

# اثر فرآیند مارتمپرینگ پله ای و ناهمسانگردی بر میزان تابیدگی و اعوجاج فولاد ابزار گرم کار نورد سرد شده

جمال‌الدین فرشته خصلت<sup>۱</sup>، سید حسین رضوی<sup>۲</sup>، اشکان نوری<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج. (پست الکترونیک: jamaleddin1976@yahoo.com)

۲- دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران. (پست الکترونیک: hrazavi@iust.ac.ir)

۳- استادیار گروه مهندسی مواد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اراک. (پست الکترونیک: a-nouri@araku.ac.ir)

## Influence of the Step Martempering and Anisotropy on the Distortion Value a Cold Rolled Hot Work Tool Steel

J.Fereshtekheslat<sup>1</sup>, S.H. Razavi<sup>2</sup>, A. Nouri<sup>3\*</sup>

1- MSc, Islamic Azad University, Department of Materials Engineering and Metallurgy, Karaj Branch., E-Mail: Jamaled-din1976@yahoo.com

2- Associate professor, Department of Materials Engineering and Metallurgy, Iran University of Science and Technology, E-Mail: hrazavi@iust.ac.ir

3- Assistant professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, E-Mail: a-nouri@araku.ac.ir

### چکیده

در این تحقیق نقش ناهمسانگردی ساختاری ناشی از نورد سرد بر میزان تابیدگی و اعوجاج یک فولاد ابزار گرم کار مورد استفاده در قالب سازی قبل و بعد از عملیات حرارتی سخت کاری مورد مطالعه واقع شد. برای عملیات سخت کاری از فرآیند مارتمپرینگ پله ای استفاده شد. میزان تابیدگی در سه وضعیت شامل پس از ماشین کاری، پس از تنش گیری و پس از مارتمپرینگ از طریق فاکتور تختی مورد سنجش واقع شد. به منظور بررسی تاثیر ناهمسانگردی بر میزان اعوجاج فولاد، بسته به جهت نورد نمونه هایی در سه وضعیت هندسی تهیه شدند. میزان تابیدگی در نمونه ها قبل از مارتمپرینگ بسیار ناچیز و تابع جهت گیری نمونه ها نبوده و یک خاصیت همسانگرد می باشد. نتایج نشان داد که انجام مارتمپرینگ موجب اعوجاج فولاد شده و این تابیدگی بسته به هندسه نمونه برداری متفاوت است که مبین آن است که تابیدگی در فولاد سخت شده یک خصوصیت ناهمسانگرد است. کمترین اعوجاج مربوط به نمونه هایی بود که عمود بر جهت نورد تهیه شده بودند. اندازه گیری سختی نمونه ها نشان داد که برخلاف تابیدگی، سختی قبل و بعد از سخت کاری یک ویژگی همسانگرد و مستقل از جهت نمونه برداری است.

واژه‌های کلیدی: عملیات حرارتی، مارتمپرینگ، اعوجاج، ناهمسانگردی ساختاری، تختی

### Abstract

In this investigation, the role of the structural anisotropy due to cold rolling on the distortion value of hot work tool steel employing in moulding before and after the hardening heat treatment was studied. For the hardening treatment, was used a step martempering process. Distortion amount was calculated by flatness factor in 3 states; after machining, after stress relief treatment and after martempering. For purpose of the consideration of the anisotropy effect on the steel distortion, dependent on the rolling direction, were prepared samples in 3 geometrical states. Before martempering, the distortion value of samples is very low and negligible. It is also independent on the sampling direction. Thus it is an isotropic characteristic. Results revealed that distortion is induced in the martempered steel. It is also significantly different in various directions of sampling. It is implied that in the hardened steel, distortion is an anisotropic property. The lowest distortion is belonging to sample which is perpendicular to rolled direction. Hardness measurement shows that this specification is an isotropic property both before and after hardening and is not affected by the geometrical direction of sampling.

**Keywords:** Heat treatment, Martempering, Distortion, Structural anisotropy, Flatness

(کد: ۹۱۱۰۶۲)

تغییرات ابعادی را به حداقل رسانده یا جبران می‌کند ولی با این حال پیش بینی دقیق تغییرات ابعادی در اثر سخت کاری به ویژه در قطعات با اشکال پیچیده نیاز به بررسی‌های دقیق دارد. لذا، تشخیص ویژگی‌های فرآیند کوئنچ و مدل سازی ریاضیاتی فرآیند عملیات حرارتی به منظور پیش بینی اعوجاج و تنش‌های پس ماند حائز اهمیت است [۱۷-۲۳]. به طور مثال Denis و همکاران [۲۴] و [۲۵] اثرات تنش را روی سینتیک استحاله فازی و پلاستیسیته ناشی از استحاله مطالعه کرده اند. Inoue و همکاران [۲۶] رابطه بین تنش‌های پس ماند و استحاله فازی را بررسی نموده اند. همچنین می‌توان به مطالعه و مدل سازی ارتباط بین سینتیک استحاله و اعوجاج در حین کوئنچ در روغن برای فولاد AISI 5120 اشاره کرد [۲۷].

فرآیند نورد، متداولترین و پررونق ترین روش تولید فرآورده‌های فلزی به ویژه فولادهاست. به گونه‌ایکه بیش از ۸۰٪ از فرآورده‌های فلزی با این روش تولید می‌شود. نورد سرد موجب ایجاد ریزساختاری متفاوت در جهت مختلف می‌شود که در ادامه این جهت دار شدن ریزساختار، جهت دار شدن خواص رخ می‌دهد. جهت دار بودن خواص مکانیکی اصطلاحاً «ناهمسانگردی» نامیده می‌شود [۲۸]. در حقیقت دانه‌های فلز در جهت نورد کشیده می‌شوند و به طور کلی دانه بندی در جهت نورد با جهت عمود بر نورد با هم متفاوت می‌شوند [۲۸]. ضمن این که برخی از فازهای رسوبی و ترکیبات نیز کشیده شده و تغییر آرایش می‌دهند که در نتیجه موجب تغییر ریزساختار نوردی با ساختار ریختگی شده و اینکه یک ناهمسانگردی ساختاری را در محصولات موجب می‌شود که بی شک بر عملیات حرارتی بعدی تاثیرگذار است [۲۹]. چنانچه همسانی (ایزوتروپی) را داشتن خواص یکسان یا نزدیک به هم در جهت مختلف بدانیم؛ در فرآیند نورد بدلیل بهم ریختن ریزساختار و آرایش دانه‌ها نسبت به جهت نورد، خواص مختلفی را در جهات مختلف خواهیم داشت. انتظار می‌رود نتایج آزمون کشش تک محوری بر روی نمونه‌های فولادی نورد شده در زوایای مختلف (۰، ۴۵ و ۹۰ درجه) وابستگی قابل توجهی نسبت به جهت نورد داشته باشد.

با توجه به موارد فوق پیش بینی می‌گردد که ناهمسانگردی در ساختار و خواص بر میزان تابیدگی و اعوجاج قطعات در حین عملیات حرارتی موثر باشد در نتیجه؛ بررسی و مطالعه پیرامون این امر خالی از فایده نیست. لذا هدف از انجام این پژوهش بررسی تاثیر ناهمسانگردی ساختاری در یک فولاد ابزار گرم کار نورد

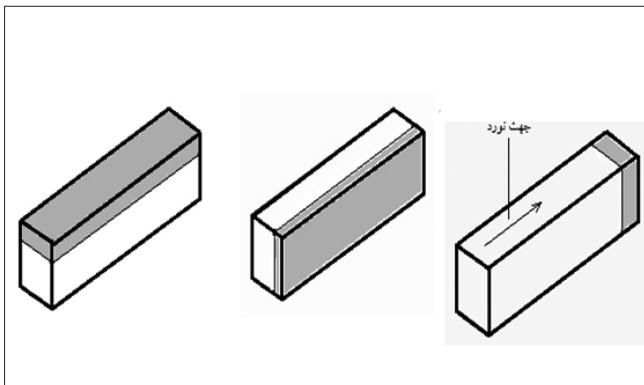
از آنجا که تابیدگی و اعوجاج در حین عملیات حرارتی همیشه به عنوان یک مشکل جدی وجود داشته است، لذا نیاز است باشناخت و بررسی عوامل مرتبط با این مشکل بتوان به ارائه راهکارهایی مناسب برای به حداقل رسانیدن تابیدگی در حین عملیات حرارتی قطعات دست یافت. شیب حرارتی ایجاد شده در قطعات در حین عملیات حرارتی به واسطه انتقال حرارت متفاوت در نقاط مختلف قطعه از اصلی ترین دلایل اعوجاج قطعات فولادی محسوب می‌شود [۱-۳]. از این رو، استفاده از سیکل‌های حرارتی که این شیب را به حداقل برساند می‌تواند راهکاری مفید در جهت کاهش و حذف این مشکل باشد. انجام فرآیند مارتمپرینگ فولاد در صورت امکان یکی از روش‌های عملیاتی در راستای این امر می‌تواند باشد [۴].

ترکیب شیمیایی فولاد و کیفیت ساختاری آن که تحت تاثیر روش تولید آن می‌باشد بر قابلیت انتقال حرارت و در نتیجه میزان تابیدگی در حین عملیات حرارتی آن موثر است [۵-۷]. فولادهای ریختگی به علت وجود مشکلات ریخته گری در ساختارشان در مقایسه با فولادهای نورد شده از استعداد بیشتری برای بروز تابیدگی در حین عملیات حرارتی برخوردارند [۸ و ۹]. از این رو، در کارکردهایی که برای رسیدن به خواص مکانیکی مطلوب نیاز به عملیات حرارتی سخت کاری است و نیز با رویکرد کاهش اعوجاج و تابیدگی در قطعات صنعتی از فولادهای نورد شده استفاده می‌گردد [۱۰].

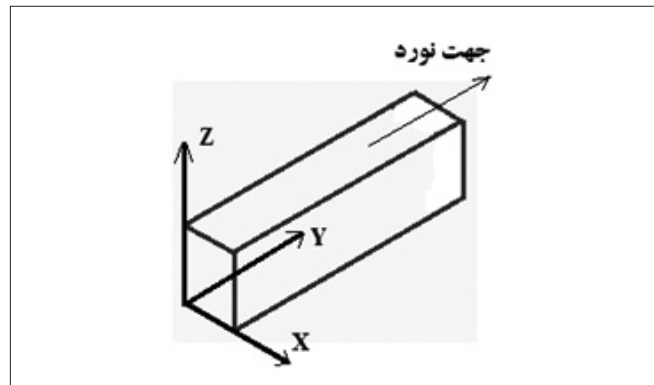
در حین عملیات حرارتی فولادهای ابزار دو گونه اصلی اعوجاج و تغییر ابعادی رخ می‌دهد که شامل تغییر در اندازه و شکل است. تغییر در اندازه مربوط به تغییرات حجمی است که ناشی از انبساط و انقباض‌های حرارتی و نیز تغییرات در ساختار کریستالی به واسطه استحاله‌های فازی صورت گرفته حین عملیات حرارتی است؛ در حالی که اعوجاج شکلی عمدتاً ناشی از خمش و پیچش است [۱۱ و ۱۲]. بسته به نوع استحاله صورت گرفته تغییر حجم متفاوت است که این خود تحت تاثیر حجم مخصوص فازهای مختلف در فولاد است [۱۳ و ۱۴]. همچنین علاوه بر نوع فاز، ترکیب آن نیز بر حجم مخصوص آن اثر گذار است. مثلاً مقدار کربن محلول در آستنیت و مارتنزیت تاثیر قابل توجهی بر حجم مخصوص لذا میزان تابیدگی پس از عملیات حرارتی دارد [۱۴-۱۶]. با وجود آنکه عملیات حرارتی مناسب بر مبنای درک تغییرات فیزیکی و استحاله‌های فازی توأم با سخت کاری،

جدول ۱- آنالیز شیمیایی (درصد وزنی) فولاد گرم کار H13 (DIN1,2344)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Co	Ti
۰/۳۸	۱/۸۷	۰/۳۶	۴/۹۲	۱/۲۵۵	۰/۲۲۷	۰/۹۹۴	۰/۱	۰/۰۰۴



شکل ۲- شماتیک تهیه نمونه ها در سه صفحه به ترتیب از چپ XY, YZ و XZ



شکل ۱- شکل شماتیکی یک چهارپهلوی نورد شده و محور مختصات تعریف شده.

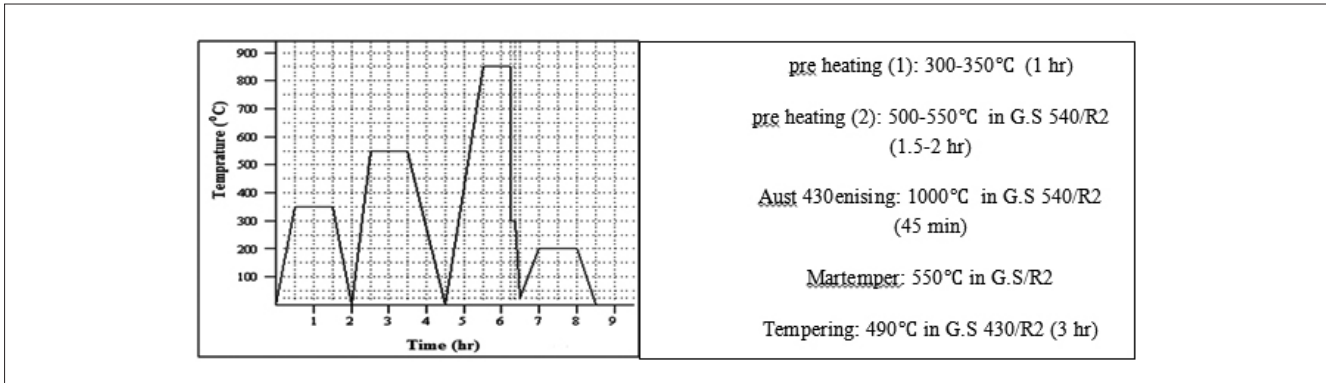
برای بررسی تاثیر انیزوتروپی و تغییر آن با مارتمپرینگ بر روی تابیدگی و اعوجاج فولاد از سطح مقطع یک چهارپهلوی در جهات مختلف برش زده شد و نمونه‌ها مورد ماشین کاری واقع شدند. سپس نمونه‌ها تحت فرآیند تنش زدایی قرار گرفتند. در ادامه نمونه‌ها تحت عملیات مارتمپرینگ پله ای سه مرحله ای قرار گرفتند تا سخت سازی شوند. به منظور بررسی تاثیر هر یک از فرآیندهای فوق بر میزان اعوجاج فولاد، میزان تابیدگی فولاد مذکور در سه وضعیت پس از ماشین کاری، پس از عملیات تنش گیری و پس از عملیات مارتمپرینگ پله ای ارزیابی گردید. به منظور کمی کردن میزان اعوجاج، ابعادنمونه‌ها در هر وضعیت توسط دستگاه CMM<sup>۲</sup> کنترل گردید. برای سنجش میزان تابیدگی از فاکتوری موسوم به تختی<sup>۳</sup> استفاده شد. در همین راستا پارامترهای طول، عرض، ضخامت اندازه گیری شد و میزان تختی بر طبق استاندارد ISO1101 2006 محاسبه گردید [۳۱ و ۳۲]. برای اطمینان هرچه بیشتر از دقت و صحت نتایج؛ از هر وضعیت، سه نمونه مطابق با اشکال ۱ و ۲ تهیه شد. شکل ۱ شماتیک یک چهارپهلوی نورد شده و محورهای مختصات تعریف شده در آن را نشان می‌دهد. شکل ۲ شماتیک نمونه‌های تهیه شده در سه صفحه XY, YZ و XZ را جهت بررسی ناهمسانگردی حاصل از نورد بر روی میزان تابیدگی نشان می‌دهد. نمونه‌ها مطابق با شکل ۲ نام گذاری شدند. در ادامه نمونه‌ها در یک کوره موفلی تنش گیری شدند. به همین

سرد شده در حین فرآیند عملیات حرارتی مارتمپرینگ بر میزان اعوجاج و تابیدگی فولاد می‌باشد. این مطالعه در راستای شناخت فاکتورهای موثر بر میزان تابیدگی با هدف کاهش و حل این مشکل در یک سازه صنعتی که با این فولاد و به عنوان قالب در صنعت ساخت قطعات خودرو در شرکت مالیل سایپا مورد استفاده قرار می‌گیرد انجام شده است. تا بتوان با حل این مشکل نیاز به انجام ماشین کاری بعدی را کاهش داده در نتیجه موجب کاهش در هزینه تمام شده محصول ساخته شده گردید.

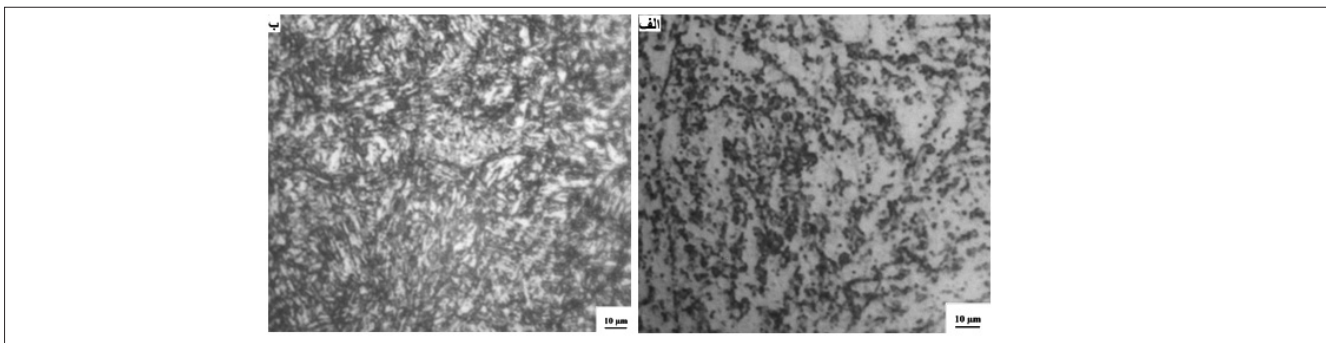
### مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از فولاد ابزار گرم کار H13 (DIN1.2344) نورد سرد شده که برای قالب سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد استفاده شد. فولاد DIN1.2344 از جمله فولادهای ابزاری است که نه تنها نسبت به محصولات حاصل از دگرگونی آستنیت در دمای بالا (فریت و پرلیت) مقاوم است بلکه نسبت به تشکیل بینیت که ممکن است در دماهای بلافاصله قبل از MS تشکیل شوند نیز پایدار بوده و دارای سختی پذیری خوبی می‌باشد [۳۰]. فولاد مذکور برای عملیات مارتمپرینگ بسیار مناسب می‌باشد زیرا سختی پذیری این فولاد آنقدر زیاد است که کاهش آهنگ سرد کنندگی محیط را نیز جبران می‌کند [۳۰]. ابعاد نمونه‌های فولادی به کار رفته در این کار ۴×۱۰×۱۳۰ میلی متر می‌باشد. جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد مورد بررسی را نشان می‌دهد.

۲- دستگاه اندازه گیری مختصات (Coordinate Measuring Machines)  
 ۳ فاکتور تختی (Flatness) معرف میزان تابیدگی می‌باشد.



شکل ۳- سیکل عملیات حرارتی مارتمپرینگ پله ای جهت دستیابی به کمترین میزان تابیدگی روی فولاد DIN1.2344



شکل ۴- ریزساختار فولاد مورد بررسی. الف - قبل از مارتمپرینگ، ب: بعد از مارتمپرینگ

- ۲- آستنیتیه شدن نمونه‌ها در کوره G.S 540/R2 دردمای  $1000 \pm 50$  درجه سانتیگراد.
- ۳- انتقال به کوره G.S 430/R2 جهت دستیابی به همدمای تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد (بصورت کاملاً تعادلی و با نرخ آهسته) به مدت ۴۵ دقیقه.
- ۴- انتقال به محیط کارگاه تا دمای قطعات حدوداً ۶۰ درجه سانتیگراد شود.
- ۵- تمپر در ۴۹۰ درجه سانتیگراد در حمام G.S 430/R2 به مدت ۳ ساعت.
- این مرحله جرئی از پروسه سختکاری می‌باشد. پس از پایان این مرحله سختی نهایی نمونه‌های H13 حدوداً  $55 \pm 1$  HRC بدست آمد.
- ۶- تنش گیری در ۵۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳ ساعت در حمام نمک G.S430/R2 سپس انتقال به محیط کارگاه تارسیدن به دمای محیط.
- ۷- تمپر ثانویه جهت دستیابی به سختی‌های پایین تر و افزایش چقرمگی و کاهش تردی و کاربردهای مختلف در صنایع بر اساس سختی‌های پایین تر از  $55 \pm 1$  HRC (تمپرهای ثانویه در گستره دمایی ۶۱۰-۵۶۰ درجه سانتیگراد انجام میشود)

منظور نمونه‌ها ابتدا تا درجه حرارت ۷۰۰ درجه سانتیگراد گرم شده سپس تا دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد بصورت کاملاً تعادلی کاهش دما پیدا کرده و پس از یکساعت ماندگاری در کوره به درجه حرارت محیط رسیدند. بعد از تنش گیری، نمونه‌ها به وسیله CMM کنترل ابعادی شدند. نمونه‌ها سپس تحت فرآیند عملیات حرارتی مارتمپرینگ پله ای قرار گرفتند. به این منظور، نمونه‌ها ابتدا در کوره G.S430/R2 پیشگرم و پس از آن در کوره G.S520/R2 آستنیتیه شدند. عدم تغییر در ترکیب شیمیایی و نیز تغییر در دمای کل قطعه بطور همزمان از خصوصیات کوره‌های حمام نمک می‌باشد. دیاگرام سیکل عملیات حرارتی مارتمپرینگ پله ای انجام شده روی نمونه‌ها در شکل ۳ دیده می‌شود. مراحل سیکل مارتمپرینگ پیشنهادی که از طریق انجام آزمایش‌های متعدد و سعی و خطا در راستای به حداقل رساندن میزان تابیدگی فولاد DIN1.2344 حاصل گردیده به صورت زیر است.

- ۱- پیش گرم دو مرحله ای
- ۱-۱) پیشگرم خشک (کوره موفلی خشک)، یک ساعت دردمای ۳۰۰-۳۵۰ درجه سانتیگراد.
- ۲-۱) پیشگرم در کوره حمام نمک G.S 430/R2، ۲-۱/۵ ساعت دردمای ۵۰۰-۵۵۰ درجه سانتیگراد.

جدول ۲- خلاصه نتایج بدست آمده در مقاطع مختلف و در وضعیت های مختلف.

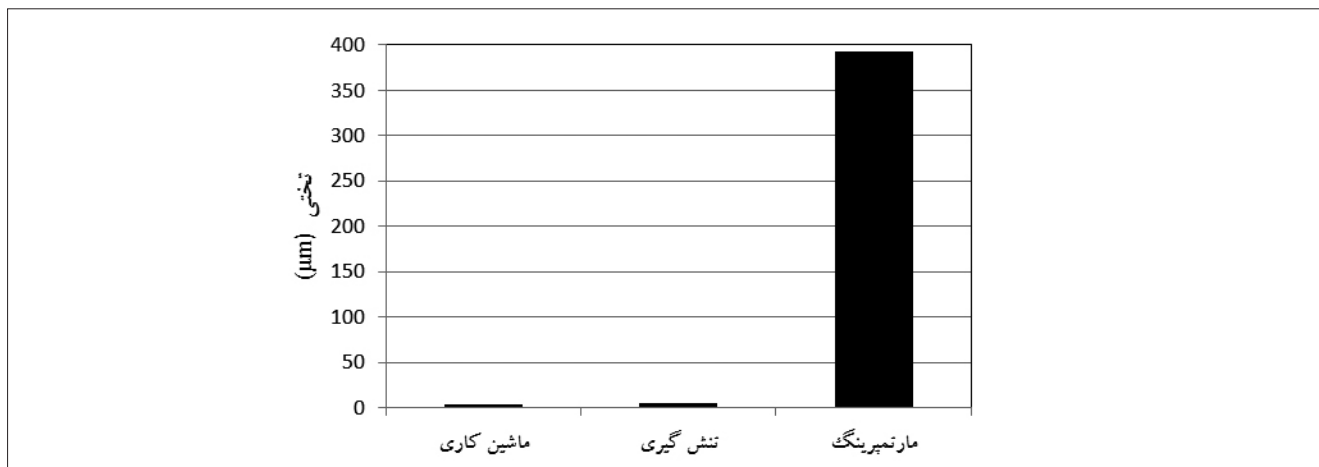
فرآیند	XY		XZ		YZ	
	سختی	تختی (μm)	سختی	تختی (μm)	سختی	تختی (μm)
ماشین کاری	۲۵۷ HB	۴	۲۵۸ HB	۷	۲۶۳ HB	۵
تنش گیری	۲۰۶ HB	۵	۱۹۸ HB	۵	۱۹۹ HB	۶
مارتپرینگ	۵۱/۷ RC	۳۹۳	۵۲/۳ RC	۱۵۱	۵۱/۷ RC	۵۵۸

## نتایج و بحث

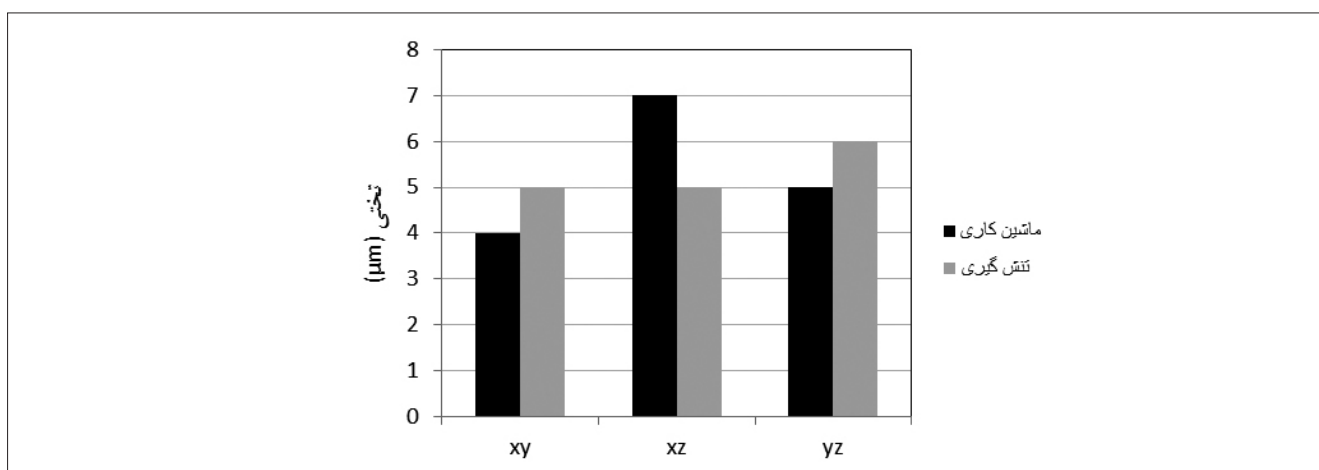
وضعیت قبل از تنش گیری و پس از آن و نیز پس از انجام فرآیند سخت سازی مارتپرینگ، مستقل از جهت نمونه برداری بوده و در هر سه وضعیت نمونه برداری، ارقام سختی در هر وضعیت مشابهند. به عبارت دیگر سختی را می توان یک ویژگی همسانگرد در کلیه ساختارها قلمداد کرد. شاید بتوان گفت چون سختی یک ویژگی سطحی مکانیکی می باشد و نه حجمی این شرایط حاکم است. به عبارت دیگر شاید بتوان گفت ناهمسانگردی را میتوان به ویژگی های حجمی ماده مربوط دانست در حالیکه ویژگی های مکانیکی سطحی نظیر سختی همسانگرد می باشند.

شکل ۵ تغییرات تختی نمونه ها را در سه وضعیت پس از ماشین کاری، پس از تنش گیری و پس از مارتپرینگ برای مقطع XY نشان می دهد. دیده می شود که این فاکتور در دو حالت ماشین کاری و تنش گیری ناچیز و مشابه است در حالی که در نمونه مارتپریشده افزایش یافته است. از آنجایی که بیشتر بودن عدد تختی معرف تابیدگی و اعوجاج بیشتر است می توان گفت نمونه ها پس از مارتپرینگ و سخت شدن، قدری دچار تابیدگی می گردند در صورتی که قبل از انجام سخت کاری اعوجاج ناچیز و در عمل قابل صرف نظر است. این وضعیت در هر دو مقطع دیگر نیز یعنی XZ و YZ وجود دارد. اگرچه تختی در نمونه های مارتپر شده در مقایسه با نمونه های ماشین کاری شده و تنش گیری شده بیشتر است ولی با این حال مقدار آن در عمل زیاد نیست. به گونه ای که نمونه ها پس از مارتپرینگ و سخت شدن اعوجاج زیادی ندارند و در مقایسه با نمونه هایی که به روش های معمول، کوئنچ سخت می شوند از تابیدگی کم و قابل قبولی برخوردارند. علت این امر را می توان اعمال روش مارتپرینگ پله ای به کار برده شده در این تحقیق دانست. در واقع در مارتپرینگ تنش ها و کرنش های تولید شده در حین کوئنچ به نوعی کنترل می شوند. به گونه ای که می توان گفت مارتپرینگ در مقایسه با روش های کوئنچ معمول باعث ایجاد تنش پس ماند کمتر که یکی از علل اصلی تابیدگی

شکل ۴ ریزساختار فولاد مورد بررسی را قبل و بعد از عملیات مارتپرینگ نشان می دهد. ساختار مارتزیت ظریف با توزیع یکنواخت در این شکل نشان می دهد که عملیات مارتپرینگ به خوبی انجام شده است؛ لذا انتظار می رود فولاد به سختی و استحکام مورد نیاز دست یافته باشد. جدول ۲ نتایج حاصل از آزمایشات سختی سنجی و اندازه گیری تختی نمونه ها را در مقاطع مختلف برای هر یک از شرایط بعد از ماشین کاری، بعد از تنش گیری و بعد از مارتپرینگ پله ای ارائه می کند. نتایج فوق مربوط به اندازه گیری و سنجش سه نمونه در هر وضعیت و میانگین گیری از آنهاست که این امر برای دست یابی به دقت بالاتر صورت گرفته است. هر سه نمونه در وضعیت های مختلف، پراکندگی نتایج ناچیز و قابل صرف نظری را نشان دادند. به گونه ای که می توان به صحت نتایج حاصل از آزمایشات اعتماد کافی نمود. با مشاهده نتایج موجود در جدول ۲ مشخص می شود که در هر یک از مقاطع، نمونه های مارتپر شده به مراتب سختی بالاتری از نمونه های ماشین کاری شده و تنش گیری شده دارند که این به وجود مارتزیت در ساختار این نمونه ها برمی گردد. همچنین انجام فرآیند تنش گیری پس از ماشین کاری موجب کاهش سختی حدوداً ۲۰ درصدی در کلیه نمونه ها نسبت به وضعیت پس از ماشین کاری گردیده است. این امر می تواند ناشی از انجام مقداری تبلور مجدد در ساختار باشد. در واقع شرایط دمایی و زمانی تنش گیری به گونه ای بوده است که با کاهش چگالی نابجایی ها علاوه بر رهایی تنش های داخلی و همچنین تغییر در دانه بندی و در نتیجه انجام تبلور مجدد سختی کاهش یافته است. به بیان دیگر ساختار قبل از انجام عملیات سخت کاری به روش مارتپرینگ ساختار تبلور مجدد یافته نسبی می باشد. نکته حائز اهمیت این است که سختی نمونه ها قبل از فرآیند سخت سازی و در هر دو



شکل ۵- تختی نمونه ها در حالات مختلف برای مقطع XY

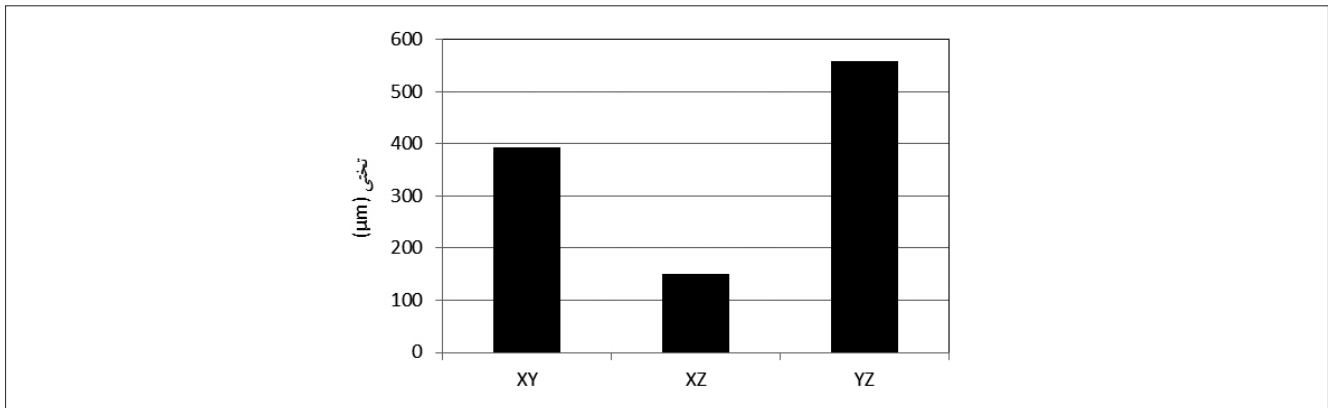


شکل ۶- تاثیر ناهمسانگردی ساختاری بر تختی نمونه ها قبل از سخت سازی

نمونه‌های پس از ماشین کاری و پس از تنش گیری و قبل از سخت سازی که این انتقال حرارت سریع را طی نکرده اند، اعوجاج مشاهده نمی شود و عدد تختی پایین است. بنابراین می توان گفت کنترل این امر یعنی انتقال حرارت سریع صورت گرفته حین سخت کاری فولاد از دمای آستنیت تا دمای اتاق، می تواند تابیدگی را کنترل نموده و انجام فرآیند مارتمپرینگ پله ای به کار رفته در این تحقیق تلاشی در همین راستا است.

شکل ۶ تغییر عدد سختی را در نمونه‌های ماشین کاری شده و تنش گیری شده با جهت‌های مختلف نمونه برداری از مقطع اولیه نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که صرف نظر از جهت نمونه برداری، عدد تختی در این نمونه‌ها ناچیز و کم است که این به معنای عدم تابیدگی در این حالات است. در واقع شکل ۶ گویای این مورد است که ناهمسانگردی ساختاری بر میزان تابیدگی نمونه‌ها قبل از عملیات سخت کاری فولاد خواه در وضعیت پس از ماشین کاری و

قطعات است می شود [۳۳]. استفاده از مواد با سختی پذیری بالاتر می تواند اعوجاج را کم کند [۱۲]. وجود جدایش و تغییر در ترکیب شیمیایی و غیر هموزن بودن آن، به صورت موضعی روی استحاله فازی موثر است و لذا می تواند موجب ایجاد اعوجاج غیریکنواخت در ماده شود [۱۲ و ۳۴]. تنش حرارتی توسعه یافته در مقطع فولادی در حین سرمایش به توزیع دمایی غیریکنواخت در امتداد جهت عرضی مقطع و نرخ سرمایش بالا مربوط است [۳۵]. تنش حرارتی فوق این قابلیت را دارد که موجب تغییر شکل پلاستیک موضعی در عرض مقطع شده، در نتیجه موجب ورود تنش پس ماند و در نهایت تابیدگی قطعه گردد [۳۵]. شکل ۵ در واقع گواه این مدعا است که انتقال حرارت صورت گرفته از دمای آستنیت تا دمای اتاق در فرآیند عملیات حرارتی سخت کاری و تنش پسماند حاصل از آن، عامل بروز تابیدگی در قطعات است زیرا این تابیدگی تنها در نمونه‌های مارتمپر شده مشاهده می شود. در حالی که در



شکل ۷- تغییر تختی با جهت نمونه برداری از مقطع نورد سرد شده اولیه پس از مارتمپرینگ.

ریزساختار و توزیع و چگالی نقایص کریستالی بر انتقال حرارت حین سرمایش سریع در خلال فرآیند سخت سازی و در نتیجه سینتیک استحاله فازی صورت گرفته و تنش پس ماند ایجاد شده موثر است. تابیدگی در مقاطع عمود بر جهت نورد و در صفحه XZ حداقل می باشد. از آنجایی که دانه ها در جهت نورد کشیده شده و به الگوی ییافی تمایل پیدا می کنند به نظر می رسد این وضعیت در بالا بودن میزان تابیدگی در نمونه های موازی جهت نورد سرد بی تاثیر نباشد. به عبارت دیگر سرعت انتقال حرارت و مقدار تنش پس ماند در راستای طولی دانه های کشیده شده متفاوت از جهت عمود بر آن می باشد. مرز دانه از آنجایی که دچار یک بی نظمی زیاد و حاوی حجم باز بیشتری نسبت به درون دانه ها است لذا می تواند باعث کاهش هدایت حرارتی و انتقال حرارت آهسته تر گردد [۲۸]. در راستای عمود بر جهت نورد تجمع مرزهای دانه بیشتر است؛ لذا انتقال حرارت آهسته تر صورت گرفته در نتیجه تنش پس ماند کمتری در این راستا ایجاد می شود. این امر در نهایت موجب کاهش اعوجاج در نمونه های مقطع XZ که عمود بر راستای نورد سرد اولیه هستند می شود. شکل ۷ همچنین نشان می دهد انجام عملیات مارتمپرینگ پله ای صورت گرفته برای فولاد مورد بررسی در این پژوهش در تمامی مقاطع موجب بالا رفتن عدد تختی و در نتیجه ایجاد اعوجاج و تابیدگی شده است این در حالی است که سختی نمونه ها بعد از مارتمپرینگ افزایش قابل ملاحظه ای یافته است.

#### نتیجه گیری

۱- اعوجاج در نمونه های قبل از سخت کاری در دو وضعیت پس از ماشین کاری و پس از تنش گیری ناچیز و مستقل از جهت نمونه برداری از مقطع نورد سرد شده اولیه بود. به عبارت دیگر

خواه پس از تنش گیری بی تاثیر است. به عبارت دیگر آنچه موجب اعوجاج در فولاد مورد بررسی می شود ناهمسانگردی ساختاری نبوده بلکه تنش های پس ماند و تغییر شکل پلاستیک موضعی در فولاد ناشی از سرمایش سریع در حین فرآیند سخت سازی فولاد عامل این امر است. حال در صورتی که این تنش حرارتی وجود داشته باشد آنگاه می توان قائل شد که ناهمسانگردی اهمیت دارد در غیر این صورت و بدون القای تنش پسماند در قطعات نمی توان ناهمسانگردی را موثر دانست. اگرچه نتایج نشان می دهد که انجام فرآیند تنش گیری بعد از ماشین کاری تاثیری بر تابیدگی نداشته و در کلیه نمونه ها عدد تختی فولادها بعد از تنش گیری تقریباً مشابه عدد بدست آمده فاکتور فوق بعد از ماشین کاری است ولی با این حال به نظر می رسد انجام تنش گیری بعد از ماشین کاری به عنوان یک عملیات مکمل در حصول نتایج موفق بعد از مارتمپرینگ می تواند سودمند باشد.

بررسی اثر ناهمسانگردی پس از فرآیند مارتمپرینگ می تواند سهم ناهمسانگردی در میزان اعوجاج فولاد را مشخص کند. شکل ۷ مبین تاثیر ناهمسانگردی بر میزان اعوجاج فولاد مارتمپر شده است. در این شکل تختی نمونه های مارتمپر شده در سه مقطع XY, XZ و YZ نمایش داده شده است. بر خلاف سختی، تابیدگی و اعوجاج در نمونه های سخت سازی شده و پس از مارتمپرینگ یک ویژگی ناهمسانگرد است. این در حالی است که این ویژگی که در قطعات عملیات حرارتی شده بسیار پر اهمیت است در فولاد قبل از انجام سخت کاری و یعنی در نمونه های با سختی و استحکام کم یک مشخصه همسانگرد و غیر جهت دار می باشد. علت را می توان تغییر در ریزساختار مقطع نورد سرد شده اولیه در جهات مختلف دانست. به بیان دیگر می توان نتیجه گرفت اعوجاج و تابیدگی فولاد پس از مارتمپرینگ تابع ریزساختار اولیه ماده می باشد. در واقع

[13] K. E. Thelning, "Steel and Its Heat Treatment", Hand Book, Butterworths, 1981.

[14] Y. K. Lee, M. T. Lusk, "Thermodynamic Prediction of the Eutectoid Transformation Temperatures of Low - Alloy Steels", Metall. Trans. A, 30A, 1999, 2325 - 2329.

[15] C. R. Brooks, "Heat Treatment of Ferrous Alloys", McGraw-Hill, Book Company, 1979.

[16] C. H. Guer, A. E. Tekkaya, "Numerical Investigation of Non-homogeneous Plastic Deformation in Quenching Process", Mater. Sci. Eng., A 319-321, 2001, 164 - 169.

[17] B. Liscic, H. M. Tensi, W. Luti, "Theory and Technology of Quenching", Springer - Verlag, Berlin, 1992.

[18] G. E. Totten, "Quenching and Distortion Control", ASM Inter., 1992.

[19] A. J. Fletcher, "Thermal Stress and Strain Generation in Heat Treatment", Elsevier Science, London, 1989.

[20] J. W. Jang, I. W. Park, K. H. Kim, S. S. Kang, "FE Program for Predicting Thermal Deformation in Heat Treatment", J. Mater. Process. Tech., 130-131, 2002, 546 - 550.

[21] M. P. Lightfoot, N. A. McPherson, K. Woods, G. J. Bruce, "Artificial Neural Networks as an Aid to Steel Plate Distortion Reduction", J. Mater. Process. Tech., 172, 2006, 238 - 242.

[22] X. D. Wang, F. Li, Z. Y. Jiang, "Thermal, Microstructural and Mechanical Coupling Analysis Model for Flatness Change Prediction during Run Out Table Cooling in Hot Strip Rolling", J. Iron Steel Res. Inter., 19 (9), 2012, 45 - 51.

[23] S. M. Bel'skii, Y. A. Mukhin, S. I. Mazur, A. I. Goncharov, "Influence of the Cross Section of Hot - Rolled Steel on the Flatness of Cold - Rolled Strip", Steel in Trans., 43(5), 2013, 313 - 316.

[24] S. Denis, E. Gautier, A. Simon, G. Beck, "Stress - Phase - Transformation Interactions - Basic Principles, Modeling, and Calculation of Internal stresses", Mater. Sci. Tech., 1, 1985, 805 - 814.

[25] S. Denis, S. Sjoström, A. Simon, "Temperatures, Stress, Phase Transformation Calculation Model Numerical Illustration of the Internal Stresses Evolution during Cooling of a Eutectoid Carbon steel Cylinder", Metall. Trans. A, 18A, 1987, 1203 - 1212.

[26] T. Inoue, Z. Wang, "Coupling between stress, Temperature, and Metallic Structures during Processes Involving Phase Transformation", Mater. Sci. Tech., 1, 1985, 845 - 850.

[27] S. J. Lee, Y. K. Lee, "Finite Element Simulation of Quench Distortion in a Low - Alloy Steel Incorporating Transformation Kinetics", Acta Mater, 56, 2008, 1482 - 1490.

[28] R. E. Reed-Hill, R. Abbaschian, "Physical Metallurgy Principles", Third Ed. PWS Publishing Company, Boston, 1994.

[29] W. B. Hutchinson, K. Ushioda, G. Runnsjo, "Anisotropy of Tensile Behavior in Duplex Stainless Steel Sheet", Mater. Sci. Tech., 1, 1985, 728 - 731.

[30] J. R. T. Branco, G. Krauss, "Toughness of H11/H13 Hot Work Die Steels", New Materials Processes Experiences for Tooling, H. Berns, M. Hofmann, L. A. Norstrom, K. Rasche, A. M. Schindler, Ed., MAT SEARCH, Andelfingen, Switzerland, 1992, 121 - 134.

[31] STN EN ISO 1101: 2006, Geometrickespesifikacievyrobkov (GPS). Geometricketolerancietvaru, orietacie.Polohy a hadzania (ISO 1101: 2004).

[32] Flatness Measurement by Multi-point Methods and by Scanning Methods. Stanislav Lakota Gorog. Slovak University of Technology in Bratislava.

[33] F. Abbasi, A. J. Fletcher, A. B. Soomro, "A Critical Assessment of the Hardening of Steel by Martempering", Inter. J. Production Res., 25 (7), 1987, 1069 - 1080.

[34] C. Prinz, M. Hunkel, B. Clausen, F. Hoffmann, H. W. Zoch, "Characterization of Segregations and Microstructure and Their Influence on Distortion of Low Alloy SAE 5120 Steel", Mat-Wiss. U. Werkstoffech, 40 95-6), 2009, 368 - 373.

[35] X. Wang, Q. Yang, A. He, "Calculation of Thermal Stress Affecting Strip Flatness Change during Run - Out Table Cooling in Hot Steel", J. Mater. Proc. Tech., 207, 2008, 130 - 146.

تابیدگی و اعوجاج در این نمونه‌ها یک ویژگی همسانگرد می‌باشد.  
 ۲- انجام عملیات حرارتی سخت سازی به روش مارتمپرینگ  
 پله ای باعث ایجاد مقداری اعوجاج و تابیدگی در فولاد مورد بررسی گردید که این امر از طریق فاکتور تختی مورد سنجش قرار گرفت.

۳- تابیدگی را در نمونه‌های مارتمپر شده می‌توان یک ویژگی ناهمسانگرد محسوب کرد که میزان آن در جهات مختلف تفاوت قابل توجهی دارد.

۴- کمترین میزان اعوجاج در نمونه‌های مارتمپر شده مربوط به نمونه هایی بود که در راستای موازی با صفحه XZ برش زده شده و به تعبیر دیگر عمود بر جهت نورد بودند. در حالی که میزان اعوجاج در نمونه هایی که موازی با جهت نورد برش زده شده بودند بیشتر بود.

۵- سختی سنجی نمونه‌ها نشان داد که این ویژگی مکانیکی تحت تاثیر جهت نمونه برداری از مقطع نورد سرد شده اولیه نبوده و در هر دو وضعیت قبل و بعد از عملیات سخت سازی یک خصوصیت همسانگرد است.

## منابع و مراجع

[1] V. C. Prantil, M. L. Callabresi, G. S. Ramaswamy, J. F. Larthrop, G. S. Ramaswamy, M. T. Lusk, "Simulating Distortion and Residual Stresses in Carburized Thin Strips", J. Eng. Mater. Tech., 125 (2), 2003, 116 - 124.

[2] J. Cho, W. Kang, M. Kim, J. Lee, Y. Lee, W. Bae, "Distortions Induced by Heat Treatment of Automotive Bvel Gears", J. Mater. Process. Tech., 153 - 154, 2004, 476 - 481.

[3] B. L. Ferguson, Z. Li, A. M. Freborg, "Modeling Heat treatment of Steel Parts", Computational Mater. Sci., 34 (3), 2005, 274 - 281.

[4] G. Krauss, "Steels: Heat Treatment and Processing Principles", American Society for Metals, 1990.

[5] M. Waldenstrom, "An Experimental Study of Carbide - Austenite Equilibria in Iron-Base Alloys with Mo, Cr, Ni and Mn in the Temperature Range 173 to 1373 K", Metall. Trans. A, 8A, 1977, 1963 - 1977.

[6] B. Sundman, "Thermodynamic Databanks, Visions and Facts, Scand", J. Metall., 20, 1991, 79 - 85.

[7] D. R. Jack, K. R. Jack, "Carbides and Nitrides in Steel", Mater. Sci. Eng., 11, 1973, 1 - 27.

[8] R. W. Rayson, "Tool Steels, Constitution and Properties of Steels", EB.Pickering, Ed., VCH Publishing, 1992.

[9] L. Eliasson, O. Sandberg, "Effect of Different Parameter on Heat - Checking Properties of Hot - Work Tool Steels", New Materials and Processes for Tooling, H. Berns, H. Nordberg, H. J. Fleischer, Ed., VerlagSchurmann&Klagges K G, Bochum, Germany, 1989.

[10] W. Roberts, "Dynamics Changes that Occur during Hot Workin and Their Significance Regarding Microstructural Development and Hot Workability, Deformation Processing and Structure", ASM Inter., 1984, 109 - 184.

[11] B. S. Lement, "Distortion in Tool Steels", American Society for Metals, 1959.

[12] C. Prinz, B. Clasen, F. Hoffmann, R. Kohlmann, H. W. Zoch, "Metallurgical Influence on Distortion of the Case Hardening Steel 20MnCr5", Mat-Wiss. U. Werkstoffech, 37 (1), 2006, 29 - 33.