



Analysis of microstructure and mechanical properties of refined steel grades by RH method before and after rolling

Abbas Abbasian^{1*}, Mohammad Ali Etminani Esfahani ²

¹Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

²Department of Engineering Sciences, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 2024.10.14

Revised: 2024.12.08

Accepted: 2025.04.07

Keyword:

Steel
Decarburization
Degassing
RH
Rolling
Mechanical Properties

*Corresponding Author:

Abbas Abbasian

Email:

Abbasian_phd@yahoo.com

ABSTRACT

In this article, the analysis of microstructure and mechanical properties of refined steel grades by RH method before and after rolling has been done. In the RH process, which is carried out under vacuum conditions, the reaction of carbon with oxygen gas generally takes place and leads to the reduction of dissolved carbon and oxygen below 10 and 15 PPM, respectively. reduced After degassing and improving the melt quality, samples were taken from 6 grades of steel, and in order to compare the microstructure and check the mechanical properties, mechanical tests including tensile and hardness were performed on the samples. The results showed that rolling has a great effect on the structure and properties of steels in all grades. According to the obtained results, the martensitic phase of the blade increases by approximately 2% after rolling, and due to the larger and wider grains, the martensitic blades are also broken and become wider. The results of the mechanical tests showed that the final hardness and strength of the rolled sample reached 95 HB and 325 MPa, respectively, which shows that in addition to the reduction of impurities in the final product, the martensitic structure was also effective, as well as adding aluminum to eliminate oxygen. It does not cause impurity, but with the removal of hydrogen gas, the quality is increased and the strength of the sheet is in a very favorable range.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Today, new methods such as RH steelmaking are used for steel production, which, in addition to reducing prices, has also led to an increase in the purity of the produced steel. Steel is one of the most abundant materials produced by humans, and more than 1 billion tons of steel are produced worldwide each year.

This mechanism has been taken from HERAEUSE and RUHERSTHALI since 1950. It is well known that carbon makes steel stronger; "non-engineering" decarbonization reduces the mechanical properties and strength of steel. However, there is engineering decarbonization that increases the properties of steel in such a way that, instead of carbon, other elements such as nickel, chromium, niobium, and titanium can be used to strengthen steel. The prepared steel goes to the rolling machine, where the metal billet is deformed by passing between one or more pairs of rollers. In this research, the properties and microstructure of RH melts before and after rolling were investigated. The purpose of this research was to remove carbon from the composition so that its reaction with oxygen has less impurity. By removing oxygen and carbon and by adding microalloys such as Ti and Nb, steel will gain the desired strength for secondary processes. For this purpose, microstructural and mechanical investigations were carried out, and the samples were compared with each other.

Methodology

To produce sheets with steels, high-strength steelmaking with low alloy, 5 types of steel were studied in terms of microstructure and mechanical properties. The studied alloys were of grades 1110, 1361, 5942, 5976, 5973, and 5357, which are the internal grades of Mobarakeh Steel and their equivalent standard grades and slabs and sheets produced by Mobarakeh Steel Company with the specified chemical composition presented in Table 1.

Table 1. Internal grades of Mobarakeh steel and its standard equivalent.

Standard		grade
EN10130	DC06	1110
EN10111	DD14	1361
EX65	API	5942
EX70	API	5976
X52	API	5973
X55	API	5357

The melt was discharged from the furnace after being prepared into 200-ton pails, and the melt was transferred to the RH unit by transferring to the transmission line by a crane and after performing the RH process. After the approved slabs were sent for rolling, a sample of 50 cm x 50 cm was taken from them after the rolling operation and turned into a roll; this sample was prepared to check the microstructure. The pre-rolled samples, including 6 samples, were prepared for mechanical and metallographic tests as shown in Figure 1.

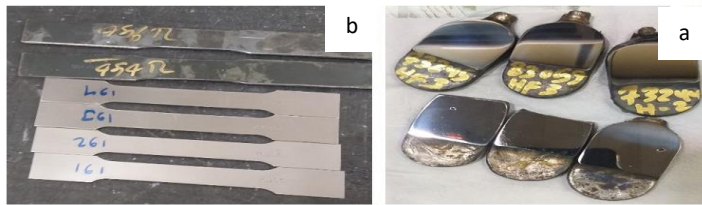


Figure 1. Samples prepared for microstructural and mechanical investigations.

Results and discussion

The tested samples are presented by coding in Figure 2 and according to Tables 2 and 3 below:

5973: Microscopic image of a sample produced with internal grade 5973 and API X52 standard. As can be seen, the white spots of ferrite and the golden blades of martensite are low-carbon. Figure 2(5.1) is before rolling, and Figure 2(5.2) is after rolling.

5976: Microscopic image of a sample produced with internal grade 5976 and APIEX70 standard. As can be seen, the white spots of ferrite and blades are low-carbon martensite. Figure 2(6.1) is before rolling, and Figure 2(6.2) is after rolling.

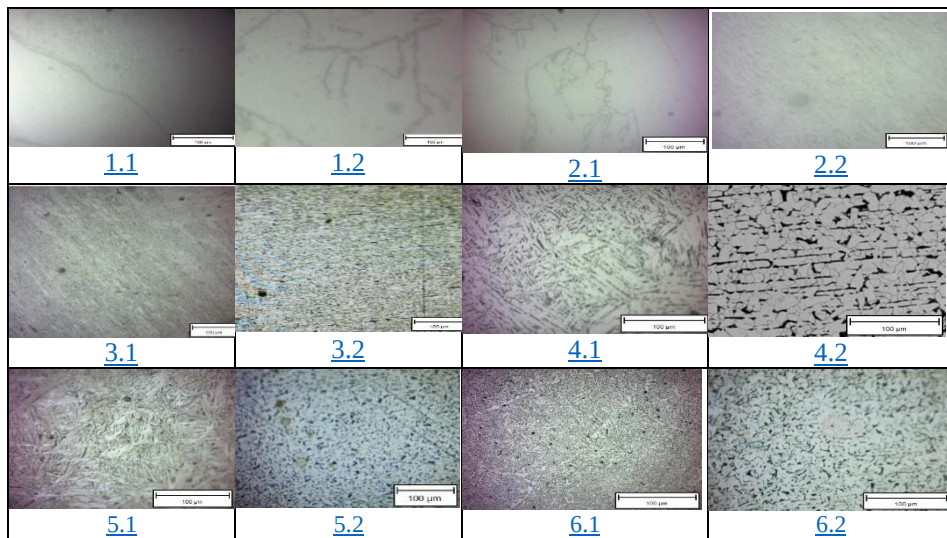


Figure 2. Microscopic images of samples with coding separation produced with an internal grid.

All tensile mechanical tests were performed according to ASTM A370 and ASTM B557M standards and with zwick/Roell z600 machine. Tables 2 and 3 show the final tensile strength of 6 grades before and after rolling. In grade 5976, it was 275 before rolling and 315 after rolling. Also, in grade 5973, the tensile strength changes from 287 to 325.

Table 2. Mechanical properties before rolling.

Results							grade
N	R	RE/RM-T	LO	ELT	UTS-T	YIEIO-T	Alloy
0.237	2.845	0.35	80	44	283	149	1110

0.238	2.945	0.54	80	44	283	148	1361
0.253	2.89	0.51	80	44	277	144	5942
0.251	2.90	0.49	80	44	275	136	5976
0.252	2.612	0.49	80	44	287	141	5973
0.254	2.9	0.5	80	44	276	137	5357

Table 3. Mechanical properties after rolling.

N ³	R ²	RESULTS					grade
		RE/RM-T ¹	LO	ELT	UTS-T	YIEIO-T	Alloy
0.254	2.69	0.5	80	55	320	165	1110
0.237	2.845	0.53	80	49	303	151	1361
0.237	2.845	0.53	80	47	313	184	5942
0.253	2.92	0.49	80	46	315	165	5976
0.252	2.692	0.51	80	51	325	175	5973
0.238	2.845	0.53	80	52	292	152	5357

Conclusion

1. The results showed that rolling has a great effect on the structure and properties of steels in all grades with the given chemical compositions. According to the obtained results, the martensitic phase of the blade increases by approximately 2% after rolling, and we observe that the grains become larger and wider, which causes the martensitic blades to widen.

2. According to the results obtained from the mechanical tests and the analysis of these results and data, we conclude that rolling on alloys increases their mechanical strength to an acceptable level and is better than the state before rolling. In the tests, they had greater mechanical resistance and better stability than before rolling, which applies to all these alloys.

¹ RE/RM-T: The ratio of tensile strength to yield point

² R: The reduction ratio of width to thickness

³ N: Manual work



تحلیل ریزساختار و خواص مکانیکی گریدهای فولادی تصفیه شده به روش RH قبل و بعد از نورد

عباس عباسیان^{*۱}، محمدعلی اطمینانی اصفهانی^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

۲- گروه علوم مهندسی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۸ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸ کلید واژگان: فولاد کربن زدایی گاز زدایی RH نورد خواص مکانیکی *نویسنده مسئول: عباس عباسیان پست الکترونیکی: Abbasian_phd@yahoo.com	در این مقاله تحلیل ریزساختار و خواص مکانیکی گریدهای فولادی تصفیه شده به روش RH قبل و بعد از نورد انجام شده است. در فرآیند RH که تحت شرایط خلاء انجام می گیرد عموماً واکنش کربن با گاز اکسیژن صورت گرفته و منجر به کاهش کربن و اکسیژن مذاب به ترتیب کمتر از ۱۰ و ۱۵ PPM می گردد، علاوه بر کربن زدایی و اکسیژن زدایی می توان هیدروژن و نیتروژن مذاب را به واسطه ایجاد خلا به حداقل ممکن کاهش داد. پس از گاز زدایی و بهبود کیفیت مذاب از ۶ گرید فولاد نمونه گیری و جهت مقایسه ریزساختار و بررسی خواص مکانیکی روی نمونه ها آزمون های مکانیکی شامل کشش و سختی انجام گرفت. نتایج نشان داد که نورد بر ساختار و خواص فولادها در تمامی گریدها تأثیر زیادی دارد. طبق نتایج بدست آمده، فاز مارتنزیتی تیغه های پس از نورد تقریباً ۲ درصد افزایش می یابد و به دلیل بزرگ تر و پهن تر شدن دانه ها تیغه های مارتنزیتی نیز شکسته شده و پهن تر می شود. نتایج آزمون های مکانیکی نشان داد که سختی و استحکام نهایی نمونه نورد شده به ترتیب به ۹۵ HB و ۳۲۵ MPa رسید که نشان می دهد علاوه بر اینکه ناخالصی در محصول نهایی کاهش داشته ساختار مارتنزیتی نیز تأثیرگذار بوده است، همچنین برای از بین بردن اکسیژن به افزودن آلومینوم که باعث ایجاد ناخالصی می شود نیاز نیست، بلکه با حذف گاز هیدروژن کیفیت بالا رفته و استحکام ورق نیز در محدوده بسیار مطلوبی قرار می گیرد.



۱- مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی نیاز به فولادهایی با وزن کمتر و استحکام بیشتر بیش از پیش احساس می شود. اصلی ترین ویژگی این فولادها باید شکل پذیری آنها باشد. فولادهای بینابینی IF به دلیل درصد کم کربن و نیتروژن ($C/N < 0.003$) و ($N < 0.004$) این ویژگی را دارا هستند. اضافه کردن و یا کاهش عناصر مختلف به آهن مذاب در شرایط مختلف باعث می شود استحکام، ضربه پذیری، چکش خواری، شکل پذیری و... افزایش یا کاهش یابد [۱]. یکی از روش های افزایش استحکام فولاد اضافه کردن کربن به آهن مذاب است که باعث تولید فولاد با استحکام بالا می شود [۲، ۳]. فولادها انواع و کاربردهای مختلفی دارند و با اضافه یا کاهش عناصر و شرایط ریخته گری و نورد و یا شرایط سرد کردن می توان به خواص مختلفی رسید. خواص فولاد به کمک تغییر در درصد کربن، عناصر آلیاژی و عملیات حرارتی قابل کنترل است. استفاده از فولاد به دلیل استحکام کشش نهایی زیاد و قیمت نسبتاً پایین آن در ساخت صنایع مختلفی از قبیل ساختمان سازی، سازه های زیر ساختی، ابزارها، کشتی ها، پل ها، قطارها، خودروها، ماشین آلات، تجهیزات و سلاح های نظامی کاربرد گسترده دارد [۴]. امروزه برای تولید فولاد از روش های نوینی مانند، فولادسازی به روش RH استفاده می شود که علاوه بر کاهش قیمت ها، منجر به افزایش خلوص فولاد تولیدی نیز گردیده است. فولاد یکی از بیشترین مواد تولید شده توسط انسان است و سالانه تقریباً بیش از ۱ میلیارد تن فولاد در سراسر جهان تولید می شود [۳]. استحکام فولاد با «میزان کربن محلول» به شدت افزایش می یابد اما از طرفی این افزایش استحکام باعث کاهش قابلیت جوشکاری و افزایش احتمال شکست ترد می شود. استحکام فولادهای فریتی (فرومگناطیس^۱) رابطه معکوسی با شکل پذیری دارد. تلفیق استحکام و شکل پذیری با پایدار سازی فاز آستنیت (پارامگناطیس^۲) در فولادهای مدرن چند فازی قابل بهبود است. تولید فولاد روش های مختلفی دارد کوره القایی، کوره بلند، کوره قوس الکتریکی و... پس از تولید فولاد می توان عملیات مختلفی روی آن انجام داد تا باعث تقویت خواص آن گردد یکی از این روش ها استفاده از ایستگاه RH جهت کربن زدایی و گاز زدایی است [۵]. این مکانیزم از سال ۱۹۵۰ از نام دوشر کت HERAEUSE و RUHERSTHALI گرفته شده است. همان طور که مشخص است کربن باعث استحکام فولاد می گردد و کربن زدایی «غیرمهندسی» باعث کاهش خواص مکانیکی و استحکام فولاد می شود و فولاد ترد و شکننده می شود بنابراین کربن زدایی فولاد می بایست به صورت کاملاً کنترل شده انجام شود [۶]. کربن زدایی مهندسی باعث افزایش خواص فولاد می شود و در این فرآیند به جای عنصر کربن می توان از عناصر دیگری مانند نیکل، کروم، نیوبیم، تیتانیوم جهت تقویت فولاد استفاده نمود [۷]. در این تحقیق به بررسی و تحلیل خواص مکانیکی و ریز ساختار ذوب های RH در ۶ گرید متفاوت قبل و بعد از نورد پرداخته شده است. هدف از این پژوهش حذف کربن در ترکیب با ایجاد خلاء می باشد تا واکنش آن با اکسیژن ناخالصی به شدت کمتری ایجاد کند. با حذف کربن و اکسیژن، میکروآلیاژی های مثل Ti و Nb به ذوب افزوده شد که باعث تولید فولاد با خواص مکانیکی مطلوب تر جهت فرآیندهای ثانویه گردید. در نهایت با نورد نمونه های فولاد و ایجاد تنش های فشاری و کششی روی آن از لحاظ خواص مکانیکی و ریز ساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری (OM) و تست های مکانیکی با هم مقایسه شدند. این پژوهش از لحاظ استراتژیک بسیار حائز اهمیت بود به دلیل اینکه در کشور رسیدن به این کیفیت و خواص برای ورق های فولادی نقطه عطفی در صنعت فولاد ایجاد کرده است.

^۱ Ferromagnetism^۲ Para magnetism

۲- روش شناسی

برای تولید ورق‌های فولادی، فولادسازی استحکام بالا با آلیاژ کم ۱، ۶ نوع فولاد از نظر ریزساختاری و خواص مکانیکی مورد مطالعه قرار گرفت. آلیاژهای مورد مطالعه عبارتند از: گریدهای (۱۱۱۰-۱۳۶۱-۵۹۴۲-۵۹۷۶-۵۹۷۳) که معادل استاندارد این گریدها و اسلب‌ها با ترکیب شیمیایی مشخص در جدول ۱ و ۲ به ترتیب ارائه شده است. پس از انجام فرآیند RH و تنظیم آنالیز شیمیایی مطابق جدول ۲، ذوب حاصل جهت ریخته‌گری به بخش ریخته‌گری فرستاده شد و عملیات ریخته‌گری آن (ریخته‌گری به صورت مداوم) انجام گرفت، برای انجام آنالیز و آزمون‌های مکانیکی و ریز ساختاری نمونه‌های از مذاب گرفته شد. این نمونه‌ها در محدوده دمایی ۱۵۵۰-۱۵۲۵ درجه سانتی‌گراد از مذاب در حال ریخته‌گری و از درون تگار ۲ گرفته شده است و درون کپسول نیتروژن خنک‌سازی شدند.

جدول ۱. گریدهای داخلی فولاد مبارکه و معادل استاندارد آن.

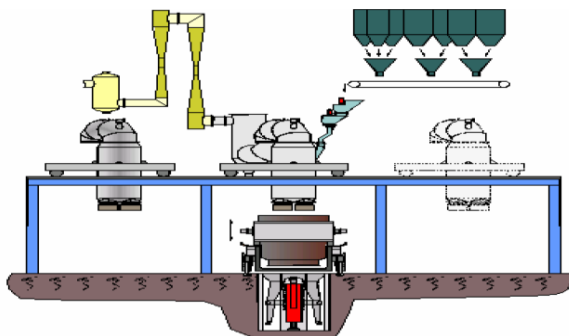
استاندارد	گرید
EN10130	DC06
EN10111	DD14
EX65	API
EX70	API
X52	API
X55	API

جدول ۲. اسلب‌ها و ورق‌های تولید شده ساخت شرکت فولاد مبارکه.

گرید	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Al	Ti
1110	Min	0.002	0.0001	0.125	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.027	0.045
	Max	0.003	0.018	0.145	0.013	0.007	0.035	0.035	0.035	0.01	0.005	0.035	0.06
1361	Min	0.01	0.0001	0.155	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.03	0.0001
	Max	0.025	0.025	0.18	0.015	0.01	0.04	0.04	0.01	0.005	0.005	0.055	0.01
5357	Min	0.07	0.15	1.35	0.001	0.001	0.001	0.12	0.001	0.035	0.02	0.025	0.008
	Max	0.09	0.25	1.45	0.015	0.008	0.06	0.18	0.06	0.045	0.04	0.045	0.018
5942	Min	0.03	0.2	1	0.001	0.006	0.22	0.1	0.075	0.035	0.02	0.02	0.01
	Max	0.055	0.35	1.1	0.015	0.0015	0.3	0.18	0.1	0.05	0.04	0.045	0.02
5973	Min	0.035	0.2	1	0.0001	0.0001	0.0001	0.12	0.0001	0.035	0.02	0.02	0.01
	Max	0.045	0.3	1.1	0.001	0.001	0.06	0.17	0.07	0.045	0.03	0.04	0.018
5976	Min	0.075	0.2	1.45	0.001	0.001	0.001	0.12	0.001	0.08	0.033	0.01	0.01
	Max	0.085	0.3	1.55	0.013	0.007	0.1	0.18	0.1	0.095	0.048	0.021	0.021

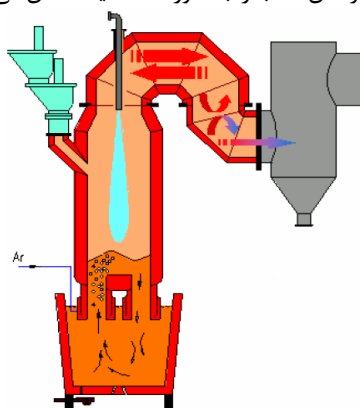
^۱ High Strength Low alloy^۲ Tundish

برای آماده‌سازی ذوب با استفاده از کوره‌های قوس الکتریکی مقدار ۱۸۵ تن مذاب را توسط ۳ عدد الکتروگراویتی و یک ترانس ۶۳۱ آمیدی مطابق با آنالیز جدول ۲ آماده شد. پس از آماده‌شدن ذوب درون کوره، مذاب داخل پاتیل‌های ۲۰۰ تنی تخلیه می‌شود و با جرثقیل به واحد RH انتقال داده می‌شود. با ایجاد خلاء و انجام فرایند RH و همچنین تنظیم آنالیز شیمیایی ذوب جهت ریخته‌گری به ماشین ریخته‌گری توسط جرثقیل فرستاده می‌شود و عملیات ریخته‌گری آن (ریخته‌گری از پاتیل به تگار و از تگار به قالب به صورت مداوم) انجام می‌گیرد که شماتیک مراحل انجام فرایند RH در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. نمای شماتیکی از واحد RH و پاتیل مذاب و جک هیدرولیک.

پاتیل مذاب پس از ورود به کارگاه و قرارگرفتن در موقعیت مورد نظر به وسیله جک هیدرولیک به همراه ترانسفرکار ۱ بالا آمده و ذوب تا ۴۰ سانتی‌متر وارد اسنورکل‌ها^۲ می‌شود و پس از استارت سیستم خلا با اختلاف فشار ایجاد شده و همچنین فلو گاز آرگون از دهانه اسنورکل ورودی باعث چرخش مذاب می‌شود. شکل ۲ نمایی از واحد RH و پاتیل مذاب و اسنورکل و نحوه چرخش مذاب را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمای شماتیکی از واحد RH و پاتیل مذاب و اسنورکل و نحوه چرخش مذاب.

نمونه‌های انجام آنالیز و آزمون‌های مکانیکی و ریزساختاری از مذاب گرفته شد. این نمونه‌ها در محدوده‌های ۱۵۲۵ تا ۱۵۵۰ درجه سانتیگراد از مذاب در حال ریخته‌گری و از درون تگار گرفته شده است و درون کپسول نیتروژن خنک

^۱ Transporter

^۲ Snorkels

سازی می‌گردد. جهت محافظت از مذاب و جلوگیری از اکسیداسیون علاوه بر سرباره خود آلیاژ و فولاد تولیدی در هر مرحله (RH- تگار- قالب) از پودر مخصوص جهت جلوگیری از نفوذ هوا به درون مذاب استفاده می‌شود، همچنین ریختن ذوب از پاتیل به تگار و از تگار به قالب توسط نازل صورت می‌گیرد که دارای آب بندی کامل است. آنالیز شیمیایی توسط دستگاه اسپکترومتر انجام می‌گیرد که به وسیله اشعه بر روی سطح فولاد میزان عناصر را مشخص می‌کند. ورق‌های تایید شده جهت انجام عملیات نورد ارسال می‌شوند، برای بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی قبل و بعد از عملیات نورد تعداد هر کدام ۶ نمونه به ابعاد ۵۰ mm در ۵۰ mm آماده شد که در شکل ۳ قابل مشاهده است. برای آزمون کشش نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM A370 و ASTM B557M آماده شدند.



شکل ۳. نمونه‌های آماده شده جهت بررسی‌های ریزساختاری و مکانیکی (الف) نمونه‌های آماده شده برای متالوگرافی (ب) نمونه‌های آماده شده جهت تست کشش.

روش آماده‌سازی بدین صورت است که ابتدا نمونه‌ها به وسیله دستگاه سنباده‌زن از سنباده ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ عملیات سنباده زنی انجام گرفت تا سطح صیقلی و آینه‌ای شود سپس توسط دستگاه پولیش اولیه داده شد و توسط پودر آلومینای $0.3 \mu\text{m}$ پولیش نهایی شد و نهایتاً نمونه‌ها جهت مشاهده ریزساختار توسط محلول نایتال ۲ درصد اچ شدند [۹]. میکروسکوپ نوری مورد استفاده در این تحقیق از نوع Olympus gx51 بود. آزمون‌های مکانیکی با استفاده از دستگاه ZWICK ROELL Z600 و همچنین سختی سنجی نمونه‌ها توسط دستگاه Koopa انجام شده است. برای بررسی تأثیر تغییرات ریزساختار بر خواص مکانیکی از قسمت مرکزی و چپ و راست نمونه سختی سنجی برینل انجام شد. برای این منظور از دستگاه سختی سنجی کوبا مدل UV6 استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشخصه‌یابی و متالوگرافی نمونه‌ها

هدف از انجام این پژوهش دستیابی به نتایجی است که مشخص گردد آیا با کاهش کربن در استحکام و خواص مکانیکی تغییری ایجاد می‌شود یا خیر، زیرا این فولادها جهت بدنه خودرو و لوازم خانگی استفاده می‌شوند که وجود کربن باعث عدم شکل‌پذیری و کشش سطحی عمیق می‌شود. در گریدهای API که شامل ۵۹۴۲، ۵۹۷۳ و ۵۹۷۶ می‌شود به دلیل کاربرد این گریدها در صنایع نفت و گاز و صنایع شیمیایی برای لوله‌ها مخازن و ... وجود ترکیبات هیدروژنی و سولفیدی مثل H2S و HS این گریدها نیاز به هیدروژن زدایی دارند در صورت عدم هیدروژن زدایی، هیدروژن و گوگرد موجود در فولاد و گازهای موجود در مواد نفتی و شیمیایی به تعادل می‌رسد و ترکیبات مضر در فولاد به وجود می‌آورد که باعث ایجاد ترک و انهدام مخزن یا لوله می‌شود [۸]. اضافه کردن و یا کاهش عناصر مختلف به آهن مذاب در شرایط مختلف باعث می‌شود استحکام، ضربه پذیری، چکش خواری، شکل پذیری و ... افزایش یا کاهش یابد. یکی از این روش‌ها و عملیات‌ها اضافه کردن کربن به آهن مذاب است که باعث تولید فولاد می‌شود که دارای استحکام بالایی است. تولید فولاد روش‌های مختلفی دارد کوره القایی، کوره بلند، کوره قوس الکتریکی و ... پس از

تولید فولاد می‌توان عملیات مختلفی روی آن انجام داد تا باعث تقویت خواص آن گردد یکی از این عملیات‌ها استفاده از ایستگاه RH جهت کربن‌زدایی و گاززدایی است.

در دنیا روش‌های مختلفی برای هیدروژن‌زدایی از فولاد وجود دارد که به اختصار ارائه شده است تا درک بهتری از مطلب ایجاد گردد. جهت کربن‌زدایی در مقیاس‌های کم از پمپ‌های وکیوم استفاده می‌شود که ملاقه‌ای از مذاب را داخل پمپ خلاء قرار می‌گیرد و به وسیله عملیات خلاء کربن‌زدایی و گاززدایی انجام می‌شود. اما برای مقیاس صنعتی از ۳ روش استفاده می‌شود که عبارتند از:

- روش RH که دو عدد دماغه (اسنورکل) دارد
- روش ^۱SSRF که یک عدد دماغه دارد
- روش REDA

حفظ سرباره جهت تماس مستقیم مذاب با اتمسفر و جلوگیری از افت دما امری ضروری است. در روش RH باید دماغه‌ها با دقت بالا سطح سرباره را شکسته و پس از رسیدن به مذاب عمل همگن‌سازی و کربن‌زدایی شروع می‌شود اما باز هم مقداری سرباره به درون اسنورکل و کف مخزن ۲ نفوذ میکند اما در روش SSRF این مشکل تا حدودی برطرف شده و همچنین سرعت عمل SSRF بیشتر از RH است. با اعمال خلاء در واحد RH.TOP تعادل گازی بین ذوب و محیط به هم می‌خورد و برای ایجاد تعادل گازی مجدد اتم‌های محلول هیدروژن با یکدیگر پیوند داده و به صورت مولکول‌های هیدروژن از ذوب خارج می‌شوند [۹]. همچنین هیدروژن موجود در ورق با هیدروژن موجود در مواد نفتی ترکیب شده و گاز هیدروژن بوجود می‌آید که باعث ایجاد حباب در ورق شده و پس از خروج گاز هیدروژن جای خالی حباب در ورق ایجاد باقی می‌ماند و با نفوذ H_2SO_4 که اسیدی می‌باشد به درون حفره در ورق باعث خوردگی زیادی در ورق می‌شود [۱۰].

بر اساس تئوری فشار داخلی ترک‌های هیدروژنی در پنج مرحله رخ می‌دهند که مرتبط با مکانیزم‌های ترک هیدروژنی، میزان حلالیت هیدروژن و نفوذ هیدروژن در مواد می‌باشد.

- جذب سطحی هیدروژن مولکولی از گاز زمینه به سطح فولاد
- شکل‌گیری اتم‌های هیدروژنی در سطح فولاد و جذب آن‌ها در سطح
- فرآیند جذب اتم‌های هیدروژن
- نفوذ اتم‌های جذب شده‌ی هیدروژن به لایه‌های فولاد
- تجمع اتم‌های هیدروژنی در تله‌های هیدروژنی همانند حفره‌هایی در اطراف ناخالصی‌ها در زمینه فولادی که منجر به افزایش فشار داخلی و شروع و انتشار ترک می‌شود.

ترک‌های هیدروژنی به دو دسته‌ی ترک‌های زیر سطحی که به ترک‌های هیدروژنی تاول معروفند و ترک‌های هیدروژنی مرکزی تقسیم می‌شوند. ترک‌های زیر سطحی در نزدیکی سطح، جایی که فشار هیدروژنی منجر به ایجاد حباب‌های زیر سطحی می‌شوند تشکیل می‌گردد. این پدیده در فولادهای با مقاومت کششی پایین رخ می‌دهد [۱۱]. حضور و توزیع انواع مختلف ناخالصی‌های غیرفلزی در فولاد، مخصوصاً حفره‌ها در اطراف ناخالصی‌ها شرایط مناسبی برای ایجاد ترک هیدروژنی ایجاد می‌کنند و به طور ویژه می‌توان به ناخالصی‌های کشیده شده‌ی MnS که مکان‌های

^۱ Single Snorkel Refining Furnace

^۲ vessel

مناسبی برای رخ داد ترک هیدروژنی هستند اشاره کرد. بنابراین کاهش و اصلاح این نوع ناخالصی‌ها برای کاهش امکان ترک هیدروژنی بسیار مهم هستند [۳].

فرآیندهای متالورژیکی RH عبارتند از: ۱- کربن‌زدایی با دمش اکسیژن و همچنین کربن‌زدایی طبیعی تحت خلاء. ۲- هیدروژن‌زدایی. ۳- کاهش نیتروژن. ۴- تنظیم آنالیز شیمیایی. ۵- تنظیم دما و امکان انجام گرمایش شیمیایی. طبق اصل لوشاتلیه با کاهش فشار واکنش به سمت تولید گاز بیشتر پیش می‌رود و در RH با استفاده از این موضوع و ایجاد خلاء، فشار را تا زیر 1 mbar کاهش داده و کربن‌زدایی انجام می‌شود [۱۲]. لازم به ذکر است که باید اکسیژن محلول در مذاب به اندازه کافی باشد، در صورت کافی نبودن اکسیژن عملیات تزریق اکسیژن انجام می‌شود [۱۳]. عوامل موثر در سرعت چرخش فولاد مذاب: ۱- شار گاز ۲- قطر اسنورکل ۳- فاصله محل دمش گاز تا کف مخزن ۴- اختلاف فشار داخل مخزن و محیط. بالا رفتن نیتروژن، یا در واحد متالورژی ثانویه با اضافه کردن بیش از حد نیتروژن به ذوب انجام می‌شود یا در هنگام ورود به واحد متالورژی ثانویه که به عوامل زیر بستگی دارد: ۱- استفاده از قراضه در کوره ۲- فاصله زیاد بین قطع اکسیژن در کوره و تخلیه‌ی کوره ۳- عدم وجود سرباره پفکی و اشکال در تنظیمات برقی کوره ۴- عدم افزودن گرافیت هنگام تخلیه ۵- پایین بودن سولفور در مذاب. با توجه به مطالب بالا نیتروژن ذوب بالا می‌رود و در واحد RH.TOP نیتروژن‌زدایی انجام می‌شود. تنظیم آنالیز شیمیایی: در واحد RH.TOP با استفاده از افزودن فروآلیاژها قابلیت تنظیم آنالیز حین اعمال خلاء وجود دارد. تنظیم دما و امکان انجام گرمایش شیمیایی: در واحد RH.TOP با دمش اکسیژن و افزودن آلومینیوم این امکان وجود دارد و با انجام واکنش گرمای روبرو دما بالا می‌رود.



بررسی‌های ریزساختاری با تکفیک شماره و گریدها به ترتیب کدگذاری شد و در شکل ۴ ارائه گردیده است. به منظور بررسی تأثیر خواص متالوگرافی و مکانیکی ذوب دمای گاززایی و کربن‌زدایی به وسیله RH تصاویر متالوگرافی و آزمون‌های مکانیکی انجام شد که در ادامه به ارائه و بررسی نتایج پرداخته شده است:

۱۱۱۰: شکل میکروسکوپی نمونه تولید شده با گرید داخلی ۱۱۱۰ و استاندارد DC06 EN10130 همانطور که مشاهده می‌شود لکه‌های سفید فریت و لکه‌های خاکستری پرلیت و تیغه‌ها مارتنزیت هستند. شکل ۱،۱ قبل از نورد، شکل ۱،۲ پس از نورد.

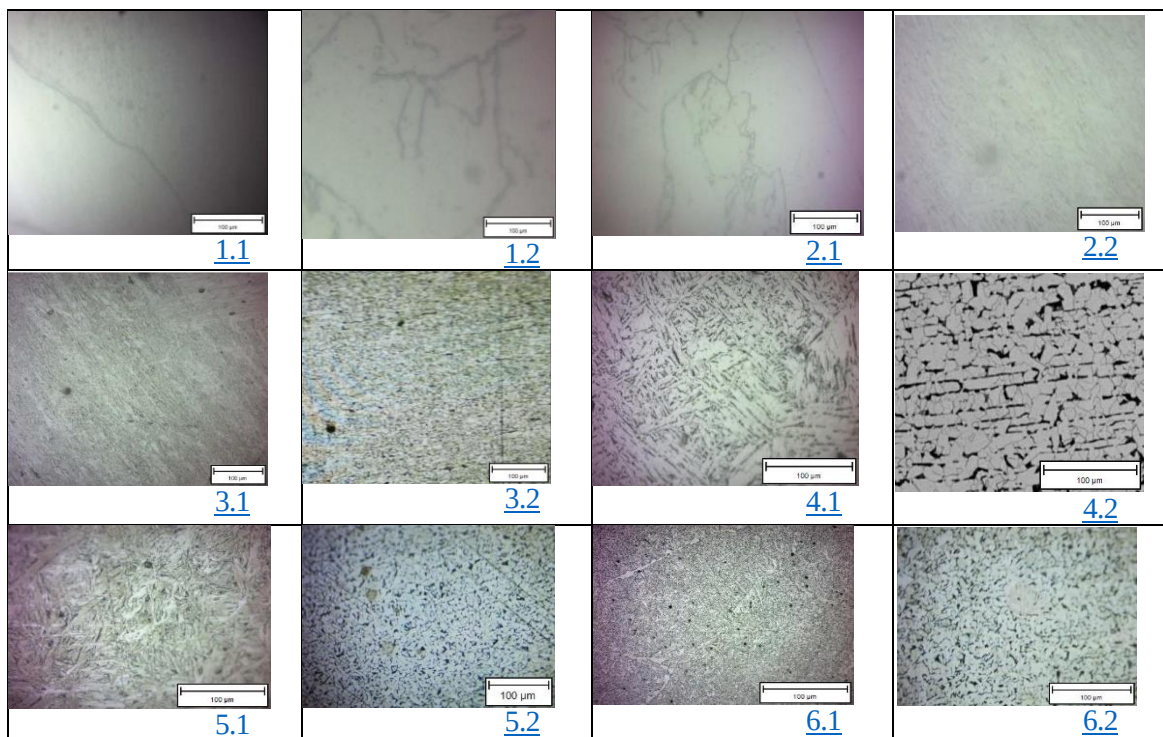
۱۳۶۱: شکل میکروسکوپی نمونه تولید شده با گرید داخلی ۱۳۶۱ و استاندارد ASTM-DD14 EN 10111. همانطور که مشاهده می‌شود لکه‌های سفید فریت و تیغه‌ها مارتنزیت کم‌کربن هستند. شکل ۲،۱ قبل از نورد، شکل ۲،۲ پس از نورد.

۵۳۵۷: شکل میکروسکوپی نمونه تولید شده با گرید داخلی ۵۳۵۷ و استاندارد API X55. همانطور که مشاهده می‌شود، لکه‌های سفید فریت، لکه‌های خاکستری پرلیت و تیغه‌ها مارتنزیت هستند. شکل ۳،۱ قبل از نورد، شکل ۳،۲ بعد از نورد.

۵۹۴۲: شکل میکروسکوپی نمونه تولید شده با گرید داخلی ۵۹۴۲ و استاندارد APIEX70. همانطور که مشاهده می‌شود، لکه‌های سفید فریت و تیغه‌ها مارتنزیت کم‌کربن هستند. شکل ۴،۱ قبل از نورد، شکل ۴،۲ پس از نورد. ۵۹۷۳: شکل میکروسکوپی نمونه تولید شده با گرید داخلی ۵۹۷۳ و استاندارد API X52. همانطور که مشاهده می‌شود، لکه‌های سفید فریت و تیغه‌های طلایی مارتنزیت کم‌کربن هستند. شکل ۵،۱ قبل از نورد، شکل ۵،۲ بعد از نورد.

۵۹۷۶: شکل میکروسکوپی نمونه تولید شده با گرید داخلی ۵۹۷۶ و استاندارد APIEX70. همانطور که مشاهده می‌شود، لکه‌های سفید فریت و تیغه‌ها مارتنزیت کم‌کربن هستند. شکل ۶،۱ قبل از نورد، شکل ۶،۲ بعد از نورد.

تأثیر عناصر مختلف بر کیفیت و استحکام فولادهای مورد آزمایش ارائه شده که در زیر به آن اشاره شده است. با توجه به جدول ۲ می‌توان دریافت که خواص ریز ساختاری و مکانیکی فولادهای مورد آزمایش به چه نحوی با عناصر و ترکیب شیمیایی خود در ارتباط می‌باشند. وانادیم فلز نرم و داکتیل به رنگ خاکستری نقره‌ای رنگ است که مقاومت خوردگی خوبی در برابر بازها و اسیدسولفوریک و هیدروکلریک دارد. وانادیم به راحتی در دمای ۳۹۹ درجه کلوین اکسید می‌شود. این فلز از استحکام ساختاری خوبی برخوردار است و در صنایع هسته‌ای کاربرد فراوانی دارد. با افزودن وانادیم به فولادهای ابزار و آلیاژی سختی‌پذیری آنها افزایش یافته و کاربردهای کمپلکس در ریزساختار تشکیل می‌شود [۱۴].



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی نمونه‌ها با تفکیک کد گذاری تولید شده با گرید داخلی.

یافته‌ها نشان می‌دهد که وجود ذرات کاربیدی برای افزایش سختی است [۱۵] در حالیکه مقاومت به نرم شدن در حین پیرسازی را بالا می‌برد. وانادیم، مقاومت به سایش و حفظ دندانه‌های تیز و استحکام در دماهای بالا را افزایش می‌دهد. هم چنین بخاطر ریز کردن دانه‌های آستنیت، قابلیت جوشکاری را بهبود بخشیده و نیز مقاومت در برابر هیدروژن با فشار بالا را افزایش می‌دهد. تأثیر نیوبوم در فولاد یا همان کلمبیوم در سالهای اخیر به عنوان عنصر پایدارکننده کاربرد در فولادهای زنگ زن و عنصر استحکام‌زا محسوب می‌شود. مولیبدن در فولاد چقرمگی و استحکام و سختی را بالا می‌برد. سیلیکون اکسیژن‌زدای قوی است و آخال‌های اکسیدی را نیز حذف می‌کند [۱۵]. سیلیکون به عنوان عنصر آلیاژی در مقادیر بیش از ۰.۳٪ اثرات مفیدی دارد. استحکام فریت را افزایش می‌دهد و سختی‌پذیری را زیاد می‌کند. وجود سیلیکون در فولادهای الکتریکی که جهت‌گیری دانه‌ها مطرح است بسیار مهم است. همچنین

سیالیت ذوب را نیز افزایش می‌دهد و باعث کاهش خواص مغناطیسی فولاد را می‌شود. می‌توان گفت که با اکسیداسیون هر ۶ کیلوگرم آلومینیوم یک درجه سانتیگراد دما افزایش می‌یابد [۱۶].

۳-۲- بررسی خواص مکانیکی

تمام آزمون‌های مکانیکی کشش طبق استاندارد ASTM A370 و ASTM B557M و با دستگاه zwick/Roell z600 انجام گرفت [۱۴]. رفتار ماده پیش از رسیدن به نقطه تسلیم به صورت کشسان است و در صورت برداشتن تنش وارده، ماده همانند یک کش به حالت اولیه خود باز می‌گردد که به آن منطقه الاستیک نیز گفته می‌شود. در جدول‌های ۳ و ۴ و شکل ۵ نقطه تسلیم ۶ گرید قبل و بعد از نورد آمده است. در گرید ۱۱۱۰ نقطه تسلیم قبل از نورد ۱۴۹ بوده و بعد از نورد ۱۶۵ شده است که بیانگر افزایش منطقه الاستیک است. در گرید ۱۳۶۱ نیز منطقه الاستیک از ۱۴۸ به ۱۵۱ افزایش یافته است. در گرید ۵۹۴۲ نیز تغییرات نقطه تسلیم و منطقه الاستیک از ۱۴۴ به ۱۸۴ رسیده است. گرید ۵۹۷۶ قبل از نورد ۱۳۶ و بعد از نورد ۱۶۵ می‌شود. هم چنین در گرید ۵۹۷۳ تغییرات منطقه الاستیک از ۱۴۱ تا ۱۷۵ بوده است. در گرید ۵۳۵۷ نیز نقطه تسلیم قبل از نورد ۱۳۷ بوده است و بعد از نورد به ۱۵۲ افزایش یافته است. در نهایت نتایج نشان می‌دهند که نقطه تسلیم در تمام گریدها افزایش یافته، یا به عبارتی منطقه الاستیک در تمام گریدها افزایش یافته است. در جدول ۳ تغییرات منطقه الاستیک آورده شده است.

مقاومت کششی نهایی ۱ یا به اختصار UTS مقاومت کششی نهایی یا ماکزیمم تنش کششی است که نمونه تحمل می‌کند و نسبت نیروی (بار) ماکزیمم به سطح مقطع اولیه نمونه تعریف می‌شود که در منطقه پلاستیک می‌باشد. در جدول‌های ۳ و ۴ و شکل ۵ مقاومت کششی نهایی ۶ گرید قبل و بعد از نورد آمده است.

جدول ۳. خواص مکانیکی قبل از نورد.

گرید	نتایج					
Alloy	YIELD-T	UTS-T	ELT	LO	RE/RM-T	R
1110	149	283	44	80	0.35	2.845
1361	148	283	44	80	0.54	2.945
5942	144	277	44	80	0.51	2.89
5976	136	275	44	80	0.49	2.90
5973	141	287	44	80	0.49	2.612
5357	137	276	44	80	0.5	2.9

گرید	RESULTS					
Alloy	YIELD-T	UTS-T	ELT	LO	RE/RM-T ^۲	R ^۲
1110	165	320	55	80	0.5	2.69
1361	151	303	49	80	0.53	2.845
5942	184	313	47	80	0.53	2.845

^۱ Ultimate Tensile Strength

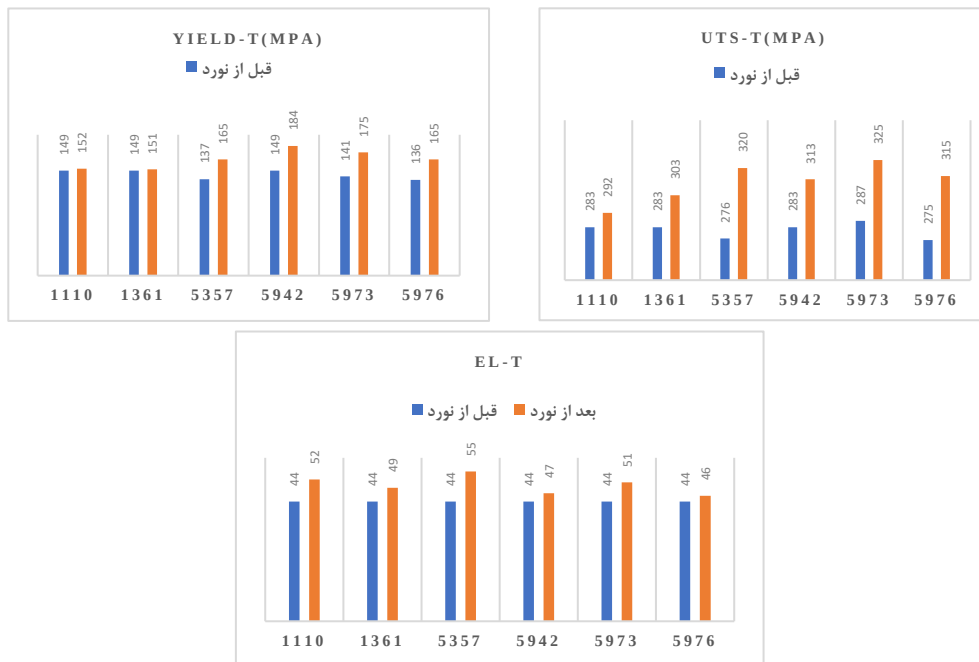
^۲ RE/RM-T: نسبت مقاومت کششی به نقطه تسلیم

^۳ R: نسبت کاهش عرض به ضخامت

^۴ n: کارسختی

0.253	2.92	0.49	80	46	315	165	5976
0.252	2.692	0.51	80	51	325	175	5973
0.238	2.845	0.53	80	52	292	152	5357

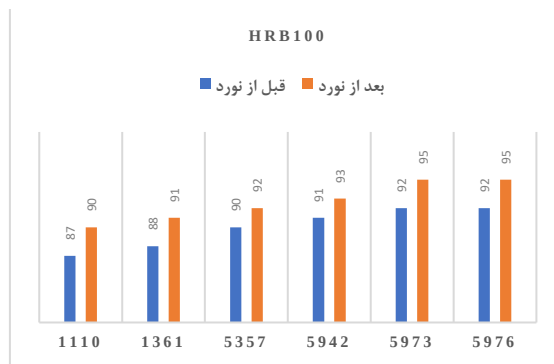
جدول ۴. خواص مکانیکی پس از نورد.



شکل ۵. نمودارهای تنش تسلیم، کششی نهایی شکست و ازدیاد طول قبل و بعد از نورد.

در گرید ۱۱۱۰ مقاومت کششی در منطقه پلاستیک قبل و بعد از نورد ۲۸۳ و ۳۲۰ بوده است که نشاندهنده افزایش مقاومت کششی در منطقه پلاستیک می باشد. گرید ۱۳۶۱ نیز مقاومت کششی از ۲۸۳ به ۳۰۳ افزایش یافته است. در گرید ۵۹۴۲ نیز تغییرات مقاومت کششی از ۲۷۷ به ۳۱۳ بوده است و همچنین گرید ۵۹۷۶ قبل از نورد ۲۷۵ و بعد از نورد ۳۱۵ بوده است. تغییرات مقاومت کششی در گرید ۵۹۷۳ از ۲۸۷ به ۳۲۵ بوده است که بیشترین مقاومت در مقابل کشش مابین تمامی نمونه ها را دارا بود که دلیل آن وجود شاخه های مارتنزیت به صورت اصلاح شده که در اثر افزایش عناصر آلیاژی بوجود آمده بودند می باشد. در گرید ۵۳۵۷ مقاومت کششی قبل از نورد ۲۷۶ بوده است و بعد از نورد به ۲۹۲ افزایش یافته است. در نهایت نتایج حاصل از رفتار کششی نمونه ها نشان می دهد که مقاومت کششی در منطقه پلاستیک بعد از نورد در تمام گریدها افزایش یافته است. مقاومت کششی نهایی در بعضی گریدها بیشتر و در بعضی ها کمتر که دلیل آن ترکیب شیمیایی متفاوت است [۱۷]. ازدیاد طول نمونه از طریق کشیده شدن، تغییر شکل می دهد و بر میزان طول آن افزوده می شود که به این تغییر شکل، ازدیاد طول گفته می شود. ازدیاد طول نهایی برای هر نوع ماده بیانگر مقداری است که می توان نمونه را پیش از نقطه شکست آن کشید. در جدول های ۳ و ۴ و شکل ۵ ازدیاد طول ۶ گرید قبل و بعد از نورد آمده است. ازدیاد طول در تمام گریدها قبل از نورد حدود ۴۴ بدست آمد. اما بعد از نورد مقدار ازدیاد طول افزایش یافته است. در گرید ۱۱۱۰ از ۴۴ به ۵۵ و در گرید ۱۳۶۱ به ۴۹، در گرید ۵۹۴۲ به ۴۷ و در گرید ۵۹۷۶ به ۴۶ و همچنین در گرید ۵۹۷۳ به ۵۱ و حتی در گرید ۵۳۵۷ به ۵۲ درصد ازدیاد طول افزایش

داشته است. نهایتاً نتایج نشان می‌دهند ازدیاد طول که در منطقه پلاستیک است بعد از نورد در تمام گریدها افزایش یافته است. طول مبناء اولیه ۶ گرید قبل و بعد از نورد بررسی شد که در جدول‌های ۳ و ۴ و شکل ۵ قابل مشاهده است. مشخص شد طول مبناء اولیه در تمام گریدها ۸۰ بوده است و هیچ تغییری بعد از فرآیند نورد رخ نداده است. سختی سنجی برینل، سختی مواد را از طریق مقیاس نفوذ یک فرو رونده فشار داده شده بر روی قطعه‌ای آزمایشی از ماده، مشخص می‌کند. این یکی از چندین تعریف سختی در علم مواد است [۱۸]. در شکل ۶، سختی ۶ گرید قبل و بعد از نورد بررسی شده است. در گرید ۱۱۱۰ سختی برینل قبل از نورد ۸۷ و بعد از نورد ۹۰ بوده است. سختی برینل گرید ۱۳۶۱ قبل از نورد ۸۸ و بعد از نورد ۹۱ بوده است. همچنین در گرید ۵۹۴۲ قبل از نورد ۹۰ و بعد از نورد ۹۲ بوده است. در گرید ۵۹۷۶ قبل و بعد از نورد ۹۲ و ۹۵ بوده است. در گرید ۵۹۷۳ نیز قبل از نورد ۹۲ و بعد از نورد ۹۵ بوده است که سختی این نمونه نیز مابین تمامی نمونه افزایش داشته است. حتی در گرید ۵۳۵۷ قبل از نورد ۹۱ بوده است و بعد از نورد به ۹۳ افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که سختی برینل در تمام گریدها افزایش یافته یا به عبارت دیگر نورد باعث افزایش سختی می‌شود [۱۹].



شکل ۶. نمودار سختی سنجی برای نمونه‌های مورد آزمایش.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر فرآیند نورد بر ریز ساختار و خواص مکانیکی فولادهای تصفیه شده به روش RH و تهیه ذوب با کیفیت و دارای حداقل ناخالصی بوا سطح ایجاد خلاء و کاهش در صد کربن و اکسیژن مذاب به حداقل ممکن مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد:

۱. نتایج نشان دادند که با ایجاد ایستگاه RH و ایجاد خلاء می‌توان ذوب با کیفیت بالا و فوق کم کربن تهیه کرد که دارای گازهای هیدروژن و اکسیژن به شدت پایینی ($C\% < 0.003$ و $N\% < 0.004$) هستند.
۲. نورد بر ساختار و خواص فولادها در تمامی گریدها با ترکیبات شیمیایی آورده شده تأثیر زیادی دارد. با توجه به نتایج به دست آمده، فاز مارتنزیتی تیغه‌ای پس از نورد تقریباً ۲ درصد افزایش می‌یابد و شاهد بزرگ‌تر شدن دانه‌ها و پهن‌تر شدن دانه‌ها هستیم که باعث پهن شدن تیغه‌های مارتنزیتی می‌شود.
۳. نتایج حاصل از نورد نشان می‌دهند که در ذوب‌های RH برای اکثر نمونه‌ها منطقه الاستیک، پلاستیک، نقطه تسلیم و کار سختی افزایش می‌یابد، مثلاً برای نمونه ۵۹۷۶ تنش تسلیم از ۱۳۶ به ۱۶۵ MPa، تنش نهایی از ۲۷۵ به ۳۱۵ MPa و کار سختی از ۰.۲۵۱ به ۰.۲۵۳ به ترتیب قبل و بعد از نورد افزایش داشته است.

۴. باتوجه به نتایجی که از آزمون‌های مکانیکی بدست آمد مشخص شد که انجام نورد بر روی آلیاژها استحکام مکانیکی ورق ۵۹۷۳ تا ۳۲۵ MPa و ازدیاد طول آن به ۵۱ درصد است و هم چنین سختی آن به ۹۵ HB رسید که نسبت به حالت قبل از نورد افزایش زیادی در بین تمامی تمامی نمونه‌ها داشته است.
۵. با توجه به اینکه برای از بین بردن اکسیژن نیازی به افزودن آلومنیوم که باعث ایجاد ناخالصی می شود نیست و ناخالصی کمتری درمحصول نهایی وجود دارد و همچنین با حذف گاز هیدروژن کلیه آلیاژهای تولید شده از لحاظ افزایش خواص مکانیکی بسیار مطلوب بودند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از کارخانه فولاد مبارکه و دانشگاه ملی مهارت شهید مهاجر اصفهان بابت همکاری‌های صورت گرفته تشکر و قدردانی به عمل می‌آورند.

فهرست منابع

- [1] Chen, S., Lei, H., Wang, M., Yang, B., Dou, W., Chang, L., & Zhang, H. (2020). Ar-CO-liquid steel flow with decarburization chemical reaction in single snorkel refining furnace. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146, 118857. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118857>.
- [2] Cho, M.-K., Van Ende, M.-A., Eun, T.-H., & Jung, I.-H. (2012). Investigation of slag-refractory interactions for the Ruhrstahl Heraeus (RH) vacuum degassing process in steelmaking. *Journal of the European ceramic society*, 32(8), 1503-1517. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.01.005>.
- [3] Jingjie, L., Huizhong, Z., Pengda, Z., Jiangtao, C., Songlin, M., & Yongfeng, L. (2016). Effects of Cr2O3 addition on property improvement of magnesia-spinel refractories used in RH snorkel. *Ceramics International*, 42(16), 18579-18584. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.08.200>.
- [4] Fukuda, Y., Onoyama, S., Imai, T., Mukawa, S., Sado, T., Fukiage, K., Kunitake, O., Takagi, N., & Matsumoto, H. (2013). Development of high-grade steel manufacturing technology for mass production at Nagoya works. *Nippon Steel Tech. Rep*, 104, 90-96. https://www.researchgate.net/publication/290563899_Development_of_high-grade_steel_manufacturing_technology_for_mass_production_at_nagoya_works.
- [5] Chen, Y., Zhang, D., Liu, Y., Li, H., & Xu, D. (2013). Effect of dissolution and precipitation of Nb on the formation of acicular ferrite/bainite ferrite in low-carbon HSLA steels. *Materials Characterization*, 84, 232-239. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.08.005>.
- [6] Ricks, R., Howell, P., & Barritte, G. (1982). The nature of acicular ferrite in HSLA steel weld metals. *Journal of materials science*, 17, 732-740. <https://doi.org/10.1007/BF00540369>.
- [7] Tao, P., Yu, H., Fan, Y., & Fu, Y. (2014). Effects of cooling method after intercritical heat treatment on microstructural characteristics and mechanical properties of as-cast high-strength low-alloy steel. *Materials & Design (1980-2015)*, 54, 914-923. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.103>.
- [8] Shi, L., Yan, Z., Liu, Y., Zhang, C., Qiao, Z., Ning, B., & Li, H. (2014). Improved toughness and ductility in ferrite/acicular ferrite dual-phase steel through intercritical heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 590, 7-15. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.10.006>.

- [9] Porter, L. F., & Repas, P. E. (1982). The evolution of HSLA steels. *JOM*, 34(4), 14-21. <https://doi.org/10.1007/BF03337994>.
- [10] Saeidi, N., Amanollahi, A., Ebrahimzadeh, I., & Raeissi, M. (2023). Evaluation of the Effect of Heat Treatment Parameters on Mechanical Properties of Architected Steel Incorporated Low Carbon Steel and Aluminum 6061. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 20(1), 279-300. <https://www.doi.org/10.48301/KSSA.2022.326385.1973>. (In persian)
- [11] Holman, R., Sheppard, C., Crusoe, M., Dudley, S., Gibson, G., Collier, T., Maiwurm, D., Reeves, D., Ochi, M., & Lin, C. (2001). Percussion Ensemble, Steel Drum Ensemble, May 21, 2001. <https://www.proquest.com/openview/67d3d07441069afb31fb15bdf53c94b6/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>.
- [12] Chen, G., He, S., & Li, Y. (2017). Investigation of the air-argon-steel-slag flow in an industrial RH reactor with VOF-DPM coupled model. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 48, 2176-2186. <https://doi.org/10.1007/s11663-017-0992-y>.
- [13] Geng, R., Li, J., & Shi, C. (2021). Evolution of inclusions with Ce addition and Ca treatment in Al-killed steel during RH refining process. *ISIJ International*, 61(5), 1506-1513. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-672>.
- [14] Tsujino, R., Nakashima, J., Hirai, M., & Sawada, I. (1989). Numerical analysis of molten steel flow in ladle of RH process. *ISIJ International*, 29(7), 589-595. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.29.589>.
- [15] Wang, M., Bao, Y.-p., Cui, H., Wu, H.-j., & Wu, W.-s. (2010). The composition and morphology evolution of oxide inclusions in Ti-bearing ultra low-carbon steel melt refined in the RH process. *ISIJ International*, 50(11), 1606-1611. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.1606>.
- [16] Chen, J., Cheng, Y., Li, Y., Xiao, J., Zhang, Y., Liu, G., Wei, Y., Li, G., Zhang, S., & Li, N. (2021). Formation of ferrospinel layer at the corroded interface between Al₂O₃-spinel refractory and molten steel in RH refining ladle. *Journal of the American Ceramic Society*, 104(11), 6044-6053. <http://dx.doi.org/10.1111/jace.17980>.
- [17] Kim, I., Kim, J., Shin, D. H., & Park, K.-T. (2003). Communications: Effects of grain size and pressing speed on the deformation mode of commercially pure Ti during equal channel angular pressing. *Metallurgical and Materials Transactions*, 34(7), 1555. <https://doi.org/10.1007/s11661-003-0267-x>.
- [18] Ueji, R., Tsuji, N., Minamino, Y., & Koizumi, Y. (2004). Effect of rolling reduction on ultrafine grained structure and mechanical properties of low-carbon steel thermomechanically processed from martensite starting structure. *Science and Technology of Advanced Materials*, 5(1-2), 153. <https://doi.org/10.1016/j.stam.2003.10.017>.
- [19] Xiao, F., Liao, B., Ren, D., Shan, Y., & Yang, K. (2005). Acicular ferritic microstructure of a low-carbon Mn-Mo-Nb microalloyed pipeline steel. *Materials Characterization*, 54(4-5), 305-314. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2004.12.011>.