

The Effect of Quenching and Partitioning Process on the Microstructure and Tensile Properties of a Medium Carbon High Silicon Steel*

Research Article

Ali Akbar Abedini¹ Habibollah Rastegari Koopaei²
 Sayyed Mohammad Emam³

1-Introduction

The applications of high strength and ductile steel for making light and strong parts have forced researchers to find solutions and suggestions for producing steel parts and sheets with the mentioned mechanical properties. The construction of massive structures and the production of vehicles with high speed are other applications that have necessitated the production of this type of steel. The quenching and partitioning (Q&P) process has helped to eliminate the above concerns and enabled the production of high strength steels.

2-Research Methodology

Medium carbon alloy spring steel named 1/7102 made of 54SiCr6 was used as the sample in this study. The chemical composition of the sample in terms of weight percentage is shown in table 1.

Table 1 Chemical Composition of samples (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0.52	1.4	0.64	0.012	0.003	0.62	0.0024	0.0416

J Mat Pro (Martensitic finish) software was used to determine critical and optimum quench-partitioning temperatures. The critical temperatures of our samples are shown in table 2.

Table 2 Critical Temperatures of samples (°C)

M _s	M _f	AC ₁	AC ₃
286	164	723	837

The partitioning time and quench temperature were considered the heat treatment process variables. All samples were fully austenitized at 900°C (higher than AC₃) for 20 min. The heat treatment cycle (Q&P) is schematically shown in figure 1.

The samples are named based on the quench temperature and partitioning time. For example, 170-3 is related to the sample quenched at 170 °C and partitioned for 3 minutes. The partitioning temperature for all samples was 300 °C. In order to evaluate the microstructural development after heat treatment tests, the

samples were characterized by light microscope (Meiji Techno-IM7200) equipped with imaging camera.

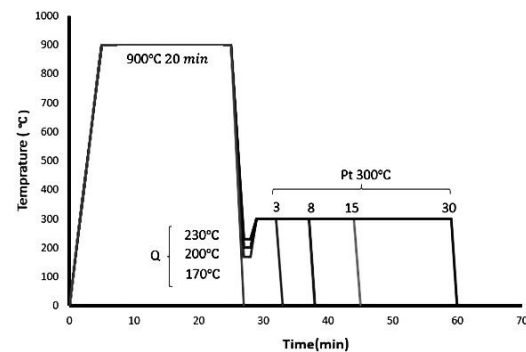


Figure 1: The heat treatment cycle (Q&P)

3- Results and Discussion

3-1 Quenching temperature

The microstructure obtained after quenching at 170, 200 and 230°C for 3 minutes indicated that the lower quenching temperature resulted in higher retained austenite (white area).

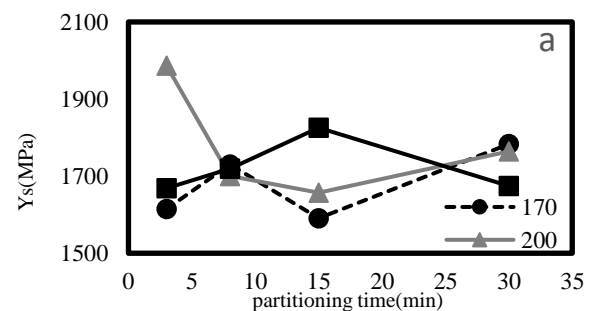
3-2 Partitioning time

The effect of partitioning time on the microstructure for quenching temperature of 170°C was evaluated. The results clearly show the effect of quench temperature and partitioning time on the residual austenite.

3-3 Tensile properties

After heat treatment, standard tensile test samples were prepared according to the ASTM E8. The length and diameter of the tensile samples were 30 and 6 mm, respectively. The tensile test was taken by the Santam-STM250 machine with a strain rate of 10 mm/min.

Effect of quenching temperature and partitioning time on the tensile properties are shown in figure 2, and it is observed that the tensile strength obtained after Q&P operation for different conditions is much higher than the raw sample (up to 117% increase).



* Manuscript received: 3 October 2021; Revised, 16 March 2022, Accepted, 7 May 2022.

¹ Ms.C Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

² Corresponding Author: Assistant professor, Department of Materials and Metallurgy Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran. **Email:** rastegary@birjandut.ac.ir.

³ Assistant professor, Department of Materials and Metallurgy Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

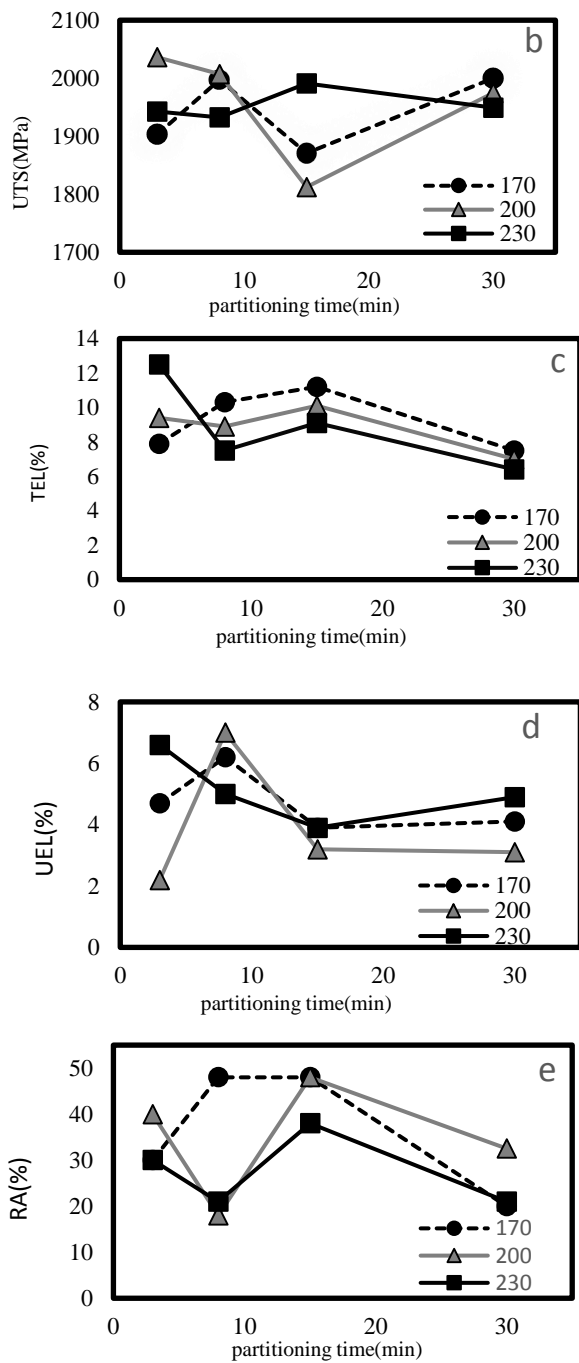


Figure 2: Effect of quenching temperature and partitioning time on tensile properties a) Tensile Strength (UTS), b) Yield Strength (YS), c) Total elongation (TEL), d) Uniform elongation (UEL), and e) Reduction area (RA).

In addition, the obtained strengths were much higher than the as quenched condition (up to 46% increase). However, the total elongation obtained for some samples after Q&P heat treatment did not decrease compared with the pearlitic structure of as-received sample.

Based on the obtained tensile properties, the best tensile properties were for the sample quenched at 170°C and partitioned at 8 min with the tensile strength of 1997.3 MPa, yield strength of 1730.2 MPa, elongation of 10.3%, and reduction area of 48%. It can be claimed that a rod with such specifications (i.e. microstructure and tensile

properties) will have excellent cold drawability and can be a good option for the production of springs.

4- Conclusion

- Q&P heat treatment has resulted in the formation of a micro composite microstructure in 1.7102 steel.
- Increasing partitioning time after quench caused residual austenite loss and the formation of carbide deposits in the microstructure.
- Quenching at 170°C and partitioning at 300°C for 8 min resulted in the tensile strength of 1997 MPa, yield strength of 1730 MPa, elongation of 10.3% and reduction area of 48%.
- The highest strength obtained was 2036 MPa related to the sample 3-200, and the lowest tensile strength was 1871 MPa related to the sample 15-170.

تأثیر عملیات کوئنچ و پارتیشن‌بندی بر ریزساختار و خواص کششی یک فولاد متوسط کربن پرسلیسیم*

مقاله پژوهشی

علی اکبر عابدینی^(۱) حیب اله رستگاری کوپایی^(۲) سید محمد امام^(۳)

چکیده یکی از روش‌های کاربردی جهت توسعه فولادهای استحکام بالا با انعطاف‌پذیری مناسب، عملیات حرارتی کوئنچ و پارتیشن‌بندی به منظور ایجاد یک ریزساختار میکروکامپوزیتی (مارتنزیت+آستنیت باقیمانده) است. به کمک این روش می‌توان با هزینه اندک، ترکیبی فوق‌العاده از خواص مکانیکی را در یک فولاد کم آلیاژ بوجود آورد. در پژوهش حاضر، فولاد متوسط کربن پرسلیسیم ۱۷۱۰۲ با اعمال فرآیندهای کوئنچ و پارتیشن‌بندی مورد مطالعه قرار گرفته است و تأثیر پارامترهای مختلف از جمله دمای کوئنچ (محدوده دمایی ۱۷۰ الی ۲۳۰ درجه سانتیگراد) و زمان پارتیشن‌بندی (۳ الی ۳۰ دقیقه) روی ریزساختار و خواص کششی بررسی شده است. ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری بررسی شده و کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده، توسط تکنیک پراش پرتوی ایکس اندازه‌گیری شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که ریزساختار میکروکامپوزیتی پس از عملیات حرارتی بوجود آمده است. افزایش زمان پارتیشن‌بندی باعث کاهش آستنیت باقیمانده و تشکیل رسوبات کاربیدی می‌گردد همچنین با افزایش دمای کوئنچ در زمان پارتیشن‌بندی ۳ دقیقه، درصد آستنیت باقی‌مانده و پایدار شده افزایش یافته است. بهترین خواص کششی مربوط به نمونه کوئنچ شده در ۱۷۰ درجه سانتیگراد و پارتیشن‌بندی شده در ۳۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۸ دقیقه با استحکام کششی ۱۹۹۷ مگاپاسکال، استحکام تسلیم ۱۷۳۰ مگاپاسکال، ازدیاد طول ۱۰/۳ درصد و میزان کاهش سطح مقطع ۴۸ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی عملیات حرارتی، کوئنچ و پارتیشن‌بندی، فولاد متوسط کربن پرسلیسیم، خواص مکانیکی، ریزساختار

مقدمه

از فرآیند کوئنچ و پارتیشن‌بندی کمک شایانی در جهت حذف دغدغه‌های فوق‌کرده و دستیابی به تولید فولاد و به طبع آن قطعات و ورق‌های فولادی با استحکام کششی بالا به همراه شکل‌پذیری زیاد را میسر نموده است [2].

ریزساختار اغلب آلیاژهای فلزی توسط عملیات حرارتی، به منظور دستیابی به خصوصیات مطلوب، اصلاح می‌شود [2]. فرآیند کوئنچ و پارتیشن‌بندی به عنوان راهکار جدیدی در جهت دستیابی به فولادهایی با ترکیب استحکام و انعطاف‌پذیری بالا پیشنهاد شده است [3-5]. در فرآیند کوئنچ و پارتیشن‌بندی، با تنظیم دمای آستنیت‌کردن، دمای کوئنچ (زیر دمای شروع تشکیل مارتنزیت)، مدت زمان نگهداری در این دما، حرارت‌دهی مجدد بالای دمای شروع تشکیل مارتنزیت، امکان ایجاد مقادیر مختلفی از فاز مارتنزیت و آستنیت باقی‌مانده بوجود می‌آید. از طرفی، عناصر آلیاژی مختلف نیز اثرات متفاوتی بر روی تشکیل این فازها در ریزساختار دارند [6].

تحت شرایط ایجاد شده در فرآیند کوئنچ و پارتیشن‌بندی می‌توان ترکیبی مناسب از استحکام بالا و شکل‌پذیری مناسب را

تولید فولادهایی با استحکام بالا و همچنین انعطاف‌پذیر، در صنایع مختلف جهت ساخت قطعات سبک و مستحکم در حال توسعه و رشد می‌باشد. همچنین ساخت فترهایی با استحکام و شکل‌پذیری بالا و قیمت مناسب، یکی از چالش‌های صنعت می‌باشد. فشار وارد آمده به کمک فنر خودرو در جاده‌های ناهموار در صورت استفاده از فترهایی با جنس نامناسب، موجب شکست این قطعه خواهد شد. همچنین ساخت سازه‌های عظیم و پیشرفت‌های سریع در تولید خودروهایی با سرعت و شتاب بالا و به دنبال آن افزایش میزان تصادفات و خسارت‌های جانی و مالی ناشی از آن، محققان را وادار کرده به دنبال راهکار و پیشنهادهایی در جهت توسعه فرآیند تولید قطعات و ورق‌های فولادی با استحکام کششی بالا به همراه شکل‌پذیری زیاد باشند. لذا دستیابی به این خواص، نیازمند صرف هزینه‌های بالا برای تولید فولادهای آلیاژی خاص می‌باشد؛ که معمولاً موجب افزایش وزن سازه و خودرو نیز می‌شوند. این امر موجب بروز زیان‌های زیست محیطی، آلاینده‌گی شهرها و افزایش مصرف سوخت می‌شود [1]. استفاده

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۱۱/۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۲/۱۸ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

(۳) استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

استفاده از خواص کوئنچ و پارتیشن‌بندی با دمای بالاتر از ۴۵۰ درجه می‌توان بهبود بخشید [19]. آریباس و همکاران اثر دمای پارتیشن‌بندی با دمای بالا را بر ریزساختار و خواص کششی چهار فولاد کم کربن با محتوای مختلف منگنز و نیکل بررسی کردند آنها دریافتند خصوصیات ریزساختار و حجم آستنیت باقی‌مانده به عناصر آلیاژی و شرایط پارتیشن‌بندی بستگی دارد [20]. اوید و همکاران ریز ساختار کوئنچ و پارتیشن‌بندی شده فولاد کربن متوسط را با استفاده از نتایج XRD مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که غنی‌سازی کربن آستنیت، نتیجه واکنش‌های رقابتی مانند تقسیم کربن از مارتنزیت، تبدیل بینیت و به دام انداختن کربن در مارتنزیت است [21]. ورکرسی و همکاران وابستگی دمایی رفتار استاتیکی و دینامیکی فولاد کم سیلیسیوم را با عملیات کوئنچ و پارتیشن‌بندی در محدوده دمایی منفی ۴۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد بررسی کردند آنها دریافتند خواص کششی خیلی خوب فولاد به دلیل پایداری حرارتی بالای آستنیت در این دما حفظ شده است [22].

به هر حال، بررسی تحقیقات پیشین بیانگر عدم مطالعه بر روی فولاد پرکاربید ۱/۷۱۰۲ بعنوان یک فولاد متوسط کربن پرسیلیسیوم می‌باشد. هدف اصلی تحقیق حاضر، دستیابی به سیکل عملیات حرارتی بهینه‌ی کوئنچ و پارتیشن‌بندی جهت حصول ترکیب مناسبی از استحکام بالا و انعطاف‌پذیری مناسب برای این فولاد کم‌آلیاژ جهت گسترش کاربرد آن در فرآیند کشش سیم جهت تولید سیم‌های استحکام بالا است.

روش پژوهش

فولاد فنر آلیاژی با کربن متوسط با نام تجاری ۱/۷۱۰۲ و مشخصه 54SiCr6 به عنوان نمونه مورد بررسی در این پژوهش استفاده شده است که کاربرد فراوان در قطعات خودرو و واگن قطار دارد. این گرید به صورت مفتول نورد شده با قطر ۱۰ mm از کارخانه فولاد آلیاژی ایران با مشخصه D7102 تهیه شده است و آنالیز شیمیایی نمونه‌ها بوسیله دستگاه کوانتومتری مدل foundry master توسط شرکت ریخته‌گری اصفهان انجام گرفته است. ترکیب شیمیایی نمونه بر حسب درصد وزنی در جدول (۱) گزارش شده است.

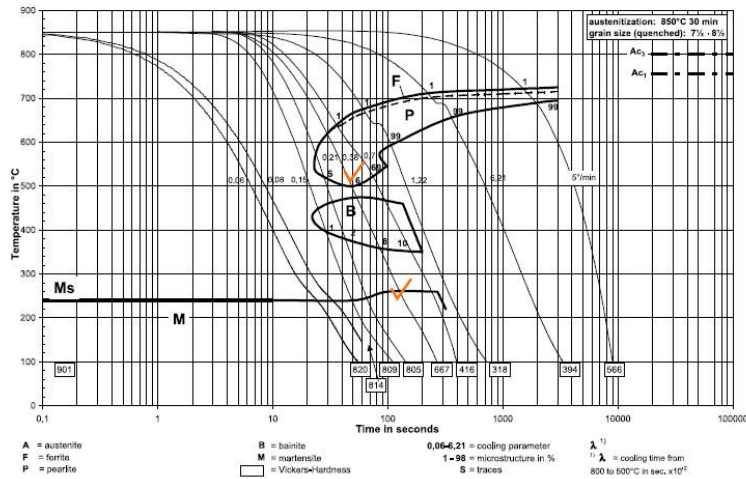
برای فولادهای کم‌آلیاژ بدست آورد [7]. پایدارسازی آستنیت باقی‌مانده تا دمای محیط باعث بهبود شکل‌پذیری فولاد می‌شود. علاوه بر این، آستنیت تحت بارگذاری مکانیکی به مارتنزیت تبدیل شده و باعث افزایش بیشتر استحکام می‌شود. به عبارت دیگر، رفتار کارسختی فولاد متأثر از میزان آستنیت باقی‌مانده در ریزساختار می‌باشد. فولادهایی که برای عملیات حرارتی کوئنچ و پارتیشن‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند، باید دارای مقدار مشخصی کربن برای سخت شدن باشند. علاوه بر این، عنصر سیلیسیم برای جلوگیری از تشکیل کاربید و منگنز برای گسترش ناحیه فاز گاما نقش موثری دارند [3,8,9].

تحقیقات متعددی در این زمینه صورت گرفته است؛ برای مثال، در تحقیقی استحکام تسلیم ۱۰۴۷MPa و ازدیاد طول نسبی ۱۵/۵٪ برای یک فولاد کم‌کربن به کمک این فرآیند بدست آمده است [۱۰]. بررسی‌ها بر روی فولادهای کم و متوسط کربن نشان می‌دهد، استفاده از فرآیند کوئنچ و پارتیشن‌بندی علاوه بر افزایش استحکام، باعث ایجاد ازدیاد طول نسبی قابل قبول در این دسته فولادها می‌گردد [11-13]. ژو و همکاران به کمک فرآیند کوئنچ و پارتیشن‌بندی (Quenching & Partitioning (Q&P)) بر روی فولادی مقاوم به سایش به استحکام ۱۷۳۰MPa و سختی ۵۱/۸ راکولسی و انرژی شکست ۲۴ ژول دست یافته‌اند [14]. فروزان و همکاران ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد کم‌آلیاژ توسط Q&P را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با کاهش دمای کوئنچ، سختی افزایش خواهد یافت [15]. اسپچینو و همکاران با بررسی تاثیر فرآیند Q&P بر روی فولاد کم‌کربن منگنزدار به این نتیجه رسیدند که، افزایش میزان منگنز باعث افزایش خواص کششی فولاد خواهد شد [16]. باگلبانی و همکاران مقایسه‌ای از دو فرآیند Q&P و Q&T (Quenching & Temper) بر روی خواص فولاد کربن متوسط کم‌آلیاژ انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که دمای کوئنچ بهینه‌ای وجود دارد که میزان استحکام و انعطاف‌پذیری در آن قابل قبول خواهد بود و همچنین خواص مکانیکی فولادهای Q&P بالاتر از نمونه‌های Q&T بوده است [17]. لو و همکاران خواص مکانیکی فولاد کربن متوسط Q&P شده را با فولاد Mn13Cr2 مقایسه کردند و نشان دادند؛ فولاد Q&P شده خواص مکانیکی و مقاومت در برابر سایش بهتری داشته است [18]. وانگ و هیانگ بهبود مقاومت در برابر شکنندگی هیدروژنی قطعات فولادی ۱۵۰۰ مگاپاسکال داغ که تحت Q&P قرار گرفته‌اند را مطالعه کردند آنها دریافتند شکنندگی هیدروژنی فولاد بسیار با استحکام را با

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد تحقیق

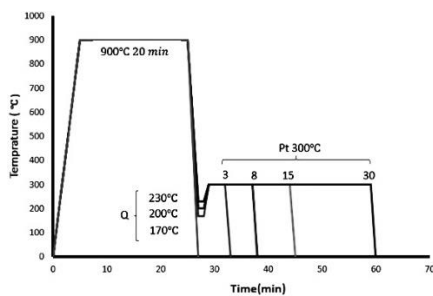
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0.52	1.4	0.64	0.012	0.003	0.62	0.0024	0.0416

Time-temperature-transformation diagram for continuous cooling



شکل ۱ دیاگرام TTT فولاد مورد مطالعه مطابق استاندارد DIN EN 10089

اتاق سرد شدند. جهت مقایسه خواص، یک نمونه نیز در شرایط کوئنچ شده (در روغن ۱۵ درجه سانتیگراد) آماده سازی گردید. هیچکدام از نمونه‌ها تحت تمپر قرار نگرفته است. نمونه‌های عملیات حرارتی با قطر ۱۰mm و طول ۱۲۰mm بریده شدند و سپس تحت عملیات Q&P قرار گرفتند.



شکل ۲ شماتیک عملیات Q&P

مطابق سیکل عملیات حرارتی ارائه شده، فرآیند عملیات حرارتی شامل مراحل زیر می باشد:

مرحله الف - آستنیته کردن فولاد به صورت کامل بالاتر از دمای AC_3 در دمای $900^\circ C$ به مدت ۲۰ دقیقه در کوره الکتریکی

مرحله ب - کوئنچ در دماهای $200^\circ C$ ، $170^\circ C$ و $230^\circ C$ در روغن حرارتی به مدت ۱ دقیقه که مشخصات روغن مذکور در جدول (۳) آورده شده است.

از دیاگرام دما-زمان-استحاله (TTT) Transformation می توان به عنوان راهنمای تغییرات انجام شده در ریزساختار فولادها طی عملیات حرارتی و متناسب با سرعت سرمایش استفاده کرد. دیاگرام TTT فولاد مورد مطالعه در شکل (۱) نمایش داده شده است. براساس این دیاگرام، مدت زمان گذر از دماغه تشکیل پرلیت (محدوده دمایی $850^\circ C$ الی $550^\circ C$ سانتیگراد) و اطمینان از تشکیل ساختار مارتنزیتی، حدود ۲۵ ثانیه است. از نرم افزار J Mat Pro 7.0 جهت تعیین دماهای بحرانی و تعیین دمای بهینه کوئنچ پارتیشن بندی استفاده شده است. دماهای بحرانی فولاد مورد مطالعه در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲ دماهای بحران

M_s (Martensitic start)	M_f (Martensitic finish)	AC_1	AC_3
۲۸۶	۱۶۴	۷۲۳	۸۳۷

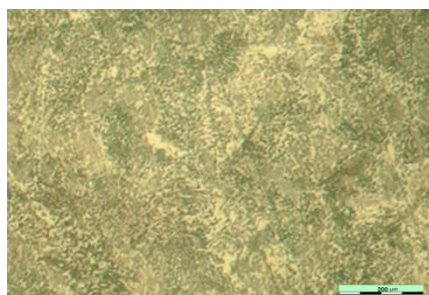
متغیرهای مورد بررسی در فرآیند عملیات حرارتی، زمان پارتیشن بندی و دمای کوئنچ در نظر گرفته شد. کلیه نمونه‌ها تا دمای $900^\circ C$ (بالتر از AC_3) در کوره الکتریکی آذرکوره مدل FM20p گرم شدند و به مدت ۲۰ دقیقه جهت آستنیته شدن کامل نگهداری گردیدند. سپس پس از طی مراحل کوئنچ و پارتیشن بندی مطابق سیکل نشان داده شده در شکل (۲) تا دمای

جدول ۳ مشخصات روغن استفاده شده جهت کوئنچ نمونه‌ها

مشخصات فیزیکی - شیمیایی	cSt گرانروی ۱۰۰°C	شاخص گرانروی	حداقل نقطه اشتعال °C	حداکثر نقطه ریزش °C	دانسیته در ۱۵/۶	قلیائیت کل MgKOH/g
روش آزمون	ASTM D-445	ASTM D-2270	ASTM D-92	ASTM D-97	ASTM D-1298	ASTM D-2896
بهران حرارت	۵/۵	۱۰۳	۲۰۰	-۶	۸۷۰	

نتایج و بحث

ریزساختار و خواص کششی ماده اولیه. ریزساختار فولاد متوسط کربن با نام تجاری ۱/۷۱۰۲ در شکل (۳) نمایش داده شده است. میزان سختی نمونه خام اولیه برابر ۲۶۱/۴ برنیل می‌باشد. همانطور که واضح است، ریزساختار تقریباً پرلیتی بوده (نواحی لایه‌ای و تا حدودی شکسته شده که احتمالاً ناشی از وقوع کروی شدن ناقص بوده) و مقادیر کمی فریت اولیه (نواحی روشن) در ریزساختار موجود است. سختی بدست آمده نیز متناسب با نوع ریزساختار می‌باشد. این ریزساختار نشان دهنده این است که میلگرد تولید شده پس از نورد گرم، به آهستگی سرد شده است.



شکل ۳ ریزساختار فولاد ۱/۷۱۰۲ تهیه شده قبل از عملیات حرارتی

در جدول (۴) خواص کششی بدست آمده از نمونه اولیه آورده شده است. ملاحظه می‌شود که استحکام نهایی حدود ۹۳۸ مگاپاسکال، ازدیاد طول نسبی برای این نمونه برابر با ۱۰/۱٪ و میزان کاهش سطح مقطع برابر ۴۳٪ بوده است. علی‌رغم ازدیاد طول بیش از ۱۰ درصد، تغییر شکل همگن کمتر از ۵ درصد است. از طرفی، با وجود استحکام زیر ۱۰۰۰ مگاپاسکال، حدود ۱۰ درصد انعطاف‌پذیری بدست آمده است که در فولادهای معمولی مرسوم می‌باشد. همانطور که پیش از این نیز تاکید شد، هدف از این تحقیق، انجام فرآیند عملیات حرارتی کوئنچ و پارتیشن‌بندی به

مرحله ج- گرمادهی مجدد قطعات نمونه تا دمای پارتیشن‌بندی ۳۰۰°C به صورت زمان متغیر ۳، ۸، ۱۵ و ۳۰ دقیقه در کوره الکتریکی

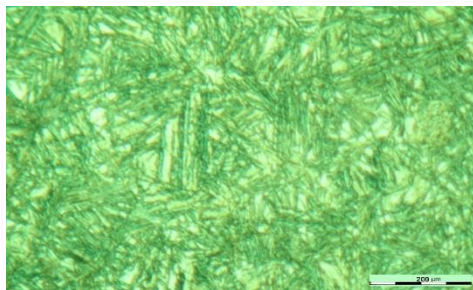
مرحله د- خنک سازی نهایی در دمای اتاق

نامگذاری نمونه‌ها براساس دمای کوئنچ و زمان پارتیشن‌بندی انجام شده است. برای مثال، نمونه ۱۷۰-۳ مربوط به نمونه ایست که در ۱۷۰ درجه سانتیگراد کوئنچ و به مدت ۳ دقیقه پارتیشن‌بندی شده است. دمای پارتیشن‌بندی برای همه نمونه‌ها ۳۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. لازم به ذکر است که تمام دماهای کوئنچ توسط ترمومتر اینفرارد اندازه‌گیری شد.

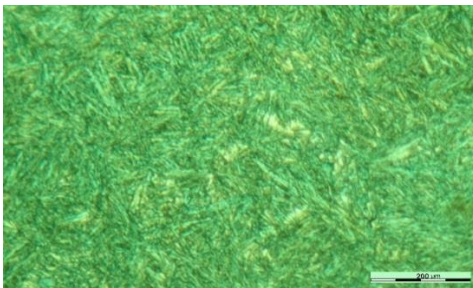
به منظور ارزیابی تغییرات ریزساختاری پس از آزمون‌های عملیات حرارتی از میکروسکوپ نوری مدل Meiji Techno-IM7200 مجهز به دوربین تصویربرداری استفاده شد. هدف از بررسی ریزساختاری نمونه‌های عملیات حرارتی، شناسایی تحولات ریزساختاری متاثر از تغییر پارامترهای عملیات حرارتی است. آماده سازی نمونه‌ها بوسیله روش سنباده‌زنی (ورق سنباده‌های ۸۰، ۱۲۰، ۳۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰) و پولیش مکانیکی انجام شده است. محلول نایتال ۲٪ به عنوان اچ کننده استفاده شده است.

پس از عملیات حرارتی، نمونه‌های استاندارد آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM E8 تهیه گردید. طول و قطر سنجی نمونه‌های کشش به ترتیب برابر ۳۰ و ۶ میلی‌متر بود. آزمون کشش توسط دستگاه کشش Santam-STM250 و با نرخ کرنش مهندسی ۱۰mm/min انجام گرفت. درصد ازدیاد طول کل نمونه‌ها از طریق اندازه‌گیری اختلاف بین طول سنج قبل و بعد از آزمون کشش و میانگین‌گیری سه نمونه به دست آمده است. آزمون سختی با دستگاه KOOPA-UV1 به روش برینل با ساچمه ۲/۵ میلی‌متر و نیروی ۱۸۷/۵ کیلوگرم بر روی سه نقطه مختلف برای هر نمونه انجام شده است. آزمون XRD توسط دستگاه کمپانی Bruker مدل Advance d8 با ولتاژ ۴۰kV و آمپر ۳۰mA با لامپ تیوپ مس با طول موج ۱۰۵۴ آنگسترم انجام شده است.

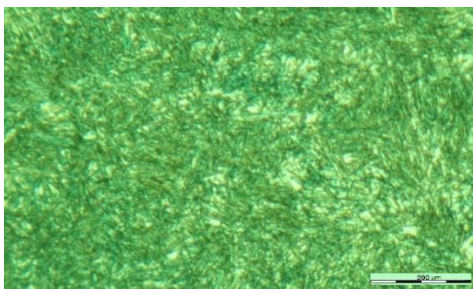
پارتیشن‌بندی نقش مهمی در پایداری آستنیت در مرحله پارتیشن‌بندی دارد که در بخش بعدی به آن پرداخته شده است. نکته دیگری که در تصاویر ریزساختاری می‌توان به آن اشاره کرد، ظریف‌تر شدن تیغه‌های مارتزیتی با افزایش دمای کوئنچ می‌باشد. این موضوع می‌تواند مرتبط با مارتزیت‌های تشکیل شده از آستنیت‌های باقی‌مانده پس از مرحله پارتیشن‌بندی باشد (مارتزیت ثانویه). با توجه به افزایش نسبی درصد کربن در آستنیت‌های باقی‌مانده، متعاقباً فاز مارتزیتی ظریف‌تری در بین ساختار مارتزیتی قبلی تشکیل می‌شود و نمای کلی ساختار، ظریف‌تر مشاهده می‌شود. تحت چنین شرایطی، استحکام فولاد می‌تواند افزایش پیدا کند که در بخش‌های بعدی به آن پرداخته شده است [14].



الف



ب



ج

شکل ۴ تصاویر ریزساختاری نمونه‌های کوئنچ شده در دمای مختلف (الف) ۱۷۰، (ب) ۲۰۰ و (ج) ۲۳۰ برحسب درجه سانتیگراد با زمان پارتیشن بندی ۳ دقیقه.

منظور افزایش قابل توجه استحکام بدون افت قابل توجه انعطاف‌پذیری می‌باشد که در ادامه نتایج آن آورده شده است.

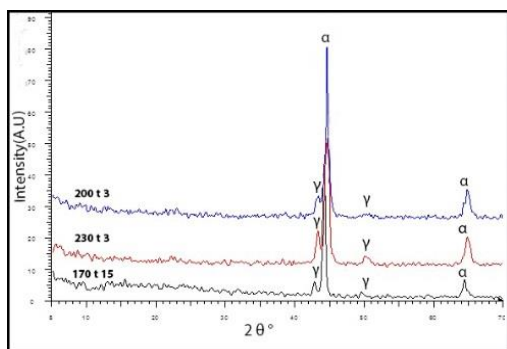
جدول ۴ خواص مکانیکی نمونه اولیه.

عنوان	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	ازدیاد طول یکنواخت %	ازدیاد طول کل %	کاهش سطح مقطع %
نمونه خام	۸۶۱/۶	۹۳۸/۲	۴/۷	۱۰/۱	۴۳

مشاهدات ریزساختاری. ریزساختار نمونه‌ها پس از انجام عملیات حرارتی کوئنچ و پارتیشن‌بندی بوسیله میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. جهت تحلیل اجزا ریزساختار، از آنالیز XRD (X-ray powder diffraction)، برای مشخص شدن فازهای موجود در ریزساختار استفاده شده است. در ادامه تصاویر نوری به دست آمده از ساختار نمونه‌ها، بر اساس شرایط اعمال شده در عملیات کوئنچ و پارتیشن‌بندی بررسی می‌شود.

تاثیر دمای کوئنچ. در شکل (۴) ریزساختار بدست آمده پس از کوئنچ در دماهای ۱۷۰، ۲۰۰ و ۲۳۰°C و برای زمان ۳ دقیقه نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، نواحی سفید رنگ توده‌ای بین تیغه‌های مارتزیتی برای نمونه کوئنچ شده در پایین‌ترین دما، بیشترین مقدار را دارد. این نواحی مربوط به فاز آستنیت باقی‌مانده می‌باشد. قابل مشاهده است که، با افزایش دمای کوئنچ درصد آستنیت باقی‌مانده کاهش یافته است، این موضوع می‌تواند ناشی از کاهش کسر حجمی مارتزیت در مرحله کوئنچ (با افزایش دمای کوئنچ) بوده و در نتیجه باعث تشکیل کسر حجمی بالاتری از آستنیت باقی‌مانده شود. در ادامه، در مرحله پارتیشن‌بندی، طی مدت زمان کوتاه ۳ دقیقه، آستنیت باقی‌مانده برای نمونه‌های حاوی آستنیت بالاتر، پایدار نشده (به دلیل کسر حجمی پایین‌تر مارتزیت و نفوذ کمتر کربن) و پس از سرد کردن از دمای پارتیشن‌بندی، مقداری از آستنیت باقی‌مانده به مارتزیت استحاله می‌یابد. به عبارت دیگر، در دمای کوئنچ بالاتر نسبت حجمی آستنیت به مارتزیت در حالت متعادل تری بوده در نتیجه میزان آستنیت پایدار شده افزایش داشته و این نسبت با کاهش دمای کوئنچ از نسبت ایده‌آل فاصله گرفته و آستنیت باقیمانده کمتری پایدار گردیده است [3,7]. نهایتاً برای دمای کوئنچ بالاتر، آستنیت باقی‌مانده کمتری در ریزساختار تشکیل خواهد شد. توجه به این نکته ضروری است که زمان

بطور کلی، ریزساختار شامل فاز مارتنزیت و جزایر آستنیت باقی‌مانده می‌باشد. بیشترین مقدار آستنیت باقی‌مانده (نواحی سفید رنگ بلوکی شکل) مربوط به کمترین زمان پارتیشن‌بندی ۳ دقیقه (شکل ۴-الف)) است. با افزایش زمان پارتیشن‌بندی به ۸ دقیقه (شکل ۵-الف))، به نظر می‌رسد آستنیت باقی‌مانده کاهش یافته است. با افزایش بیشتر زمان، نواحی سفید رنگ مربوط به آستنیت باقی‌مانده بطور واضح قابل مشاهده نمی‌باشد. این موضوع به معنی وجود نداشتن آستنیت باقی‌مانده برای نمونه‌های پارتیشن‌بندی شده به مدت ۱۵ و ۳۰ دقیقه نمی‌باشد ولی می‌توان گفت مقدار آستنیت باقی‌مانده در این نمونه‌ها بطور محسوسی کاهش یافته است.



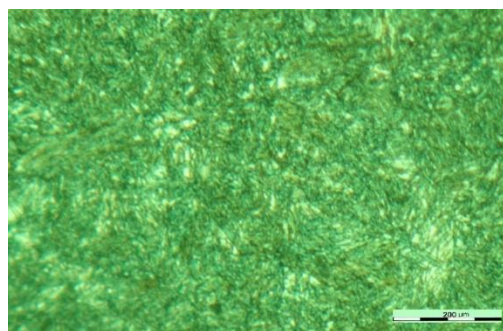
شکل ۶ الگوی XRD نمونه‌های ۱۷۰-۱۵ (موج آبی)، ۲۰۰-۳ (موج قهوه‌ای) و ۲۳۰-۳ (موج قرمز).

در شکل (۶)، الگوی پراش پرتوی ایکس برای نمونه‌های ۱۷۰-۱۵، ۲۰۰-۳ و ۲۳۰-۳ آورده شده است. برای بررسی مقدار کسر حجمی آستنیت باقیمانده در هر کدام از نمونه‌ها از رابطه (۱) استفاده شده است.

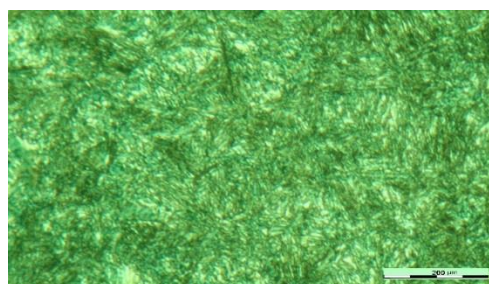
$$V_{\gamma} = \frac{\left(\sum_{j=1}^q \frac{I_{\gamma j}}{R_{\gamma j}}\right)}{\left(\sum_{j=1}^q \frac{I_{\gamma j}}{R_{\gamma j}}\right) + \left(\sum_{j=1}^p \frac{I_{\alpha j}}{R_{\alpha j}}\right)} \quad (1)$$

جائیکه V_{γ} کسر حجمی آستنیت باقیمانده، $I_{\gamma j}$ شدت پیک آستنیت مربوط به صفحه کریستالی (hkl) ، $R_{\gamma j}$ شدت پیک تئوری برای همان صفحه کریستالی آستنیت، $I_{\alpha j}$ شدت پیک مارتنزیت (یا بینیت) مربوط به صفحه کریستالی (hkl) و $R_{\alpha j}$ شدت پیک تئوری برای همان صفحه کریستالی مارتنزیت (یا بینیت) می‌باشد. مقدار شدت پیک تئوری براساس محاسبات انجام شده توسط Jatzak تعیین می‌شود [23]. در جدول (۵)

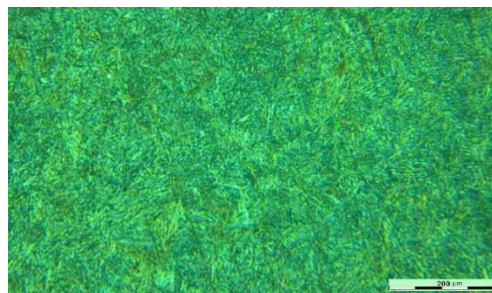
تاثیر زمان پارتیشن‌بندی. پارتیشن‌بندی یک فرآیند نفوذی است که با افزایش دما و زمان فرآیند، نفوذ بیشتر و سریعتر انجام می‌گردد؛ یعنی کربن بیشتری از ساختار مارتنزیتی خارج شده و به آستنیت باقی‌مانده نفوذ می‌کند و مقدار آستنیت باقی‌مانده بیشتری پایدار می‌گردد [7]. با اعمال کرنش، بخشی از آستنیت به مارتنزیت ریز سوزنی تبدیل شده و همراه با مارتنزیت موجود باعث افزایش استحکام می‌شود [14]. در این بخش، تاثیر زمان پارتیشن‌بندی بر روی ریزساختار فولاد مورد تحقیق برای دمای کونچ 170°C مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل (۵)، تصاویر ریزساختاری بدست آمده پس از کونچ در دمای 170°C و پارتیشن‌بندی در دمای 300°C در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. واضح است که افزایش زمان پارتیشن‌بندی تاثیرات مهمی در ریزساختار ایجاد کرده است.



الف



ب



ج

شکل ۵ تصاویر ریزساختاری نمونه‌های کونچ شده در دمای ۱۷۰ و زمان‌های مختلف پارتیشن‌بندی (الف) ۸، (ب) ۱۵ و (ج) ۳۰ (برحسب دقیقه).

کسر حجمی آستنیت باقیمانده محاسبه شده بر اساس نتایج XRD آورده شده است.

جدول ۵ کسر حجمی آستنیت باقیمانده (%)

عنوان قطعه	۱۷۰-۱۵	۲۰۰-۳	۲۳۰-۳
حجم آستنیت باقیمانده	۴	۸/۵	۱۳

همانطور که ملاحظه می‌شود، بیشترین مقدار آستنیت باقی مانده مربوط به نمونه ۳-۲۳۰ (حدود ۱۳ درصد) و کمترین مقدار آستنیت باقی مانده مربوط به نمونه ۱۵-۱۷۰ (حدود ۴ درصد) است. این نتایج به خوبی تاثیر دما کوئنچ و زمان پارتیشن بندی بر روی میزان آستنیت باقی مانده را نشان می‌دهد. در بخش قبل توضیح داده شد که در دمای کوئنچ ۱۷۰ درجه سانتیگراد، به دلیل کسر حجمی بالاتر مارتنزیت، آستنیت باقی مانده در زمان های کوتاه پارتیشن بندی (در اینجا ۳ دقیقه) بواسطه نفوذ گسترده عنصر کربن به داخل فاز آستنیت پایدار می‌شود؛ درحالیکه افزایش بیشتر زمان پارتیشن بندی باعث استحاله آستنیت باقی مانده و از بین رفتن آن خواهد شد.

این موضوع توسط نتایج XRD نیز تایید شده است. البته می‌توان پیش بینی کرد که برای دماهای بالاتر کوئنچ، زمان های طولانی پارتیشن بندی منجر به پایداری مقدار بیشتری آستنیت باقی مانده می‌شود. زیرا در دماهای بالاتر کوئنچ، کسر حجمی بالاتری از آستنیت باقی مانده در ریزساختار تشکیل می‌شود (قبل از پارتیشن بندی) و نفوذ میزان کافی عنصر کربن و پایدار شدن آنها نیاز به زمان بیشتری دارد.

موضوع دیگری که در تصاویر شکل (۵) قابل رویت می‌باشد، ظریف تر شدن ساختار تیغه های مارتنزیتی است. در مورد نمونه پارتیشن بندی شده به مدت ۱۵ و ۳۰ دقیقه (شکل ۵ (ب و ج)) یک ساختار مارتنزیت تمپر شده بوجود آمده است. این موضوع نشان دهنده این است که افزایش بیش از حد زمان پارتیشن بندی، علاوه بر تجزیه آستنیت باقی مانده، باعث تمپر شدن ساختار مارتنزیتی نیز می‌شود. حتی امکان تشکیل رسوبات سمتمیتی بسیار ریز نیز در زمان های طولانی وجود دارد که می‌تواند موجبات افزایش نسبی استحکام را فراهم کند. نتایج تحقیقات انجام شده توسط سانتوفیمیا و همکاران نیز موید این موضوع می‌باشد [24]. نتایج بدست آمده توسط این محققین حاکی از آن است که افزایش زمان پارتیشن بندی باعث کاهش

پایداری سازی آستنیت باقی مانده می‌شود. با افزایش زمان پارتیشن بندی میزان آستنیت باقی مانده تا حدی افزایش یافته و از یک نقطه به بعد میزان کسر آستنیت با افزایش دمای پارتیشن بندی کاهش خواهد یافت. دلیل این اتفاق وجود رسوب کاربید و فرآیندهای رقابتی در فصل مشترک های مارتنزیت-آستنیت و یا استحاله بینیتی خواهد بود [7].

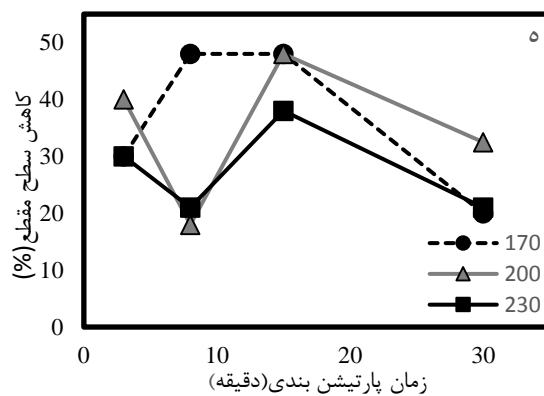
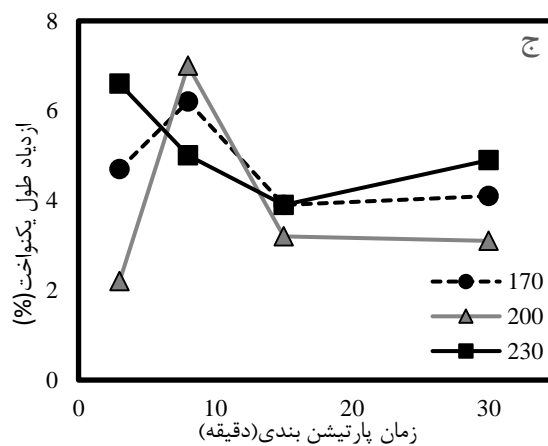
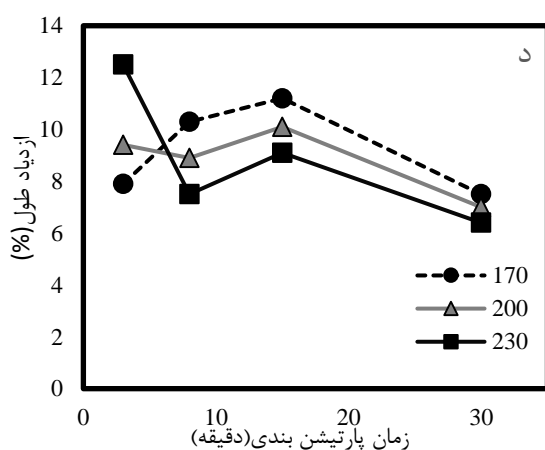
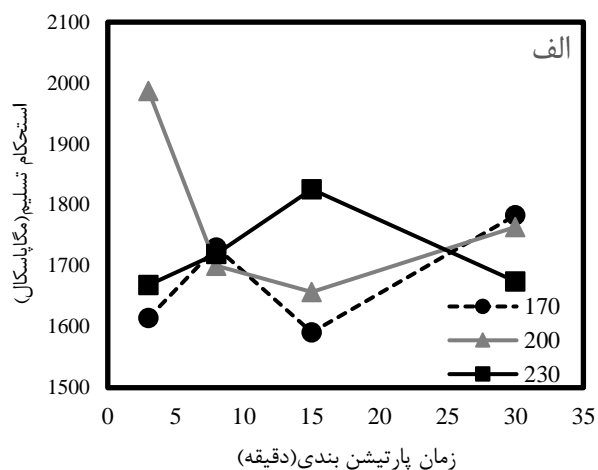
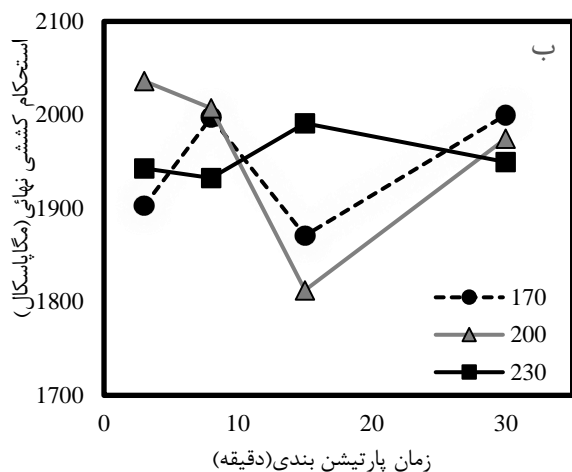
خواص کششی. در شکل (۷) به منظور بررسی دقیق تر خواص بدست آمده از آزمون کشش، خواص کششی مختلف بدست آمده شامل استحکام کششی (UTS) (Ultimate Tensile Strength)، استحکام تسلیم (YS) (Yield Strength)، ازدیاد طول کل (TEL) (Total Elongation)، ازدیاد طول یکنواخت (UEL) (Uniform Elongation) و میزان کاهش سطح مقطع (RA) (Reduction in Area) در نمودارهای جداگانه ای برای شرایط مختلف عملیات Q&P رسم شده است (شکل ۷) نتایج استحکام تسلیم در شکل (۷-الف) ارائه شده است. بالاترین استحکام تسلیم در این عملیات مربوط به نمونه کوئنچ شده در دمای ۲۰۰°C با زمان پارتیشن بندی ۳ دقیقه بوده است. همچنین میزان استحکام تسلیم نمونه های کوئنچ شده در دمای ۱۷۰°C با زمان های پارتیشن بندی مختلف به جز در زمان ۳۰ دقیقه از استحکام تسلیم سایر نمونه ها پایین تر بوده است. نکته دیگر اینکه، برای دمای ۲۰۰°C، با افزایش زمان پارتیشن بندی تا ۱۵ دقیقه، استحکام تسلیم از حدود ۱۹۸۷ مگاپاسکال تا حدود ۱۶۵۷ مگاپاسکال (تقریباً ۳۳۰ مگاپاسکال) کاهش یافته است. با توجه به اینکه، استحکام تسلیم بیانگر تنش لازم برای شروع تغییر شکل پلاستیک است، کاهش قابل توجه آن با افزایش زمان پارتیشن بندی را می‌توان متاثر از وقوع تمپر فاز مارتنزیتی و پایداری سازی کسر حجمی بالاتری از آستنیت در ریزساختار نسبت داد [25].

از طرفی، رفتار متفاوتی برای استحکام تسلیم نمونه های کوئنچ شده در دمای ۲۳۰°C مشاهده می‌شود. در واقع، برای این نمونه ها، با افزایش زمان پارتیشن بندی به ۱۵ دقیقه، افزایش استحکام تسلیم رخ داده است. این موضوع می‌تواند ناشی از افزایش کسر حجمی آستنیت باقی مانده برای این نمونه ها (بواسطه دمای کوئنچ بالاتر) ولی استحاله آنها به مارتنزیت ثانویه پس از پارتیشن بندی باشد [26]. نمونه کوئنچ شده در دمای ۲۰۰°C رفتاری تقریباً شبیه به نمونه کوئنچ شده در دمای ۱۷۰°C (به جز زمان پارتیشن بندی ۳۰ دقیقه) داشته است. لازم به توضیح است که افزایش زمان پارتیشن بندی باعث کاهش آستنیت باقی مانده و

ریز ساختاری در شرایط عملیات حرارتی مختلف، تاثیر مشابهی بر روی استحکام تسلیم و استحکام کششی داشته است.

تشکیل رسوبات کاربیدی نیز می شود [27]. این موضوع می تواند موجبات افزایش استحکام را فراهم کند که برای زمان پارتیشن بندی ۳۰ دقیقه نیز رخ داده است.

در خصوص استحکام کششی (شکل ۷-ب)، رفتار تقریباً مشابهی با استحکام تسلیم بدست آمده است. در واقع، تحولات



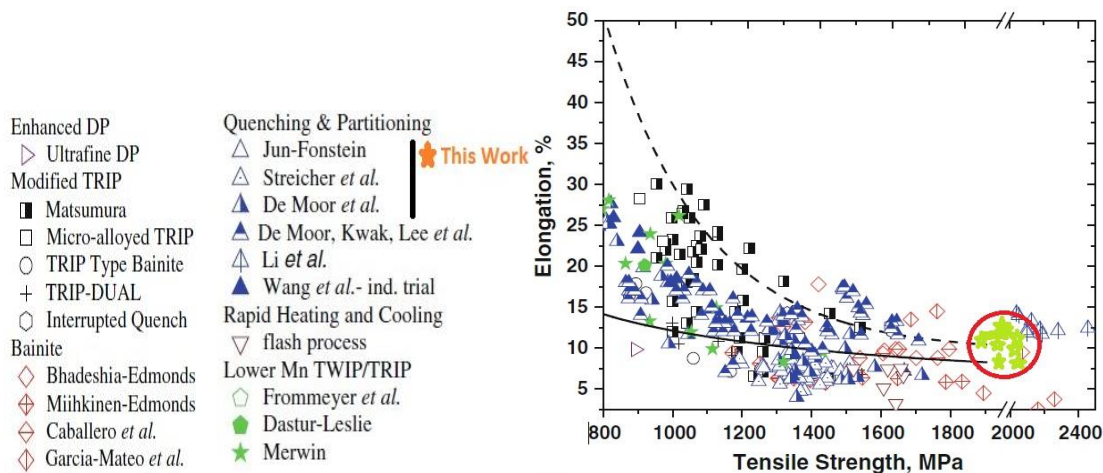
شکل ۷ نمودارهای: الف) استحکام کششی (UTS)، ب) استحکام تسلیم (YS)، ج) ازدیاد طول (TEL)، د) ازدیاد طول یکنواخت (UEL) و ه) میزان کاهش سطح مقطع (RA) بر حسب زمان پارتیشن بندی

با افزایش زمان پارتیشن‌بندی به ۸ دقیقه میزان RA افزایش داشته و تا زمان ۱۵ دقیقه مقدار آن ثابت باقی مانده است و سپس با افزایش زمان تا ۳۰ دقیقه مقدار RA کاهش یافته است. همانطور که در بررسی ریزساختار و کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده بر اساس XRD مشخص شده، مقدار آستنیت پایدار شده در دو دمای ۱۷۰ و ۲۰۰ درجه سانتیگراد نسبت به دمای کوئنچ 230°C در زمان ۳ دقیقه کمتر بوده است که می‌تواند به دلیل عدم پایداری آستنیت باقی‌مانده باشد. در این شرایط با کم شدن میزان فاز آستنیت پایدار شده مقدار RA کاهش خواهد یافت [24]. میزان RA در نمونه 230°C تا زمان پارتیشن‌بندی ۱۵ دقیقه کاهش داشته است. سپس این مقدار در زمان ۳۰ دقیقه افزایش یافته است که می‌تواند به دلیل تشکیل کاربید یا استحاله بینیتی در نمونه باشد. براساس خواص کششی بدست آمده می‌توان گفت بهترین خواص کششی برای نمونه کوئنچ شده در دمای 170°C و پارتیشن‌بندی شده در دمای ۸ دقیقه با استحکام کششی $1997/3\text{MPa}$ ، استحکام تسلیم $1730/2\text{MPa}$ ، ازدیاد طول $10/3\%$ و کاهش سطح مقطع 48% بدست آمده است. می‌توان گفت که مفتولی با مشخصاتی این چینی (ساختار و خواص کششی) دارای قابلیت کششی سرد عالی خواهد بود و می‌تواند گزینه خوبی برای تولید فنرها و سیم‌های پراستحکام باشد.

در شکل (۸)، نتایج تحقیق حاضر با طیف گسترده‌ای از فولادهای استحکام بالا مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج بدست آمده بیانگر ارتقا خواص کششی فولاد مورد تحقیقی در مقایسه با سایر نتایج بدست آمده برای فرآیند Q-P-T است. ذکر این نکته ضروری است که در تحقیق حاضر، هیچگونه تمپری بر روی نمونه‌ها انجام نشده است ولی نتایج حاصل از این تحقیق بسیار مطلوب (استحکام و انعطاف پذیری بالاتر) بوده است.

باتوجه به شکل (۷-ج)، حداقل انعطاف‌پذیری کل برای نمونه‌های پارتیشن‌بندی شده در ۳۰ دقیقه بدست آمده است. این موضوع می‌تواند متأثر از تشکیل رسوبات کاربیدی در ریزساختار و از بین رفتن آستنیت باقی‌مانده باشد. بالاترین ازدیاد طول کل برای نمونه ۳-۲۳۰ به میزان $12/5\%$ بدست آمده است. با مقایسه شکل (۷-الف) و (۷-ج) می‌توان گفت که استحکام تسلیم و ازدیاد طول کل در تقابل با یکدیگر رفتار کرده‌اند. به عبارت دیگر، با افزایش استحکام تسلیم، ازدیاد طول کل کاهش یافته است. البته این موضوع در مورد ازدیاد طول یکنواخت (شکل ۷-د) صادق نیست. بالاترین ازدیاد طول یکنواخت برای نمونه‌های ۸-۱۷۰، ۸-۲۰۰ و ۳-۲۳۰ بدست آمده است. افزایش زمان پارتیشن‌بندی برای این نمونه‌ها (یعنی بیش از ۸ دقیقه برای نمونه کوئنچ شده در ۱۷۰ و ۲۰۰ درجه سانتیگراد و بیش از ۳ دقیقه برای نمونه کوئنچ شده در ۲۳۰ درجه سانتیگراد) باعث افت تغییر شکل همگن می‌گردد. ازدیاد طول یکنواخت به معنی تغییر شکل همگن بدون وقوع گلویی شدن (وقوع ناپایداری) می‌باشد. افزایش یا کاهش این پارامتر قطعاً وابسته به میزان آستنیت باقی‌مانده بعنوان یک فاز شکل‌پذیر در ریزساختار است. فیلم‌های آستنیتی که بین لایه‌های مارتزیت قرار گرفته در مقایسه با فاز مارتزیت، فازی نرم‌تر و انعطاف‌پذیر را تشکیل می‌دهند و در نتیجه از رشد ترک‌های ریز جلوگیری کرده و موجبات افزایش انعطاف‌پذیری را فراهم می‌کند [28]. از طرف دیگر، افزایش بیش از اندازه زمان پارتیشن‌بندی می‌تواند موجب از بین رفتن آستنیت باقی‌مانده و حتی تشکیل رسوبات کاربیدی گردد که در نتیجه، ازدیاد طول یکنواخت را کاهش خواهد داد [16].

نتایج میزان کاهش سطح مقطع نمونه‌ها در شکل (۷-ه) ارائه شده است. بهترین مقادیر کاهش سطح مقطع مربوط به دماهای کوئنچ ۱۷۰ و ۲۰۰ درجه سانتیگراد در زمان پارتیشن‌بندی متفاوت می‌باشد. مشاهده می‌شود که دو نمونه کوئنچ شده در دمای ۲۰۰ و ۲۳۰ درجه سانتیگراد رفتار یکسانی برحسب زمان پارتیشن‌بندی داشته‌اند. با افزایش زمان از ۳ به ۸ دقیقه میزان کاهش سطح مقطع کاهش داشته و با افزایش زمان به ۱۵ دقیقه میزان RA افزایش یافته است. سپس با افزایش زمان به ۳۰ دقیقه مقدار RA مجدداً کاهش یافته است. ولی در نمونه کوئنچ 170°C



شکل ۸ جایگاه فولاد Q&P شده در تحقیق حاضر در بین سایر فولادها [2]

منجر به حصول استحکام کششی ۱۹۹۷ مگاپاسکال، استحکام تسلیم ۱۷۳۰ مگاپاسکال، ازدیاد طول ۱۰/۳ درصد و میزان کاهش سطح مقطع ۴۸ گردیده است.

- بالاترین استحکام بدست آمده برابر با ۲۰۳۶ مگاپاسکال مربوط به نمونه ۳-۲۰۰ و کمترین مقدار استحکام کششی برابر با ۱۸۷۱ مگاپاسکال مربوط به نمونه ۱۵-۱۷۰ می‌باشد.
- مقایسه خواص کششی بدست آمده با سایر فولادها بیانگر حصول خواصی قابل مقایسه با فولادهای آلیاژی بسیار گرانتقیمت می‌باشد.

نتیجه‌گیری

- عملیات حرارتی کوئنچ پارتیشن‌بندی باعث تشکیل یک ریزساختار میکروکامپوزیتی در فولاد ۱/۷۱۰۲ شده است.
- افزایش زمان پارتیشن‌بندی پس از کوئنچ، باعث از بین رفتن آستنیت باقیمانده و همچنین تشکیل رسوبات کاربیدی در ریزساختار می‌گردد.
- انجام عملیات کوئنچ در دمای ۱۷۰ درجه سانتیگراد و پارتیشن‌بندی در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۸ دقیقه

مراجع

1. Connolly, D. S., Kohar, C. P., Muhammad, W., Hector Jr, L. G., Mishra, R. K., & Inal, K., "A coupled thermomechanical crystal plasticity model applied to Quenched and Partitioned steel", *International Journal of Plasticity*, Vol. 133, p. 102757, (2020).
2. Härtel, M., Wilke, A., Dieck, S., Landgraf, P., Grund, T., Lampke, T., ... & Wappler, S., "On the Q&P Potential of a Commercial Spring Steel", *Metals*, Vol. 11, No. 10, p. 1612, (2021).
3. Speer, J. G., De Moor, E., Findley, K. O., Matlock, D. K., De Cooman, B. C., & Edmonds, D. V., "Analysis of microstructure evolution in quenching and partitioning automotive sheet steel", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 42, No. 12, pp. 3591-3601, (2011).
4. Franceschi, M., Pezzato, L., Gennari, C., Fabrizi, A., Polyakova, M., Konstantinov, D., ... & Dabalà, M., "Effect of intercritical annealing and austempering on the microstructure and mechanical properties of a high silicon manganese steel", *Metals*, Vol. 10, No. 11, p. 1448, (2020).
5. Hidalgo, J., Celada-Casero, C., & Santofimia, M. J., "Fracture mechanisms and microstructure in a medium Mn quenching and partitioning steel exhibiting macrosegregation", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 754, pp.

- 766-777, (2019).
6. Sabirov, I., Santofimia, M. J., & Petrov, R. H., "Advanced High-Strength Steels by Quenching and Partitioning", *Metals*, Vol. 11, No. 9, p. 1419, (2021).
 7. Speer, J., Matlock, D. K., De Cooman, B. C., & Schroth, J. G., "Carbon partitioning into austenite after martensite transformation", *Acta materialia*, Vol. 51, No. 9, pp. 2611-2622, (2003).
 8. Jirková, H., Mašek, B., Wagner, M. F. X., Langmajerová, D., Kučerová, L., Treml, R., & Kiener, D., "Influence of metastable retained austenite on macro and micromechanical properties of steel processed by the Q&P process", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 615, pp. 163-168, (2014).
 9. Yu, J. X., Wang, L. Y., Chi, R. A., Zhang, Y. F., Xu, Z. G., & Guo, J., "Competitive adsorption of Pb²⁺ and Cd²⁺ on magnetic modified sugarcane bagasse prepared by two simple steps", *Applied Surface Science*, Vol. 268, pp. 163-170, (2013).
 10. Liao, S., "An optimal homotopy-analysis approach for strongly nonlinear differential equations", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 15, No. 8, pp. 2003-2016, (2010).
 11. Wang, X. D., Zhong, N., Rong, Y. H., Hsu, T. Y., & Wang, L., "Novel ultrahigh-strength nanolath martensitic steel by quenching-partitioning-tempering process", *Journal of Materials Research*, Vol. 24, No. 1, pp. 260-267, (2009).
 12. Zurnadzhy, V. I., Efremenko, V. G., Wu, K. M., Azarkhov, A. Y., Chabak, Y. G., Greshta, V. L., ... & Pomazkov, M. V., "Effects of stress relief tempering on microstructure and tensile/impact behavior of quenched and partitioned commercial spring steel", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 745, pp. 307-318, (2019).
 13. Meigui, O., Chunlin, Y., Jie, Z., Qifan, X., & Huina, Q., "Influence of Cr content and Q-P-T process on the microstructure and properties of cold-coiled spring steel", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 697, pp. 43-54, (2017).
 14. Zhou, W., Sun, Y., Wang, Q., & Ding, L., "Effect of quenching and partitioning process to low-alloy wear resistant steel", *Journal of Materials Research*, Vol. 31, No. 5, pp. 663-669, (2016).
 15. Forouzan, F., Guitar, M. A., Vuorinen, E., & Mücklich, F., "Effect of carbon partitioning, carbide precipitation, and grain size on brittle fracture of ultra-high-strength, low-carbon steel after welding by a quenching and partitioning process", *Metals*, Vol. 8, No. 10, p. 747, (2018).
 16. Di Schino, A., Emilio Di Nunzio, P., & Maria Cabrera, J., "Effect of quenching & partitioning process on a low carbon steel", *Advanced Materials Letters*, Vol. 8, No. 5, pp. 641-644, (2017).
 17. Bagliani, E. P., Santofimia, M. J., Zhao, L., Sietsma, J., & Anelli, E., "Microstructure, tensile and toughness properties after quenching and partitioning treatments of a medium-carbon steel", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 559, pp. 486-495, (2013).
 18. Lu, J., Yu, H., Kang, P., Duan, X., & Song, C., "Study of microstructure, mechanical properties and impact-abrasive wear behavior of medium-carbon steel treated by quenching and partitioning (Q&P) process", *Wear*, Vol. 414, pp. 21-30, (2018).
 19. Wang, Z., & Huang, M., "Improving Hydrogen Embrittlement Resistance of Hot-Stamped 1500 MPa Steel Parts That Have Undergone a Q&P Treatment by the Design of Retained Austenite and Martensite Matrix", *Metals*, Vol. 10, No.

- 12, p. 1585, (2020).
20. Arribas, M., Gutiérrez, T., Del Molino, E., Arlazarov, A., Diego-Calderón, D., Martin, D., ... & Santofimia, M. J., "Austenite reverse transformation in a Q&P route of Mn and Ni added steels", *Metals*, Vol. 10, No. 7, p. 862, (2020).
21. Aoued, S., Danoix, F., Allain, S. Y., Gaudez, S., Geandier, G., Hell, J. C., ... & Gouné, M., "Microstructure evolution and competitive reactions during quenching and partitioning of a model Fe–C–Mn–Si alloy", *Metals*, Vol. 10, No. 1, p. 137, (2020).
22. Vercruyssen, F., Celada-Casero, C., Linke, B. M., Verleysen, P., & Petrov, R. H., "Temperature dependence of the static and dynamic behaviour in a quenching and partitioning processed low-si steel", *Metals*, Vol. 10, No. 4, p. 509, (2020).
23. Jaczak, C. F., "Retained austenite and its measurement by X-ray diffraction. *SAE Transactions*, Vol. 89, pp. 1657-1676, (1980).
24. Santofimia, M. J., Zhao, L., Petrov, R., Kwakernaak, C., Sloof, W. G., & Sietsma, J., "Microstructural development during the quenching and partitioning process in a newly designed low-carbon steel", *Acta Materialia*, Vol. 59, No. 15, pp. 6059-6068, (2011).
25. Jirková, H., Kučerová, L., & Mašek, B., "Effect of Quenching and Partitioning Temperatures in the QP Process on the Properties of AHSS with Various Amounts of Manganese and Silicon", In *Materials Science Forum*, Vol. 706, pp. 2734-2739, Trans Tech Publications Ltd, (2012).
26. Edmonds, D. V., He, K., Rizzo, F. C., De Cooman, B. C., Matlock, D. K., & Speer, J. G., "Quenching and partitioning martensite—A novel steel heat treatment", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 438, pp. 25-34, (2006).
27. Clarke, A. J., Speer, J. G., Miller, M. K., Hackenberg, R. E., Edmonds, D. V., Matlock, D. K., ... & De Moor, E., "Carbon partitioning to austenite from martensite or bainite during the quench and partition (Q&P) process: A critical assessment", *Acta materialia*, Vol. 56, No. 1, pp. 16-22, (2008).
28. Zhou, S., Zhang, K., Wang, Y., Gu, J. F., & Rong, Y. H., "High strength-elongation product of Nb-microalloyed low-carbon steel by a novel quenching–partitioning–tempering process", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 27, pp. 8006-8012, (2011).
29. Wang, C., & HUI, W., "Study on the martensite in low carbon CrNi3Si2MoV steel treated by Q&P process", *Acta Metall Sin*, Vol. 47, No. 6, pp. 720-726, (2011).