



Effect of Cooling System on the Mechanical Properties and Residual Stress of Steel AISI 1045 in Quenching Heat Treatment

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Aghaei M.¹ MSc,
Nazari F.¹ MSc,
Honarpisheh M.*¹ PhD

How to cite this article

Shahrjerdy M, Safikhani H. Effect of Cooling System on the Mechanical Properties and Residual Stress of Steel AISI 1045 in Quenching Heat Treatment. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(12):2979-2986.

¹Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, Kashan, Iran

*Correspondence

Address: University of Kashan, Ghotb'e Ravandi Boulevard, Kashan, Iran. Postal code: 8731751167
Phone: +98 (31) 55913404
Fax: +98 (31) 55913444
honarpishe@kashanu.ac.ir

Article History

Received: December 17, 2018
Accepted: May 26, 2019
ePublished: December 21, 2019

ABSTRACT

Quenching heat treatment is one of the most used processes in the industry, which has a great influence on the properties of materials. Accurate understanding of the effects of this process on the behavior of materials can be effective in better use of this process. In this research, the effect of quenching media on the mechanical behavior of wide used steel of AISI 1045 has been investigated and the residual stress created in the structure has been studied using the contour method. In this regard, three cooling environments of water, oil, and molten salt have been utilized, and after examining the strength and contour of hardness resulted by each cooling environment, the residual stresses have been investigated by the contour method. Also, the uncertainty of residual stresses in the environment with the most influencing factor has been evaluated. Investigation of the results shows that quenching in water can create higher hardness and strength, and more excessive compressive residual stress with greater penetration depth than the other environments. But cooling media of water creates more heterogeneous of the structure between the surface and the center of the piece, while quenching in a molten salt environment, with maintaining a structural homogeneity close to the annealing state, can increase the hardness and strength, and generate compressive residual stresses with a penetration depth of about 1.3 mm. Investigation of uncertainty for quenching in the water environment showed that the greatest error in the residual stresses was about 9%, and the error resulting from data smoothing had the most effect on the measurement of residual stresses by the cantor method.

Keywords Quenching Heat Treatment; Mechanical Properties; Residual Stress; Structural Homogeneity; Uncertainty; Steel AISI 1045

CITATION LINKS

[1] An investigation of the fatigue of CK45 steel in the ... [2] Enhancement of fatigue strength of SAE 1045 steel by ... [3] 3D FEM simulation of steel quenching and investigation of the ... [4] Quenching and cold-work residual stresses in aluminum hand ... [5] Analytical solutions for determining residual stresses in ... [6] Experimental study of process parameters' effect on surface ... [7] Prediction and measurement of residual stresses in ... [8] A new procedure to measure near yield residual ... [9] Specific features of the determination of residual ... [10] Finite element calculation and measurement of thermal ... [11] Through-depth residual stress measurement of laser bent ... [12] Experimental and numerical investigation of through-thickness ... [13] On the estimation of residual stresses by the crack ... [14] Residual stress in 7449 aluminum ... [15] Neutron diffraction measurement of ... [16] Effect of machining and quench-induced residual stress ... [17] Cross-sectional mapping of residual stresses by measuring ... [18] Uncertainty analysis of contour method in the hot ... [19] Residual stress measurements in single and multi-pass ... [20] The influence of bending mode ultrasonic-assisted ... [21] Residual stress, tensile strength, and macrostructure ... [22] The measurement of residual stress in railway rails ... [23] Assessment of tensile residual stress mitigation in alloy ... [24] Effect of stress relief annealing on microstructure ... [25] Comparison of Microstructure and Surface Properties of ... [26] Comparison of the quenching capacities of hot ... [27] The influence of alkaline salt bath quenching on the ... [28] Estimation of uncertainty for contour method ... [29] Mechanical properties of dual phase steel quenched ... [30] Comparison of mechanical properties of medium ... [31] Hardening characteristics of medium carbon steel using ... [32] Effects of various quenching media on mechanical ... [33] Influence of forging and cooling rate on microstructure and ... [34] Fundamentals of materials science and ... [35] Evaluation of mechanical properties of medium ... [36] Experimental and finite element investigation ... [37] Experimental and numerical study of severe plastic ... [38] Quenching theory and ...

اثر محیط خنک‌کننده بر رفتار مکانیکی و تنش پسماند فولاد AISI 1045 در عملیات حرارتی کوئنچ

محسن آقایی MSc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

فرشاد نظری MSc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

محمد هنرپیشه PhD*

گروه ساخت و تولید، دانشکده مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده

عملیات حرارتی کوئنچ یکی از فرآیندهای پر کاربرد در صنعت بوده که تأثیر بسیاری بر خواص مواد دارد. شناخت دقیق اثرات این فرآیند بر رفتار مواد می‌تواند در استفاده بهتر از این فرآیند مؤثر باشد. در این پژوهش اثر محیط کوئنچ بر رفتار مکانیکی فولاد پر کاربرد AISI 1045 بررسی شده و تنش پسماند ایجاد شده در ساختار ماده مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا از سه محیط آب، روغن و نمک مذاب استفاده شده است و پس از بررسی استحکام و کانتور سختی ایجاد شده توسط هر یک از این سه محیط، تنش پسماند حاصل از این فرآیند به روش کانتور مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین عدم قطعیت تنش پسماند در محیط با ضریب اثرگذاری بیشتر، مطالعه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که کوئنچ در آب می‌تواند سختی بیشتر، استحکام بالاتر و تنش پسماند فشاری بیشتر همراه با عمق نفوذ بالاتری را نسبت به سایر محیطها ایجاد نماید اما ناهمگنی ساختار بین سطح و مرکز قطعه نیز بیشتر است. در حالی که کوئنچ در محیط نمک مذاب با حفظ همگنی ساختار نزدیک به حالت آئیل، می‌تواند ضمن افزایش سختی و استحکام، تنش پسماند فشاری با عمق نفوذ حدود ۱/۳ میلی‌متر ایجاد نماید. بررسی عدم قطعیت کوئنچ در محیط آب نشان داد بزرگترین خطا در تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده حدود ۹٪ بوده و خطای ناشی از هموارکردن داده‌ها بیشترین اثر را در اندازه‌گیری تنش پسماند به روش کانتور دارد.

کلیدواژه‌ها: عملیات حرارتی کوئنچ، خواص مکانیکی، تنش پسماند، همگنی ساختار، عدم قطعیت، فولاد AISI 1045

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۰۵

*نویسنده مسئول: honarpishe@kashanu.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین فولادهایی که در صنعت مورد استفاده می‌باشد فولاد AISI 1045 است. این فولاد در قسمت‌هایی که نیاز به استحکام بالا بوده و تحت بارهای نوسانی هستند به ویژه در ماشین‌ها و هواپیما، به شکل‌های مختلف چرخ‌دنده، میل‌لنگ، پیچ و مهره و غیره استفاده می‌شود^[1, 2]. قطعات تولیدشده با این فولاد در بسیاری از موارد پس از طی پروسه تولید به منظور دستیابی به خواص بهتر تحت عملیات‌های حرارتی مختلف قرار می‌گیرند که یکی از آنها فرآیند کوئنچ می‌باشد.

فرآیند کوئنچ، فرآیندی پر کاربرد است که به منظور ایجاد استحکام، سختی و مقاومت به سایش در اجزای فولادی بسیار استفاده می‌شود^[3]. کوئنچ تابع تنش‌ی را با توجه به جریان پلاستیک غیریکنواخت در حین سرد شدن ایجاد می‌کند که سبب ایجاد تنش پسماند در جسم می‌شود^[4]. تنش پسماند در بسیاری از مواد و ساختارهای مهندسی وجود دارد و نقش اساسی در استحکام ماده، عمر خستگی و پایداری ابعادی ایفا می‌کند^[5, 6]. پژوهشگران زیادی در مورد اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در نمونه‌های کوئنچ شده با استفاده از روش‌های گوناگون فعالیت داشته‌اند.

حسین و همکاران^[7] با استفاده از روش تجربی و المان محدود به بررسی تنش پسماند در فرآیند کوئنچ پرداختند. آنها کره‌ای از جنس

فولاد زنگ‌نزن را در محیط خنک‌کننده آب کوئنچ کرده و با استفاده از روش المان محدود تنش‌های پسماند را محاسبه نمودند و به منظور تأیید نتایج خود از روش سوراخکاری مرحله‌ای استفاده کردند و تطابق خوبی را در این دو روش مشاهده نمودند.

محمودی و همکاران^[8] با استفاده از روش سوراخکاری عمیق تنش پسماند استوانه کوئنچ شده را اندازه‌گیری کردند. آن‌ها در این کار عنوان کردند که این روش برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند بزرگ و نزدیک به تنش تسلیم ماده روشی مناسب می‌باشد.

گرونو و همکاران^[9] با استفاده از روش اشعه ایکس و با روشی جدید نسبت به روش $\sin^2\theta$ که بر اساس تحلیل خط پراکندگی وابسته به حجم تابش اشعه می‌باشد تنش پسماند فولاد ساختمانی کوئنچ شده را ارزیابی کردند و نشان دادند که با کاهش شدت تابش مقادیر اندازه‌گیری شده توسط روش $\sin^2\theta$ متفاوت خواهد بود.

جین‌مارت و بوویست^[10] در تحقیقی پس از تخمین تنش‌های پسماند در آلومینیوم پر استحکام کوئنچ شده به وسیله مدل المان محدود، از روش حذف لایه‌ای به منظور اعتبارسنجی نتایج خود استفاده کردند.

کتبی و هنرپیشه^[11, 12] به بررسی روش شیرزنی در فرآیند خمکاری لیزر پرداختند. نیروی و زاویه^[13] نیز تنش پسماند را در آلومینیوم کوئنچ شده با استفاده از روش شیرزنی مورد بررسی قرار داده و به بررسی فرضیات این روش و تأثیر آن بر نتایج پرداختند.

رابینسون و همکاران^[14] با استفاده از دو روش پراکندگی نوترونی تنش پسماند قطعه کوئنچ شده را اندازه‌گیری کرده و برای تأیید نتایج خود از روش سوراخکاری عمیق استفاده کردند و بیان کردند هنگامی که مقادیر تنش پسماند زیاد باشد نتایج حاصل از سوراخکاری عمیق بزرگتر از نتایج پراکندگی نوترونی می‌باشد. آلبرتینی و همکاران^[15] از روش پراش اشعه نوترونی برای اندازه‌گیری تنش پسماند در نمونه‌های کوئنچ شده با نرخ خنک‌کنندگی متفاوت استفاده کردند و نشان دادند که نرخ بالاتر خنک‌کنندگی موجب تشکیل تنش‌های پسماند بیشتر می‌شود.

امینی و همکاران^[16] به بررسی رابطه بین تنش پسماند ناشی از فرآیند کوئنچ و ماشینکاری با استفاده از میزان اعوجاج یک قطعه جدارنازک آلومینیومی پرداختند و برای اندازه‌گیری تنش پسماند از روش پراش اشعه ایکس استفاده کردند. آن‌ها در این پژوهش به این نتیجه رسیدند که به منظور کاهش اعوجاج و تنش پسماند ناشی از ماشینکاری می‌بایست شرایطی بهینه جهت کاهش نیرو و حرارت تولیدشده در فرآیند ماشینکاری، اتخاذ کرد.

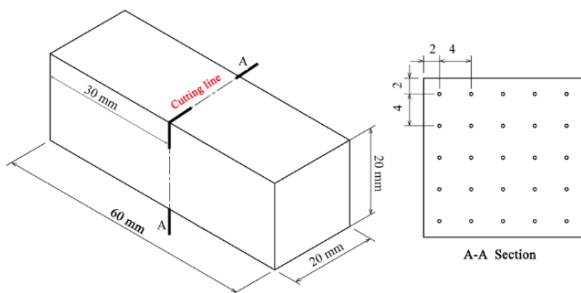
تمامی روش‌های اندازه‌گیری ذکر شده مقادیر تنش‌های پسماند را در یک نقطه نشان داده یا پروفیل تنش پسماند را روی یک خط اندازه‌گیری می‌کنند و توانایی اندازه‌گیری توزیع دوبعدی تنش روی یک سطح را ندارند.

در سال ۲۰۰۱، پرایم^[17] روش جدیدی برای اندازه‌گیری تنش پسماند به نام روش کانتور معرفی نمود. روش کانتور تکنیکی کارآمد برای به‌دست‌آوری تنش پسماند در میان روش‌های مخرب در اندازه‌گیری تنش پسماند می‌باشد و توانایی اندازه‌گیری تنش پسماند دوبعدی روی سطح را دارد. این روش هیچ محدودیتی از نظر ریزساختار، ضخامت و هندسه نمونه‌ها نداشته و به همین دلیل روشی مناسب جهت اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات بزرگ با ضخامت زیاد می‌باشد^[18]. تا امروز پژوهشگران زیادی به بررسی تنش‌های پسماند با استفاده از روش کانتور پرداخته‌اند. کارتال و همکاران^[19] تنش پسماند جوش تک‌پاس و چندپاس را با استفاده از روش کانتور و پراش نوترون بررسی کردند و نشان دادند که این دو روش از تطابق

۲-۲- مطالعه خواص مکانیکی

خواص مکانیکی نمونه‌ها پیش از عملیات حرارتی و پس از آن با استفاده از آزمون کشش مورد مطالعه قرار گرفت و استحکام تسلیم، استحکام نهایی و قابلیت افزایش طول در نمونه‌ها ارزیابی گردید. در این راستا، نمونه‌های آزمون کشش طبق استاندارد DIN 50125 آماده شده و آزمون کشش با استفاده از دستگاه تست کشش سنتام با ظرفیت ۶۰ تن انجام گرفت.

جهت بررسی سختی نمونه‌ها و عمق سخت‌شوندگی از آزمون سختی سنجی ویکرز بهره گرفته شد و کانتور سختی روی سطح مقطع میانی نمونه‌ها مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌ها از وسط با استفاده از فرآیند ماشینکاری وایرکات در حالت پرداخت نهایی برش داده شد و کانتور سختی بر اساس یک الگوی مربعی با طول گام ۴mm در راستاهای X و Y اندازه‌گیری شد. جهت اطمینان از نتایج، اندازه‌گیری‌ها در هر نقطه ۳ مرتبه تکرار شده و میانگین مقادیر سختی در هر نقطه ارائه شده است. آزمون سختی سنجی با استفاده از دستگاه میکروسختی سنجی مدل HV1000B انجام شده و شکل ۱ تصویر نمونه و الگوی مورد استفاده در اندازه‌گیری کانتور سختی را نشان می‌دهد.



شکل ۱) تصویر نمونه و الگوی استفاده‌شده در سختی‌سنجی

۲-۳- اندازه‌گیری تنش پسماند

در این پژوهش با توجه به ضخامت زیاد نمونه‌ها (۲۰mm) و به منظور ارائه کانتور دوبعدی تنش‌های پسماند در سطح مقطع، از روش کانتور بهره گرفته شد. در روش کانتور با برش دادن نمونه‌ها، تنش‌های پسماند آزاد شده و سبب تغییر شکل سطح برش می‌گردد. سپس با اندازه‌گیری جابجایی‌های سطح برش و مدل‌سازی آنها در یک مدل المان محدود، تنش‌های پسماند محاسبه می‌گردد. روش کانتور، تنش‌های پسماند را عمود بر سطح برش اندازه‌گیری کرده و کیفیت انجام هر مرحله در ادامه بیان شده است.

جهت اندازه‌گیری تنش پسماند، قطعات پس از فرآیند کوئنچ به وسیله ماشینکاری وایرکات برش داده شدند. فرآیند برش با استفاده از ماشین وایرکات Charmilles مدل ROBOFIL 2000 و به صورت غوطه‌وری کامل در سیال انجام گرفت. محل برش در وسط نمونه‌ها انتخاب شده و شکل ۱ موقعیت خط برش روی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. جهت دستیابی به کیفیت سطح مناسب، پارامترهای ماشینکاری روی پرداخت نهایی تنظیم شد و برشکاری با سرعت پیشروی ۰/۴mm/min و با استفاده از سیم برنجی به قطر ۲۵۰µm انجام گرفت.

پس از برش قطعات، جهت اندازه‌گیری جابجایی‌های ناشی از آزاد شدن تنش‌های پسماند، سطوح برش توسط دستگاه GMM مدل POLI-SKY و پراب تماسی با قطر ۲mm و دقت نامی ۳µm مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و این کار برای هر دو سطح برش انجام شد. داده‌برداری در یک شبکه مربعی با فاصله مکانی ۰/۴mm در راستای

خوبی برخوردار هستند و بیشینه تنش در جوشکاری سه‌پاسه در حدود ۱۰۰مگاپاسکال بیشتر از جوش تک پاس می‌باشد. علی‌تقیان و همکاران [20, 21] تنش پسماند ناشی از جوشکاری اصطکاکی همراه با ارتعاشات اولتراسونیک را با استفاده از روش کانتور مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که با اضافه شدن ارتعاشات، تنش پسماند کششی کاهش و استحکام نمونه افزایش می‌یابد. کلهر و همکاران [22] تنش پسماند ریل راه‌آهن را با استفاده از این روش به دست آوردند و روش کانتور را به عنوان روشی کاربردی به منظور دستیابی به تانسور کامل تنش مطرح کردند.

دی‌والد و همکاران [23] تأثیر کوبش لیزر را بر فولاد آلیاژی مورد بررسی قرار دادند و تنش پسماند در این فرآیند را با استفاده از روش کانتور و شیازنی اندازه‌گیری کردند. آنها بیان کردند میزان عمق تنش پسماند فشاری حدود ۴ میلی‌متر بوده که به سطح تابش و تعداد تکرار فرآیند وابسته است.

نظری و همکاران [24] تأثیر فرآیند پرس در قالب شیار محدود بر تنش پسماند را مطالعه کرده و نقشه دوبعدی تنش پسماند را با استفاده از روش کانتور اندازه‌گیری کردند. آنها نشان دادند در فرآیند پرس در قالب شیار محدود تنش پسماند در نزدیک سطح فشاری بوده و با حرکت در راستای ضخامت به کششی تبدیل می‌شود. همچنین با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند تنش‌های پسماند کاهش می‌یابد.

ترکیب شیمیایی مواد، عمق سختی‌پذیری و محیط خنک‌کننده از پارامترهای تأثیرگذار بر خواص مواد در عملیات حرارتی کوئنچ می‌باشند و محیط خنک‌کننده با تأثیر بر سرعت خنک‌شوندگی از عوامل مهم جهت رسیدن به خواص مطلوب بعد از فرآیند کوئنچ محسوب می‌شوند. انتخاب یک محیط خنک‌کننده نامناسب علاوه بر عدم دستیابی به خواص مورد نظر می‌تواند سبب بروز ترک و پیچیدگی در نمونه‌های کوئنچ شده گردد [25].

با توجه به پیشینه بیان شده، تأثیر محیط‌های خنک‌کننده بر خواص ماده در عملیات حرارتی کوئنچ، از پارامترهای مهم بوده و اثر آن بر نقشه دوبعدی تنش‌های پسماند مورد توجه قرار نگرفته است. در این پژوهش اثر محیط‌های آب، روغن و نمک مذاب در عملیات حرارتی کوئنچ بر خواص مکانیکی فولاد AISI 1045 بررسی شده و تنش پسماند به وجود آمده در هر محیط اندازه‌گیری شده است. در این راستا استحکام، سختی و همگنی ساختار قبل و بعد از فرآیند کوئنچ در محیط‌های مختلف ارزیابی شده و کانتور تنش‌های پسماند با استفاده از روش کانتور ارائه شده است. همچنین به منظور بررسی دقت نتایج و بررسی عوامل خطا، عدم قطعیت روش کانتور در فرآیند کوئنچ مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- شرایط فرآیند کوئنچ

در این مطالعه فرآیند کوئنچ روی میله‌هایی از جنس فولاد AISI 1045 و با سطح مقطع مربع به ابعاد ۶۰×۲۰×۲۰mm انجام گرفت. جهت انجام عملیات حرارتی کوئنچ، تمامی نمونه‌ها در دمای ۸۴۵ درجه سانتیگراد به مدت ۱ ساعت آستنیته شده [25, 26] و سپس نمونه‌ها در ۳ محیط آب، روغن و حمام نمک مذاب، خنک شدند. حمام نمک شامل دو نمک جامد با ترکیب ۶۰% پتاسیم هیدروکسید (KOH) و ۴۰% سدیم هیدروکسید (NaOH) بوده که در دمای ۲۰۵ درجه سانتیگراد به صورت مذاب تبدیل شده است [25-27]. اما محیط‌های خنک‌کننده آب و روغن به صورت هم‌دما با دمای اتاق یعنی ۲۵ درجه سانتیگراد قرار داشتند.

پسماند به روش کانتور هستند که به ترتیب خطای جابجایی و خطای مدل نامیده می‌شوند [28]. خطای مدل وابسته به هموارسازی داده‌ها بوده و جهت محاسبه آن، داده‌های جابجایی تحت پارامترهای مختلف هموار شده و به ازای هر کدام تنش‌های پسماند محاسبه می‌گردد. با محاسبه انحراف معیار استاندارد برای تنش‌های پسماند محاسبه شده در هر نقطه، خطای مدل در آن نقطه به دست می‌آید. رابطه (۱) روش محاسبه خطای مدل را نشان می‌دهد. در این رابطه، U_{model} خطای مدل، σ تنش پسماند محاسبه شده برای یک نقطه و m و n نیز بالاترین درجات تابع هموارسازی در جهت‌های X و Y هستند [18].

$$U_{model}(x, y) = std(\sigma_{m-1, n}(x, y), \sigma_{m, n-1}(x, y), \sigma_{m, n}(x, y), \sigma_{m+1, n}(x, y), \sigma_{m, n+1}(x, y)) \quad (1)$$

خطای جابجایی ناشی از وجود پارازیت در داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد و به منظور محاسبه آن ابتدا می‌بایست میزان پارازیت‌ها را محاسبه نمود. به منظور محاسبه مقدار پارازیت‌ها، در هر نقطه داده‌های جابجایی به دست آمده از میانگین‌گیری را از مقدار جابجایی به دست آمده پس از هموارسازی کم نموده و این اختلاف به دست آمده مقدار پارازیت اصلی در آن نقطه می‌باشد. سپس چند دسته پارازیت تصادفی، با این شرط که انحراف معیار استاندارد هر گروه از پارازیت‌ها باید به انحراف معیار پارازیت‌های اصلی برابر باشد، تولید می‌شود. در ادامه هر گروه از پارازیت‌های تصادفی تولید شده را با داده‌های جابجایی اصلی جمع کرده و پس از هموارسازی، تنش‌های پسماند محاسبه می‌گردد. مشابه رابطه (۱)، با محاسبه انحراف معیار استاندارد برای تنش‌های پسماند محاسبه شده در هر نقطه، خطای جابجایی در آن نقطه به دست می‌آید [18]. برای محاسبه عدم قطعیت کل، ابتدا مطابق رابطه (۲) مقدار خطا در هر نقطه (U_{RSS}) با استفاده از روش مجذور جمع مربعات به دست آمده و سپس میانگین خطا (\bar{U}_{RSS}) روی سطح محاسبه می‌گردد.

$$U_{RSS}(x, y) = \sqrt{(U_{Model}^2(x, y) + U_{Disp}^2(x, y))} \quad (2)$$

$$\bar{U}_{RSS} = \frac{\sum_{i=1}^N U_{RSS}(x_i, y_i)}{N}$$

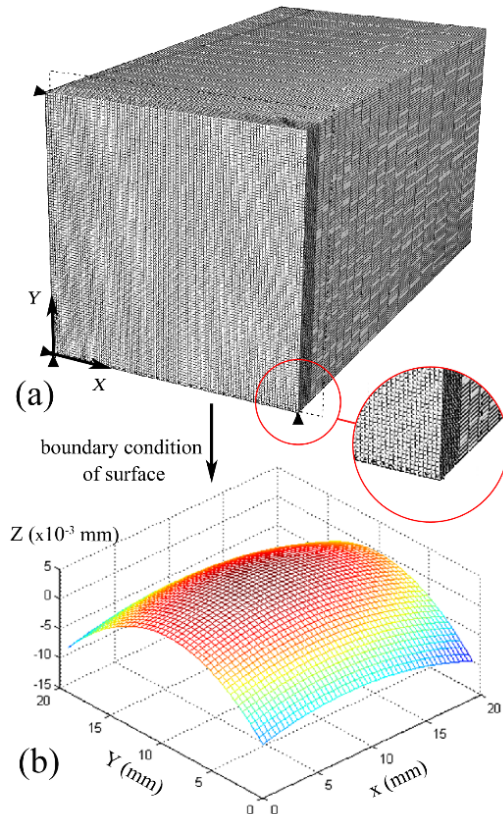
عدم قطعیت کل در هر نقطه از مقایسه و انتخاب بیشترین مقدار خطا بین مقدار خطا در آن نقطه و مقدار میانگین خطا روی سطح به دست می‌آید. رابطه (۳)، روش محاسبه عدم قطعیت کل را نشان می‌دهد [18].

$$U_{Total}(x, y) = Max(U_{RSS}(x, y), \bar{U}_{RSS}) \quad (3)$$

۴- نتایج و بحث

ابتدا محیط‌های خنک‌کننده مورد استفاده در این پژوهش از نظر قدرت خنک‌کنندگی و رفتار آنها هنگام گرم شدن مقایسه شده است. آب پر استفاده‌ترین و در دسترس‌ترین سیالی هست که جهت فرآیند کوئنچ مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سیال توانایی خنک‌کنندگی و ظرفیت گرمایی بالایی داشته اما هنگام گرم شدن از توانایی خنک‌کنندگی آن کاسته می‌شود. روغن در مقایسه با آب از نرخ خنک‌کنندگی کندتری برخوردار است اما هنگام گرم شدن با کاهش ویسکوزیته قدرت خنک‌کنندگی آن افزایش می‌یابد. ضریب خنک‌شوندگی نمک مذاب از هوا بیشتر بوده اما در برابر روغن می‌تواند بیشتر یا کمتر باشد که به ترکیب نمک مذاب و روغن وابسته است [25, 26]. در ادامه نتایج به دست آمده و تأثیر هر یک از محیط‌های خنک‌کننده بیان شده در فرآیند کوئنچ بر خواص مکانیکی، همگنی ساختار و تنش پسماند شرح داده شده است.

طول و عرض انجام گرفت و در هر سطح مقطع ۲۴۰۰ نقطه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. در طول فرآیند اندازه‌گیری دقت گردید تا نمونه‌ها کاملاً ثابت بوده و قطعه به درستی موقعیت‌دهی شده باشد تا در تعیین نقاط متناظر اختلافی ایجاد نگردد. برای حذف خطای ناشی از تنش‌های برشی، از مقادیر اندازه‌گیری شده روی سطوح برش، در نقاط متناظر میانگین گرفته شد. جهت حذف زبری و ناهمواری‌های ناشی از فرآیند ماشینکاری، داده‌های حاصل از میانگین‌گیری با استفاده از یک تابع ۲ متغیره درجه ۲ (Bivariate Quadratic Spline) در نرم‌افزار متلب هموار گردید. شکل ۲ کانتور جابجایی سطح را پس از میانگین‌گیری، هموارسازی و قرینه‌سازی، برای نمونه کوئنچ شده در آب نشان می‌دهد.



شکل ۲ (a) مدل المان محدود و شرایط مرزی، (b) کانتور جابجایی سطح پس از میانگین‌گیری، هموارسازی و قرینه‌سازی برای نمونه کوئنچ شده در آب

جهت محاسبه تنش‌های پسماند در روش کانتور از شبیه‌سازی المان محدود استفاده می‌گردد و جابجایی‌های اندازه‌گیری شده پس از میانگین‌گیری و هموارسازی به صورت شرایط مرزی و به طور قرینه بر سطح برش اعمال می‌شود. در این بررسی از نرم‌افزار تجاری آباکوس جهت شبیه‌سازی عددی استفاده شد و تنش‌های پسماند با استفاده از یک مدل استاتیکی سه‌بعدی و با استفاده از المان C3D8R محاسبه گردید. همچنین جهت افزایش دقت محاسبات، نزدیک به صفحه برش از المان‌های کوچکتری نسبت به قسمت‌های دور از صفحه برش استفاده شد. شکل ۲ مدل المان محدود و شرایط مرزی حاکم بر مدل را نشان می‌دهد.

۳- محاسبه عدم قطعیت در روش کانتور

پارازیت‌های موجود در جابجایی‌های اندازه‌گیری شده و خطای ناشی از هموارسازی داده‌ها، دو منبع اصلی خطا در اندازه‌گیری تنش

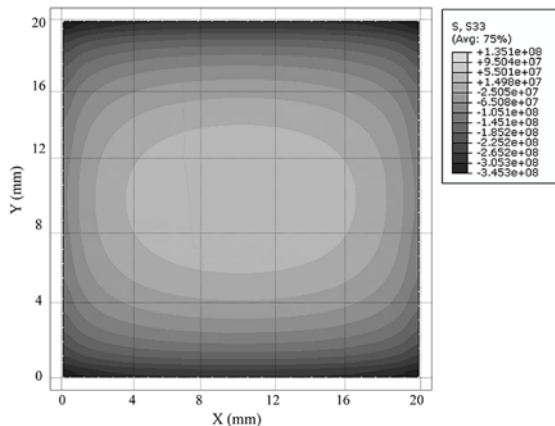
۴-۱- استحکام کششی

بررسی نتایج آزمون کشش نشان داد، استحکام فولاد پس از کوئنچ در آب بیشتر از کوئنچ در روغن و حمام نمک مذاب بوده و توانایی افزایش طول آن از نمونه‌های کوئنچ‌شده در روغن و نمک مذاب کمتر است. از نظر استحکام، نمونه‌های کوئنچ‌شده در حمام نمک مذاب و روغن شرایط تقریباً یکسانی دارند با این تفاوت که توانایی افزایش طول در نمونه کوئنچ‌شده در نمک مذاب از روغن بیشتر است. دلیل استحکام بیشتر کوئنچ در آب نسبت به نمک مذاب و روغن، نرخ خنک‌کنندگی بالای آب می‌باشد [29, 30]. نرخ خنک‌کنندگی بالای آب سبب تشکیل فاز مارتنزیت بیشتر در نمونه فولادی شده و استحکام بالا و سختی این فاز سبب افزایش استحکام نمونه‌های کوئنچ‌شده می‌گردد که در پژوهش‌های دیگر نیز به آن اشاره شده است [31, 32].

توانایی افزایش طول در نمونه کوئنچ‌شده در نمک مذاب از سایر نمونه‌ها بیشتر می‌باشد و این امر به دلیل دمای اولیه نمک مذاب و نرخ خنک‌کنندگی کمتر آن نسبت به محیط‌های آب و روغن می‌باشد [33].

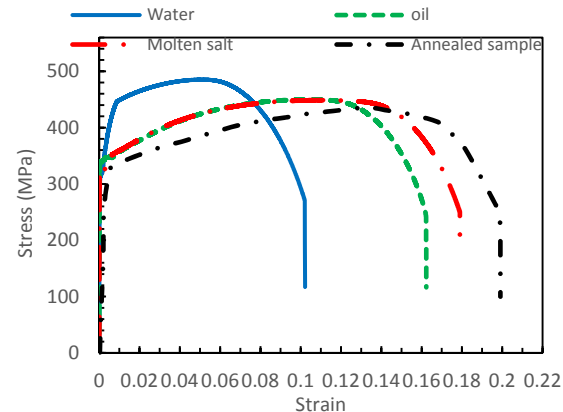
با توجه به نتایج، استحکام تسلیم و نهایی در نمونه اولیه به ترتیب ۲۰۵ و ۴۳۸ MPa بوده که پس از کوئنچ در آب این مقادیر به ۳۳۳/۹ و ۴۸۵/۱ MPa رسیده است که ۶۳ و ۱۳/۵٪ افزایش را نشان می‌دهد. همچنین استحکام تسلیم و نهایی برای کوئنچ در نمک مذاب ۳۲۴ و ۴۴۹ MPa و برای کوئنچ در روغن ۳۴۲/۳ و ۴۵۰ MPa بوده است. نمودار ۱ نتایج آزمون کشش، قبل و بعد از عملیات حرارتی کوئنچ در محیط‌های مختلف را نشان می‌دهد.

نتایج آزمون کشش فولاد AISI 1045 قبل و بعد از عملیات حرارتی کوئنچ در محیط‌های مختلف



نمودار ۲) کانتور دویبعی تنش پسماند برای نمونه کوئنچ‌شده در آب

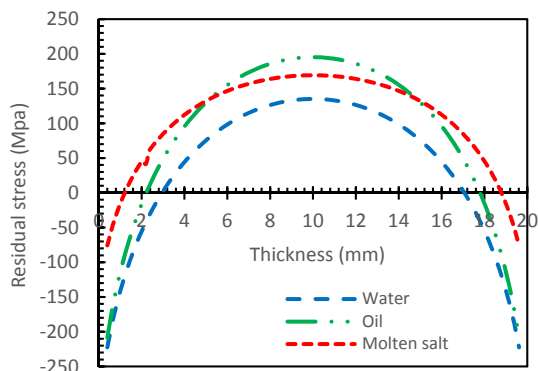
بیشترین تنش پسماند فشاری در سطح ناشی از کوئنچ در آب می‌باشد و بعد از آن کوئنچ در روغن و سپس نمک مذاب قرار دارند. همچنین کوئنچ در آب با عمق نفوذ حدود ۳ mm بیشترین عمق تنش پسماند فشاری را ایجاد کرده که به دلیل تشکیل ساختارهای مارتنزیت می‌باشد. کوئنچ در روغن با عمق نفوذ حدود ۲/۲ mm و نمک مذاب با عمق نفوذ حدود ۱ mm از نظر عمق تنش پسماند فشاری در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. نمودار ۳ پروفیل تنش پسماند را برای کوئنچ در آب، روغن و نمک مذاب روی خط $x=10$ در مرکز قطعه، نمایش می‌دهد.



نمودار ۱) نتایج آزمون کشش برای فولاد AISI 1045 قبل و بعد از عملیات حرارتی کوئنچ در محیط‌های مختلف

۴-۲- تنش پسماند و عدم قطعیت

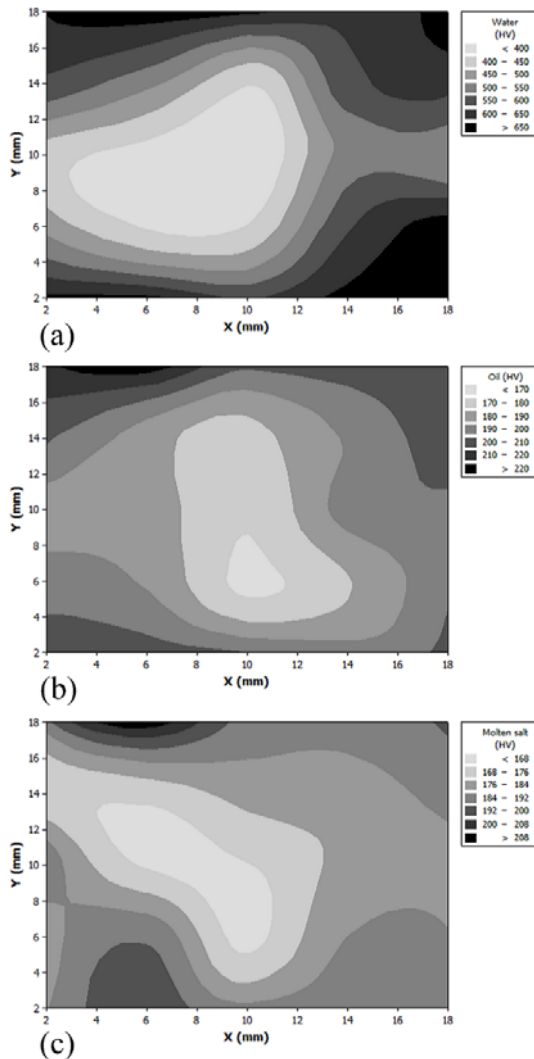
بررسی نتایج تنش پسماند نشان داد، عملیات حرارتی کوئنچ در تمامی محیط‌های خنک‌کننده سبب ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح شده که با حرکت به سمت مرکز نمونه به تدریج به تنش پسماند کششی تبدیل می‌شود. در عملیات حرارتی کوئنچ، طی خنک‌کردن ناگهانی قطعه دو تغییر ابعادی انبساط ناشی از تغییر ساختار آستنیت به مارتنزیت و انقباض ناشی از کاهش دما صورت می‌گیرد. این تغییرات ابعادی و ساختاری باعث به‌وجود آمدن تنش‌های پسماند در جسم می‌شود. با خنک‌کردن ناگهانی نمونه، سطح بیرونی قطعه سریع‌تر سرد شده و منقبض می‌شود اما قسمت درونی که هنوز گرم است نسبت به انقباض مقاومت می‌کند. همچنین در فرآیند کوئنچ، فاز مارتنزیت در سطح نمونه تشکیل شده و تا جایی که شرایط تشکیل این فاز وجود داشته باشد به سمت مرکز قطعه پیشروی



نمودار ۳) پروفیل تنش پسماند برای عملیات حرارتی کوئنچ در آب، روغن و نمک مذاب روی خط $x=10$ در وسط سطح مقطع نمونه

جهت بررسی دقت نتایج، عدم قطعیت روش کانتور مورد بررسی قرار گرفت و خطای جابجایی، خطای مدل و خطای کل برای نمونه

تشکیل شده و همچنین تنش پسماند شکل گرفته پس از عملیات حرارتی کوئنچ مؤثر بوده و به همین دلیل، آب با ضریب خنک‌کنندگی بالا سبب تشکیل فاز مارتنزیت بیشتر و تنش پسماند فشاری بالاتری روی قطعات می‌گردد و سبب می‌شود کوئنچ در آب، سختی بسیار بیشتری را ایجاد کرده به طوری که میزان سختی سطحی نمونه حدود ۳ برابر بیشتر از کوئنچ در محیط‌های روغن و نمک مذاب می‌باشد. به طور مشابه محیط نمک مذاب به دلیل دمای اولیه ۲۰۵ درجه سانتیگراد کمترین سختی و عمق سخت‌شوندگی را ایجاد کرده است. کانتورهای سختی بر اساس محیط‌های خنک‌کننده در نمودار ۶ نمایش داده شده است.



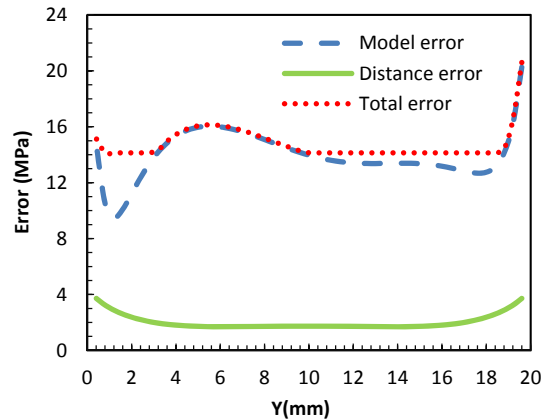
نمودار ۶) کانتور سختی نمونه‌های کوئنچ شده در (a) آب، (b) روغن و (c) نمک مذاب

۴-۴- همگنی خواص

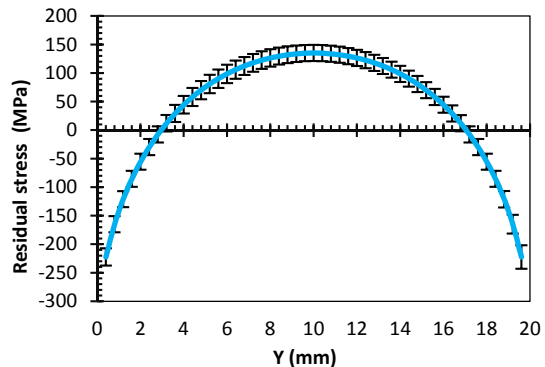
به منظور بررسی کمی میزان همگنی و یکنواختی سختی از ضریبی به نام ضریب ناهمگنی (I.F.) استفاده می‌شود که طبق رابطه (۴) محاسبه می‌گردد [36, 37]. در این رابطه، \bar{H} برابر سختی میانگین سطح، H_i برابر سختی در هر نقطه و n تعداد کل نقاط را نشان می‌دهد. در این روش هرچه مقدار ضریب ناهمگنی کمتر باشد نشان‌دهنده همگن‌تر بودن خواص مکانیکی ماده می‌باشد.

$$I.F. = \frac{1}{\bar{H}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n-1}} \times 100 \quad (4)$$

کوئنچ شده در آب محاسبه گردید. همان‌طور که در نمودار ۴ نشان داده شده، خطای مدل بیشترین تأثیر را بر نتایج داشته و اثر خطای جابجایی بسیار کوچک می‌باشد. بیشینه خطا در لبه‌های قطعه اتفاق افتاده و خطای مدل با بیشینه ۲۰/۲ MPA و خطای جابجایی با بیشینه ۳/۷ MPA به ترتیب معادل ۹ و ۱/۶٪ بیشینه تنش پسماند می‌باشند. همچنین بیشینه عدم قطعیت کل به مقدار ۲۰/۶ MPA در لبه قطعه بوده و نمودار ۵ نمودار تنش پسماند را با در نظر گرفتن عدم قطعیت کل برای کوئنچ در آب نشان می‌دهد.



نمودار ۴) نمودار خطی خطای مدل، خطای جابجایی و عدم قطعیت کل برای نمونه کوئنچ شده در آب



نمودار ۵) مقادیر تنش پسماند با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای نمونه کوئنچ شده در آب روی خط $x=10$ در وسط سطح مقطع نمونه

۴-۳- سختی

مطالعه نتایج سختی نشان داد، کوئنچ در آب با ایجاد سختی ۶۸۷HV بیشترین سختی را ایجاد کرده و پس از آن کوئنچ در روغن با سختی بیشینه ۲۰۶HV و در کوئنچ در نمک مذاب با سختی ۱۹۳HV در رتبه‌های بعدی قرار دارند. همچنین بررسی دامنه مقادیر سختی و عمق سخت‌شوندگی نشان داد، آب با میانگین سختی ۵۵۹HV بیشترین سختی را در سطح مقطع ایجاد کرده و بیشترین عمق سخت‌شوندگی نیز با کوئنچ در آب اتفاق می‌افتد؛ اما دامنه سختی در کوئنچ با روغن و نمک مذاب تقریباً مشابه بوده با این تفاوت که میانگین سختی در روغن با مقدار ۱۹۵HV از نمک مذاب با ایجاد سختی میانگین ۱۸۳HV بیشتر است و عمق سخت‌شوندگی ایجاد شده توسط روغن نیز بسیار از نمک مذاب بیشتر می‌باشد. با توجه به توضیحات بیان شده می‌توان میزان ایجاد سختی و عمق سخت‌شوندگی در محیط‌های مختلف را به ضریب خنک‌کنندگی محیط‌ها نسبت داد [35]. در فولادها، این عامل بر میزان فاز مارتنزیت

۴- بیشترین سختی حاصل از کوئنچ در محیط خنک‌کننده آب به‌دست آمده که به دلیل نرخ خنک‌کنندگی زیاد و متعاقباً تشکیل فاز مارتنزیت و ایجاد تنش پسماند فشاری بالا در قطعه می‌باشد و ۳ برابر سختی بیشتری نسبت به محیط‌های خنک‌کننده روغن و نمک مذاب ایجاد می‌کند. کمترین سختی در محیط خنک‌کننده نمک مذاب حاصل می‌گردد اما این محیط سبب ایجاد بیشترین همگنی خواص شده که به حالت آنیل نمونه نزدیک می‌باشد. میزان همگنی در شرایط کوئنچ در آب پایین بوده و بیش از ۳/۵ برابر از کوئنچ در نمک مذاب کمتر است.

۵- در یک جمع‌بندی می‌توان بیان کرد که کوئنچ در آب بالاترین استحکام و سختی و بیشترین تنش پسماند فشاری را ایجاد می‌کند اما چقرمگی و همگنی نمونه را به شدت کاهش می‌دهد. اما فرآیند کوئنچ در نمک مذاب ضمن افزایش استحکام و سختی و ایجاد تنش پسماند فشاری مطلوب سبب حفظ چقرمگی و همگنی ساختار نمونه نمونه نیز می‌گردد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان مقاله از دانشگاه کاشان برای حمایت مادی و معنوی این تحقیق تشکر می‌نمایند.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. ضمناً محتویات علمی و ادبی مقاله منتج از فعالیت علمی خود نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافع برای این اثر ندارند.

سهم نویسندگان: محسن آقایی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۵٪)؛ فرشاد نظری (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی (۳۵٪)؛ محمد هنرپیشه (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۳۰٪)

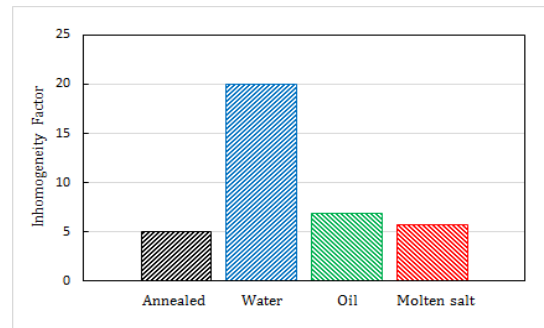
منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- 1- Shariati M, Mehrabi H. An investigation of the fatigue of CK45 steel in the as-received state and after pre-fatigue deformation. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2015;38(4):489-502.
- 2- Yazdania S, Yoozbashi N, Ebrahimi A. Enhancement of fatigue strength of SAE 1045 steel by tempering treatment and shot peening. *Materials Science Forum*. 2007;561-565:41-44.
- 3- Şimşir C, Gur CH. 3D FEM simulation of steel quenching and investigation of the effect of asymmetric geometry on residual stress distribution. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;207(1-3):211-221.
- 4- Prime MB, Newborn MA, Balog JA. Quenching and cold-work residual stresses in aluminum hand forgings: contour method measurement and FEM prediction. *Materials Science Forum*. 2003;426-432:435-440.
- 5- Kartal ME. Analytical solutions for determining residual stresses in two-dimensional domains using the contour method. *Proceedings. Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*. 2013;469(2159):1-20.
- 6- Mahmoodi M, Sedighi M, Tanner DA. Experimental study of process parameters' effect on surface residual stress magnitudes in equal channel angular rolled aluminium alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2014;228(12):1592-1598.
- 7- Hossain S, Daymond MR, Truman CE, Smith DJ. Prediction and measurement of residual stresses in

ضریب ناهمگنی در حالت‌های قبل و بعد از کوئنچ در ۳ محیط آب، روغن و نمک مذاب محاسبه شده و مقادیر آن در نمودار ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است کوئنچ در حمام نمک مذاب بیشترین همگنی را ایجاد کرده که به نمونه آنیل شده نزدیک است اما کوئنچ در آب کمترین همگنی را داشته که به دلیل تغییرات فاز و وجود تنش‌های پسماند فشاری و کششی شدید بین سطح و مرکز قطعه می‌باشد.

حمام نمک مذاب با توجه به نرخ پایین خنک‌کنندگی، ضمن ایجاد خواص همگن در نمونه، خطر وقوع اعوجاج در قطعه را طی عملیات حرارتی کوئنچ کاهش می‌دهد. هنگامی که قطعه‌ای با دمای بالا درون محیط‌های خنک‌کننده آب یا روغن قرار می‌گیرد در لحظه اول، اطراف قطعه حباب‌هایی شکل می‌گیرد که سبب پوشش قطعه شده و مانع انتقال حرارت می‌شوند و در ادامه با برطرف شدن این حباب‌ها انتقال حرارت به سرعت اتفاق می‌افتد اما خنک‌کردن در نمک مذاب از پوشش قطعه به وسیله حباب‌های گاز جلوگیری کرده و در نتیجه انتقال حرارت و کاهش دما به شکل یکنواخت‌تری در قطعه انجام می‌گیرد [26, 38].



نمودار ۷) مقایسه ضریب ناهمگنی قبل و بعد از کوئنچ در محیط‌های خنک‌کننده آب، روغن و نمک مذاب

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش فولاد پرکاربرد AISI 1045 به منظور بهبود خواص مکانیکی تحت عملیات حرارتی کوئنچ قرار گرفت و اثر محیط‌های خنک‌کننده آب، نمک مذاب و روغن بر استحکام، سختی، همگنی و تنش پسماند بررسی گردید. همچنین جهت بررسی دقت نتایج، عدم قطعیت تنش پسماند در روش کانتور مطالعه شد. نتایج تحقیق به طور خلاصه در ادامه بیان شده است:

۱- بر اساس نتایج، بیشترین استحکام تسلیم و نهایی با عملیات حرارتی کوئنچ در آب ایجاد شده و متعاقباً کمترین قابلیت افزایش طول نیز با کوئنچ در آب اتفاق می‌افتد. استحکام تسلیم و نهایی ناشی از کوئنچ در روغن و نمک مذاب به هم نزدیک بوده اما بیشترین قابلیت افزایش طول با کوئنچ در روغن حاصل می‌گردد. کوئنچ در روغن ضمن حفظ شکل‌پذیری نمونه سبب افزایش استحکام تسلیم و نهایی آن به ترتیب با مقادیر ۶۶ و ۲/۷٪ می‌گردد.

۲- با توجه به نتایج تنش پسماند، بیشترین تنش پسماند فشاری در سطح نمونه با کوئنچ در آب ایجاد شده و بیشترین عمق نفوذ تنش پسماند فشاری نیز در محیط آب حاصل می‌گردد. همچنین کمترین تنش پسماند از نظر مقدار و عمق نفوذ در محیط نمک مذاب ایجاد شده است.

۳- بررسی عدم قطعیت تنش پسماند نشان داد، خطای مدل بیشترین تأثیر را بر عدم قطعیت تنش پسماند داشته و تأثیر خطای جابجایی بر نتایج ناچیز است. بیشینه عدم قطعیت کل ۲۰/۶MPa بوده که معادل ۹٪ بیشینه تنش پسماند می‌باشد.

- Journal of Neutron Research. 2003;11(4):187-193.
- 23- DeWald AT, Rankin JE, Hill MR, Lee MJ, Chen H. Assessment of tensile residual stress mitigation in alloy 22 welds due to laser peening. Journal of Engineering Materials and Technology. 2004;126(4):1-9.
- 24- Nazari F, Honarpisheh M, Zhao H. Effect of stress relief annealing on microstructure, mechanical properties, and residual stress of a copper sheet in the constrained groove pressing process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019;102(9-12):4361-4370.
- 25- Raygan S, Rassizadehghani J, Askari M. Comparison of Microstructure and Surface Properties of AISI 1045 Steel After Quenching in Hot Alkaline Salt Bath and Oil. Journal of Materials Engineering and Performance. 2009;18(2):168-173.
- 26- Rassizadehghani J, Raygan S, Askari M. Comparison of the quenching capacities of hot salt and oil baths. Metal Science and Heat Treatment. 2006;48(5-6):193-198.
- 27- Malekan A, Pedram A, Raygan S, Rassizadeh Ghani J, Malekan M. The influence of alkaline salt bath quenching on the microstructure and mechanical properties of AISI D2 steel. Canadian Metallurgical Quarterly. 2014;53(1):88-92.
- 28- Olson MD, DeWald AT, Prime MB, Hill MR. Estimation of uncertainty for contour method residual stress measurements. Experimental Mechanics. 2015;55(3):577-585.
- 29- Adediran A, Aribio S, Amuda M. Mechanical properties of dual phase steel quenched in bitumen medium. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies. 2015;14(26):1-16.
- 30- Singh RR, Gaikwad A, Singh SS, Singh V. Comparison of mechanical properties of medium carbon steel with dual phase steel. International Journal of Mechanical Engineering. 2015;4(4):1-8.
- 31- Hassan SB, Balogun SO, Aigbodion VS. Hardening characteristics of medium carbon steel using fresh cassava liquid extract as quenchant. Journal of Metallurgy and Materials Engineering, 2009;4(2):55-61.
- 32- Dauda M, Kuburi LS, Obada DO, Mustapha RI. Effects of various quenching media on mechanical properties of annealed 0.509Wt% C -0.178Wt% Mn steel. Nigerian Journal of Technology. 2015;34(3):506-512.
- 33- Gündüz S, Çapar A. Influence of forging and cooling rate on microstructure and properties on medium carbon microalloy forging steel. Journal of Materials Science. 2006;41(2):561-564.
- 34- Callister WD. Fundamentals of materials science and engineering. 5th Edition. London, UK: Wiley; 2000.
- 35- Odusote JK, Ajiboye TK, Rabiou AB. Evaluation of mechanical properties of medium carbon steel quenched in water and oil. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2012;11(9):859-862.
- 36- Shirdel A, Khajeh A, Moshksar MM. Experimental and finite element investigation of semi-constrained groove pressing process. Materials and Design. 2010;31(2):946-950.
- 37- Honarpisheh M, Tavajjohi MH, Nazari F. Experimental and numerical study of severe plastic deformation in the constrained groove pressing process on the pure copper sheets. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(2):269-280. [Persian]
- 38- Liscic B, Tensi HM, Canale LCF, Totten GE. Quenching theory and technology. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor and Francis Group; 2010.
- quenched stainless-steel spheres. Materials Science and Engineering A. 2004;373(1-2):339-349.
- 8- Mahmoudi AH, Hossain S, Truman CE, Smith DJ, Pavier MJ. A new procedure to measure near yield residual stresses using the deep hole drilling technique. Experimental Mechanics. 2009;49(4):595-604.
- 9- Gorkunova ES, Zadvorkin SM, Gorulevac LS. Specific features of the determination of residual stresses in materials by diffraction techniques. AIP Conference Proceedings. 2017;1915(1):030006.
- 10- Jeanmart P, Bouvaist J. Finite element calculation and measurement of thermal stresses in quenched plates of high-strength 7075 aluminium alloy. Materials Science and Technology. 1985;1(10):765-769.
- 11- Kotobi M, Honarpisheh M. Through-depth residual stress measurement of laser bent steel-titanium bimetal sheets. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2018;53(3):130-140.
- 12- Kotobi M, Honarpisheh M. Experimental and numerical investigation of through-thickness residual stress of laser-bent Ti samples. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2017;52(6):347-355.
- 13- Nervi S, Szabo BA. On the estimation of residual stresses by the crack compliance method. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2007;196(37-40):3577-3584.
- 14- Robinson JS, Hossain S, Truman CE, Paradowska AM, Hughes DJ, Wimpory RC, Fox ME. Residual stress in 7449 aluminum alloy forgings. Materials Science and Engineering A. 2010;527(10-11):2603-2612.
- 15- Albertini G, Caglioti G, Fiori F, Pirling T, Stanic V, Wright J. Neutron diffraction measurement of residual stresses in AA6082 quenched samples. Materials Science Forum. 2000;347-349:598-602.
- 16- Amini S, Masoudi S, Amirian G. Effect of machining and quench-induced residual stress on the distortion of thin-walled parts. Modares Mechanical Engineering. 2016;15(12):357-366. [Persian]
- 17- Prime MB. Cross-sectional mapping of residual stresses by measuring the surface after a cut. Journal of Engineering Materials and Technology. 2001;123(2):161-168.
- 18- Honarpisheh M, Nazari F. Uncertainty analysis of contour method in the hot extruded Aluminum specimens. Modares Mechanical Engineering. 2017;17(5):439-445. [Persian]
- 19- Kartal ME, Turski M, Johnson G, Fitzpatrick ME, Gungor S, Withers PJ, Edwards L. Residual stress measurements in single and multi-pass groove weld specimens using neutron diffraction and the contour method. Materials Science Forum. 2006;524-525:671-676.
- 20- Alinaghian I, Honarpisheh M, Amini S. The influence of bending mode ultrasonic-assisted friction stir welding of Al-6061-T6 alloy on residual stress, welding force and macrostructure. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;95(5-8):2757-2766.
- 21- Alinaghian I, Amini S, Honarpisheh M. Residual stress, tensile strength, and macrostructure investigations on ultrasonic assisted friction stir welding of AA 6061-T6. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2018;53(7):030932471878976
- 22- Kelleher J, Prime MB, Buttle D, Mummery PM, Webster PJ, Shackleton J, Withers PJ. The measurement of residual stress in railway rails by diffraction and other methods.