



Experimental Investigation of Warm Deep Drawing Process of Eutectoid Steel

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sanatnian A.¹ MSc,
Saghafi A.*¹ PhD,
Rastegari Koupaei H.² PhD

How to cite this article

Sanatnian A, Saghafi A, Rastegari Koupaei H. Experimental Investigation of Warm Deep Drawing Process of Eutectoid Steel. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(6):1601-1609.

ABSTRACT

Deep drawing process is one of the most important processes of sheet forming, which is widely used in the deformation of metal sheets in order to produce parts with complex geometry. Several studies have been carried out on some steels with good formability such as low-carbon and austenitic stainless steels. Among different types of plain carbon steels, high carbon eutectoid steels are capable to withstand cold and warm working without formation of any defect, due to their fully pearlitic microstructure without the presence of proeutectoid phases and nano-sized cementite lamella. However, no comprehensive research has been conducted on the deep drawing process of eutectoid steel. In the present research, the formability of CK75 steel sheets was experimentally evaluated using warm deep drawing process. Warm deep drawing process of the CK75 steel was studied in the temperature range near and below the eutectoid transformation temperature. The results show that deformation at 700°C (near to the eutectoid temperature) lead to the uniform distribution of thickness and less instability. On the other hand, maximum instability (e.g. thinning) was obtained by warm deformation at 550°C. At the temperature above the eutectoid transformation temperature, due to the formation of multi-phase structure and non-uniform distribution of cementite particle, the workability was reduced and led to the occurrence of rupture during deep drawing.

Keywords Warm Deep Drawing; Eutectoid Steel; CK75; Sheet Forming; Eutectoid Transformation Temperature; Microstructure

¹Mechanical Engineering Department, Mechanical & Materials Engineering Faculty, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

²Materials Engineering Department, Mechanical & Materials Engineering Faculty, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Mechanical & Materials Engineering Faculty, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.
Postal Code: 9719866981
Phone: +98 (56) 32252501
Fax: +98 (56) 32252463
a.saghafi@birjandut.ac.ir

Article History

Received: September 19, 2019
Accepted: December 7, 2019
ePublished: June 20, 2020

CITATION LINKS

[1] Deep-drawing of magnesium alloy sheets at warm temperatures [2] Numerical and experimental investigations on the effect of the heating strategy and the punch speed on the warm deep drawing of magnesium alloy AZ31 [3] Thickness distribution of extra deep drawn steel in stretch forming at elevated temperatures [4] An experimental investigation into the warm deep-drawing process on laminated sheets under various grain sizes [5] Thinning behavior of laminated sheets metal in warm deep-drawing process under various grain sizes [6] Understanding formability of extra-deep drawing steel at elevated temperature using finite element simulation [7] Warm deformation processing maps for the plain eutectoid steels [8] Determination of processing maps for the warm working of vanadium microalloyed eutectoid steels [9] ASTM E8: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [10] Flow stress and work-hardening of pearlitic steel [11] Microstructure evolution and mechanical properties of eutectoid steel with ultrafine or fine (ferrite+cementite) structure

بررسی تجربی فرآیند کشش عمیق گرم در فولاد یوتکتویدی

علی صنعتیان MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

امین ثقفی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

حبیب‌اله رستگاری‌کوپایی PhD

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

فرآیند کشش عمیق از مهم‌ترین فرآیندهای شکل‌دهی ورق است که به‌طور وسیعی در تغییر شکل ورق‌های فلزی به‌منظور تولید قطعاتی با هندسه پیچیده کاربرد دارد. پژوهش‌های مختلفی بر روی برخی فولادها با قابلیت شکل‌پذیری مناسب مانند فولادهای کم‌کربن و فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی انجام شده است. از بین انواع فولادهای ساده کربنی، فولادهای پرکربن یوتکتویدی به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردشان از جمله ساختار کاملاً پرلیتی بدون حضور فازهای پرویوتکتویدی و همچنین نانوسایزبودن لایه‌های سمنتیت، قابلیت تحمل تغییر شکل سرد و گرم بدون تشکیل عیوب ریزساختاری را دارند. تاکنون در زمینه کشش عمیق این فولادها تحقیقات جامعی انجام نشده است. در این پژوهش، به‌منظور بررسی رفتار شکل‌پذیری این دسته از فولادها، فرآیند کشش عمیق گرم بر ورق‌های فولاد CK75 در دماهای کمتر و نزدیک به دمای استحاله یوتکتویدی به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر توزیع یکنواخت ضخامت و همچنین نازک‌شدگی کمتر برای نمونه‌های تغییرشکل‌داده‌شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد (دمای بسیار نزدیک به دمای استحاله یوتکتویدی) است. همچنین، حداکثر ناپایداری در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق افتاده است. در دماهای بالاتر از دمای استحاله یوتکتویدی، به‌دلیل عدم تشکیل ساختار کاملاً آستنیتی و توزیع غیریکنواخت رسوبات کاربیدی، کاهش کارپذیری و پارگی نمونه‌ها حین کشش عمیق به‌وقوع پیوسته است.

کلیدواژه‌ها: کشش عمیق گرم، فولاد یوتکتویدی، CK75، شکل‌دهی ورق، دمای استحاله یوتکتویدی، ریزساختار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۱۶

نویسنده مسئول: a.saghafi@birjandut.ac.ir

مقدمه

کاربرد وسیع ورق‌های فلزی در صنعت سبب شده است تا فرآیندهای شکل‌دهی ورق به‌صورت ویژه‌ای مورد توجه صنعتگران قرار گیرند. فرآیند کشش عمیق از مهم‌ترین فرآیندهای شکل‌دهی ورق است که به‌طور وسیعی در تولید قطعاتی با هندسه پیچیده در صنایع مختلف مانند اتومبیل‌سازی، هوا و فضا و غیره کاربرد دارد. به‌منظور افزایش شکل‌پذیری در فرآیند کشش عمیق و با توجه به مشکلات شکل‌پذیری در دمای محیط، فرآیندهای کشش عمیق گرم مورد توجه قرار گرفته است. به‌عنوان مثال در پژوهش

انجام شده توسط ژانگ و همکاران^[1]، کشش عمیق گرم بر روی ورق‌های منیزیم AZ31 مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج حاصل از این پژوهش، کمترین ضخامت نمونه‌های شکل‌گرفته در محل شعاع سنبه و بیشترین مقدار ضخامت نیز در لبه پانچ به‌دست آمده است. همچنین، بهترین دمای شکل‌دهی برای آلیاژ منیزیم در بازه ۱۰۵ تا ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. در پژوهش انجام‌شده توسط پالمبو و همکاران^[2]، فرآیند کشش عمیق گرم بر روی آلیاژ منیزیم AZ31 با دو استراتژی مختلف خنک‌کنندگی و عدم خنک‌کنندگی سنبه در حین فرآیند، مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. بیشترین مقدار نسبت کشش حدی به‌دست‌آمده مربوط به دمای ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت فرآیند ۶ میلی‌متر بر دقیقه بوده است. همچنین توزیع ضخامت یکنواخت‌تر در منطقه دیواره کاپ برای آزمایش با خنک‌کنندگی سنبه، حاصل شد.

رامون گود و همکاران^[3]، به بررسی و ارزیابی توزیع ضخامت ورق‌های فولادی شکل‌دهی‌شده در فرآیند کشش عمیق گرم با آنالیز ۰/۴۸٪ وزنی کربن، ۰/۳۵٪ وزنی منگنز، ۰/۸۳٪ وزنی سیلیسیم، ۰/۱۹٪ وزنی فسفر و ۰/۲۲٪ وزنی گوگرد، پرداخته‌اند. آزمایشات تجربی بر روی ورق‌های فولادی در دماهای ۲۵، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. نتایج آزمون تجربی با نتایج مدل‌سازی المان محدود مقایسه و توزیع یکنواخت‌تر ضخامت ورق برای دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. *افشین و کدخدایان*^[4]، به بررسی تاثیر نیروی ورق‌گیر و سائز دانه‌ها در فرآیند کشش عمیق گرم در ورق‌های دولایه آلومینیم ۱/۰۵۰/فولاد ۳۰۴ و آلومینیم ۵/۰۵۲/فولاد ۳۰۴ با سائز دانه‌های مختلف پرداخته‌اند. نیروی ورق‌گیر به‌عنوان عامل اصلی نیروی شکل‌دهی در دماهای مختلف مطرح شده است. در آزمایشات با نیروی ورق‌گیر کم، افزایش درجه حرارت ورق منجر به افزایش نیروی شکل‌دهی شد. از طرف دیگر، افزایش نیروی ورق‌گیر منجر به افزایش شکل‌پذیری در دمای بالاتر و در نتیجه انجام فرآیند کشش عمیق با بار کمتری شد. همچنین اعمال نیروی ورق‌گیر بالاتر باعث شد تا در آزمایشات بر روی نمونه‌هایی با اندازه دانه بزرگ‌تر، شکل‌دهی با نیروی کمتری انجام شود. در پژوهشی دیگر توسط *کدخدایان و افشین*^[5]، توزیع ضخامت در فرآیند کشش عمیق گرم بر روی ورق‌های دولایه آلومینیم ۱/۰۵۰/فولاد ۳۰۴ و آلومینیم ۵/۰۵۲/فولاد ۳۰۴ با سائز دانه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی نمودارهای توزیع ضخامت مشخص شد که با افزایش سائز دانه و افزایش دما، نازک‌شدگی در تمام لایه‌ها در نمونه‌های آلومینیم ۱/۰۵۰/فولاد ۳۰۴ و آلومینیم ۵/۰۵۲/فولاد ۳۰۴، افزایش یافته است. مناطق حساس به شکست در ورق آلومینیم و ورق فولادی به‌ترتیب در شعاع سنبه و مرکز نمونه گزارش شد. سیینگ و همکاران^[6]، به‌صورت آزمایش تجربی و شبیه‌سازی به بررسی توزیع ضخامت در فرآیند کشش عمیق گرم بر روی ورق‌های فولادی پرداخته‌اند. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش

در جدول ۲ گزارش شده است. سنبه از فولاد Mo40 و ماتریس از فولاد SPK ساخته شده است. مشخصات ابعادی اجزای قالب کشش عمیق در جدول ۳ ارائه شده است. آزمایش کشش عمیق توسط یک پرس هیدرولیک ۶۰ تن با سرعت حرکت سنبه ۵۴۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است.

جدول ۱) خواص مکانیکی فولاد CK75

خواص مکانیکی	
جنس	CK75
مدول یانگ (GPa)	۲۱۰
چگالی (Tonne/mm ³)	۷/۸ e-۹
ضریب پواسون	۰/۳
تنش تسلیم (MPa)	۴۲۶

جدول ۲) ترکیب شیمیایی فولاد CK75

عناصر	مقدار (%)
Cr	۰/۰۲
P	۰/۰۲
Si	۰/۲۳
Mn	۰/۶۸
C	۰/۷۲

جدول ۳) ابعاد هندسی قالب

ابعاد هندسی	مقدار (mm)
قطر سنبه	۴۵
قطر ماتریس	۵۰
شعاع لبه سنبه و ماتریس	۱۰
لقی	۲/۵

آزمایش اولیه کشش عمیق در دمای محیط انجام شده است. برای انجام آزمایش، فاصله بین ورق و ورق گیر به اندازه ۱ میلی‌متر برای هر دو ضخامت تنظیم می‌شود. ورق به روغن کشش آغشته شده و به وسیله سینی طراحی شده به زیر سنبه هدایت می‌شود. با قرار گرفتن ورق در موقعیت مشخص، آزمایش انجام می‌شود. آزمایش کشش عمیق برای ورق فولادی مذکور در دو محدوده دمایی گرم (۲۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، زیر دمای استتاله یوکتوئیدی) و داغ (۷۵۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، بالای دمای استتاله یوکتوئیدی) انجام شده است. روان کاری توسط گریس و پودر گرافیت صورت گرفته است. برای انجام آزمایش در دماهای مذکور، پس از تنظیم و رسیدن دمای کوره به دمای آزمایش، نمونه به مدت ۵ دقیقه در داخل کوره حرارت داده می‌شود. نمونه از داخل کوره خارج، توسط سینی به داخل قالب هدایت و بلافاصله آزمایش انجام می‌شود. در شکل ۱ دستگاه پرس، کوره و مجموعه قالب مورد استفاده در این آزمایش نشان داده شده است. تصویر برخی از نمونه‌های شکل گرفته از آزمایش در دماهای مختلف، در شکل ۲ نشان داده شده است.

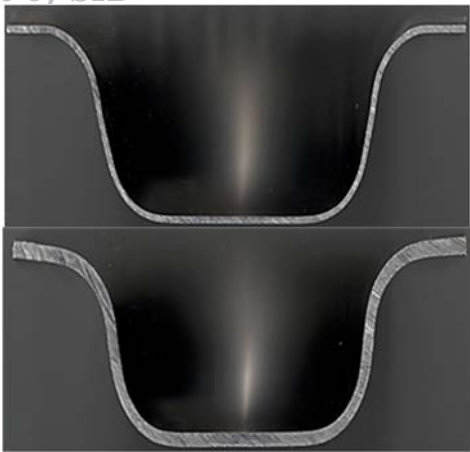
در دمای محیط و دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بیانگر حد کشش بالاتر و همچنین عدم افت ناگهانی ضخامت در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بود.

همان طور که ملاحظه می‌شود، اغلب پژوهش‌های انجام شده در زمینه کشش عمیق بر روی آلیاژهایی از آلومینیوم و منیزیم بوده است. همچنین پژوهش‌های مختلفی بر روی برخی از فولادها با قابلیت شکل پذیری مناسب مانند فولادهای کم کربن و فولادهای زنگ‌زن آستنیتی انجام شده است و بحث کشش عمیق در مورد فولادهای پر کربن و حتی متوسط کربن مطرح نبوده است. بدیهی است که این موضوع ناشی از شکل پذیری پایین این فولادها به خصوص در دمای محیط است. شکل پذیری پایین ناشی از حضور فاز سخت و شکننده سمنتیت و دو فازی بودن ریزساختار (فربیتی+ سمنتیتی) آنها است. در این میان، فولادهای یوکتوئیدی به عنوان یک نوع فولاد پر کربن، به دلیل داشتن ویژگی‌های منحصربه‌فرد مانند ساختار کاملاً پرلیتی بدون حضور فازهای پرویوکتوئیدی و همچنین نانو سازی بودن لایه‌های سمنتیت و یا ریزساختار کاملاً کروی شده، قابلیت کارسختی بالا، توانایی تحمل تغییر شکل سرد و گرم بدون تشکیل عیوب ریزساختاری را دارند. تحقیقات انجام شده توسط رستگاری و همکاران [7, 8]، بر روی رفتار شکل پذیری فولاد یوکتوئیدی حاوی حدود ۰/۸٪ وزنی کربن تحت آزمون فشار گرم نشان داده است که فولادهای یوکتوئیدی قابلیت تغییر شکل گرم بدون ایجاد عیوب ریزساختاری را دارند. به هر حال، بررسی منابع اطلاعاتی نشان می‌دهد که تاکنون رفتار کشش عمیق فولادهای پر کربن مورد بررسی قرار نگرفته است. در همین راستا، به منظور بررسی رفتار شکل پذیری این دسته از فولادها، فرآیند کشش عمیق گرم ورق‌های فولاد CK75 مورد مطالعه قرار گرفته است.

ساختار کلی این مقاله به این شرح است. در بخش ۲، تجهیزات و روند آماده سازی نمونه و انجام آزمایش کشش عمیق گرم بر روی ورق‌های فولاد CK75، تشریح شده است. تاثیر دما بر توزیع ضخامت و همچنین بررسی ریزساختار نمونه‌های شکل گرفته از آزمایشات تجربی در دماهای نزدیک و کمتر از دمای استتاله یوکتوئیدی در بخش ۳، بیان شده است. بخش ۴ نیز به نتیجه گیری نهایی اختصاص یافته است.

آزمایش تجربی

در این پژوهش، برای انجام آزمون تجربی کشش عمیق از ورق‌های فلزی از جنس فولاد CK75 به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و با ضخامت ۱ و ۲ میلی‌متر استفاده شده است. برای تعیین مشخصات خواص مکانیکی، آزمایش کشش طبق استاندارد [9] ASTM (E8M)، توسط دستگاه کشش تک‌محوره مدل Zwick-Z250 انجام شده است. جدول ۱، خواص مکانیکی به دست آمده از آزمون کشش برای ورق‌های فلزی استفاده شده در این آزمایشات را نشان می‌دهد. ترکیب شیمیایی ورق به وسیله دستگاه کوانتومتری اندازه گیری و



شکل ۳) مقطع برش خورده ورق‌های شکل گرفته در دمای محیط

به منظور بررسی توزیع ضخامت، نمونه‌ها به وسیله دستگاه کاتر اهرمی برش خورده و سپس ضخامت نمونه‌ها با استفاده از ضخامت‌سنج اندازه‌گیری شده است. تصویر مقطع برش خورده ورق‌های شکل گرفته در دمای محیط در شکل ۳ نشان داده شده است. متالوگرافی نمونه‌ها به منظور بررسی تغییرات ریزساختاری در فرآیند کشش عمیق انجام شده است. برای این منظور، نمونه‌هایی از ناحیه دیواره و لبه ورق شکل‌دهی شده تهیه شده است. مانت سرد از جنس رزین پلی‌استر برای مانت‌نمودن نمونه‌های آزمایش استفاده شد. سنباده‌زنی نمونه‌ها با سرعت ثابت و در ۱۰ مرحله به وسیله ورق سنباده از جنس کاربیدسیلیسیم با زبری ۶۰ تا ۲۰۰۰ انجام شده است. در نهایت عملیات پولیش‌زنی و اچ (بوسیله محلول پیکرال) انجام گرفته است. مشاهدات ریزساختاری به کمک میکروسکوپ نوری صورت گرفته است.

نتایج و بحث

بررسی اثر دما در شکل‌دهی ورق CK75

محدوده دمایی کمتر از دمای استحاله یوتکتویدی

استحاله یوتکتویدی در فولاد در حدود دمای ۷۲۳ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. در دماهای بالاتر از دمای استحاله، ساختار آستنیتی پایدار است و در دماهای کمتر از دمای استحاله، ساختار دوفازی فریتی و سمنتیتی پایدار است. شکل‌دهی در محدوده دمایی کمتر از دمای استحاله یوتکتویدی به معنی عدم تغییر ریزساختار و عدم تشکیل هر گونه فاز آستنیتی در حین تغییر شکل است. آزمایش کشش عمیق بر روی ورق‌های با ضخامت ۱ و ۲ میلی‌متر در دمای محیط و همچنین بازه دمایی ۲۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و با فاصله دمایی ۵۰ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته است. نتایج به دست آمده از بررسی توزیع ضخامت نمونه‌های ۱ و ۲ میلی‌متر پس از فرآیند کشش عمیق به ترتیب در نمودارهای ۱ و ۲ نشان داده شده است. همان طور که در نمودار ۱ ملاحظه می‌شود، با افزایش دمای تغییر شکل (به استثناء دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد)، توزیع ضخامت یکنواخت‌تری به دست آمده است. در واقع یکنواخت‌ترین توزیع ضخامت برای نمونه تغییر شکل داده شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد (دمای بسیار نزدیک به دمای استحاله یوتکتویدی) حاصل شده است؛ به عبارت دیگر، کمترین مقدار نازک‌شدگی در منطقه بحرانی، برای این دما به دست آمده است. از طرف دیگر، کشش عمیق گرم در محدوده دمایی ۴۵۰ الی ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد منجر به وقوع غیریکنواختی قابل توجهی در ضخامت (خصوصاً در ناحیه دیواره و لبه) شده است.

با مقایسه نمودار ۲ توزیع ضخامت برای ورق ۲ میلی‌متر مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت ورق، غیریکنواختی توزیع ضخامت افزایش یافته است. به هر حال، در اینجا نیز حداکثر یکنواختی برای دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمده است. طبق تحقیقات رستگاری و همکاران [7]، فولاد CK75 در دمای نزدیک به استحاله یوتکتویدی، کارپذیری بالایی دارد؛ به گونه‌ای که حداکثر سرعت تغییر شکل گرم بدون وقوع هر گونه عیب نظیر ترک خوردگی، در



شکل ۱) تجهیزات فرآیند کشش عمیق گرم



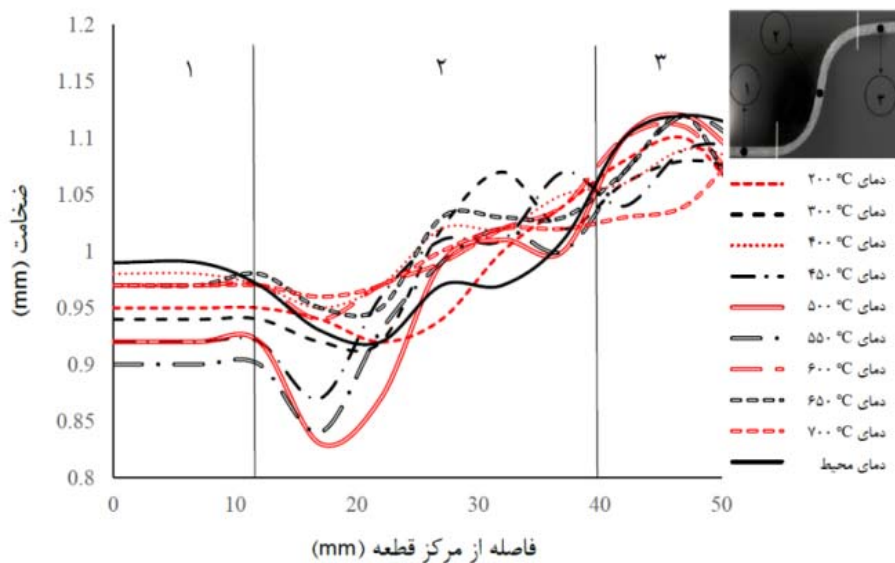
شکل ۲) نمونه‌های شکل گرفته از آزمایش در دماهای مختلف؛ الف) دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، ب) دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، ج) دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد

به عبارت دیگر، حداکثر ناپایداری و یا حداقل کارپذیری گرم در این محدوده دمایی رخ داده است. مجدداً، با افزایش بیشتر دما تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد درصد کاهش ضخامت روند نزولی داشته و در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد حداقل درصد کاهش ضخامت به دست آمده است.

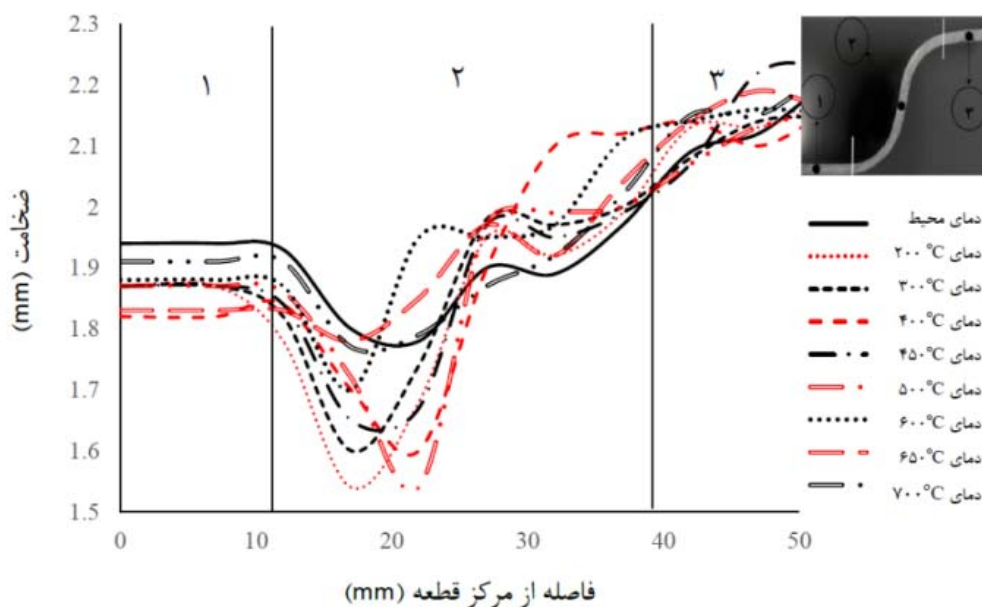
درباره کاهش ضخامت در نقطه بحرانی ورق ۲ میلی‌متر، تغییرات کمی تا دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ داده است؛ در حالی که حداکثر کاهش ضخامت در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به وقوع پیوسته، به گونه‌ای که ورق از این ناحیه دچار پارگی شده است. با افزایش دما تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، مشابه ورق ۱ میلی‌متر، حداقل مقدار کاهش ضخامت به دست آمده است.

این دما به دست می‌آید. لذا نتایج به دست آمده در این تحقیق در تطابق با یافته‌های قبلی است.

با توجه به نتایج توزیع ضخامت، درصد کاهش ضخامت در نقطه بحرانی ورق‌های شکل‌گرفته در جدول ۴ و نمودار ۳ ارایه شده است. افزایش درصد کاهش ضخامت بیانگر وقوع نازک‌شدگی موضعی در یک ناحیه مشخص از ورق است که به معنای وقوع ناپایداری سیلان در حین تغییر شکل است. واضح است که از دمای محیط تا دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، درصد کاهش ضخامت نقطه بحرانی تغییرات اندکی دارد؛ در حالی که از دمای ۴۵۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، درصد کاهش ضخامت به‌طور محسوسی افزایش یافته است. با افزایش درصد کاهش ضخامت در این محدوده دمایی، امکان وقوع پارگی خواهد یافت؛

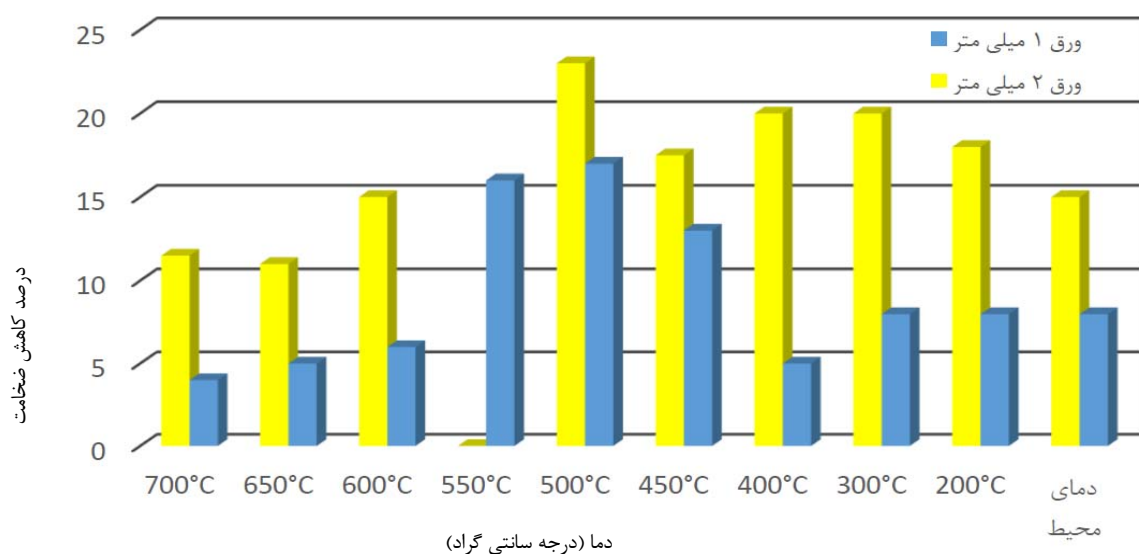


نمودار (۱) توزیع ضخامت از نمونه شکل‌گرفته از ورق ۱ میلی‌متر در دماهای آزمایش



نمودار (۲) توزیع ضخامت از نمونه‌های شکل‌گرفته از ورق ۲ میلی‌متر در دماهای آزمایش

درصد کاهش ضخامت ورق ۲ میلی‌متر (mm)	ضخامت بحرانی ورق ۲ میلی‌متر (mm)	درصد کاهش ضخامت ورق ۱ میلی‌متر (mm)	ضخامت بحرانی ورق ۱ میلی‌متر (mm)	دمای آزمایش (°C)
۱۵	۱٫۷	۸	۰٫۹۲	دمای محیط
۱۸	۱٫۶۴	۸	۰٫۹۲	۲۰۰
۲۰	۱٫۶	۸	۰٫۹۲	۳۰۰
۲۰	۱٫۶	۵	۰٫۹۵	۴۰۰
۱۷٫۵	۱٫۶۵	۱۳	۰٫۸۷	۴۵۰
۲۳	۱٫۵۴	۱۷	۰٫۸۳	۵۰۰
---	---	۱۶	۰٫۸۴	۵۵۰
۱۵	۱٫۷	۶	۰٫۹۴	۶۰۰
۱۱	۱٫۷۸	۵	۰٫۹۵	۶۵۰
۱۱٫۵	۱٫۷۷	۴	۰٫۹۶	۷۰۰



نمودار ۳) درصد کاهش ضخامت در نقطه بحرانی

افزایش یافته و حداقل ناپایداری در حین کشش عمیق رخ داده است.

ریزساختار فولاد پس از آزمون کشش عمیق در دمای محیط در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، ریزساختار فولاد متشکل از زمینه فریتی و رسوبات کروی سمنتیت است. رسوبات سمنتیت دارای توزیع نسبتاً یکنواختی در زمینه فریتی بوده و اندازه متوسط آنها تقریباً ۴۱۰ نانومتر است. همان طور که در تحقیقات گذشته نیز بیان شده است، با توجه به اندازه کم رسوبات در ریزساختار فولاد بیوتکتویدی، این فولاد قابلیت کارپذیری سرد را خواهد داشت [10, 11]. آزمون کشش عمیق سرد این فولاد نیز بدون وقوع پارگی و با ناپایداری کمی در نقطه بحرانی ورق انجام شده است.

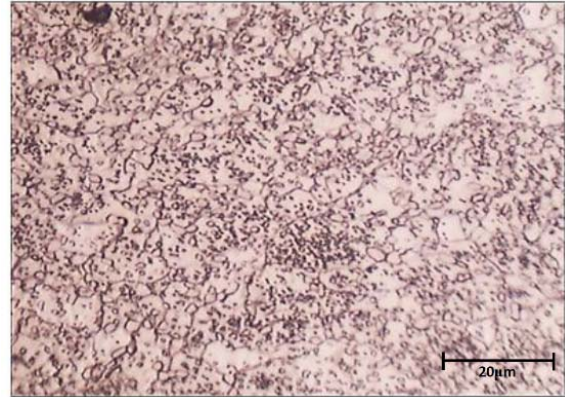
ریزساختار به دست آمده پس از آزمون کشش عمیق در دمای ۵۵۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد (ورق ۱ میلی‌متر) در شکل‌های ۵ و ۶ نشان

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان محدوده دمایی ۵۰۰ الی ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد را محدوده دمایی بحرانی برای فرآیند کشش عمیق گرم فولاد CK75 در نظر گرفت. کارپذیری فولاد وابسته به دمای کارگرم و شرایط ریزساختاری فولاد است. از یک طرف، افزایش دما باعث افزایش کارپذیری می‌شود و از سوی دیگر، با افزایش دما و افزایش سرعت نفوذ (به خصوص عنصر کربن)، رسوبات سمنتیت شروع به درشت شدن می‌نمایند و در نتیجه کارپذیری کاهش می‌یابد. در واقع، با افزایش دمای تغییر شکل گرم، این دو اثر در تقابل با یکدیگر هستند. در محدوده دمایی ۵۰۰ الی ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، اُفت کارپذیری ناشی از درشت شدن رسوبات مکانیزم حاکم بر کارپذیری بوده و منجر به وقوع ناپایداری سیلان در منطقه بحرانی شده است؛ در حالی که در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، به رغم درشت شدن رسوبات، به دلیل دمای بالاتر و نزدیکی به دمای استحاله، کارپذیری فولاد

داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش دمای تغییر شکل، اندازه رسوبات کروی سمنتیت به‌طور محسوس افزایش یافته است و از حدود ۴۱۰ نانومتر در دمای محیط به نزدیک ۱/۱ میکرومتر و ۹۳۰ نانومتر به ترتیب در دمای ۵۵° و ۷۰° درجه سانتی‌گراد رسیده است.

ریزساختار فولاد پس از کشش عمیق در دمای ۷۵° درجه سانتی‌گراد در شکل ۸، نشان داده شده است. واضح است که اندازه متوسط رسوبات به‌طور قابل ملاحظه‌ای (بیش از ۱/۵ میکرومتر) افزایش یافته است و در کنار آن، رسوبات بسیار درشتی با اندازه بیش از ۲ میکرومتر تشکیل شده است. علاوه بر این، به دلیل نگهداری بسیار کوتاه مدت ورق در دمای ۷۵° درجه سانتی‌گراد (پیش از شروع عملیات کشش عمیق)، آستنیت‌شدن ریزساختار به‌طور کاملاً ناقص رخ داده و یک ساختار سه‌فازی آستنیتی+ فریتی+ سمیتیتی با توزیع غیریکنواختی از رسوبات کاربیدی تشکیل شده است. چنین رخدادی باعث کاهش قابل ملاحظه کارپذیری فولاد شده است. به نظر می‌رسد که افزایش بیشتر دمای آستنیت‌دهی و زمان نگهداری کافی می‌تواند منجر به رفع این مشکل شود که می‌تواند در پژوهش‌های آتی مورد بررسی قرار گیرد.

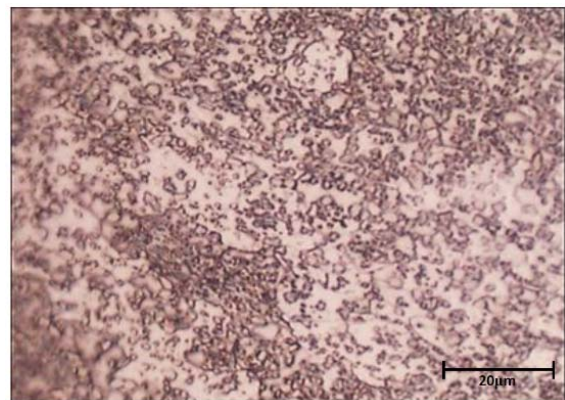
داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش دمای تغییر شکل، اندازه رسوبات کروی سمنتیت به‌طور محسوس افزایش یافته است و از حدود ۴۱۰ نانومتر در دمای محیط به نزدیک ۱/۱ میکرومتر و ۹۳۰ نانومتر به ترتیب در دمای ۵۵° و ۷۰° درجه سانتی‌گراد رسیده است.



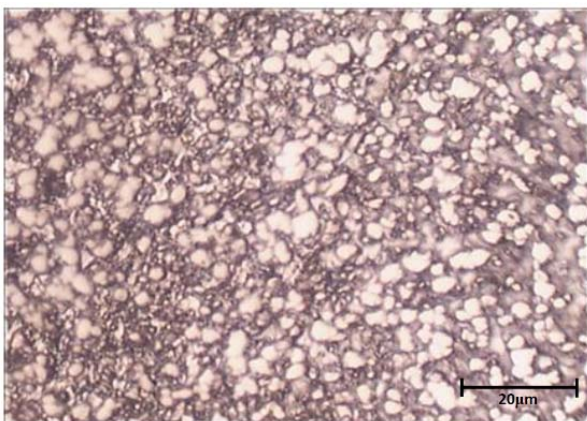
شکل ۴) ریزساختار نمونه پس از فرآیند شکل‌دهی در دمای محیط



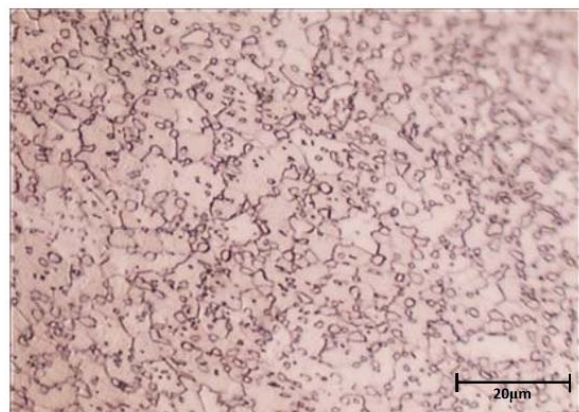
شکل ۷) نمونه شکل‌دهی شده در دمای ۷۵° درجه سانتی‌گراد



شکل ۵) ریزساختار نمونه شکل‌دهی شده در دمای ۵۵° درجه سانتی‌گراد



شکل ۸) ریزساختار نمونه شکل‌دهی شده در دمای ۷۵° درجه سانتی‌گراد



شکل ۶) ریزساختار نمونه شکل‌دهی شده در دمای ۷۰° درجه سانتی‌گراد

بررسی اثر روان‌کار در شکل‌دهی ورق CK75

در این بخش از پژوهش، شیوه‌های مختلف روان‌کاری مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. آزمون کشش عمیق توسط پودر گرافیت و گریس دما بالا در دماهای ۷۱۵، ۷۵۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد

محدوده دمایی بالاتر از دمای استحاله یوتکتویدی

در ادامه پژوهش، آزمون کشش عمیق در دماهای ۷۵۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفته است. نتایج به دست آمده بیانگر وقوع شکست و پارگی قابل ملاحظه در تمام نمونه‌های مورد آزمایش

به‌طور مشابه آزمون کشش عمیق با روان‌کاری اجزای قالب توسط گرافیت و همچنین ترکیب گریس و پودر گرافیت در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. نتایج نشان‌دهنده عدم شکل‌دهی در حالت استفاده از روان‌کار گرافیت و همچنین شکل‌دهی کامل در حالت استفاده از ترکیب گریس و پودر گرافیت برای مجموعه قالب است. تصویر نمونه‌های به‌دست‌آمده از آزمایش در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد برای دو حالت مختلف روان‌کاری در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.



شکل ۱۰ نمونه های شکل‌دهی‌شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد: (A) روان‌کاری توسط ترکیب گریس و گرافیت، (B) روان‌کاری توسط گرافیت

نتیجه‌گیری

به‌منظور بررسی تاثیر دما بر شکل‌دهی ورق‌های فولادی پرکربن CK75، مجموعه قالب و تجهیزات آزمایشگاهی برای انجام آزمون کشش عمیق گرم برای ورق‌هایی با ضخامت ۱ و ۲ میلی‌متر طراحی شد. آزمون کشش عمیق در دمای محیط و همچنین کشش عمیق در بازه دمایی نزدیک و همچنین کمتر از دمای استحاله یوتکتویدی انجام شد. خلاصه نتایج حاصل از این پژوهش به‌صورت زیر بیان می‌شود:

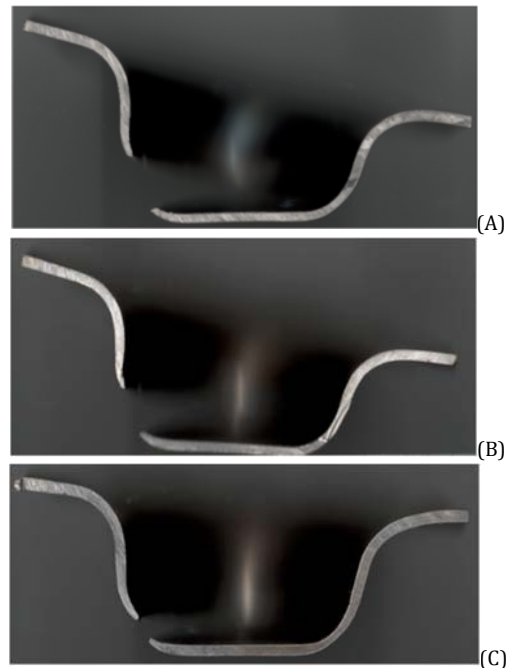
۱- در بازه دمایی کمتر از دمای استحاله یوتکتویدی، با افزایش دمای تغییر شکل (به استثناء محدوده دمایی ۴۵۰ الی ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد)، توزیع ضخامت یکنواخت‌تری مشاهده شد. یکنواخت‌ترین توزیع ضخامت برای نمونه تغییر شکل داده‌شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد (دمای بسیار نزدیک به دمای استحاله یوتکتویدی) حاصل شد.

۲- آزمون کشش عمیق گرم در محدوده دمایی ۴۵۰ الی ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد منجر به وقوع غیریکنواختی قابل توجهی در ضخامت (خصوصاً در ناحیه دیواره و لبه) شد. حداکثر ناپایداری و یا حداقل کارپذیری گرم در این محدوده دمایی گزارش شد. اُفت کارپذیری

انجام شده است. در گام نخست برای ورق آغشته به پودر گرافیت و گریس، آزمون کشش عمیق انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر وقوع شکست برای تمام نمونه‌های مورد آزمایش (ورق‌های ۱ و ۲ میلی‌متر) است. جذب کربن موجود در پودر گرافیت توسط ورق به‌دلیل نگهداری ورق در کوره با دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد (پیش از شروع عملیات کشش عمیق)، اتفاق افتاده است. چنین رخدادی باعث عدم شکل‌دهی کامل و درنتیجه شکست و پارگی نمونه‌های آزمایش شده است.

در ادامه، آزمون کشش عمیق با روان‌کاری اجزای قالب توسط گریس، گرافیت و ترکیب گریس و گرافیت در دماهای ۷۱۵، ۷۵۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر وقوع شکست و پارگی قابل ملاحظه در تمام نمونه‌های مورد آزمایش (ورق ۱ و ۲ میلی‌متر) است. همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد، تشکیل ساختار سه‌فازی آستنیتی+ فریتی+ سمنیتی با توزیع غیریکنواختی از رسوبات کاربیدی باعث کاهش قابل ملاحظه کارپذیری فولاد مورد مطالعه و درنتیجه عدم شکل‌پذیری مناسب نمونه‌ها شده است.

با توجه به عدم شکل‌دهی نمونه‌های آزمایش در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد برای ورق ۲ میلی‌متر، آزمون کشش عمیق با روان‌کاری اجزای قالب توسط گریس، گرافیت و ترکیب گریس و گرافیت انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر وقوع شکست در تمام نمونه‌های مورد آزمایش است. تصویر سطح مقطع برش‌خورده نمونه‌های به‌دست‌آمده از آزمایش در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد برای حالت‌های مختلف روان‌کاری در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹ سطح مقطع ورق شکل‌دهی‌شده در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد: (۱) روان‌کاری توسط گرافیت، (۲) روان‌کاری توسط گریس، (۳) روان‌کاری توسط ترکیب گریس و گرافیت

temperatures. Journal of Materials Processing Technology. 2007;185(1):147-151.

2- Palumbo G, Sorgente D, Tricarico L, Zhang SH, Zheng WT. Numerical and experimental investigations on the effect of the heating strategy and the punch speed on the warm deep drawing of magnesium alloy AZ31. Journal of Materials Processing Technology. 2007;191(1-3):342-346.

3- Raman Goud R, Eshwara Prasad K, Singh SK, Varghese G. Thickness distribution of extra deep drawn steel in stretch forming at elevated temperatures. Materials Today: Proceedings. 2017;4(2):827-834.

4- Afshin E, Kadkhodayan M. An experimental investigation into the warm deep-drawing process on laminated sheets under various grain sizes. Materials & Design. 2015;87:25-35.

5- Kadkhodayan M, Afshin E. Thinning behavior of laminated sheets metal in warm deep-drawing process under various grain sizes. In proceeding of 12th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes; 2016 May 20; France: EDP Sciences; 2016.

6- Singh SK, Mahesh K, Kumar A, Swathi M. Understanding formability of extra-deep drawing steel at elevated temperature using finite element simulation. Materials & Design. 2010;31(9):4478-4484.

7- Rastegari H, Kermanpur A, Najafizadeh A, Porter D, Somani M. Warm deformation processing maps for the plain eutectoid steels. Journal of Alloys and Compounds. 2015;626:136-144.

8- Rastegari H, Kermanpur A, Najafizadeh A, Somani MC, Porter DA, Ghassemali E, et al. Determination of processing maps for the warm working of vanadium microalloyed eutectoid steels. Materials Science and Engineering. 2016;658:167-175.

9- ASTM E8: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM; 2004.

10- Takahashi T, Nagumo M. Flow stress and work-hardening of pearlitic steel. Transactions of the Japan Institute of Metals. 1970;11(2):113-119.

11- Zheng C, Li L, Yang W, Sun Z. Microstructure evolution and mechanical properties of eutectoid steel with ultrafine or fine (ferrite+cementite) structure. Materials Science and Engineering A. 2014;599:16-24.

ناشی از درشت شدن رسوبات، مکانیزم حاکم بر کارپذیری بوده و منجر به وقوع ناپایداری سیلان در منطقه بحرانی شده است.

۳- نتایج به دست آمده از آزمون کشش عمیق در دماهای ۷۵۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد بیانگر وقوع شکست و پارگی قابل ملاحظه در تمام نمونه‌های مورد آزمایش (ورق ۱ و ۲ میلی‌متر) بوده است. تشکیل ساختار سه‌فازی آستنیتی+ فریتی+ سمنیتی با توزیع غیریکنواختی از رسوبات کاربیدی باعث کاهش قابل ملاحظه کارپذیری فولاد مورد مطالعه و در نتیجه عدم شکل‌پذیری مناسب قطعات شده است.

۴- آزمون کشش عمیق با روان‌کاری اجزای قالب توسط گرافیت، گریس و همچنین ترکیب گریس و پودر گرافیت انجام پذیرفت. مناسب‌ترین شکل‌دهی با استفاده از ترکیب گریس و پودر گرافیت برای مجموعه قالب حاصل شده است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

تأییدیه اخلاقی: تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: علی صنعتیان (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۳۴٪)؛ امین ثقفی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۳۳٪)؛ حبیب‌اله رستگاری کوپایی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۳۳٪).

منابع مالی: بخشی از هزینه‌ها از محل حمایت دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی بیرجند از پایان نامه‌های تحصیلات تکمیلی تأمین شده است.

منابع

1- Zhang SH, Zhang K, Xu YC, Wang ZT, Xu Y, Wang ZG. Deep-drawing of magnesium alloy sheets at warm