



## ارائه روش عملیات حرارتی ویژه به منظور افزایش استحکام و کاهش وزن قسمت‌های فولادی سازه‌های ماشین‌های ابزار

سید مجید صافی<sup>۱\*</sup>، خلیل خلیلی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

\* بیرجند، صندوق پستی ۹۷۱۷۵/۶۱۵، safi@iauhvaz.ac.ir

### چکیده

یکی از علل اصلی ناپایداری در فرآیند ماشین‌کاری صلیبیت و استحکام نامناسب ماشین‌ابزار می‌باشد. بدین سبب پژوهشگران از دیرباز برای تقویت سازه‌های ماشین‌های ابزار از روش‌های گوناگونی همچون افزودن تینه‌ها به قسمت‌های مختلف سازه، انتخاب مواد دارای استحکام بالا و ارتقای خصوصیات میرایی با افزایش وزن سازه بهره گرفته‌اند. در این مقاله با استفاده از عملیات حرارتی ویژه‌ای تحت عنوان آستمپرینگ اصلاح‌شده، رویکردی جدید برای افزایش استحکام سازه و همچنین کاهش وزن قسمت‌های فولادی ماشین‌ابزار مورد توجه قرار گرفته است. تحقق این مهم بر کاهش هزینه ساخت ماشین‌ابزار نیز تاثیرگذار خواهد بود. بدین منظور فرآیند عملیات حرارتی مربوطه برای فولاد فوق‌مستحکم تجاری ASSAB705M طراحی گردیده و سپس نتایج این روش عملیات حرارتی ویژه با نتایج دیگر روش‌های عملیات حرارتی صورت پذیرفته بر روی این فولاد فوق‌مستحکم مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد روش پیشنهاد شده در این تحقیق، ساختار باینیت پایینی و مارتنزیت را در فولاد ایجاد می‌کند و بنابراین به طور همزمان استحکام و مقاومت به ضربه‌ی بالاتری را نسبت به دیگر عملیات حرارتی انجام شده در این تحقیق در پی داشته است. با توجه به نتایج، رویکرد عملیات حرارتی ارائه شده در سبک‌سازی و استحکام‌بخشی قسمت‌های فولادی سازه‌های ماشین‌های ابزار کارایی بسیار موثری خواهد داشت.

**کلید واژگان:** سازه‌ی ماشین‌ابزار، پایداری ماشین‌کاری، عملیات حرارتی آستمپرینگ کونچج سربالایی اصلاح‌شده، استحکام، چقرمگی

## A novel heat treatment method to increase strength and reduction of weight for steel parts of machine tool structures

Seyed Majid Safi\*, Khalil Khalili

Department of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

\* P.O.B. 97175-615, Birjand, Iran, safi@iauhvaz.ac.ir

### ABSTRACT

One of the key reasons for instabilities occurred in machining process is low rigidity and strength in machine tool structures. Thus, researchers have tried to cope with this problem by using different methods like rib enhancement, choosing proper materials and improving damping characteristics through increasing the weight. In this article, a new approach based on heat treatment of steel components is proposed in order to simultaneously increase strength and ductility of steels used in machine structure. This also allows cost reduction in manufacturing due to light-weight steel components. Also, a novel heat treatment process for steel ASSAB705M is designed and the results have been extracted from experiments. Moreover, comparison has been made between experiment results of conventional heat treatment methods and the novel method presented in this research. Results showed that the proposed technique of modified austempering causes lower bainite and martensite formation in specimens. This metallurgical structure produces high tensile strength and ductility, simultaneously. Therefore, this heat treatment approach can be effectively used for reducing the weight and cost of steel construction of the machine tool without adversely affecting its rigidity and damping characteristics.

**Keywords:** Machine Tool Structure, Machining Stability, Modified Austempering Technique, Strength, Toughness.

کوشنیر و همکارانش [۲] سه گزینه‌ی متعارف سازه‌ی فولادی جوشی،

چدن ریختگی و کامپوزیت‌های پلیمری را برای اجزای سازه‌ی ماشین‌های ابزار مورد مطالعه قرار داده‌اند. مشخص شده است که داشتن جرم بالاتر برای سازه خاصیت میراگری آن را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، مدول الاستیسیته‌ی پایین منجر به کاهش استحکام سازه‌ی ماشین‌های ابزار می‌شود که در سازه‌های بزرگ و عمودی این مشکل نمود بیشتری پیدا می‌کند. کوشنیر و همکارانش همچنین معیارهای مختلفی همچون چقرمگی استاتیک، چقرمگی ویژه، چقرمگی دینامیک و جرم سازه را برای انتخاب و طراحی سازه‌ی ماشین‌های ابزار پیشنهاد نموده‌اند [۲].

پرکاربردترین مواد برای اجزای ساختاری ماشین‌های ابزار فولاد و چدن

### ۱- مقدمه

استحکام و صلیبیت بالای سازه‌های ماشین‌های ابزار یکی از شروط اساسی در پایداری فرآیند ماشین‌کاری محسوب می‌شود. نیروهای ماشین‌کاری که در اثر تغییر شکل پلاستیک ناشی از برش فلزات به وجود می‌آیند، قابلیت تشدید و ایجاد ارتعاشات در سازه‌ی ماشین‌های ابزار را دارا هستند. برای نمونه پدیده‌ی ارتعاشات چتر که باعث اختلال در فرآیند ماشین‌کاری می‌شود از بارزترین موارد ناپایداری در عملیات ماشین‌کاری محسوب می‌گردد [۱]. به منظور بهبود شرایط پایداری فرآیند ماشین‌کاری مسئله‌ی طراحی ماشین‌های ابزار از دیرباز مورد توجه محققین بوده است.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

S. M. Safi, K. Khalili, A novel heat treatment method to increase strength and reduction of weight for steel parts of machine tool structures, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 495-500, 2015 (in Persian)

آگونوسوی و همکارانش [۱۲] تاثیر عملیات حرارتی را بر ریزساختار و خصوصیات مکانیکی آلیاژ فولاد ریختگی NF6357A بررسی نمودند. آنها در تحقیق خود برای افزایش مقاومت به خوردگی و چقرمگی فولاد پرآلیاژ پایه-کروم از عملیات آنلینگ، کوئنچ و تمپرینگ استفاده نمودند. نتایج نشان می‌دهد انتخاب عملیات حرارتی درست و ضخامت مناسب قطعات ریخته‌گری شده اثر زیادی بر بهبود خواص مقاومت به خوردگی دارا می‌باشد.

در سال‌های اخیر جهت بهبود خواص مکانیکی فولادها، روش‌های متنوع عملیات حرارتی از جمله آستمپرینگ اصلاح شده [۱۳، ۱۴]، آستنیت‌زدن کوتاه مدت [۱۵]، جلوگیری از سرد شدن ناگهانی [۱۶]، عملیات حرارتی پی‌درپی [۱۷، ۱۸] و کوئنچ کردن مرحله‌ای [۱۹، ۲۰] ارائه شده است.

روش عملیات حرارتی پیشنهاد شده در این مقاله، رویکردی را ارائه می‌دهد که هر دو نیاز چقرمگی و استحکام را به صورت هم‌زمان و در جهت بهبود خصوصیات مکانیکی سازه‌ی ماشین‌ابزار، برآورده می‌سازد. در این مقاله نتایج آزمایشگاهی تأثیرات روش جدید بر خواص مکانیکی فولاد ASSAB705M در دمای محیط، با روش‌های سنتی عملیات حرارتی از جمله آستمپرینگ هم‌دم و آستمپرینگ پی‌درپی مقایسه شده است. نزدیک‌ترین استانداردها به فولاد ASSAB705M عبارت از JIS SNCM8، AISI/SAE4340 و DIN34CrNiMo6 می‌باشند.

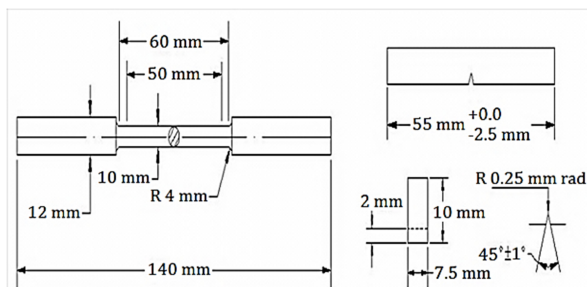
در این مقاله، در ادامه مراحل انجام آزمایشات بیان شده است. و سپس نتایج ارائه شده و بحث و بررسی به عمل آمده است.

## ۲- مراحل انجام آزمایشات

در این تحقیق از فولاد تجاری ASSAB705M استفاده شده است. فولاد به صورت قطعات با ابعاد ۲۵ میلی‌متری انتخاب شده است. ترکیب شیمیایی فولاد (برحسب درصد وزنی) و همچنین دماهای شروع فازهای مارتنزیت و بینیت در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین برای آستنیت‌زدن این فولاد از دمای ۸۰۰ درجه و با مدت زمان ۶۰ دقیقه استفاده شده است. در شکل ۲ نمونه‌ی مربوط به آزمایش کشش و ضربه نشان داده شده است. همچنین خواص مکانیکی نمونه خام فولاد ASSAB705M در دمای محیط در جدول ۲ آورده شده است. Ms دمای شروع تشکیل مارتنزیت و Bs دمای شروع تشکیل بینیت نیز برای فولاد مربوطه در جدول ۲ ارائه شده است.

جداول مربوط به عملیات‌های حرارتی به کار برده شده در این تحقیق در جدول ۳ ارائه شده است. تمامی نمونه‌ها در کوره حمام نمک عملیات حرارتی شده‌اند. خواص مکانیکی با استفاده از آزمایشات کشش و ضربه چارپی بدست آمده است.

نمونه‌های آزمایش کشش طبق استاندارد DIN 50125 و آزمایش ضربه چارپی طبق استاندارد ASTM E32 تهیه شده است. قطعات آزمایشی در



شکل ۲ ابعاد نمونه‌های تست کشش و ضربه‌ی مورد استفاده

می‌باشند. استفاده از فولاد، بیشتر در سازه‌هایی که از فرآیند جوش کاری برای انجام اتصال استفاده می‌شود مرسوم می‌باشد. همچنین قطعاتی همچون سردستگاه ماشین‌ابزار از فولاد ریختگی ساخته می‌شوند. مزایای فولاد نسبت به دیگر گزینه‌ها ارزان بودن و قابلیت ماشین‌کاری خوب آن می‌باشد. همچنین فولاد دارای مدول الاستیسیته‌ی بالا و نسبت وزن به چقرمگی بسیار خوبی است. البته یکی از خصوصیات منفی قطعات و سازه‌های فولادی نسبت به چدن‌ها میراگری پایین‌تر آن‌ها می‌باشد [۳].

سیمون و همکارانش [۴] بهبود صلیبیت استاتیکی ماشین‌ابزار را با استفاده از سازه فولادی توخالی که توسط بتن توپرسازی شده است، مورد بررسی قرار داده‌اند. در شکل ۱ قسمتی توپرسازی شده از یک سازه‌ی ماشین‌ابزار نشان داده شده است. ساخت سازه‌ی ماشین‌ابزار با در نظر گرفتن الزامات استحکام، چقرمگی و میرایی ارتعاشات باید مقرون به صرفه باشد. یکی از روش‌های کاهش هزینه‌ی ساخت، استفاده از سازه‌های فولادی-بتنی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از سازه‌های فولادی-بتنی می‌توان هر دو خصوصیت جرم و میراگری را به صورت هم‌زمان بهبود بخشید و در عین حال هزینه‌ی ساخت سازه را به طرز چشمگیری کاهش داد.

از سوی دیگر، از بیش از ۵۰ سال قبل، محققان تاثیر ریز ساختار را بر ویژگی‌های مکانیکی فولاد مورد بررسی قرار داده‌اند و در این خصوص مقوله‌ی عملیات حرارتی به طور قابل‌ملاحظه‌ای واکاوی شده است. یکی از زمینه‌های تحقیقاتی کلیدی، عملیات حرارتی فولادهای فوق‌مستحکم می‌باشد که کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله سازه‌های فضاپیماها، صنایع هوافضا و همچنین سازه‌های ماشین‌های ابزار دارد [۵-۸]. بسیاری از قطعات ماشین‌های ابزار همچون چرخ‌دنده‌ها، محورها، قسمت‌های گیربندی و اجزای بدنه از قطعات فولادی فوق‌مستحکم ساخته می‌شوند که معمولاً فرآیندهای حرارتی همچون کربوریزه کردن، کوئنچ و تمپرینگ برای رسیدن به ترکیبی از خصوصیات استحکام و چقرمگی بر روی آن‌ها انجام می‌شود. توانایی دست-یابی به استحکام و چقرمگی بالا با استفاده از عملیات حرارتی یکی از مزایای اصلی آلیاژهای فولادی فوق‌مستحکم است. هر چند که ایجاد تنش‌های داخلی و اعوجاج از پیامدهای عملیات حرارتی می‌باشد [۹] که بایستی با عملیات حرارتی تکمیلی اصلاح شوند. ناسی [۱۰] در پژوهش خود تاثیر عملیات حرارتی را بر رفتار خستگی فولاد آلیاژی A193-51T-B7 مورد استفاده در سازه‌های ماشین‌ابزار مطالعه نموده است. عملیات حرارتی انجام شده به ترتیب آنلینگ، کوئنچینگ و تمپرینگ در دمای ۲۰۰ درجه بوده است که نتایج نشان می‌دهد رشد ترک در نمونه‌ی عملیات حرارتی شده بسیار کمتر از نمونه‌ی معمولی بدون عملیات حرارتی می‌باشد. فیلهو و همکارانش [۱۱] عملیات حرارتی سازه‌های تجهیزات ساخته شده از فولادهای آلیاژی جوش‌پذیر را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها در تحقیق خود عملیات حرارتی نرمالیزه کردن را به صورت موفقیت‌آمیز برای بهبود خصوصیات استحکام و مقاومت به ضربه سازه‌های جوشی استفاده نموده‌اند.



شکل ۱ قسمتی از یک سازه‌ی فولادی ماشین‌ابزار توپرسازی شده توسط بتن [۴]

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد استفاده شده برحسب درصد وزنی

C	Si	S	P	Mn
۰/۳۳	۰/۳۰۲	۰/۰۲۶	۰/۰۱۶	۰/۶۶۶
W	Ti	As	Sn	Co
۰/۰۰۸	۰/۰۰۴	۰/۰۰۹	۰/۰۱	۰/۰۱۴
Ni	Cr	Mo	V	Cu
۱/۲۴۷	۱/۲۶۳	۰/۱۴۵	۰/۰۰۸	۰/۲۱۲
Al	Pb	Zr	Zn	Bi
۰/۰۱۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱

$$M_s=340^{\circ}\text{C}, B_s=534^{\circ}\text{C}$$

ابعادی بزرگ‌تر از ابعاد مطلوب نهایی پیش از عملیات حرارتی، ماشین‌کاری شده‌اند. پس از عملیات حرارتی قطعات به اندازه نهایی خود رسیده‌اند.

آزمایش کشش در دمای محیط ( $20^{\circ}$ ) با یکارگیری یک دستگاه کشش با نیروی  $50\text{KN}$  و نرخ ثابت کشش  $6\text{mm/min}$  انجام شده است. نمونه‌های آزمایش ضربه چارپی نیز در دمای محیط ( $20^{\circ}$ ) در ماشین ضربه چارپی شکسته شده‌اند. نمونه‌ها، توسط آزمایش سختی سنجی ویکرز و با نیروی معادل  $30\text{KN}$  تست شده‌اند.

### ۳- نتایج آزمایشات و بحث و بررسی

از آن‌جا که خواص مکانیکی به ریز ساختار بستگی دارد، بررسی و آزمایش تأثیرات ریز ساختار بر استحکام و داکتیلیتی، از اهمیت خاصی در تحقیقات برخوردار است [۶]. نتایج آزمایش‌های استحکام کششی در دمای محیط، مقاومت به ضربه آزمایش چارپی، داکتیلیتی شکست، کاهش سطح مقطع، درصد افزایش طول قطعه و سختی فولاد پس از انجام عملیات حرارتی متنوع به ترتیب در شکل‌های ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، و ۸ نشان داده شده است. نتایج با استفاده از میانگین‌گیری از ۳ اندازه‌گیری حاصل شده است.

در گام نخست، تأثیرات دما بر روش آستمپرینگ هم‌دما (IA1 و IA2) مورد آزمایش قرار گرفته است. شروع واکنش بینیتی با جوانه‌زنی فریت بینیتی همراه است. نرخ رشد جوانه زنی به دما بستگی دارد [۲۲] و علت آن تغییر شکلی است که اساساً با دما رخ می‌دهد [۲۲، ۲۳].

بر اساس پدیده جوانه‌زنی ناقص بینیت [۲۴، ۶]، ترکیب ساختار در IA1 شامل بینیت بالایی به همراه مقدار کمی از آستنیت باقی مانده است و ترکیب ساختار در IA2 نیز شامل بینیت پائینی به همراه مقدار کمی از آستنیت باقی مانده است [۲۵].

همان‌گونه که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، با کاهش دما استحکام کششی و مقاومت به ضربه افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که تمامی عواملی که موجب افزایش استحکام می‌شوند، اثرات مخربی بر داکتیلیتی دارند که البته کاهش در اندازه ریز ساختار و همچنین کاهش اندازه دانه‌های آستنیت قبلی در این مورد استثنا محسوب می‌شوند [۲۶].

بنابراین کاهش دما، موجب افزایش نرخ جوانه‌زنی بینیت و همچنین کاهش اندازه کاربیدها می‌شود. به همین ترتیب، سمانتیت موجود در بینیت بالایی موجب کاهش انرژی ضربه می‌شود [۲۷].

جدول ۳ برنامه‌ی عملیات حرارتی

نام عملیات حرارتی	شرح فرآیند عملیات حرارتی	نتیجه‌ی ریزساختار
۱- آستمپرینگ هم‌دما (IA1)	آستنیت‌کردن در دمای $800^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد به مدت $3600$ ثانیه، آستمپر کردن در دمای $430^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد به مدت $1000$ ثانیه، سرد کردن در هوا.	بینیت بالایی
۲- آستمپرینگ هم‌دما (IA2)	آستنیت‌کردن در دمای $800^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد به مدت $3600$ ثانیه، آستمپر کردن در دمای $360^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد به مدت $1000$ ثانیه، سرد کردن در هوا.	بینیت پائینی
۳- آستمپرینگ پی‌درپی (SA1)	آستنیت‌کردن در دمای $800^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد به مدت $3600$ ثانیه، حرارت دادن در دمای $430^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد به مدت $60$ ثانیه، سرد کردن در هوا.	ترکیب بینیت بالایی و بینیت پائینی در حالی که میزان بینیت پائینی بیشتر است.
۴- آستمپرینگ پی‌درپی (SA2)	آستنیت‌کردن در دمای $800^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد به مدت $3600$ ثانیه، حرارت دادن در دمای $430^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد به مدت $60$ ثانیه، سرد کردن در هوا.	ترکیب بینیت بالایی و بینیت پائینی در حالی که میزان بینیت بالایی بیشتر است.
۵- کوئنچ سریالا (UQA)	آستنیت‌کردن در دمای $800^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد به مدت $3600$ ثانیه، کوئنچ کردن در دمای $120^{\circ}\text{C}$ ثانیه، آستمپر کردن در دمای $500^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد به مدت $1000$ ثانیه، سرد کردن در هوا.	ترکیب بینیت بالایی و مارتنزیت تمپر شده
۶- آستمپرینگ اصلاح‌شده (MA)	آستنیت‌کردن در دمای $800^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد به مدت $3600$ ثانیه، کوئنچ کردن در دمای $120^{\circ}\text{C}$ ثانیه، آستمپر کردن در دمای $400^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد به مدت $1000$ ثانیه، سرد کردن در هوا.	ترکیب بینیت پائینی و مارتنزیت تمپر شده

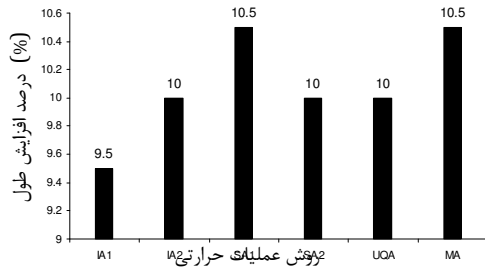
در گام دوم، تأثیرات آستمپرینگ پی‌درپی بر خصوصیات مکانیکی مورد آزمایش قرار گرفت (SA1 و SA2). دو عامل مهم در بررسی واکنش آستمپرینگ پی در پی عبارتند از:

۱. دمای آستمپرینگ بالایی و آستمپرینگ پائینی

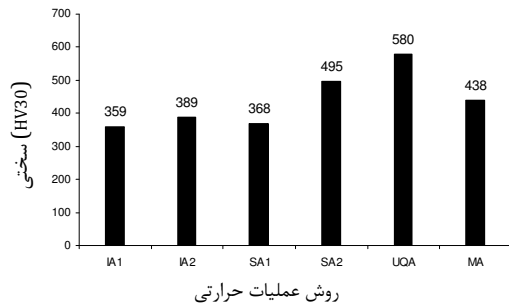
۲. زمان واکنش در آستمپرینگ بالایی [۲۸].

جدول ۲ خواص مکانیکی فولاد خام ASSAB705M

سختی (HV30)	درصد افزایش طول (%)	کاهش سطح مقطع (%)	داکتیلیتی شکست انرژی ضربه (J)	استحکام کششی (MPa)
۳۳۷	۱۷	۵۷	۷۰	۹۷۲



شکل ۷ نتایج کاهش درصد افزایش طول برای فولاد مربوطه در عملیات حرارتی مختلف



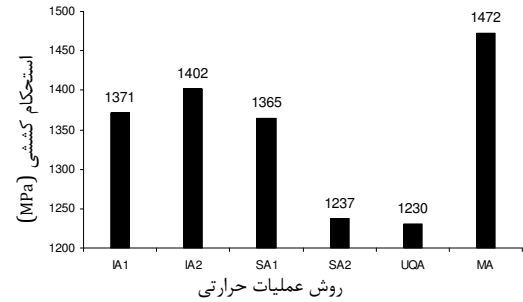
شکل ۸ نتایج آزمایش سختی برای فولاد مربوطه در عملیات حرارتی مختلف

می‌دهد [۲۹]. بنابراین پس از عملیات حرارتی SA2 و SA1 ساختاری ترکیبی از بینیت بالایی و بینیت پایینی و مقدار اندکی از آستنیت باقی مانده ایجاد می‌شود. همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، بیشترین میزان استحکام پس از SA1 حاصل می‌شود که علت آن به دلیل وجود بینیت پایینی به همراه میزان اندکی از بینیت بالایی در ساختار است. پس از SA2 افزایش مقاومت به ضربه قابل مشاهده است و دلیل آن پایداری آستنیت باقی مانده، کاهش تنش کوئنچ به وسیله کوئنچ مرحله‌ای و ساختار ترکیبی کامپوزیتی شامل بینیت بالایی و بینیت پایینی می‌باشد.

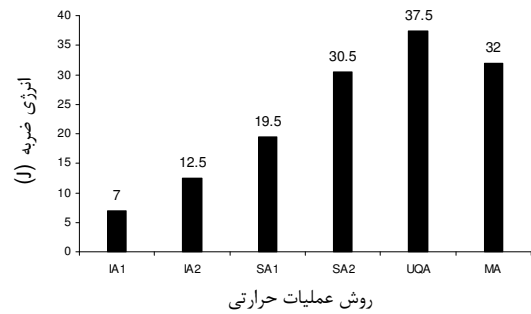
در گام سوم، تأثیرات آستمپرینگ کوئنچ سر بالا بر خصوصیات مکانیکی مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. این روش شامل کوئنچ در دمایی پایین‌تر از دمای شروع تغییر فرم مارتنزیت ( $M_s$ ) و سپس حرارت دادن در دمای بالاتر، پیش از خنک‌کاری نهایی می‌باشد. بنابراین ساختاری ترکیبی از مارتنزیت تمپر شده، بینیت بالایی و مقدار اندکی از آستنیت باقی مانده پس از عملیات حرارتی UQA بدست می‌آید. از سوی دیگر برای عملیات حرارتی ویژه ارائه شده در این مقاله (MA) ساختار ترکیبی از مارتنزیت تمپر شده و بینیت پایینی و مقدار اندکی از آستنیت باقی مانده بدست خواهد آمد.

در توضیح این مسئله می‌توان عنوان نمود که صفحات مارتنزیتی تمپر شده، دانه‌های آستنیت را تقسیم‌بندی کرده و استحکام بخشی ساختار بر اساس رابطه‌ی هال-پچ [۷] بدست می‌آید. در شکل ۳ قابل مشاهده است که استحکام، با ترکیبی از بینیت پایینی و مارتنزیت تمپر شده بیشتر شده است. کاهش استحکام در روش UQA به دلیل اندازه بینیت بالایی و کاهش دانسیته نایجانی‌ها می‌باشد.

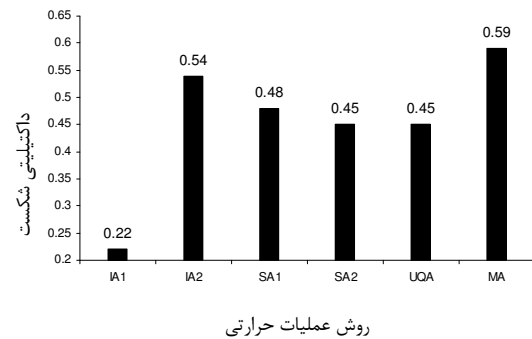
شایان ذکر است که عملیات حرارتی آستمپرینگ کوئنچ سربالای ارائه



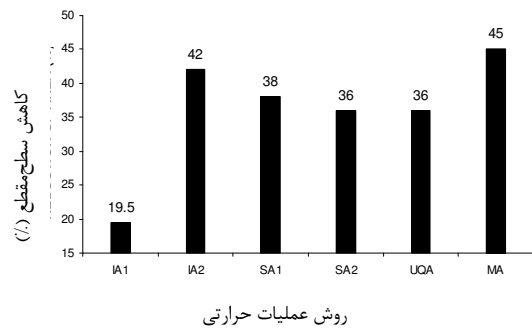
شکل ۳ نتایج استحکام کششی برای فولاد مربوطه در دمای محیط برای عملیات حرارتی مختلف



شکل ۴ نتایج انرژی ضربه برای فولاد مربوطه در عملیات حرارتی مختلف



شکل ۵ نتایج داکتیلیتی شکست برای فولاد مربوطه در عملیات حرارتی مختلف



شکل ۶ نتایج کاهش سطح مقطع برای فولاد مربوطه در عملیات حرارتی مختلف

زمان آستمپرینگ بالایی، زمان واکنش در آستمپرینگ پایینی را افزایش

بالاترین سطح خود می‌رسد. در حالی که روش‌های سنتی عملیات حرارتی فولادهای فوق مستحکم نمی‌توانند هر دو پارامتر استحکام و داکتیلیتی را به صورت همزمان در بالاترین سطح داشته باشند.

یکی از زمینه‌های کاربرد این روش در عملیات حرارتی قسمت‌های فولادی سازه‌های ماشین ابزار می‌باشد که در این مقاله مورد بحث قرار گرفته است. در این خصوص سازه‌های توپرسازی شده توسط بتن نیز به عنوان نمونه‌ای کاربردی اشاره گردید. از سوی دیگر در این مقاله نشان داده شده است که روش عملیات حرارتی ویژه آستمبرینگ اصلاح شده برای عملیات حرارتی انواع فولادهای فوق مستحکم قابل اجرا می‌باشد و برای انواع قطعات فولادی سنگین و سبک قابل استفاده است. با توجه به این مسئله می‌توان از قابلیت‌ها و ویژگی‌های این روش برای استحکام بخشی و سبک‌سازی سازه‌های ماشین‌ابزار به صورت مقرون‌به‌صرفه و موفقیت‌آمیز بهره جست.

#### ۵- مراجع

- Y. Altintas, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*, Second Edition, pp. 125-178, Cambridge University Press, 2012.
- E. F. Kushnir et al., Material Considerations in Optimization of Machine Tool Structure, *Proceedings of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pp. 1-12, New York, November 11-16, 2001.
- N. L. de Lacalle, *Machine Tools for High Performance Machining*, pp. 47-72, Springer-Verlag London, 2009.
- M. Simon, STUDY OF IMPROVING STATIC RIGIDITY ON MACHINE TOOL STRUCTURE USING CONCRET COMPONENTS, *In The 6th edition of the Interdisciplinarity in Engineering International Conference*, pp. 26-29, Petru Maior University of Tirgu Mures, Romania, 2012.
- L. C. F. Cananle, J. Vatauvuk, G. E. Totten, Introduction to steel heat treatment, *Comprehensive Materials Processing*. Vol 12, pp.3-37, 2014,
- H. Bhadeshia, *Bainite in steels: Transformation, Microstructure and Properties*, Second Edition, London: IOM Communications, Institute of Materials, 2001.
- Y. Tomita, Improved low temperature mechanical properties of 0.4C-Cr-Mo-Ni steel through modified heat treatments, *Materials Science and Technology*, Vol. 6, pp. 843-849, 1990
- J.M.Tartaglia, The effects of martensite content on the mechanical properties of quenched and tempered 0.2C-Ni-Cr-Mo steels, *Materials Engineering and Performance*, Vol. 19, pp. 572-584, 2010.
- B. L. Ferguson, Z. Li, A.M. Freborg, Modeling heat treatment of steel parts, *Journal of Computational Materials Science*, Vol. 34, pp. 274-281, 2005.
- S. M. Nacy, Effect of Heat treatment on Fatigue Behavior of A193-51T-B7 Alloy Steel, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, Vol. II, London, U.K., 2007.
- V. Filho et al, Normalizing Heat Treatment Effect On Low Alloy Steel Weld Metals, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 16, pp. 62-66, 2004.
- J. O. Agunsoye et al., Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of NF6357A Cast Alloy for Wear Resistance Application, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, Vol. 10, No.11, pp.1077-1086, 2011.
- J. M. Tartaglia, K. L. Hayrynen, A comparison of fatigue properties of austempered versus quenched and tempered 4340 steel, *Materials Engineering and Performance*, Vol. 21, pp. 1-17, 2012.
- Y. Tomita, Effect of modified austempering on tensile properties of 0.52C steel, *Materials Science and Technology*, Vol. 11, pp.994-997, 1995.
- R. O. Ritchie, J. F. Knott, The influence of high austenitizing temperatures and overheating on fracture and fatigue crack propagation in a low alloy steel, *Metallurgical and Materials: Transactions B*, Vol. 5, pp. 782-785, 1974.
- V. K. Zablotskii, V. I. Shimko, A. I. Shimko, Power saving heat treatment of steels with the use of the heat of structural and phase transformations, *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 56, pp. 70-73, 2014.
- R. Padmanabham, W. E. Wood, Micro structural analysis of a multistage heat treated ultrahigh strength low alloy steel, *Materials Science and Engineering*, Vol. 66, No. 2, pp. 125-143, 1984.
- Y. Tomita, K.Okabayashi, Modified heat treatment for lower temperature improvement of the mechanical properties of two ultrahigh strength low alloy steels, *Metallurgical and Materials: Transactions A*, Vol. 16, pp. 83-91, 1984.
- W. E. Wood, Discussion of evaluation of toughness in AISI4340 alloy steel austenitized of low and high temperatures, *Metallurgical and Materials: Transactions A*, Vol. 8, pp. 1195-1196, 1977.
- W. E. Wood, Discussion of evaluation of toughness in AISI4340 alloy steel austenitized of low and high temperatures, *Metallurgical and*

شده توسط تومیتا [7]، در این تحقیق مورد اصلاح قرار گرفته است. دمایی ارائه شده برای آستنیت‌دهی کردن ۸۶۰ درجه سانتی‌گراد بوده است که در این مقاله دما به ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. زمان آستمبرینگ ارائه شده توسط تومیتا ۷۲ کیلو ثانیه بود که غیراقتصادی به نظر می‌رسد. زیرا واکنش بینیتی تقریباً پس از ۱ کیلو ثانیه کامل می‌شود و مابقی زمان نقش کوچکی در تکمیل واکنش دارد [۲۷]. بنابراین در این تحقیق زمان واکنش ۱۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. در روش ارائه شده توسط تومیتا از کوئنچ کردن در آب در پایان عملیات حرارتی استفاده شده است. حال آنکه در این تحقیق از خنک‌کاری توسط هوا استفاده گردیده است. زیرا خنک‌کاری در آب موجب بروز تنش بیشتر در نمونه‌ها می‌شود. ترکیب پیشنهادی در روش معمول ارائه شده توسط تومیتا شامل مارتنزیت تمپر شده و بینیت بالایی است (UQA) می‌باشد، در حالی که در این مقاله با ارائه‌ی روش MA ساختاری ترکیبی از مارتنزیت تمپر شده و بینیت پایینی بدست آمده است که به مراتب ترکیب بهتری از استحکام و داکتیلیتی را ارائه می‌دهد.

دلیل علمی استفاده از روش اصلاحی ارائه شده در این مقاله به این حقیقت باز می‌گردد که افزایش دانسیته نابعثی‌ها موجب بهبود شرایط می‌شود. در نتیجه‌ی افزایش دانسیته نابعثی‌ها، کاهش مقدار کاربیدهای واقع در مرز دانه‌ها (سمانتیت) و افزایش مقدار کاربیدهای ریز درون دانه‌ای به وقوع خواهد پیوست.

روش نوین آستمبرینگ اصلاح شده ارائه شده در این مقاله، به دلیل ساده بودن فرآیند برای انواع فولادهای فوق مستحکم قابل کاربرد است و مزایای اقتصادی چشمگیری در پی خواهد داشت. روش آستمبرینگ ارائه شده به مراتب تأثیرات بهتری در بهبود استحکام و داکتیلیتی در فولادهای فوق مستحکم در مقایسه با روش‌های سنتی عملیات حرارتی خواهد داشت. استفاده از روش پیشنهادی برای عملیات حرارتی قطعات سنگین منجر به سبک‌سازی این قطعات خواهد شد و ترکیب آن با روش‌های ترمومکانیکال باعث بهبود بیشتر خواص مکانیکی می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله رویکردی جدید برای سبک‌سازی و استحکام بخشی همزمان قسمت‌های فولادی سازه‌های ماشین ابزار ارائه شده است. این روش بر مبنای انجام عملیات حرارتی ویژه‌ای تحت عنوان آستمبرینگ اصلاح شده می‌باشد که در این کار پژوهشی عملیات حرارتی مربوط به آن بر روی فولاد ASSAB705M طراحی و به انجام رسیده است. همچنین چندین روش عملیات حرارتی متداول نیز برای انجام مقایسه با نتایج روش ارائه شده در این مقاله بر روی فولاد مورد نظر صورت پذیرفت. در ادامه آزمایش‌های فراوانی برای دستیابی به خصوصیات مکانیکی فولاد مربوطه در نتیجه‌ی هر کدام از عملیات حرارتی اجرا شده صورت پذیرفت که در قسمت ۳ به طور کامل به آن پرداخته شده است. با توجه به مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی خصوصیات مکانیکی فولاد ASSAB705M پس از عملیات‌های حرارتی مختلف، برتری روش عملیات حرارتی ویژه‌ی ارائه شده در این پژوهش را به طور خلاصه به صورت زیر می‌توان بیان نمود:

۱. حداکثر استحکام، حداکثر داکتیلیتی شکست، حداکثر درصد افزایش طول و انرژی ضربه بسیار خوب نسبت به دیگر روش‌های عملیات حرارتی
۲. افزایش کاربیدهای ریز درون دانه‌ای در روش ارائه شده
۳. همان‌گونه که نتایج عملیات حرارتی نشان می‌دهد، روش ارائه شده نه تنها منجر به افزایش استحکام می‌شود، بلکه به طور هم زمان داکتیلیتی به

- on anisotropy of mechanical properties in normalized C-Mn steels, *Metallurgical and Materials: Transactions A*, Vol. 14, pp. 271-283, 1983.
- [27] G. Baozhu, G. Krauss, The effect of low temperature isothermal heat treatment on the fracture of 4340 steel, *Journal of Heat Treating*, Vol. 4, pp. 365-372, 1986.
- [28] R. F. Hehemann, A. R. Troiano, Characteristics and stabilization of the bainite reaction, *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, Vol. 200, pp. 1272-1280, 1954.
- [29] L. D. Jaffe, Anisothermal formation of bainite and proeutectoid constituents in steels, *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, Vol. 176, pp. 363-371, 1948.
- Materials: Transactions A*, Vol. 8, pp. 1195-1196, 1977.
- [21] H. Bhadeshia, Bainite: mobility of the transformation interface, *Journal de Physique*, Vol. 43, No. 12, pp. 437-441, 1982.
- [22] H. Bhadeshia, D. V. Edmonds, The mechanism of bainite formation in steels, *Acta Metallurgica*, Vol. 9, pp. 1265-1270, 1980.
- [23] G. Spanos, H. S. Fang, H. I. Aaronson, A mechanism for the formation of lower bainite, *Metallurgical and Materials: Transaction A*, Vol. 21, No. 6, pp. 1381-1390, 1990.
- [24] K. Tsuzaki, T. Maki, Some aspects of bainite transformation in Fe-based alloys, *Journal de Physique*, Vol. 5, pp. 61-70, 1995.
- [25] R. F. Hehemann, The bainite transformation, *In The ASM International Phase Transformation Conference*, Ohio, USA, PP. 397-432, 1970.
- [26] W. A. Spitzig, Effect of sulfide inclusion morphology and pearlite banding