

مدل سازی تأثیر تغییر ترکیب شیمیایی بر روند افزایش کارکرد غلتک‌های فولادی نورد سه غلتکه ورق گرم فولادی

محمد رضا شریفیان^{1*}، روح الله پهلوان²، مریم کمایی³، علیرضا مس فروشان⁴

¹ و ³ کارشناس ارشد متالورژی، شرکت ایران غلتک

² و ⁴ کارشناس ارشد متالورژی، شرکت نورد و تولید قطعات فولادی

چکیده

از آنجایی که غلتک‌های فولادی از متداولترین و کارآمدترین غلتک‌های مورد استفاده در خط نورد هستند، در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر تغییرات اعمالی در ترکیب شیمیایی این غلتک‌ها بر کارکرد آن‌ها در استند سه غلتکه نورد ورق گرم فولادی با استفاده از مدل‌سازی رویه سه بعدی¹ پرداختیم. جهت بررسی روند تغییرات اعمالی از آزمون‌های متداول همچون سنجش ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری و اندازه‌گیری سختی، بعنوان روشی غیرمخرب، استفاده کردیم. از سوی دیگر با هدف بازنگری دقیق‌تر نتایج به بررسی تغییرات اعمالی در آنالیز نمونه‌های صنعتی از طریق آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی، اقدام نمودیم. در ادامه به بررسی آزمون‌های مکانیکی پرداختیم. نتایج مربوط به بررسی‌های انجام‌شده در ابعاد صنعتی نشان‌دهنده بهبود کارکرد غلتک‌ها با افزودن عناصر آلیاژی است که از طریق بهبود کاربدهای تشکیل‌شده از نظر نوع و پراکندگی آن‌ها در ساختار حاصل می‌شود. بررسی آزمون سایش نشان‌دهنده افزایش سیکل بکارگیری نمونه‌ها به ازاء واحد وزن کاهش‌یافته است. بنابر کلیه بررسی‌های انجام‌شده در قالب آزمون‌های ریزساختاری و مکانیکی در نمونه‌های مربوط به غلتک‌های فولادی ریخته‌گری و در ابعاد صنعتی می‌توان چنین نتیجه گرفت که تغییرات اعمالی در آنالیز این غلتک‌های فولادی نتایج مطلوبی در کارکرد این غلتک‌ها فراهم نموده است.

کلمات کلیدی: غلتک‌های فولادی، نورد سه غلتکه، نورد ورق گرم فولادی، مدل سازی

* sharifian163@yahoo.com

¹ Curve 3D

غلتهک‌های فولادی کاربرد گسترده‌ای در خط نورد دارند. براین اساس از گستره وسیع ترکیب شیمیایی و خواص متنوعی برخوردار هستند. با توجه به کاربرد گسترده این نوع غلتهک‌ها می‌توان به ویژگی مهم آن‌ها در خط نورد گرم ورق فولادی یعنی مقاومت در برابر سایش اشاره کرد. براین اساس دسته‌بندی که در ادامه آمده است را می‌توان برای غلتهک‌های فولادی در نظر گرفت: غلتهک‌های فولاد ریخته‌گری پرلیتی، از مهم‌ترین ویژگی‌های این غلتهک‌ها می‌توان به ساختار پرلیتی اشاره کرد که منجر به بهبود مقاومت در برابر سایش و تافنس می‌شود. این غلتهک‌ها برای نورد پائینی ورق و نورد گرم و سرد کاربرد دارند. دسته‌بندی بعدی مرتبط با غلتهک‌های آدامایت است که این غلتهک‌ها ترکیبی از استحکام بالا و تافنس خوب به همراه انتقال حرارت عالی را فراهم می‌کند. این غلتهک‌ها در استندهای رافینگ و میانی در نورد گرم و نورد ورق بکار می‌روند. در ادامه دسته‌بندی مرتبط با فولاد تندبر^۲ است که حاوی مقادیر بالای عناصر آلیاژی از قبیل تنگستن و مولیبدن و وانادیوم هستند و مقاومت در برابر سایش مطلوبی را تأمین می‌کنند و استحکام خوبی در دمای بالا از خود نشان می‌دهند. دسته‌بندی دیگر مرتبط با غلتهک‌های فولاد ریخته‌گری آلیاژی است. این غلتهک‌ها با استفاده از افزودن عناصر آلیاژی از قبیل کروم، نیکل و مولیبدن به غلتهک‌های فولادی، ریخته‌گری می‌شوند. همچنین مقاومت در برابر سایش مطلوبی دارند و تافنس و مقاومت حرارتی خوبی از خود نشان می‌دهند که کاربرد گسترده آن‌ها در خطوط نورد متنوعی را فراهم می‌کند. [1-6]

براساس دسته‌بندی یادشده لازم است برای دستیابی به خواص مورد نظر در خط نورد ورق فولادی، محدوده مناسبی از ترکیب شیمیایی در غلتهک‌های فولادی تعیین شود تا مقاومت در برابر سایش مطلوب در کنار سایر مشخصات مورد نظر حاصل گردد. از سوی دیگر با توجه به آنکه غلتهک‌های فولادی بکار رفته در خط نورد علی‌رغم استحکام مناسب مستعد ترک هستند، ضروری است برای برقراری تعادل در خواص آن‌ها به تعدیل ترکیب شیمیایی در آن‌ها اقدام نماییم. در این روند برقراری توازن از طریق مقدار کربن بکار رفته بعنوان عامل اثرگذار در بهبود مقاومت در برابر سایش این غلتهک‌ها مطرح است. نتایج حاصل از مطالعات نشان می‌دهد که مقادیر کمتر از ۱/۴٪ کربن مقاومت در برابر سایش کافی را تأمین نمی‌کند و از سوی دیگر افزایش مقدار کربن به بیش از ۲/۵٪ بدلیل تشکیل مقادیر بیش از اندازه کاربیدی منجر به افت خواص مکانیکی در این غلتهک‌ها خواهد شد. بموازات این مقادیر ضروری است بازه مورد نظر در مورد کروم از ۱٪ تا ۳٪ در نظر گرفته شود. چراکه بررسی‌ها نشان‌دهنده تأمین مقاومت در برابر سایش در بازه یاد شده است. نکته حایز اهمیت در این بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر خواص نهایی غلتهک است که در اینجا به دلیل تمرکز بر ترکیب شیمیایی از ذکر

^۲ high speed steel

جزئیات مربوط به عملیات حرارتی این غلتک‌ها خودداری می‌شود. لازم به ذکر است که بطور عمده عملیات حرارتی بکار رفته در این غلتک‌ها مشتمل بر عملیات آسفرودایزینگ و همگن سازی است.

علاوه بر طیف گسترده آزمون‌های بکار رفته در این پژوهش ذکر این نکته ضروری است که معیار اثرگذار بر کیفیت غلتک‌های فولادی و رفتار سایشی آن‌ها از سوی مصرف کنندگان بطور عمده از طریق آزمون سختی بررسی می‌شود. این آزمون بعنوان یکی از آزمون‌های مهم مطرح است اما ذکر این نکته ضروری است که در نظر گرفتن آزمون سختی در کنار سایر خصوصیات برآمده از نمونه همچون بررسی تصاویر متالوگرافی و سایر آزمون‌ها از قبیل آزمون سایش در دمای بالا می‌تواند اطلاعات مفیدی را در زمینه غلتک تولیدی ارائه نماید و داده‌های برآمده در همنشینی با سایر مشخصات ارزشمند خواهد بود. [14-7]

روش تحقیق

در این پژوهش محدوده ترکیب شیمیایی نمونه غلتک‌های فولادی نورد سه غلتکی ورق فولادی مطابق با جدول ۱ قابل مشاهده است. همچنین شماتیک نورد سه غلتکه ورق فولادی مطابق با شکل ۱ قابل ملاحظه است. بمنظور ریخته‌گری این غلتک‌ها فرایند آماده سازی مذاب مطابق با ترکیب شیمیایی مورد نظر انجام شده و سپس به روش ثقلی ریخته‌گری می‌شوند. در ادامه بعد از ریخته‌گری غلتک فولادی و اجرای عملیات حرارتی مناسب نمونه‌برداری از غلتک قبل و بعد از بکارگیری آن در خط نورد شرکت نورد و تولید قطعات فولادی انجام شد. به این منظور نمونه‌برداری جهت انجام آزمون‌های مورد نظر از قسمت بشکه غلتک صورت گرفت. در پایان نمونه‌ها جهت انجام آزمون کوانتومتری، سختی سنجی، میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی^۳ و آزمون سایش^۴ آماده سازی شدند.

عکس‌برداری از نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی مدل MIRA3 TESCAN XMU انجام شد و در ادامه آزمون سختی سنجی بمنظور بررسی مقدار سختی نمونه‌ها انجام شد. پس از آن ارتباط بین ترکیب شیمیایی و سختی اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم‌افزار رویه سه بعدی مطابق با شکل ۴ مدل سازی شد. بررسی ترکیب شیمیایی با استفاده از دستگاه کوانتومتر مدل کوپا انجام شد. همچنین آزمون سایش با استفاده از دستگاه مدل WTH 02 انجام شد و مشخصات مربوط به آزمون مطابق با جدول ۲ قابل مشاهده است.

³ FESEM

⁴ pin on disk

نتایج و بحث

مطابق با شکل 3 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی در توصیف ریزساختار مربوط به غلتک‌های فولادی استند سه غلتک نورد گرم ورق فولادی با آنالیزهای متفاوت قبل و بعد از بکارگیری در خط نورد قابل مشاهده هستند. براساس این تصاویر می‌توان توزیع مناسب و یکنواخت تر کاربیدهای آسفرودایز در غلتک‌های با آنالیز جدید در مقایسه با آنالیز قبلی را مشاهده کرد. در ادامه مطابق با نتایج حاصل از آزمون سایش براساس جدول 4 و شکل 2 چنین نتیجه‌گیری می‌شود که با افزودن عناصر آلیاژی کاربیدزا بهبود مقاومت در برابر سایش را می‌توان انتظار داشت. به این منظور مقدار وزن کاهش یافته مطابق با شرایط یکسان آزمون، در مورد آنالیز جدید کاهش یافته است که فرض اولیه را تایید می‌کند. همچنین مطابق با نتایج حاصل از آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس⁵ چنین نتیجه‌گیری می‌شود که کاربیدها غنی از کروم و مولیبدن هستند و در نتیجه آن برای مقاومت در برابر سایش کاربردی خواهند بود. همچنین تصاویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی روبشی اندازه و پراکندگی کاربیدها را نشان می‌دهد. براساس مطالعات افزایش در مقدار این کاربیدها بنحوی که از پراکندگی مناسبی برخوردار باشند و از نظر ابعادی و ظاهری به سمت کاربیدهای کروی بروند، منجر به بهبود مقاومت در سایش و کاهش ضریب اصطکاک خواهد شد. [15]

همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که کاربیدهای کروی داکتیلیته و چقرمگی مناسبی را برای غلتک تامین می‌کنند. در ادامه بررسی نتایج مرتبط با داده‌های ترسیم شده در نرم افزار رویه سه بعدی چنین نتیجه‌گیری می‌دهد که با افزایش مجموع کروم و کربن می‌توان شاهد افزایش سختی و کارکرد غلتک آدامایت باشیم که این موضوع تاییدکننده فرض اولیه در رابطه با تاثیرگذاری مقدار عناصر آلیاژی در بهبود شرایط نورد است.

بطور کلی براساس نتایج بدست آمده از آزمون‌های انجام شده از آنجایی که سختی غلتک‌های آدامایت متاثر از مقدار کاربیدهای آسفرودایز پراکنده شده در میکروساختار است. کاربیدهای آسفرودایز بعنوان عوامل موثری در افزایش سختی در نظر گرفته می‌شوند چرا که بعنوان عاملی در سخت کاری مطرح هستند. کاربیدها همچنین بعنوان عاملی موثر در جلوگیری از رشد ترک‌ها مطرح هستند و از این طریق احتمال انهدام غلتک‌ها را کاهش می‌دهند. هرچند سختی غلتک‌های آدامایت تنها بوسیله مقدار کاربیدهای کروی قابل تعیین نیست. نرخ سرد شدن در حین فرایند ریخته‌گری و ترکیب شیمیایی آلیاژ بکار رفته نیز موثر است و عملیات حرارتی غلتک‌ها سختی غلتک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در حالت کلی حضور کاربیدهای آسفرودایز در غلتک‌های آدامایت از آنجایی که آن‌ها می‌توانند در استحکام و دوام غلتک‌ها مشارکت داشته باشند، مورد نظر است. مقدار بهینه و پراکندگی مناسب کاربیدهای آسفرودایز در ارتباط با کاربرد مشخص و شرایط کارکردی نورد است. بنابراین مهم است که

⁵ EDS

پارامترهای موثر و درجه تاثیرگذاری آن‌ها بر عملکرد نهایی غلتک مشخص شود. میکروساختار غلتک آدامایت بطور معمول متشکل از پرلیت به همراه کاربیدهای آسفرودایز است. پرلیت ساختار لایه ای دارد و متشکل از لایه‌های فریت و سمنتیت است که تافنس و داکتیلیته مناسب از طریق آن‌ها تامین می‌شود. کاربیدهای کرومی بوسیله فرایند آسفرودایزینگ تشکیل می‌شوند که متشکل از فرایندهای گرمایش و سردکاری کنترل شده غلتک بعد از فرایند ریخته گری است. کاربیدهای کرومی در زمینه پرلیتی پخش می‌شوند و باعث افزایش سختی خواهند شد و بعنوان عاملی در سخت کاری مداخله دارند که سختی و مقاومت در برابر سایش را بهبود می‌بخشد. فرایند کرومی کردن در افزایش عملکرد غلتک‌های آدامایت موثر است و اندازه و شکل و پراکندگی کاربیدها در میکروساختار را تحت تاثیر قرار می‌دهد. [16]

نتیجه‌گیری

براساس کلیه موارد یادشده چنین نتیجه می‌شود که:
در غلتک‌های آدامایت ترکیب شیمیایی مناسب بکار رفته نقش بسزایی در بهبود کارکرد غلتک مورد نظر ایفا می‌کند.
از مهمترین پارامترهای اثرگذار در این غلتک‌ها می‌توان به کاربیدهای کرومی اشاره کرد که تاثیر بسزایی در بهبود عملکرد غلتک‌های آدامایت دارند. این کاربیدها از طریق حضور عناصر آلیاژی تقویت کننده آن‌ها همچون کروم در کنار عملیات حرارتی مناسب ساختار مورد نظر را بهبود می‌دهند.

مراجع

- [1] NOGUCHI, Hiroshi, HIRAOKA, Hisashi, WATANABE, Yasuo, SAYAMA, Yasuhiro, "Hardness and wear resistance of adamite for work rolls in hot rolling mill", 1988, Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 28, 6
- [2] Spuzic, S, Strafford, KN, Subramanian, C, Savage, G. "Wear of hot rolling mill rolls: an overview", Wear, 1994, 176, 2.
- [3] Voronenko, B, "Compositions and heat treatment of modern roll steels", Metal science and heat treatment, 1995, 37, 11
- [4] Colas, Rafael, Ramirez, Jorge, Sandoval, Ignacio, Morales, Julio C, Leduc, Luis A, "Damage in hot rolling work rolls", Wear, 1999, 230, 1.
- [5] Schroder, Karl Heinrich, "A basic understanding of the mechanics of rolling mill rolls", Eisenwerk Sulzau-Werfen, ESW-Handbook.
- [6] Rożniata, E, Pacyna, J, "Hypereutectoid cementite morphology and mechanical properties of Cr-Ni-Mo cast steel", Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2006, 17, 1-2
- [7] Rożniata, E, Pacyna, J, "Effect of annealing on mechanical properties of ledeburitic cast steel", 2007, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 20, 1-2.
- [8] Ziehenberger, Karl Heinz, Windhager, Michael, "State of the art work rolls for hot rolling flat products", Proceedings of the CONAC, 2007.

- [9] Sun, Gui-fang, Zhang, Yong-kang, Liu, Chang-sheng, Luo, Kai-yu, Tao, Xing-qi, Li, Peng. "Microstructure and wear resistance enhancement of cast steel rolls by laser surface alloying NiCr–Cr 3 C 2", *Materials & Design*, 2010, 31, 6.
- [10] KISS, Imre, ALEXA, Vasile, "Statistical mathematic analysis and technological investigations in the area of the rolling mill rolls quality", 2011, *machine design*, 2, 79-84.
- [11] Nilsson, Malin, Olsson, Mikael, "Microstructural, mechanical and tribological characterisation of roll materials for the finishing stands of the hot strip mill for steel rolling", 2013, *Wear*, 307, 1.
- [12] Dong, Qiang, Cao, Jian-guo, Wen, Dun, "Spalling prevention and wear improvement of rolls in steel strip hot-rolling process", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2015, 15.
- [13] Laukik P. Raut, "An Optimal Design Approach for Adamite Hot Rolling Mill Roll", *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 2015, 15, 2.
- [14] Ilca, Ioan, Kiss, Imre, Alexa, Vasile, Ratiu, Sorin Aurel, "OPTIMISATION OF THE THERMAL TREATMENT TECHNOLOGIES FOR THE CAST HIPEREUTECTOID STEEL ROLLS", *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 2016, 14, 3.
- [14] Niekurzak, Mariusz, Kubińska-Jabcoń, Ewa, "Assessment of the Impact of Wear of the Working Surface of Rolls on the Reduction of Energy and Environmental Demand for the Production of Flat Products: Methodological Approach", *Materials*, 2022, 15, 6.
- [15] Janusz Krawczyk, Łukasz Frocisz, Adam KOKOSZA, Rożniata Edyta, "THE IMPORTANCE OF PRIMARY CARBIDES FOR THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF FERROUS ALLOYS", *tribologia*, 2016, 270, 6.
- [16] José García, Verónica Collado Ciprés, Andreas Blomqvist, Bartek Kaplan, "Cemented carbide microstructures: a review", *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2019, 60.

جدول ۱. محدوده ترکیب شیمیایی نمونه‌های ریخته‌گری شده.

آنالیز	مولیدن	کروم	نیکل	منگنز	سیلیسیم	کربن
نمونه با ترکیب شیمیایی قبلی	0.1	0.7	0.5	0.5	0.3	1.0
	0.7	1.2	1.0	1.0	0.5	1.5
نمونه با ترکیب شیمیایی جدید	0.4	1.0	0.8	0.7	0.5	1.2
	1.0	1.5	1.4	1.1	0.9	2.0

جدول ۲. مشخصات آزمون سایش pin on disk

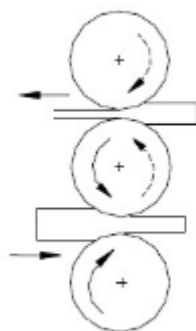
مقدار نیروی اعمالی: 100 نیوتن	دمای انجام آزمون: 600 درجه سانتیگراد
مسافت/زمان مورد نظر: 1000 متر	جنس پین: گلوله کاربید تنگستن
سرعت: 140 دور بر دقیقه	

جدول 3. نتایج مربوط به آزمون EDS

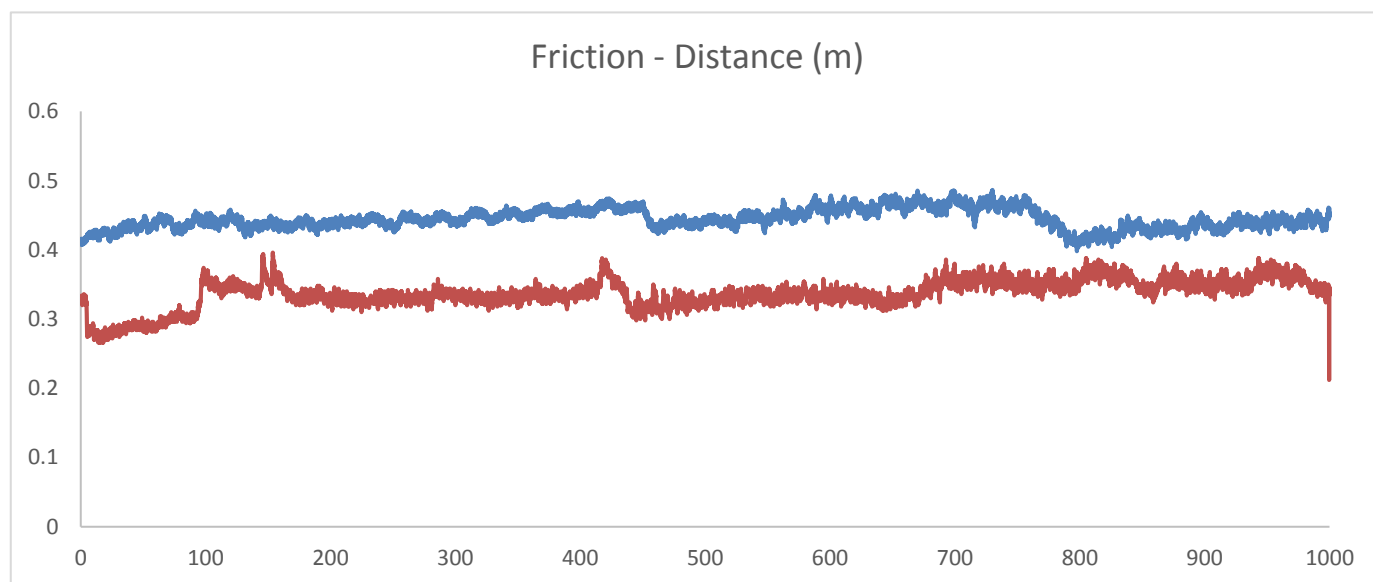
آهن	مولیدن	کروم	کربن	
73%	4.5%	4.5%	18%	نمونه با آنالیز جدید و قبل از استفاده در خط نورد
93%	6%	1%	—	زمینه
75%	4%	4.4%	16.6%	نمونه با آنالیز جدید و بعد از استفاده در خط نورد
92.7%	6.5%	0.8%	—	زمینه
77.7%	3%	3.8%	15.5%	نمونه با آنالیز قدیمی
94.2%	5%	0.8%	—	زمینه

جدول 4. نتایج مربوط به آزمون سایش PIN ON DISK

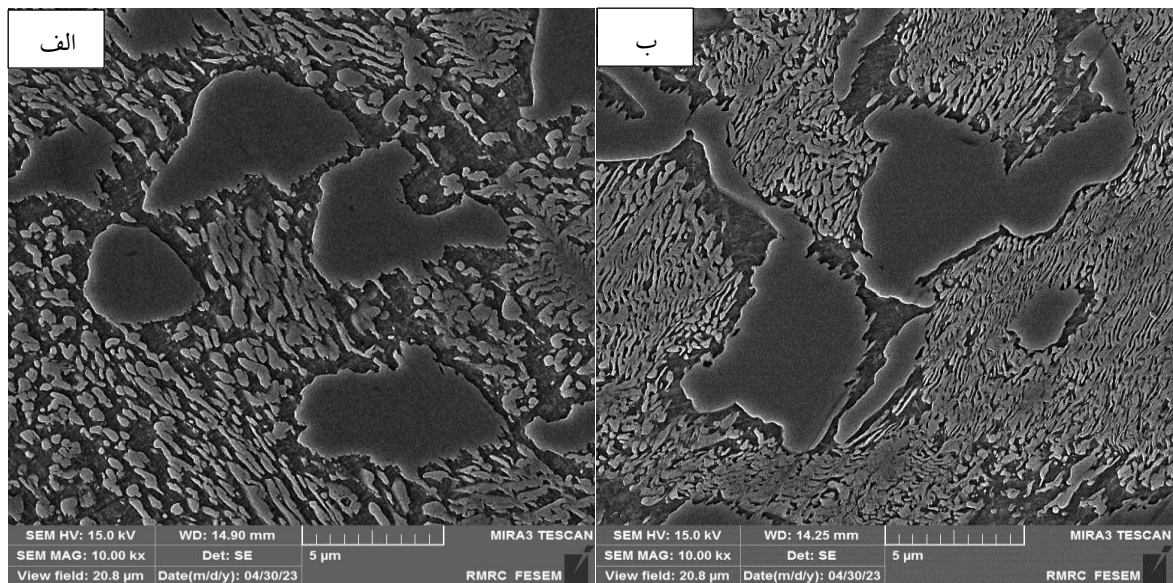
درصد وزن کاهش یافته	
0.02%	نمونه با ترکیب شیمیایی جدید
0.11%	نمونه با ترکیب شیمیایی قبلی



شکل 1. شماتیک نورد سه غلتکی.

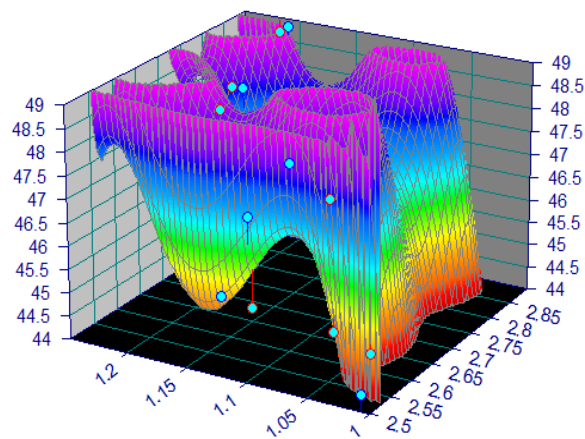


شکل ۲. نمودار مربوط به رفتار سایشی و ضریب اصطکاک. نمودار بالا مرتبط با ترکیب شیمیایی قبلی و نمودار پایین در ارتباط با ترکیب شیمیایی جدید.



شکل 3. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در مورد توزیع کاربیدهای آسفرودایز الف. در ترکیب شیمیایی جدید ب. در ترکیب شیمیایی قبلی. مطابق با تصاویر کاربیدهای مرتبط با آنالیز قبلی بلوکه ای و کاربیدهای آنالیز جدید به سمت کروی شدن.

Rank 67 Eqn 215 $z=a+b/x+c/x^2+d/x^3+e/x^4+f/x^5+gy+hy^2+iy^3+jy^4+ky^5$
 $r^2=0.95580869$ DF Adj $r^2=0.46970431$ FitStdErr=0.90135464 Fstat=4.3257769
 $a=-23740663$ $b=3.2744957e+08$ $c=-1.7766392e+09$ $d=4.8172973e+09$ $e=-6.5276505e+09$ $f=3.5363035e+09$
 $g=-1792721.6$ $h=3299668.9$ $i=-3023175.9$ $j=1379187.8$ $k=-250699.25$



شکل 4. نمودار بدست آمده براساس نرم افزار مدل سازی رویه سه بعدی. مطابق با این مدل ارتباط مقدار کروم – کربن و تاثیر آن بر مقدار سختی و کارکرد نهایی غلتک آدامایت بکار رفته در نورد سه غلتکی نورد ورق فولادی نشان داده شده است.