



پنجمین کنفرانس ملی

مواد، متالورژی و معدن

۸ اسفند ۱۴۰۰



بررسی اثر نرخ کرنش بر ریزساختار فولاد AISI D2 در فرآیند شکل دهی گرم

محبوبه رضائیان، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی و مواد، rezaiyan.mahbobeh@mail.um.ac.ir

علیرضا کیانی رشید، استاد گروه مهندسی متالورژی و مواد، kianirashid@um.ac.ir

غلامرضا ابراهیمی، استاد گروه مهندسی متالورژی و مواد، r.ebrahimi@um.ac.ir

چکیده

در این پژوهش ریزساختار فولاد ابزار سردکار AISI D2 تولیدی مجتمع فولاد اسفراین با هدف بررسی اثر نرخ کرنش بر اندازه و تعداد کاربیدها مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌های آزمون فشار گرم تهیه شده و آزمون در دمای ۱۱۰۰-۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۰/۰۰۱ و ۱ بر ثانیه انجام شد. دمای انجام کار گرم با استفاده از دیاگرام فازی تعادلی و با استفاده از نرم افزار Thermo calc انتخاب شد. تصاویر ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین آنالیز تصویری با استفاده از نرم افزار MIP انجام شد. نتایج آنالیز تصویری و مشاهدات میکروسکوپ نوری نشان دهنده‌ی کاهش اندازه‌ی کاربیدها در اثر افزایش نرخ کرنش از ۰/۰۰۱ تا ۱ بر ثانیه است.

واژه‌های کلیدی: کاربید، نرخ کرنش، کار گرم، فولاد ابزار، آزمون فشار گرم.

^۱ دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی

^۲ دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی

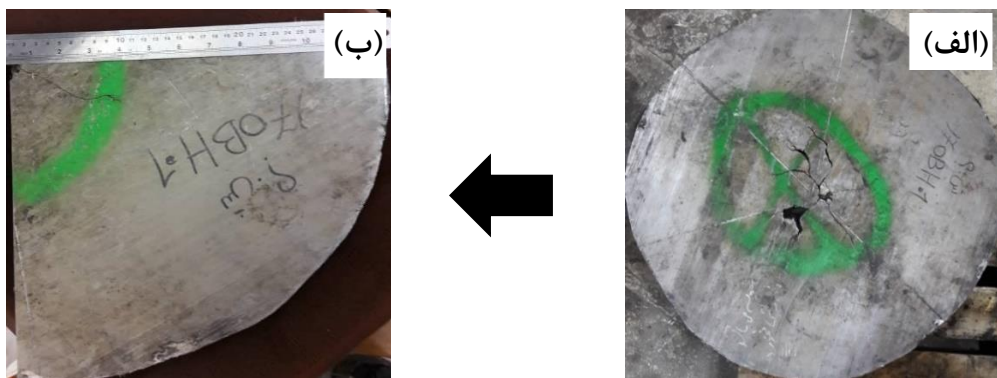
^۳ دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی

۱- مقدمه

فولاد AISI D2 و معادل‌های آن در استانداردهای مختلف از جمله فولادهای ابزار سرد کار است که به آن فولاد پرکروم و پرکربن هم گفته می‌شود [۱-۳]. فولاد D2 حاوی ۱/۵ درصد وزنی کربن و ۱۱-۱۲ درصد وزنی کروم است که این دو عنصر از جمله عناصر آلیاژی اصلی در این فولاد می‌باشند. فولاد ابزار سرد کار D2 عموماً به عنوان قالب مورد استفاده قرار گرفته و مقاومت در برابر سایش عالی دارد [۴]. مهم‌ترین مسئله ای که در ارتباط با تولید فولادهای ابزار سری D وجود دارد، مقدار بیش از حد کاربیدهای اولیه است که باعث کاهش کارپذیری و در نتیجه شکست قطعات می‌شود [۵]. محتوای بالای عناصر آلیاژی مثل کربن، مولیبدن، وانادیوم و به خصوص کروم که برای بهبود استحکام، سختی و مقاومت در برابر سایش به فولادهای ابزار اضافه می‌شوند، باعث رسوب کاربیدهای M_2C ، M_7C_3 ، MC ، $M_{23}C_6$ در طول انجماد و تغییر شکل می‌شوند و به طور قابل توجه کار گرم پذیری را کاهش می‌دهند [۷، ۶]. اندازه، توزیع، نوع و کسر کاربیدها، تاریخچه عملیات ترمومکانیکی و محدوده دمای تغییر شکل تأثیر عمده‌ای بر تغییر شکل گرم دارند. در طول گرمایش و با افزایش دما مقداری از کاربیدها حل می‌شوند، اما کاربیدهای غیر محلول می‌توانند تأثیر بسیار مهمی بر خواص نهایی محصولات داشته باشند [۸]. بنابراین ریزساختار این فولادها باید به طور دقیق مورد بررسی قرار گیرد. ترک خوردگی که منجر به شکست می‌شود جدی‌ترین محدودیت در شکل‌دهی فولادهای پر آلیاژ است [۹]. برای جلوگیری از ایجاد ترک و خرابی قالب نیاز به کنترل پارامترهای کار گرم می‌باشد. دما و نرخ کرنش از جمله پارامترهایی هستند که باید حین شکل‌دهی این فولادها کنترل شوند. مطالعات صورت گرفته روی فولاد D2 بیشتر در ارتباط با عملیات cryogenic [۱۰، ۱۱، ۱۲]، اصلاح ریزساختار [۱۲، ۱۳]، بررسی اثر کاربیدها بر رفتار کارپذیری فولاد D2 [۱۴-۱۸] و عملیات حرارتی آنها است [۱۹، ۲۰]. اگرچه ریزساختار کار گرم شده فولادهای ابزار سرد کار مانند فولاد AISI D2 از نظر صنعتی بسیار مهم است، اما تحقیقات کمی در ارتباط با اثر پارامترهای فرایند شکل‌دهی گرم بر ریزساختار فولاد D2 انجام شده است. هدف از این پژوهش بررسی اثر دما و نرخ کرنش بر مورفولوژی کاربیدها در فولاد D2 است.

۲- مواد و روش تحقیق

ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از روش کوانتومتری تعیین شد (جدول ۱). شکل ۱ تصاویر سطح مقطع شمش فورج شده (نمونه‌ی اولیه) را نشان می‌دهد. نمونه‌ی اولیه به قطر ۶۵ سانتی‌متر با استفاده از اره نواری به چهار قسمت تقسیم شد. همانطور که مشاهده می‌گردد در مرکز شمش فورج شده ترک‌های عرضی ناشی از فرایند فورج گرم ایجاد شده است.



شکل ۱- تصاویر سطح مقطع شمش فورج شده: (الف) قبل از برش، (ب) بعد از برش به کمک اره نواری.



آزمون فشار گرم به منظور بررسی اثر دما و نرخ کرنش بر ریزساختار فولاد D2 در دماهای ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد و نرخ کرنش‌های ۰/۰۰۱ و ۱ بر ثانیه و کرنش ۰/۷ انجام شد. قبل از انجام آزمون نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد نگهداری و در آب کوئچ شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه در دمای تغییر شکل قرار گرفته و با نرخ کرنش‌های متفاوت تا کرنش ۰/۷ تغییر شکل داده شدند. نمونه‌های آزمون فشار گرم به طول ۱۲ میلی‌متر و قطر ۶ میلی‌متر ($H/D=2$) به کمک وایرکات تهیه شد. ریزساختار نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون فشار گرم به کمک میکروسکوپ نوری OLYMPUS BX60M مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی ریزساختار، نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه پولیش شده و سپس با محلول Vilella (۴۵ میلی‌لیتر گلیسرول، ۳۰ میلی‌لیتر کلریک اسید و ۱۵ میلی‌لیتر نیتریک اسید) حکاکی شدند. همچنین آنالیز تصویری به کمک نرم افزار MIP جهت بررسی تغییرات مورفولوژی کاربیدها صورت گرفت. جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده را نشان می‌دهد. نمودار تعادل فاز فولاد مورد مطالعه با توجه به ترکیب شیمیایی آلیاژ و نوع کاربیدهای تشکیل شده به کمک نرم افزار Thermo calc رسم شد.

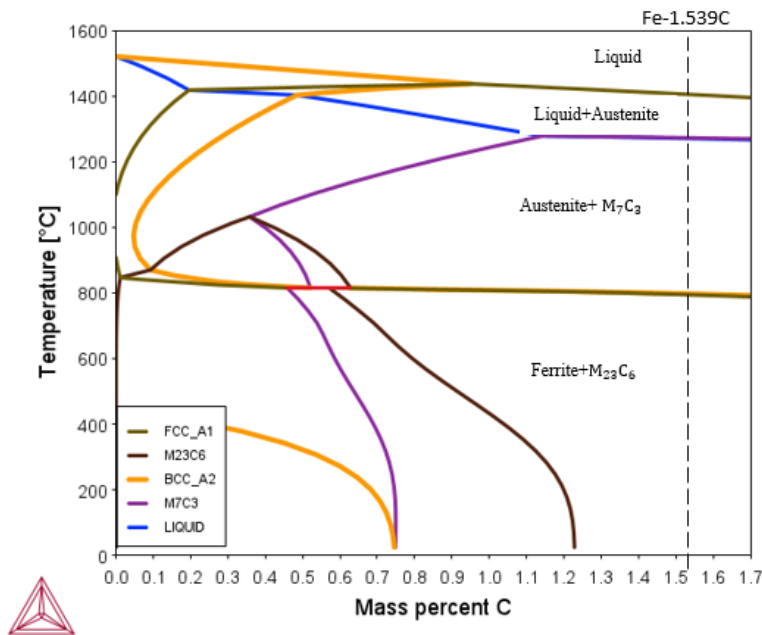
جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد D2 مورد استفاده بر حسب درصد وزنی (Wt.%)

عنصر	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S	Fe
نمونه	۱/۵۴	۰/۴۲	۰/۳۹	۱۱/۴۹	۰/۶۲	۰/۹۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸	باقی مانده

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی نمودار تعادلی فاز فولاد مورد استفاده

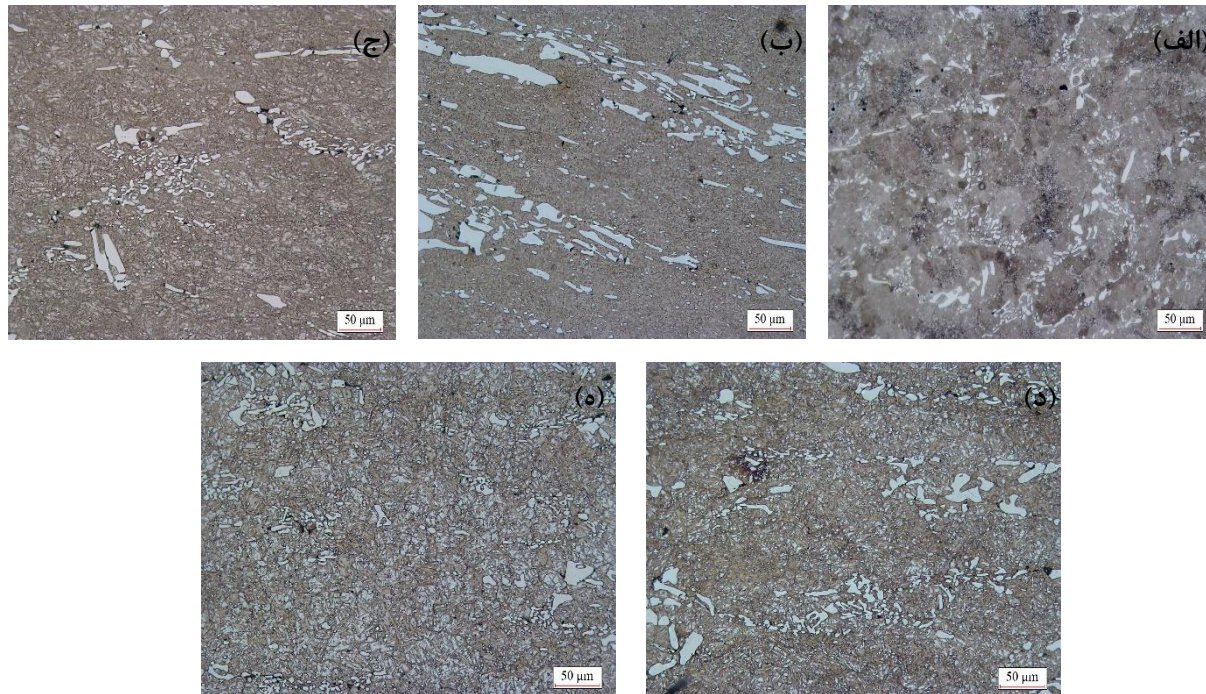
شکل ۲ دیاگرام فاز فولاد مورد استفاده را نشان می‌دهد که خط چین رسم شده ترکیب شیمیایی آلیاژ و بیانگر درصد کربن فولاد است. با توجه به شکل، کاربید M_7C_3 در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد رسوب می‌کند. از طرفی دمای واکنش یوتکتوئید در این آلیاژ حدود ۸۲۰ درجه سانتی‌گراد است که طی آن کاربید $M_{23}C_6$ رسوب می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که M_7C_3 و $M_{23}C_6$ دو کاربید اصلی در ساختار فولاد مربوطه است. با توجه به اینکه کارپذیری فولاد با رسوب کاربیدهای ترد و شکننده کاهش می‌یابد، تعیین محدوده‌ی کار گرم این فولاد بسیار اهمیت دارد و باید با فاصله از دمای رسوب کاربیدها انتخاب شود تا علاوه بر کاهش اثر واکنش‌های فاز، مانع رشد دانه‌های آستنیت شود. محدوده‌ی معمول تغییر شکل برای فولادهای ابزار آلیاژی ۹۵۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد است [۹]. بنابراین در این تحقیق دماهای ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد جهت شکل‌دهی گرم فولاد D2 انتخاب شد.



شکل ۲- دیاگرام تعادلی فازی فولاد D2.

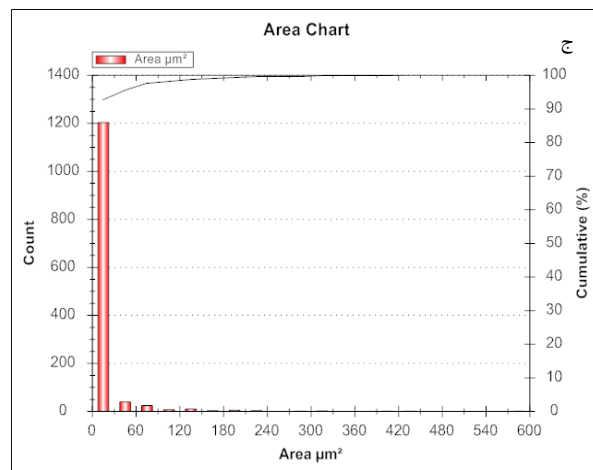
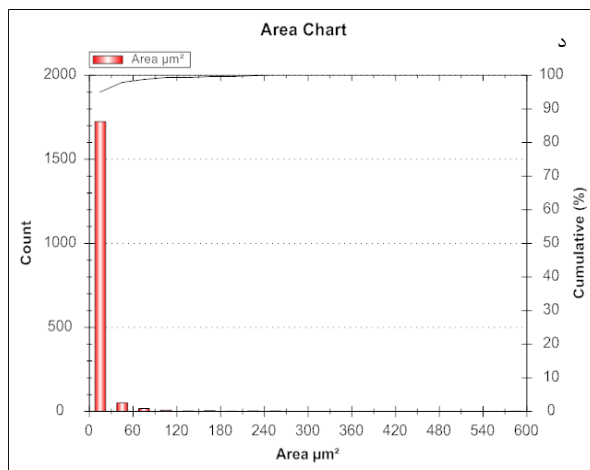
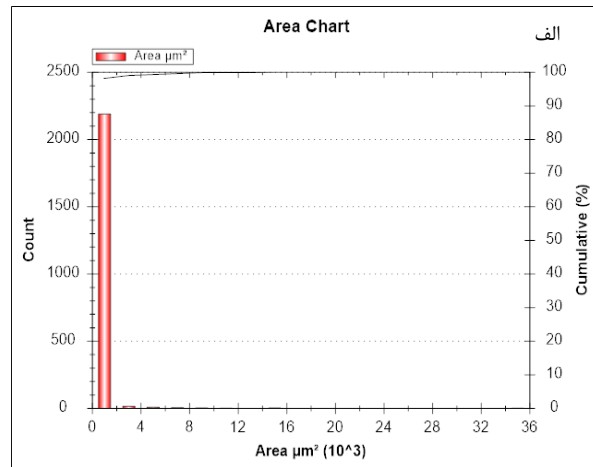
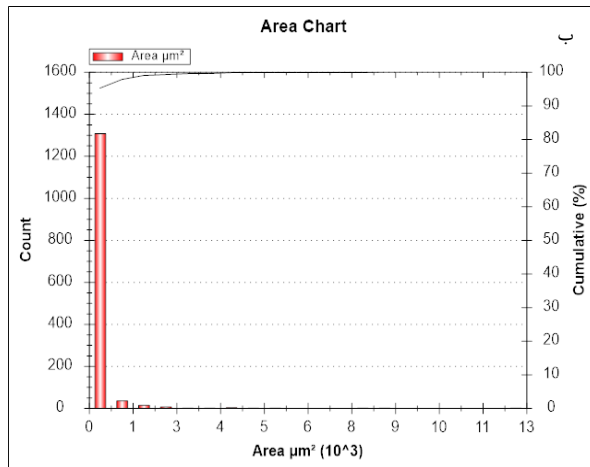
۳-۲- مشخصه‌یابی ریزساختار

شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌ها را قبل و بعد از آزمون فشار گرم نشان می‌دهد. شکل ۳-الف ریزساختار نمونه، قبل از آزمون فشار گرم است و همانطور که مشاهده می‌شود کاربیدها در این ریزساختار به صورت پیوسته کنار یکدیگر قرار گرفته و شبکه کاربیدی را تشکیل داده‌اند. در تمام شرایط تغییر شکل، شبکه کاربیدی ناپدید شده و کاربیدها شکسته و در ریزساختار توزیع شدند. شکل‌های ۳-ب و ۳-ج ریزساختار نمونه را در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش‌های ۰/۰۰۱ و ۱ بر ثانیه نشان می‌دهد. با افزایش نرخ کرنش اندازه‌ی کاربیدها کاهش یافته است. شکل ۳-د و ۳-ه ریزساختار نمونه در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش‌های ۰/۰۰۱ و ۱ بر ثانیه است. با مقایسه این دو تصویر نیز مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ کرنش از ۰/۰۰۱ تا ۱ بر ثانیه اندازه‌ی کاربیدها کاهش یافته است که این یافته‌ها با نتایج آنالیز تصویری مطابقت دارد. با مقایسه‌ی تصاویر ۳-ب و ۳-د مشاهده می‌شود که در اثر افزایش دما تعداد کاربیدها کاهش یافته است.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌ها، الف: قبل از آزمون فشار گرم، ب: دمای ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد نرخ کرنش ۰/۰۰۱ بر ثانیه، ج: دمای ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۱ بر ثانیه، د: دمای ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۰/۰۰۱ بر ثانیه، ه: دمای ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۱ بر ثانیه.

شکل ۴ نتایج آنالیز تصویری نمونه‌ها را با استفاده از نرم افزار MIP نشان می‌دهد. خلاصه‌ی نتایج در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به جدول ۲ می‌توان دریافت که در اثر افزایش نرخ کرنش میانگین مساحت کاربیدها کاهش یافته است. با افزایش نرخ کرنش زمان تغییر شکل کاهش یافته و بنابراین زمان کمتری جهت رسوب و رشد کاربیدها در نرخ کرنش‌های بالا وجود دارد که این نتیجه با یافته سایر محققین مطابقت دارد [۷، ۸]. همچنین با مقایسه شکل‌های ۴-الف و ۴-ج مشاهده می‌شود که در اثر افزایش دما از ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تعداد کاربیدها کاهش یافته است. اما این کاهش در نرخ کرنش ۱ بر ثانیه دیده نشد. با افزایش دمای تغییر شکل کاربیدهای اولیه بیشتری در زمینه حل شده و از تعداد آن‌ها کاسته می‌شود که این نتیجه با یافته‌های سایر محققین مطابقت دارد [۷، ۲۱].



شکل ۴- نتایج آنالیز تصویری با استفاده از نرم افزار MIP، الف: دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد و نرخ کرنش ۰/۰۰۱، ب: دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد و نرخ کرنش ۱ بر ثانیه، ج: دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد و نرخ کرنش ۰/۰۰۱ بر ثانیه، د: دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد و نرخ کرنش ۱ بر ثانیه.



جدول ۲- نتایج آنالیز تصویری انجام شده با استفاده از نرم افزار MIP

میانگین مساحت کاربیدهای مشاهده شده (میکرومتر مربع)	مساحت بزرگترین کاربید مشاهده شده (میکرومتر مربع)	مساحت کوچکترین کاربید مشاهده شده (میکرومتر مربع)	تعداد کاربیدها	نمونه ($^{\circ}\text{C} - \text{s}^{-1}$)
۱۸۴/۴۹۲	۳۵۷۵۰	۱	۲۲۳۱	۱۰۰۰-۰/۰۰۱
۱۶۰/۴۰۲	۱۲۲۹۲	۱	۱۳۷۶	۱۰۰۰-۱
۱۱/۰۶۹	۵۸۲/۱۸۳	۰/۰۴۷	۱۳۰۰	۱۱۰۰-۰/۰۰۱
۶/۷۹۵	۵۹۹/۹۵۳	۰/۰۴۷	۱۸۱۸	۱۱۰۰-۱

۴- نتیجه گیری

به منظور بررسی اثر نرخ کرنش بر ریزساختار فولاد D2 آزمون فشار گرم با توجه به دیاگرام تعادلی فازی در دمای ۱۰۰۰-۱۱۰۰ درجه سانتی گراد و در نرخ کرنش های ۰/۰۰۱ و ۱ بر ثانیه انجام شد. تصاویر ریزساختار با میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفته و آنالیز تصویری با استفاده از نرم افزار MIP انجام شد. نتایج به دست آمده به قرار زیر است:

- ۱- با توجه به دیاگرام تعادلی رسم شده دمای انجام کار گرم برای فولاد D2، در محدوده ۹۰۰-۱۱۵۰ درجه سانتی گراد است.
- ۲- در اثر افزایش نرخ کرنش به دلیل کم بودن زمان تغییر، شکل مساحت کاربیدهای رسوب کرده کاهش یافت.
- ۳- در اثر افزایش دما از ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد در نرخ کرنش ۰/۰۰۱ بر ثانیه تعداد کاربیدها در اثر انحلال کاهش یافت.

مراجع

[1] Ramesh G; Rahul R; Pradeep M; Sreehari P; Ramesh Kumar S; "Evolution of microstructure and mechanical properties of D2 tool steel during annealing heat treatment", *Materials today Proceedings* 5, 2733-2737, 2018.

[2] Ghasemi-Nanesa Hadi; Jahazi Mohammad; "Simultaneous enhancement of strength and ductility in cryogenically treated AISI D2 tool steel", *Materials Science & Engineering A*, 413-419, 2014.

[2] Hamid Zadeh M.A; Meratian M; Mohammadi Zahrani M; "A study on the microstructure and mechanical properties of AISI D2 tool steel modified by niobium", *Materials Science & Engineering A*, 758-766, 2012.

[4] Jun-Yun Kang; Hoyoung Kim; Dongmin Son; Cheolpyo Kim; Soon Keun Park; Tae-Ho Lee; "Hot worked microstructure and hot workability of cold-work tool steels", *Materials Characterization*, 8-17, 2018

[۵] زارع، حسین؛ ابراهیمی، رضا؛ امینی، کامران؛ جعفر زاده، محمد علی؛ صابری فر، سعید؛ «بررسی اثر سرعت انجماد بر اندازه و توزیع کاربیدهای اولیه در فولاد ابزار AISI D3 نورد شده»، سمپوزیوم فولاد ۹۱، شرکت فولاد خوزستان، اسفندماه ۱۳۹۱

[6] Bombač David; Terčelj Milan; Kugler Goran; Peruš Izток; "Amelioration of surface cracking during hot rolling of AISI D2 tool steel", *Materials Science and Technology*, 1723-1736, 2018.

[7] Zangeneh Najafi S; Momeni A; Jafarian H.R; Ghadar S; "Recrystallization, precipitation and flow behavior of D3 tool steel under hot working condition", *Materials Characterization*, 437-447, 2017

[8] Večko Pirtovšek T; Kugler G; Godec M; Terčelj M; "Microstructural characterization during the hot deformation of 1.17C-11.3Cr-1.48V-2.24W-1.35Mo ledeburitic tool steel", *Materials Characterization*, 189-197, 2011



پنجمین کنفرانس ملی
مواد، متالورژی و معدن
۱۴۰۰ اسفند ۸



- [9] Imbert C.A.C; McQueen H.J; “Hot Ductility of Tool Steels”, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 235-244, 2001.
- [10] Ghasemi-Nanesa Hadi; Jahazi Mohammad; “Alternative phase transformation path in cryogenically treated AISI D2 tool steel”, *Materials Science & Engineering A*, 32-36, 2015.
- [11] Ghasemi-Nanesa Hadi; Jahazi Mohammad; Naraghi Reza; “Martensitic transformation in AISI D2 tool steel during continuous cooling to 173 K”, *Springer Science+Business Media New York*, 5758–5768, 2015.
- [12] Hamid Zadeh n Mohammad Ali; Meratian Mahmood; Saatchi Ahmad; “Effect of cerium and lanthanum on the microstructure and mechanical properties of AISI D2 tool steel”, *Materials Science & Engineering A*, 193-198, 2013.
- [13] Hamidzadeh M.A; Meratian M; Mohammadi Zahrani M; “A study on the microstructure and mechanical properties of AISI D2 tool steel modified by niobium”, *Materials Science & Engineering A*, 758-766, 2012.
- [14] Večko Pirtovšek T; Kugler G; Terčelj M; “The behaviour of the carbides of ledeburitic AISI D2 tool steel during multiple hot deformation cycles”, *Materials Characterization*, 97-108, 2013.
- [15] Hoyoung Kim; Jun-Yun Kang; Dongmin Son; Tae-Ho Lee; Kyung-Mox Cho; “Evolution of carbides in cold-work tool steels”, *Materials Characterization*, 376-385, 2015.
- [16] Bombac D; Fazarinc M; Saha Podder A; Kugler G; “Study of Carbide Evolution During Thermo-Mechanical Processing of AISI D2 Tool Steel”, *Materials Engineering and Performanc*, 742–747, 2013.
- [17] Wilmes S; Kientopf G; “Carbide Dissolution Rate and Carbide Content in Usual High Alloyed Tool Steels at Austenitizing Temperatures Between 900°C And 1250°C”, *6th International Tooling Conference*, 533-541, 2002.
- [18] Blaha J; Kremaszky C; Werner E.A; “Carbide Distribution Effects in Cold Work Tool Steels”, *6th International Tooling Conference*, 289-298, 2002.
- [19] IIZIANI A; “Improvement of AISI D2 Steel Properties by Unconventional Vacuum Heat Treatments”, *Materials Science and Engineering A*, 125-133, 1988.
- [20] Ramesh G; Rahul R; Pradeep M; Sreehari P; Ramesh Kumar S; “Evolution of microstructure and mechanical properties of D2 tool steel during annealing heat treatment”, *Materials Today Proceedings*, 2733–2737, 2018.
- [21] ZHOU Bin; SHEN Yu; CHEN un; CUI Zhen-shan, “Breakdown Behavior of Eutectic Carbide in High Speed Steel During Hot Compression”, *Iron and Steel Research International*, 41-48, 2011.