و Ni در $C*Cr=C*Cr_{med}$

$$\text{Hardness}_{(C/Si \text{ med}=3.748706)} = C_1 (C*Cr)^2 + C_2 (Ni)^2 + C_3 (Ni) (C*Cr) + C_4 (C*Cr) + C_5 (Ni) + C_6$$

رابطه ۵ (C₁: 1.0286, C₂: 2.4317, C₃: 1.0602, C₄: 6.91829795, C₅: 7.75749906, C₆: 9.2049349)

در ادامه به بررسی نقش هر کدام از عناصر آلیاژی مورد بررسی در روند حاضر می پردازیم از آنجا که در نظر گرفتن همه مقادیر متغیر امکان پذیر نمی باشد در شرایط ثبات بقیه عناصر آلیاژی و پارامترهای مؤثر بررسی ها انجام شده است. در این بررسی صرفاً عناصر کربن، سیلیسیم، کروم و نیکل مورد ارزیابی قرار گرفتند که هر کدام از آنها منجر به کاهش و افزایش گرافیت زایی و کاربیدزایی در غلتک های چدنی خواهد شد و در ادامه به بررسی هر کدام از آنها پرداخته ایم.

کربن: عنصری است که منجر به افزایش سختی و مقاومت در برابر سایش می شود. از آنجایی که جهت تشکیل کاربیدهای نیاز به میزان 3.3% یا مقدار بیشتر کربن دارد. مکانیزم تشکیل کاربیدها بدین صورت است که ترکیب کربن، آهن و کروم در نسبت مشخص، تشکیل کاربیدهای M_7C_3 را نتیجه می دهد و همزمان ترکیب کربن و عناصر آلیاژی مولیبدن و کروم منجر به تشکیل کاربیدهای خشن M_2C و M_6C, MC می شود و نهایتاً مقاومت در برابر ترک به طور چشم گیری با افزایش میزان کربن تا مقدار 4% افزایش می یابد.

سیلیسیم: سیلیسیم یک عامل مؤثر در احیاء سطح می باشد همچنین یک عامل ضروری برای نگهداری از توانایی ریخته گری از طریق افزایش سیالیت مذاب می باشد و نکته پراهمیت آن است که با افزایش محتوای سیلیس به مقدار بیش از 1.6% مقاومت پذیری در برابر ایجاد ترک کاهش می یابد و البته در روند شکل



پذیری گرافیت‌ها در ساختار نیز مشکلاتی ایجاد می‌گردد. سیلیس باعث افزایش کربن فعال و تهییج تشکیل کاربید نیز می‌شود.

کروم: کروم عنصر اساسی در اغلب خواص یاد شده می‌باشد ولی مهمترین تأثیر آن در کنترل رفتار اکسیداسیون می‌باشد. کروم تمایل کربن به انجماد در شکل گرافیت را کاهش می‌دهد. بدین صورت که مجموعه‌ای از عناصر کروم، مولیبدن و کربن منجر به تشکیل کاربیدهای پیچیده می‌شوند که این کاربیدها در حین انجماد و فرایند عملیات حرارتی تشکیل خواهند شد. بخشی از کروم در زمینه قابل حل می‌باشد که منجر به افزایش مقاومت در برابر سایش و سختی پذیری می‌گردد که در این شرایط مقاومت در برابر خوردگی نیز افزایش می‌یابد.

نیکل: نیکل عنصر مؤثر در بهبود دگرگونی فازی در حین انجماد می‌باشد. مقادیر کم به این دلیل انتخاب می‌شود که از رسوبات فازی ناخواسته فاز همچون پرلیت جلوگیری کند. نیکل جهت افزایش سختی پذیری و استحکام زمینه کاربرد دارد.

۴- نتیجه‌گیری

با در نظر گرفتن کلیه نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت درصد نسبی عناصر به میزان اپتیمم جهت دستیابی به مقدار سختی مطلوب مطابق با روابط ۱ تا ۵ و شکل‌های ۳ تا ۸ قابل ملاحظه می‌باشد. عنصر کروم کمترین تأثیر را بر افزایش سختی در غلتک‌های چدنی با گرافیت‌کروی ایفا می‌کند ولی بطور کلی می‌توان انتظار داشت با افزایش مقدار کروم شاهد افزایش سختی باشیم. عنصر نیکل مؤثرترین عنصر در بهبود رفتار مکانیکی غلتک‌های چدن گرافیت‌ه می‌باشد که محدوده وسیعی از ویژگی‌ها همچون بهبود مقاومت در برابر سایش، شوک‌های حرارتی و سختی را به همراه دارد. شایان ذکر است که این تأثیرات در صورت وجود شرایط گرافیت‌زایی در قطعه کار به دست می‌آید همچنین از تشکیل کاربیدهای خشن و پیوسته در زمینه جلوگیری بعمل می‌آورد. با کاهش عنصر سیلیسیم نیز می‌توان افزایش سختی را انتظار داشت.

مراجع

- 1- Imre Kiss, Vasile George Cioata, Vasile Alexa. "The main alloyed elements influences upon the nodular cast iron semihard rolls hardness." Annals of the faculty of engineering hunedoara, 2004, fasciole 2.
- 2- Cai Qizhou, and Wei Bokang. "recent development of ductile cast iron production technology in china. China foundry." Vol.5, no.2.
- 3- B.N. Verma, Sanjay Kumar, and B. Joardar. "Improvement in new grades of work roll for hot strip mill through NDE." Ndesai 2011.
- 4- M Nilsson and M Olsson. "An investigation of worn work roll materials used in the finishing stands of the hot strip mill for steel rolling."



- 5- Tomas Valek, Petr Simon, and Lucie Strilkova. "production of ductile iron with core wire for centrifugally cast roll with high progressives ICDP and HSS materials of working layers. Metal."
- 6- G.S.Cho, K.H.Choe, K.W.Lee and A.Ikenaga. "Effects of Alloying Elements on the Microstructures and Mechanical Properties of Heavy Section Ductile Cast Iron." J. Mater. Sci. Technol., Vol.23 No.1, 2007
- 7- Imre Kiss and Stefan Maksay. "Graphical Addenda in the Technological Area of the Nodular Iron Cast Rolls Production." Acta Polytechnica Hungarica. Vol. 5, No. 4, 2008.
- 8- Kiss, Imre and Maksay, Stefan. "Technological correlations between the hardness and main alloyed elements in the area of cast iron half-hard rolls."
- 9- K. N. Vdovin¹, A. N. Zavalishchin¹, D. A. Gorlenko¹ and N. A. Feoktistov¹. "Structure and Properties of Cast Iron DESIGNATED for Working Layer of Roll." Journal of Materials Science Research; Vol. 5, No. 1; 2016. Technical gazette (15)20081,33-37.