

## اثر زمان و دمای پارتیشن بندی در طول فرایند Q&P روی خواص مکانیکی فولاد ۱.۵۱۴۲

عبدا... شیرعلی<sup>\*</sup>، عباس هنربخش رثوف<sup>۱</sup>، سهیلا بزاز بنابی<sup>۱</sup>، محمد ابراهیم حسنی<sup>۱</sup>، مهدی کرم آبیان<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۹۲/۹/۲، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۹۳/۴/۲۴، تاریخ پذیرش قطعی: ۹۳/۴/۲۵

### چکیده

محدودیت‌ها روی مصرف سوخت و ایمنی در صنعت خودرو منجر به توسعه فولادهای استحکام بالای پیشرفته (AHSS) و بهبود استحکام و داکتیلیته شده است. به طوری که یکی از جدیدترین و امیدوارکننده ترین عملیات حرارتی ها برای توسعه AHSS، فرایند کوئنچ و پارتیشن بندی (Q&P) است. انجام این فرایند جدید در دماها و زمان های مختلف، منجر به ترکیب جالب توجهی از خواص مکانیکی شامل استحکام بالا همراه با داکتیلیته خوب می‌شود. در این تحقیق، تغییرات خواص مکانیکی در اثر تغییر دما و زمان پارتیشن بندی روی فولاد ۱.۵۱۴۲ بررسی شده است. نتایج نشان داد که انجام فرایند Q&P روی فولاد باعث افزایش شدید سختی می شود. افزایش زمان و همچنین دمای پارتیشن بندی باعث کاهش سختی و افزایش ازدیاد طول می‌شود. با افزایش زمان پارتیشن بندی، استحکام کششی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و افزایش دمای پارتیشن بندی، باعث کاهش استحکام و افزایش ازدیاد طول و داکتیلیته می‌شود.

کلمات کلیدی: Q&P، پارتیشن بندی، آستنیت باقیمانده، استحکام، ازدیاد طول.

## Effect of Partitioning Time and Temperature during Q&P Process on Mechanical Properties of 1.5142 Steel

Abdollah Shirali<sup>\*1</sup>, Abbas Honarbakhsh Rauf<sup>1</sup>, Soheila Bazzaz Bonabi<sup>1</sup>, Mohammad Ebrahim Hasani<sup>1</sup> and Mahdi Karam Abyan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Metallurgy and Materials Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

### Abstract

Safety, economical and environmental problems in automotive industry are leading to the development of advanced high strength steels (AHSS) with improved mechanical properties. One of the newest and most promising heat treatments for the production of AHSS is quenching and partitioning (Q&P) process. The application of this new process in various times and temperatures leads to interesting combinations of mechanical properties including high strength and good ductility. In this study, variations of mechanical properties influenced by variation of partitioning time and temperature on 1.5142 steel was investigated. The results showed that application of Q&P process on the steel causes severe increasing of hardness. Increasing of partitioning time and also temperature leads to decreasing of hardness and increasing of elongation. With increasing of partitioning time, tensile strength initially increases and then decreases. However, increasing of partitioning temperature leads to decreasing of strength and increasing of elongation and ductility.

**Keywords:** Q&P, partitioning, retained austenite, strength, elongation.

## ۱- مقدمه

در چند سال گذشته، فولادهای استحکام بالای پیشرفته (AHSS: Advanced High Strength Steels) برای دستیابی به ترکیب بهتر استحکام بالا و قابلیت شکل پذیری و تافنس کافی، بررسی شده است. این بررسی، به ویژه در صنعت خودرو انجام شده است تا نگرانی کاهش وزن اجزای فولادی برای صرفه جویی در انرژی و مواد خام برطرف شود. AHSS ها، دارای ریزساختار چند فازی هستند که برای دستیابی به ترکیب استحکام - چقرمگی خوب، دارای تعدادی فاز سخت برای استحکام دهی و فاز (های) نرم دیگر برای داکتیلیته و چقرمگی است. چندین نوع فولاد AHSS، مثل فولادهای دوفازی (DP: Dual Phase) و فولادهای پلاستیسیته القا شده از استحاله (TRIP: Transformation-Induced Plasticity) توسعه یافته اند، اما استحکام این فولادها با مقدار کربن  $0.05-0.2\text{wt.}\%$  در یک محدوده  $500-1000\text{MPa}$  باقی مانده است. به منظور حصول استحکام بالاتر، یک عملیات حرارتی جدید به نام فرایند کوئنچ و پارتیشن بندی (Q&P: Quenching and Partitioning) پیشنهاد شده است. این فرایند شامل آستنیت کردن کامل یا جزئی، کوئنچ سریع تا دمایی پایین دمای شروع مارتنزیت ( $M_s$ )، پارتیشن بندی در دمای کوئنچ (عملیات تک مرحله ای) یا بالای دمای  $M_s$  (عملیات دو مرحله ای) و کوئنچ تا دمای اتاق است [۱-۴].

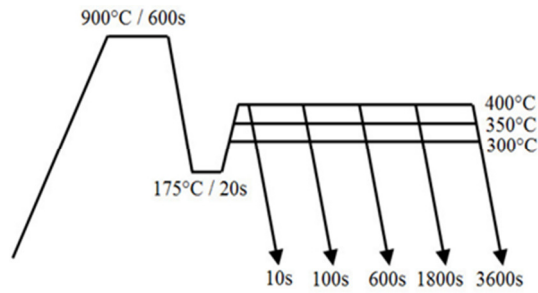
هدف این فرایند، تولید فولادهایی است که دارای مقادیر قابل توجهی آستنیت باقیمانده در یک زمینه مارتنزیتی است، بر این اساس که کربن از مارتنزیت فوق اشباع به آستنیت تبدیل نشده مجاور، نفوذ می کند و آن را تا دمای اتاق پایدار می کند. مارتنزیت با مقدار کربن زیاد، فازی است که استحکام بالا را در فولاد فراهم می کند و آستنیت باقیمانده به دلیل اثر TRIP، باعث افزایش داکتیلیته و تافنس فولاد می شود. بنابراین، وقتی استحکام بالا و قابلیت شکل پذیری خوب مورد نیاز است، از فرایند Q&P استفاده می شود، به عنوان مثال، این فرایند برای ورق های نازک مورد استفاده در صنعت خودرو، باعث بهبودهایی در توانایی حفاظت ساختار در تصادف و کاهش وزن می شود.

پیشنهاد و توسعه فرایند Q&P به دلیل تقاضای تولیدکنندگان خودرو برای فولادهایی با استحکام کششی بالای  $1200\text{MPa}$  همراه با داکتیلیته بالا بوده است. این خواص مکانیکی بالا معمولاً نیاز به فولادهای آلیاژی دارد که بسیار گران هستند و ممکن است وزن وسیله را افزایش دهد. اما فولادهای Q&P، شامل مقدار کمی عناصر آلیاژی مثل منگنز و سیلیسیوم است که می تواند هزینه مواد خام و وزن وسیله را در صنعت خودرو کاهش دهد و بدین ترتیب، مصرف سوخت و در نتیجه خروج کربن دی اکسید کاهش می یابد [۵-۷].

همان طور که اشاره شد، فرایند Q&P با آستنیت کردن کامل یا جزئی شروع می شود که انتخاب هر یک از این شرایط، بستگی به خواص مکانیکی مورد انتظار دارد. فولادهای فراوری شده توسط Q&P که با آستنیت کردن کامل شروع می شود، می تواند هم برای کاربردهای فولاد ورق و هم میلگرد در نظر گرفته شود، در حالی که فولادهای فراوری شده توسط Q&P که با آستنیت کردن جزئی شروع می شود، شامل مقدار معینی فریت در ریزساختار است و عمدتاً برای کاربردهای ورق، نورد سرد می شوند [۸]. از جمله مزایای فرایند Q&P، استحکام بالا و تافنس ضربه بالا در مقایسه با سایر روش های عملیات حرارتی است که به دلیل حضور آستنیت باقیمانده در غیاب سمیتیت است. در واقع، در فرایند Q&P با استفاده از عناصر آلیاژی مناسب موجود در فولاد از تشکیل کاربیدها جلوگیری می شود [۹].

ریزساختار نهایی در فرایند Q&P، شامل فریت (در مورد آستنیت کردن جزئی)، مارتنزیت و آستنیت باقیمانده است. در واقع ریزساختار فولاد پس از کاربرد فرایند Q&P، به پارامترهای عملیات حرارتی (مثل دما و زمان کوئنچ و نیز دما و زمان پارتیشن بندی) و ریزساختار اولیه پیش از کاربرد فرایند بستگی دارد. مقدار آستنیت نهایی ممکن است در کوئنچ تا دمای اتاق اصلاح شود، که بستگی به پایداری آستنیت به دست آمده در طول مرحله پارتیشن بندی دارد [۱۰ و ۱۱].

برای دستیابی به ترکیب خوبی از استحکام و داکتیلیته در این فرایند، بایستی پارامترهایی مثل مدت زمان حرارت دهی، سرعت سرد کردن، دما و زمان کوئنچ و همچنین دما و



شکل ۱. شماتیک سیکل های فرایند Q&P به کار برده شده برای فولاد.

نمونه‌ها برای مشاهده ریزساختار توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با محلول نایتال ۲٪ اچ شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی توسط دستگاه VEGA\TESCAN و ولتاژ کاری ۱۵kV تهیه شد. کسر حجمی و مقدار کربن فاز آستنیت باقیمانده با استفاده از آنالیز پراش اشعه X (XRD) در دمای اتاق و با استفاده از تابش Cu-K $\alpha$  (در ۳۵kV و ۳۰mA) اندازه گیری شد. نمونه‌ها در محدوده ۲θ از ۳۰° تا ۱۱۰° در یک اندازه گام ۰/۰۵° اسکن شد. کسر حجمی آستنیت باقیمانده با استفاده از بازتاب های (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰) و (۳۱۱) آستنیت و بازتاب های (۱۱۰)، (۲۰۰)، (۲۱۱) و (۲۲۰) فریت (مارتنزیت) و براساس رابطه (۲) محاسبه شد [۱۳].

$$V_{\gamma} = \frac{\left(\frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \frac{I_{\gamma j}}{R_{\gamma j}}\right)}{\left(\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \frac{I_{\alpha i}}{R_{\alpha i}}\right) + \left(\frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \frac{I_{\gamma j}}{R_{\gamma j}}\right)} \quad (\text{معادله } ۲)$$

که در آن  $V_{\gamma}$ ، کسر حجمی آستنیت باقیمانده،  $I_{\alpha}$  و  $I_{\gamma}$  به ترتیب شدت پیک برای فازهای فریت (مارتنزیت) و آستنیت،  $R$ ، فاکتور شدت نسبی تئوری و  $p$  و  $q$  به ترتیب تعداد پیک های پراش برای فازهای فریت و آستنیت است.

غلظت کربن آستنیت باقیمانده با استفاده از رابطه (۳)

محاسبه شد [۷].

(معادله ۳)

$$a_{\gamma} = 0.3556 + 0.00453x_C + 0.000095x_{Mn} + 0.00056x_{Al} + 0.0006x_{Cr} - 0.0002x_{Ni}$$

که در آن،  $a_{\gamma}$ ، پارامتر شبکه آستنیت برحسب نانومتر است و  $x_C$ ،  $x_{Mn}$ ،  $x_{Al}$ ،  $x_{Cr}$  و  $x_{Ni}$  به ترتیب غلظت کربن، منگنز،

زمان پارتیشن بندی را تغییر داد تا به یک مقدار بهینه رسید [۱۲].

در این تحقیق، فولاد 1.5142 در معرض فرایند Q&P دو مرحله ای در دما و زمان های پارتیشن بندی متفاوت قرار گرفته و تأثیر این دماها و زمان ها روی خواص مکانیکی بررسی شده است.

## ۲- روش تحقیق

ماده اولیه، فولاد 1.5142 بود که به صورت میلگرد با قطر اولیه ۲۵ میلیمتر تهیه شد. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول (۱) به دو صورت مقدار استاندارد و مقدار واقعی مشخص شده توسط کوانتومتری (SES: Spark Emission Spectroscopy) نشان داده شده است.

برای انجام فرایند Q&P، نیاز به تعیین دماهای بحرانی از جمله دمای شروع مارتنزیت ( $M_s$ ) است. برای این فولاد با استفاده از رابطه تجربی (۱)،  $256^{\circ}\text{C}$  بود. (معادله ۱)

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = 542.5 - 350C - 45Mn - 30Cr - 20Ni - 5Si$$

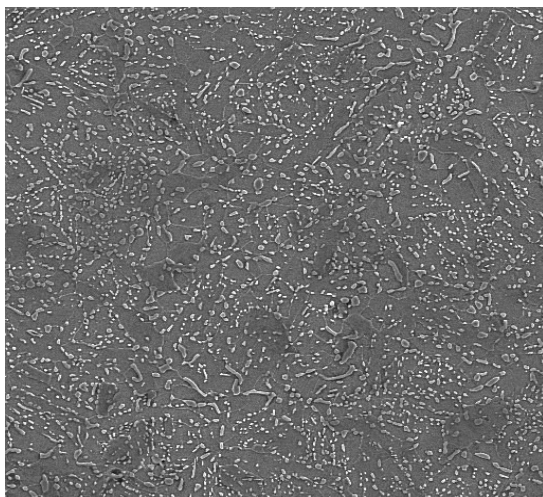
برای انجام فرایند Q&P، نمونه هایی با اندازه  $\Phi 20\text{mm} \times 10\text{mm}$  از ماده اولیه در یک کوره در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۰ دقیقه آستنیت شده، سپس در یک حمام نمک با دمای  $175^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۰ ثانیه کوئنچ شدند، بعد از آن مرحله پارتیشن بندی در دماهای  $300^{\circ}\text{C}$ ،  $350^{\circ}\text{C}$  و  $400^{\circ}\text{C}$  برای زمان های مختلف در حمام نمک دیگر انجام گرفت و در نهایت نمونه ها تا دمای اتاق در آب کوئنچ شدند. شماتیکی از سیکل های فرایند Q&P در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد (wt.%).

1.5142 Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al
Standard Value	0.55-0.65	1.00-1.30	0.90-1.10	$\leq 0.050$	$\leq 0.050$	-	-	-
Actual Value	0.639	0.993	1.03	0.008	0.050	0.305	0.138	0.025

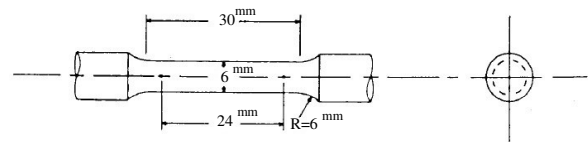
### ۳-۲- کسر حجمی و مقدار کربن آستنیت باقیمانده

شکل (۵)، الگوی پراش یک نمونه را پس از فرایند Q&P نشان می دهد. با توجه به شدت پیک ها در الگوی پراش و با استفاده از رابطه (۲)، کسر حجمی آستنیت باقیمانده قابل محاسبه است. مقدار کربن فاز آستنیت باقیمانده نیز، از آنالیز XRD و رابطه (۳) تعیین می شود. شکل ۶، نشان دهنده کسر حجمی و مقدار کربن فاز آستنیت باقیمانده به دست آمده پس از کوئنچ در  $175^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۰s و پارتیشن بندی در  $350^{\circ}\text{C}$  برای زمان های متفاوت است. کسر آستنیت پس از پارتیشن بندی به مدت ۱۰s، ۱۶/۳٪ است و پس از پارتیشن بندی به مدت ۱۰۰s به یک مقدار حداکثر ۲۱/۳٪ می رسد. پس از این زمان کوتاه پارتیشن بندی کربن، با افزایش بیشتر زمان پارتیشن بندی، کسر آستنیت کاهش می یابد، که به دلیل فرایندهای رقابتی مثل رسوب کاربید در فصل مشترک های مارتنزیت / آستنیت و یا استحاله بینیتی است. غلظت کربن در آستنیت از ۰/۷۵wt.% تا ۱/۷۸wt.% به این صورت تغییر می کند که با افزایش زمان پارتیشن بندی، ابتدا کاهش و سپس مرتباً افزایش می یابد، که این نشان دهنده تخلیه و پارتیشن بندی بیشتر کربن از مارتنزیت به آستنیت است.



شکل ۳. ریزساختار اولیه فولاد.

آلومینیوم، کروم و نیکل برحسب درصد وزنی هستند. پارامتر شبکه آستنیت با استفاده از روش کوهن (Cohen) [۱۴] تعیین شد. سختی سنجی در مقیاس راکول C و توسط دستگاه ماکروسختی Ernst انجام شد. در مقیاس راکول C از فرورونده مخروط الماسی و نیروی ۱۵۰kg استفاده می شود. سختی برای هر نمونه، ۵ بار اندازه گیری شد و عدد سختی پس از میانگین گیری گزارش شد. نمونه های تست کشش براساس استاندارد ASTM E8 [۱۵] و با ابعاد نشان داده شده در شکل (۲)، تهیه شد. تست های کشش توسط دستگاه Instron با سرعت کشش ۲mm/min و در دمای اتاق انجام شد.

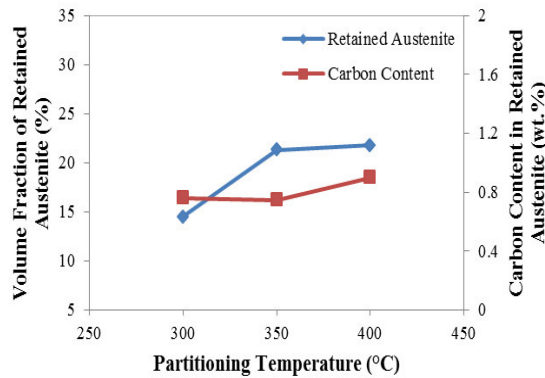


شکل ۲. هندسه و ابعاد نمونه تست کشش.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ریزساختار

شکل (۳)، تصویر SEM از ریزساختار نمونه اولیه پیش از انجام فرایند Q&P را نشان می دهد. این ریزساختار شامل فریت و کاربید است. شکل (۴)، ریزساختار نمونه را پس از انجام فرایند Q&P نشان می دهد که شامل مارتنزیت و آستنیت باقیمانده است. همان طور که مشاهده می شود پس از انجام فرایند، تقریباً هیچ کاربیدی در ریزساختار وجود ندارد، زیرا این کاربیدها در دمای بالا ( $900^{\circ}\text{C}$ ) حل می شوند. همچنین فاز فریت موجود در ریزساختار اولیه به آستنیت تبدیل شده است. با انجام فرایند Q&P، بخشی از این آستنیت در طول کوئنچ به مارتنزیت تبدیل می شود. اگرچه، در تصاویر SEM، تشخیص فاز آستنیت باقیمانده از مارتنزیت بسیار مشکل است ولی می توان مورفولوژی مارتنزیت را مشاهده کرد که مخلوطی از مارتنزیت لایه ای و صفحه ای است.



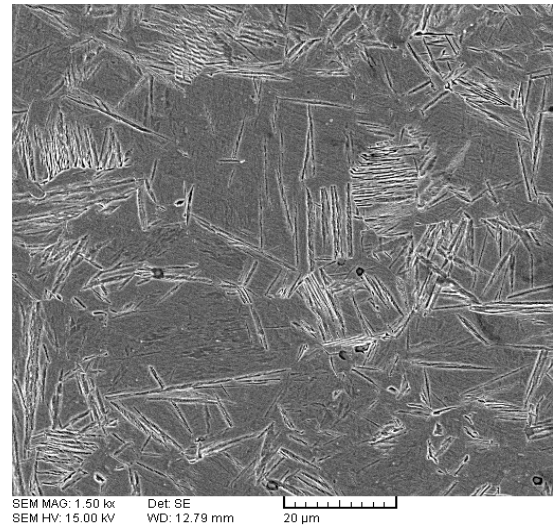
شکل ۷. تغییر کسر حجمی و مقدار کربن فاز آستنیت باقیمانده به صورت تابعی از دمای پارتیشن بندی.

شکل (۷)، کسر حجمی و مقدار کربن فاز آستنیت باقیمانده را در دماهای پارتیشن بندی  $300^{\circ}\text{C}$ ،  $350^{\circ}\text{C}$  و  $400^{\circ}\text{C}$  نشان می دهد. همان طور که مشخص است، با افزایش دمای پارتیشن بندی، کسر حجمی آستنیت باقیمانده نیز افزایش می یابد، زیرا با افزایش دما، سرعت نفوذ کربن از مارتنزیت به آستنیت افزایش می یابد [۱۶] و غنی شدن کربن در آستنیت در دمای پارتیشن بندی بالا شتاب می گیرد، به طوری که غلظت کربن آستنیت باقیمانده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  به بیشترین مقدار ( $0.9\text{wt.}\%$ ) می رسد. البته در دمای پارتیشن بندی بالاتر و نزدیک به دمای شروع بینیت، احتمال وقوع استحاله بینیت و کاهش کسر آستنیت باقیمانده وجود دارد [۱۷].

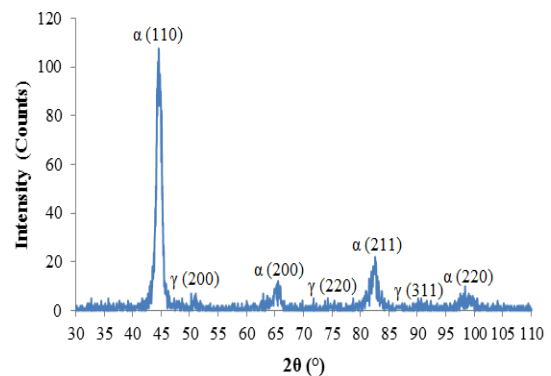
### ۳-۳ سختی

سختی نمونه اولیه  $22\text{Rc}$  بود و نمونه ای که تحت فرایند Q&P (کوئنچ در دمای  $175^{\circ}\text{C}$  به مدت  $20\text{s}$  و پارتیشن بندی در دمای  $350^{\circ}\text{C}$  به مدت  $10\text{s}$ ) قرار گرفت،  $62\text{Rc}$  بود. این نشان می دهد که فرایند Q&P به علت ایجاد فاز مارتنزیت در ریزساختار باعث افزایش شدید سختی می شود.

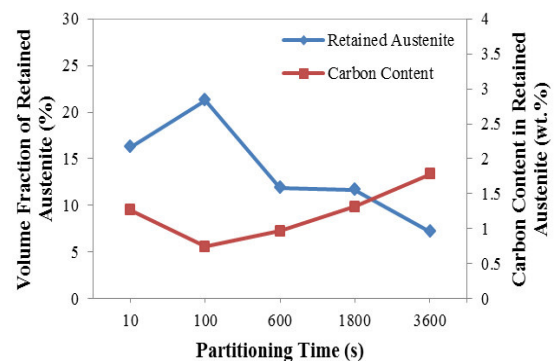
شکل (۸)، نشان دهنده نتایج سختی سنجی برای نمونه های کوئنچ شده در  $175^{\circ}\text{C}$  به مدت  $20\text{s}$  و پارتیشن بندی شده در سه دمای  $300^{\circ}\text{C}$ ،  $350^{\circ}\text{C}$  و  $400^{\circ}\text{C}$  برای زمان های متفاوت است. همان طور که مشاهده می شود حداکثر سختی در زمان های پارتیشن بندی کوتاه به دست می آید. در ادامه با افزایش



شکل ۴. ریزساختار فولاد پس از کوئنچ در دمای  $175^{\circ}\text{C}$  به مدت  $20\text{s}$  و پارتیشن بندی در دمای  $350^{\circ}\text{C}$  به مدت  $100\text{s}$ .



شکل ۵. الگوی پراش نمونه کوئنچ شده در دمای  $175^{\circ}\text{C}$  به مدت  $20\text{s}$  و پارتیشن بندی شده در دمای  $350^{\circ}\text{C}$  به مدت  $100\text{s}$ .



شکل ۶. تغییر کسر حجمی و مقدار کربن فاز آستنیت باقیمانده به صورت تابعی از زمان پارتیشن بندی.

### ۳-۴ خواص کششی

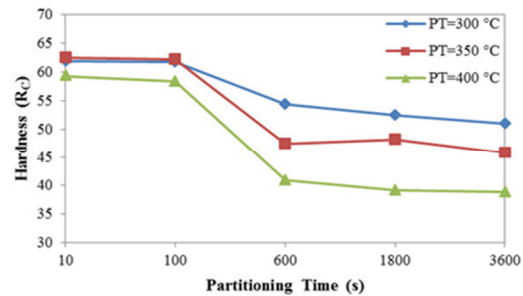
شکل (۱۰)، استحکام تسلیم (YS)، استحکام کششی نهایی (UTS) و ازدیاد طول (EI) را در برابر زمان پارتیشن بندی نمونه های عملیات شده مطابق سیکل های فرایند Q&P نشان می دهد. استحکام کششی نهایی بین  $1700\text{MPa}$  و  $1958\text{MPa}$  به این صورت تغییر می کند که با افزایش زمان پارتیشن بندی تا  $600\text{s}$  افزایش و سپس کاهش می یابد. کاهش استحکام به این علت است که در طول مرحله پارتیشن بندی، اتم های کربن از مارتنزیت فوق اشباع به طرف آستنیت تبدیل نشده حرکت می کنند و باعث کاهش فوق اشباعی کربن در مارتنزیت می شوند. با کاهش فوق اشباعی کربن، مارتنزیت نرم می شود و به این ترتیب باعث افت استحکام می شود. استحکام تسلیم بین  $1310\text{MPa}$  و  $1713\text{MPa}$  تغییر می کند. افزایش استحکام می تواند به علت تجزیه آستنیت تبدیل نشده به بینیت و استحکام ناشی از تشکیل بینیت باشد. مقادیر ازدیاد طول بین  $2/2\%$  و  $5/9\%$  بود. ازدیاد طول با افزایش زمان پارتیشن بندی افزایش می یابد. همچنین از شکل ۱۰ می توان مشاهده کرد که در دمای کوئنچ  $175^\circ\text{C}$ ، نمونه پارتیشن بندی شده در  $350^\circ\text{C}$  به مدت  $600\text{s}$ ، بالاترین UTS ( $1958\text{MPa}$ ) همراه با ازدیاد طول  $4/1\%$  نشان می دهد و نمونه پارتیشن بندی شده در  $350^\circ\text{C}$  به مدت  $1800\text{s}$  دارای بهترین ازدیاد طول ( $5/9\%$ ) با استحکام کششی نهایی  $1934\text{MPa}$  است.

حاصل ضرب استحکام و ازدیاد طول (PSE: Product)

(of Strength and Elongation)، تعادل استحکام و داکتیلیته را برای فولادهای استحکام بالا در کاربرد مهندسی نشان می دهد. تغییرات PSE با زمان پارتیشن بندی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود بالاترین PSE ( $11/4\text{GPa}\%$ ) با کوئنچ در  $175^\circ\text{C}$  به مدت  $20\text{s}$  و پارتیشن بندی در  $350^\circ\text{C}$  به مدت  $1800\text{s}$  به دست می آید.

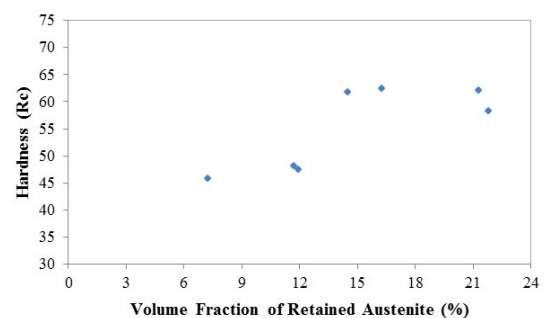
تأثیر دمای پارتیشن بندی روی خواص کششی در جدول (۲) ارائه شده است. افزایش دمای پارتیشن بندی، باعث کاهش استحکام و افزایش ازدیاد طول و داکتیلیته می شود. این پدیده به دلیل افزایش تمپر مارتنزیت است. دمای پارتیشن بندی بالاتر همچنین به پایداری بیشتر کسر آستنیت باقیمانده

زمان پارتیشن بندی، سختی به تدریج کاهش می یابد، زیرا مطابق شکل (۶)، افزایش اثر پارتیشن بندی منجر به نفوذ بیشتر کربن از مارتنزیت به آستنیت و در نتیجه نرم شدن مارتنزیت کوئنچ شده می شود. همچنین سختی با افزایش دمای پارتیشن بندی، کاهش می یابد که به علت افزایش پایداری آستنیت باقیمانده و کاهش فوق اشباعی کربن مارتنزیت در اثر افزایش نفوذ کربن است (شکل ۷).



شکل ۸. تغییرات سختی با زمان و دمای پارتیشن بندی.

شکل (۹)، سختی را به صورت تابعی از کسر آستنیت باقیمانده برای شرایط مختلف فرایند Q&P نشان می دهد. تولید فولاد با چنین سختی بالا و مقادیر قابل توجه آستنیت باقیمانده برای کاربردهای خستگی تماسی (contact fatigue) در صنعت خودرو بدون نیاز به کربوره کردن سطح، بسیار جذاب است. در واقع، ترکیب سختی بالا همراه با کسر آستنیت قابل توجه که از فرایند Q&P به دست می آید، برای تولید یاتاقان یا دنده بسیار مناسب است، به طوری که «تحمل آسیب (damage tolerance)» تحت شرایط خستگی تماسی توسط آستنیت موجود در ریزساختار افزایش می یابد [۱۸ و ۱۹].



شکل ۹. تغییرات سختی با کسر حجمی آستنیت باقیمانده.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، تغییرات سختی و خواص کششی فولاد 1.5142 با تغییر دما و زمان پارتیشن بندی در طول فرایند Q&P بررسی شده است. نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

۱. افزایش زمان و همچنین دمای پارتیشن بندی، باعث نرم شدن مارتنزیت و کاهش سختی می شود.

۲. با افزایش زمان پارتیشن بندی، استحکام کششی ابتدا افزایش و سپس به علت کاهش فوق اشباعی کربن در مارتنزیت در طول مرحله پارتیشن بندی کاهش می یابد.

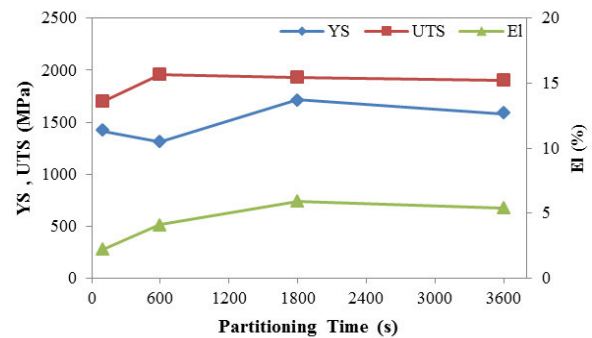
۳. ازدیاد طول با افزایش زمان پارتیشن بندی افزایش می یابد و به طور کلی تغییراتی متناظر با کسر حجمی آستنیت باقیمانده نشان می دهد.

۴. افزایش دمای پارتیشن بندی، به دلیل افزایش تمپر مارتنزیت، استحکام را کاهش می دهد و ازدیاد طول و داکتیلیته را افزایش می دهد.

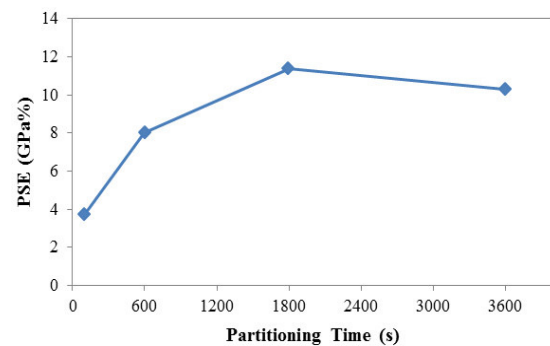
#### مراجع

- Nayak, S.S., Anumolu, R., Misra, K., Kim, K.H., and Lee, D.L., "Microstructure-hardness relationship in quenched and partitioned medium-carbon and high-carbon steels containing silicon", *Materials Science and Engineering A*, 2008, 498, 442-456.
- Edmonds, D.V., He, K., Rizzo, F.C., De Cooman, B.C., Matlock, D.K., and Speer, J.G., "Quenching and partitioning martensite—A novel steel heat treatment", *Materials Science and Engineering A*, 2006, 438-440, 25-34.
- Speer, J.G., De Moor, E., Findley, K.O., Matlock, D.K., De Cooman, B.C., and Edmonds, D.V., "Analysis of Microstructure Evolution in Quenching and Partitioning Automotive Sheet Steel", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2011, 42A, 3591-3601.
- Liu, H., Jin, X., Dong, H., and Shi, J., "Martensitic microstructural transformations from the hot stamping, quenching and partitioning process", *Materials Characterization*, 2011, 62, 223-227.
- Pastore, E., De Negri, S., Fabbreschi, M., Ienco, M.G., Pinasco, M.R., Saccone, A., and Valentini, R., "Experimental investigation on low-carbon quenched and partitioned steel", *La Metallurgia Italiana*, 2011, 9, 25-35.
- Paravicini Bagliani, E., Santofimia, M.J., Zhao, L., Sietsma, J., and Anelli, E., "Microstructure, tensile and toughness properties after quenching and partitioning treatments of a medium-carbon steel",

کمک می کند. بیشترین ازدیاد طول مربوط به نمونه با دمای پارتیشن بندی  $400^{\circ}\text{C}$  است که دارای بالاترین کسر آستنیت باقیمانده (۲۱/۸٪) است. ازدیاد طول به علت پدیده TRIP، تغییراتی متناظر با کسر حجمی آستنیت باقیمانده نشان می دهد. مقادیر ارائه شده در جدول (۲) نشان دهنده انعطاف پذیری زیاد خواص مکانیکی با تغییر پارامترهای فرایند Q&P برای برطرف کردن نیازهای مهندسی متفاوت است.



شکل ۱۰. تغییرات خواص مکانیکی با زمان پارتیشن بندی در دمای  $350^{\circ}\text{C}$ .



شکل ۱۱. تغییرات PSE با زمان پارتیشن بندی در دمای  $350^{\circ}\text{C}$ .

جدول ۲. تغییرات خواص کششی با دمای پارتیشن بندی (QT و Qt، دما و زمان کوئچ و PT و Pt، دما و زمان پارتیشن بندی است).

Sample	Treatment				UTS (MPa)	EI (%)	PSE (GPa%)	V <sub>γ</sub> (%)
	QT (°C)	Qt (s)	PT (°C)	Pt (s)				
1	175	20	300	100	1824.3	1.4	2	14.5
2	175	20	350	100	1700.1	2.2	3.7	21.3
3	175	20	400	100	1553.7	4.6	7.1	21.8

- DAAAM for 2008 & Proceedings of the 19th International DAAAM Symposium, Vienna, Austria, 2008.
13. Jaczak, C.F., Larson, J.A., and Shin, S.W., "Retained Austenite and Its Measurement by X-Ray Diffraction", Manual SP-452, SAE, 1979.
  14. Cullity, B.D., "Elements of X-ray Diffraction" Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts, 1956.
  15. ASTM Standards, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", E8/E8M-09.
  16. Wang, C.Y., Zhang, Y.J., Cao, W.Q., Shi, J., Wang, M.Q., and Dong, H., "Austenite/martensite structure and corresponding ultrahigh strength and high ductility of steels processed by Q&P techniques", Science China, Technological Sciences, 2012, 55(7), 1844-1851.
  17. De Moor, E., Lacroix, S., Clarke, A.J., Penning, J., and Speer, J.G., "Effect of Retained Austenite Stabilized via Quench and Partitioning on the Strain Hardening of Martensitic Steels", Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39A, 2586-2595.
  18. Speer, J.G., Edmonds, D.V., Rizzo, F.C., and Matlock, D.K., "Partitioning of carbon from supersaturated plates of ferrite, with application to steel processing and fundamentals of the bainite transformation", Current Opinion in Solid-State and Materials Science, 2004, 8, 219-237.
  19. Speer, J., Matlock, D.K., De Cooman, B.C., and Schroth, J.G., "Carbon partitioning into austenite after martensite transformation", Acta Materialia, 2003, 51, 2611-2622.
  - Materials Science & Engineering A, 2013, 559, 486-495.
  7. Santofimia, M.J., Zhao, L., Petrov, R., Kwakernaak, C., Sloof, W.G., and Sietsma, J., "Microstructural development during the quenching and partitioning process in a newly designed low-carbon steel", Acta Materialia, 2011, 59, 6059-6068.
  8. Santofimia, M.J., Zhao, L., and Sietsma, J., "Overview of Mechanisms Involved During the Quenching and Partitioning Process in Steels", Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42A, 3620-3626.
  9. Hong, S.C., Ahn, J.C., Nam, S.Y., Kim, S.J., Yang, H.C., Speer, J.G., and Matlock, D.K., "Mechanical Properties of High-Si Plate Steel Produced by the Quenching and Partitioning Process", Metals and Materials International, 2007, 13(6), 439-445.
  10. Clarke, A.J., Speer, J.G., Matlock, D.K., Rizzo, F.C., Edmonds, D.V., and Santofimia, M.J., "Influence of carbon partitioning kinetics on final austenite fraction during quenching and partitioning", Scripta Materialia, 2009, 61, 149-152.
  11. Santofimia, M.J., Zhao, L., Petrov, R., and Sietsma, J., "Characterization of the microstructure obtained by the quenching and partitioning process in a low-carbon steel", Materials Characterization, 2008, 59, 1758-1764.
  12. D. Aisman, H. Jirkova, L. Skalova and B. Masek, "Testing of the Parameters of the Q-P process in High Strength Low-Alloyed Steel", Annals of