



Investigation of the Ring Rolling Process of the Bonded Lead-Tin Two-Layer Ring By Finite Element Method and Experimental Test

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Abbaszadeh Gorani M.¹ MSc,
Hadad M.^{*1} PhD,
Parvizi A.¹ PhD

How to cite this article

Abbaszadeh Gorani M, Hadad M, Parvizi A. Investigation of the Ring Rolling Process of the Bonded Lead-Tin Two-Layer Ring By Finite Element Method and Experimental Test. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(5):1375-1385.

ABSTRACT

Rolling ring is one of the most important metal forming processes for fabricating rounded geometries with optimal mechanical properties in the environmental direction. The ability to fabrication of two-layer rings can be used in many industries. One of the properties of these rings is the lightweight with high strength or wear resistance along with high strength. In this research, we have tried to study the ring rolling process of the bonded two-layer ring and its effective parameters during the process using finite element analysis by ABAQUS software and experimental test. The rings are attached for process simulation and empirical testing. In the end, a ring of two-layer of pure Lead 99.99% and Tin 63% was formed. Based on the results obtained from this analysis and according to the dimensions and parameters considered for performing the process, the tension created in the bonded two-layer ring is between the values of 1.146×10^5 - 1.800×10^7 Pa and it has a strain of 0-1.187. Its contours of strain and stress are represented to better understand the process. Considering the results obtained from the simulation of the process, an experimental study of the ring rolling process of the bonded two-layer ring was conducted. The method of this study was first designed by the modeling software to design the casting model and then by designing the test, the number of tests required for the experimental test was obtained and then the number of materials needed for the test was calculated. After testing, the mechanical and metallurgical properties of rolled double rolled rings were investigated.

Keywords Ring; Rolling; Ring Rolling; Two Layers; Bonded; Bonded Two Layers

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

*Correspondence

Address: Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Tehran, Amir-Abad Neighborhood, North Karegar Street, Tehran, Iran. Postal Code: 14395515
Phone: +98 (21) 61119958
Fax: +98 (21) 61119903
mjhadad@ut.ac.ir

Article History

Received: June 22, 2019
Accepted: October 30, 2019
ePublished: May 09, 2020

CITATION LINKS

[1] Analysis of coupled mechanical and thermal behaviors in hot rolling of large rings of titanium alloy using 3D dynamic explicit FEM [2] An axisymmetric forging approach to preform design in ring rolling using a rigid-viscoplastic finite element method [3] Analysis of plastic penetration in process of groove ball-section ring rolling [4] A control method of guide rolls in 3D-FE simulation of ring rolling [5] Guide roll simulation in FE analysis of ring rolling [6] Encyclopedia.com [7] Chemistry of the elements [8] Structural shielding design for medical X-ray imaging facilities [9] Dynamic and static restoration behaviors of pure lead and tin in the ambient temperature range

بررسی فرآیند نورد حلقه‌های حلقه دولایه چسبیده از جنس‌های سرب- قلع با استفاده از روش اجزای محدود و آزمون تجربی

مهدی عباسزاده گورانی MSc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

محمدجعفر حداد* PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

علی پرویزی PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

نورد حلقه‌های یکی از مهم‌ترین فرآیندهای شکل‌دهی برای ساخت هندسه‌های گرد و یکپارچه با خواص مکانیکی مطلوب در جهت محیطی است. توانایی ساخت حلقه‌های دولایه می‌تواند کاربرد فراوانی در صنایع مختلف داشته باشد. از جمله خواص این‌گونه حلقه‌ها می‌توان به داشتن وزن سبک در کنار استحکام بالا یا مقاومت به سایش در کنار استحکام بالا اشاره نمود. در این پژوهش سعی شده است تا به بررسی فرآیند نورد حلقه‌های دولایه چسبیده و پارامترهای موثر بر آن در طول فرآیند با استفاده از تحلیل اجزا محدود توسط نرم‌افزار ABAQUS و آزمون تجربی، پرداخته شود. حلقه‌ها به صورت چسبیده به یکدیگر برای انجام شبیه‌سازی فرآیند و آزمون تجربی در نظر گرفته شده و در انتها یک حلقه از دو جنس متفاوت سرب خالص ۹۹/۹۹٪ و قلع ۰/۰۱٪ تشکیل شد. با استناد به نتایج به دست آمده از این تحلیل و با توجه به ابعاد و پارامترهای در نظر گرفته شده برای انجام فرآیند، تنش به وجود آمده در حلقه نورد شده دولایه چسبیده، بین مقادیر 1×10^8 Pa و 1.6×10^8 Pa و کرنش آن معادل ۱/۸۸٪ - به دست آمد. همین‌طور تصاویر کانتورهای تنش و کرنش، برای درک بهتر فرآیند ارائه شد. با توجه به موارد به دست آمده از شبیه‌سازی به بررسی تجربی نورد حلقه‌های دولایه پرداخته شد. روش کار بدین صورت بود که ابتدا توسط نرم‌افزار مدل‌سازی به طراحی مدل ریخته‌گری پرداخته شده و سپس با طراحی آزمایش تعداد آزمون‌های مورد نیاز به دست آمده و پس از آن میزان مواد مورد نیاز برای انجام آزمون محاسبه شد. بعد از انجام آزمون‌ها به بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی حلقه‌های دولایه نورد شده پرداخته شد.

کلیدواژه‌ها: نورد، حلقه، نورد حلقه‌ای، رینگ، رولینگ، رینگ رولینگ، دولایه، چسبیده، دولایه چسبیده

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۰۸

*نویسنده مسئول: mjhadad@ut.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از فرآیندهایی که امروزه در بسیاری از صنایع به‌ویژه صنایع نظامی و هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرد فرآیند نورد حلقه‌ای است. این فرآیند شامل غلتک اصلی، مندرل، غلتک‌های راهنما و غلتک‌های مخروطی است. با نزدیک شدن مندرل به غلتک اصلی، نورد شعاعی صورت می‌گیرد و قطر خارجی حلقه زیاد شده و ضخامت شعاعی آن کم می‌شود. با نزدیک شدن دو غلتک مخروطی به یکدیگر، نورد محوری انجام می‌شود و ضخامت محوری حلقه تنظیم می‌شود. این فرآیند در تولید حلقه‌های بدون درز جوش

کاربرد دارد و به دلیل همین خصوصیت مورد توجه انواع صنایع قرار گرفته است. البته این روش دارای مزایای دیگری مانند هزینه بسیار پایین تولید، توانایی در تولید انواع مقاطع، کیفیت بهتر محصولات از لحاظ متالورژیکی و ریزساختار و کاهش دورریز ماده اولیه است. این روش به دلیل تولید حلقه‌هایی بدون درز جوش و کاهش دورریز ماده اولیه بهترین و مناسب‌ترین روش جهت تولیدات متقارن صنایع نظامی و هوافضا است. برای طراحی و ساخت دستگاه نورد حلقه‌ای به محاسبه نیروها و گشتاور غلتک‌ها نیاز است. این کار به روش اجزا محدود صورت می‌گیرد. امروزه استفاده از نرم‌افزار تحلیل اجزا محدود در بخش‌های مهندسی به امری اجتناب‌ناپذیر و مرسوم تبدیل شده است. پذیرش ضرورت استفاده از این گونه نرم‌افزارها در کاهش هزینه‌های تحقیق و توسعه نیازی به ارائه دلایل و اسناد مالی ندارد. کاهش زمان طراحی و ساخت به همراه ارائه دیدگاهی شبه‌تجربی باعث شده تا علم اجزا محدود به ابزاری مرسوم در طراحی تبدیل شود.

مقالات بسیاری در زمینه فرآیند نورد حلقه‌ای و شبیه‌سازی آن در نرم‌افزارهای اجزا محدود وجود دارد. وانگ و همکاران^[1] به شبیه‌سازی فرآیند نورد حلقه‌ای به صورت داغ و برای حلقه ساده پرداختند. سپس نتایج شبیه‌سازی با استفاده از آزمایش‌های عملی اعتبارسنجی شد و پارامترهای کلیدی فرآیند تعیین شدند. جوآن و همکاران^[2] روشی جدید جهت پیش‌بینی تقریبی تغییر شکل ماده در فرآیند نورد حلقه‌ای ارائه کردند. در این مقاله فرآیند نورد حلقه‌ای به صورت دوبعدی و همچنین متقارن محوری شبیه‌سازی شده است. هوآ و همکاران^[3] برای بررسی شرایط اصلی در نورد حلقه‌ای با شیار توپی و بررسی پارامترهای نفوذ پلاستیکی، به شبیه‌سازی فرآیند نورد حلقه‌ای به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار ABAQUS پرداختند. لی و همکاران^[4] روش جدیدی برای هدایت غلتک‌های راهنما بیان نمودند و با استفاده از روش اجزا محدود به شبیه‌سازی فرآیند نورد حلقه‌ای با مقطع مستطیل به مقطع T- شکل پرداخته و سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی را با نتایج آزمایش عملی مقایسه کردند. فروزان و همکاران^[5] روش جدیدی جهت شبیه‌سازی غلتک‌های راهنما بیان کردند که به‌عنوان روش میله‌های حرارتی نام‌گذاری شده است. این روش موجب پایداری و سرعت حل بیشتر در شبیه‌سازی فرآیند نورد حلقه‌ای شده است.

در این پژوهش جهت دستیابی به یک حلقه با کیفیت و با خواص مکانیکی مطلوب استفاده از فرآیند نورد حلقه‌ای برای تولید حلقه دولایه با دو فلز متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد. این روش، فرآیندی سریع، مقرون‌به‌صرفه خواهد بود. علاوه بر تولید حلقه‌هایی با استحکام محیطی بالا، قطعه خواص و ویژگی‌های برتری از جمله وزن سبک، مقاومت به سایش (با توجه به کاربرد آن برای سطح خارجی یا داخلی)، داشتن خواص مطلوب دو فلز در کنار یکدیگر، کاهش هزینه‌های تولید نسبت به روش‌های دیگر و موارد متعددی که با توجه نیاز صنعت کاربرد دارند را دارا است.

شود. قوطی‌های فولادی با پوشش قلع برای نگهداری غذا کاربردی وسیع دارد و این کاربرد بخش وسیعی از بازار قلع فلزی را تشکیل می‌دهد. مهم‌ترین نمک آن کلرید قلع است که به‌عنوان عامل کاهنده و یک خورنده در چاپ روی پارچه کاربرد دارد. اگر نمک قلع روی شیشه پاشیده شود لایه‌ای به وجود می‌آید که خاصیت هدایت الکتریکی دارد. از این پوشش‌ها در شیشه‌های اتومبیل ضدیخ و روشنایی تابلو فرمان استفاده می‌شود. از قلع همچنین در لحیم‌کاری برای اتصال لوله‌ها یا مدارهای الکتریکی، در آلیاژهای چرخ‌دنده، در شبیه‌سازی و طیف وسیعی از کاربردهای شیمیایی استفاده می‌شود^[6].

۲-۲- سرب ۹۹.۹۹% (Pb) Lead

سرب (Plumbum) از عنصرهای شیمیایی واسطه در جدول تناوبی با نماد شیمیایی Pb و عدد اتمی ۸۲ است. این ماده در رده فلزهای سنگین قرار داشته (سنگین‌ترین عنصر پایدار)^[7]، سمی و چکش‌خوار بوده و دارای رنگ خاکستری کدری است. هنگامی که تازه تراشیده شود به رنگ سفید مایل به آبی است اما در معرض هوا به رنگ خاکستری تیره تبدیل می‌شود^[7]. در طبیعت به شکل کانی به نام گالن (سیستم تبلور کوپیک یا مکعبی) یافت می‌شود. سرب پس از آهن، آلومینیم، مس و روی بیشترین کاربرد را دارد. از موارد استفاده معمولی آن می‌توان استفاده در باتری‌های اسید سرب، در اجزای الکترونیکی، روکش کابل، مهمات، در شیشه لامپ‌های پرتوی کاتدی (Cathode-Ray Tube; CRT)، سرامیک، شیشه‌های سرب‌دار، آلیاژها، مسوار، اتصالات و مواد پرکننده را نام برد. در بنزین به‌صورت تترااتیل و تترامتیل سرب برای کاهش صدای موتور کاربرد داشت. البته فروش بنزین سرب‌دار در آمریکا از سال ۱۹۸۶ و در اتحادیه اروپا از سال ۱۹۹۹ ممنوع شد^[6].

سرب می‌تواند از تشعشعات هسته‌ای جلوگیری نموده و آنها را از خود عبور ندهد^[8]. از خاصیت رسانای الکتریکی پایینی برخوردار است. این فلز به‌شدت در برابر پوسیدگی مقاومت می‌کند و به همین علت از آن برای نگهداری مایعات فرسایشگر (مثل اسیدسولفوریک) استفاده می‌شود. با افزودن مقادیر خیلی کمی آنتیموان یا فلزات دیگر به سرب می‌توان آن را سخت نمود^[6].

۳- تحلیل فرآیند نورد حلقه‌ای دولایه چسبیده

برای انجام فرآیند نورد حلقه‌ای دولایه لازم دیده شد که روش استفاده از حلقه‌های دولایه برای تبدیل به یک حلقه از دو جنس متفاوت تغییر گردد. لذا برای این کار باید حلقه‌ها را قبل از فرآیند به یکدیگر متصل نمود. راهی که به نظر می‌رسید ترسیم یک حلقه یکپارچه و تقسیم‌بندی آن به دو ناحیه و تخصیص خواص جداگانه برای آن بود. با این عمل نرم‌افزار دو فلز جدا از یکدیگر را چسبیده به هم در نظر می‌گیرد و تحلیل آن به‌درستی انجام می‌گردد (شکل ۱).

جهت انجام شبیه‌سازی باید موادی را بسته به نیاز و با توجه به کاربردی خاص، در نظر گرفت تا بتوان آنها را از نظر شکل‌پذیری و کارپذیری در این نوع فرآیند استفاده نمود و نیز دارای قابلیت استفاده در کنار یکدیگر را داشته باشند. بدین معنی که دو فلز باید بتوانند به یکدیگر در طی فرآیند بچسبند و در نهایت خاصیت چسبندگی خود را به‌خوبی حفظ نمایند. از اثرات کار سختی در سرب و قلع صرف‌نظر شده است، زیرا دمای تبلور مجدد آنها پایین‌تر از دمای اتاق (۲۵ درجه) است.

در این راستا برای حلقه داخلی از یک فلز سبک‌وزن استفاده می‌شود. این امر سبب می‌شود که محصول ما از نظر وزنی نسبت به محصولات مشابه دارای وزنی به مراتب سبک‌تر و همچنین از لحاظ استحکام دارای استحکامی مطلوب و قابل قبول در حلقه خارجی آن گردد. به‌طور مثال این محصول می‌تواند در چرخ‌دنده‌های توربین‌های بادی در قسمت روتورهاب آنها به‌کار رود. جدول ۱ مواد در نظر گرفته‌شده برای فرآیند نورد حلقه‌ای دولایه و خواص مکانیکی و حرارتی آنها را نشان می‌دهد. در ادامه توضیح مختصری در مورد این آلیاژها و کاربردهای آنها در صنایع مختلف آمده است.

جدول ۱) مواد و خواص مکانیکی و حرارتی آنها برای سرب خالص و قلع^[6]

پارامتر	سرب خالص	قلع
استحکام کششی	۱۸MPa	۱۱MPa
نسبت پواسون	۰/۴۲	۰/۳۲۵
مدول الاستیسیته	۱۴GPa	۴۱/۶GPa
مدول برشی	۴/۹۰GPa	۱۵/۶GPa
سختی برینل	۴/۲	۲/۳
ضریب انبساط حرارتی (@۲۰-۱۰۰ °C/۶۸-۲۱۲°F)	۲۹/۱μm/m°C	۵/۴۰μm/m°C
هدایت حرارتی	۳۳W/mK	۶۳/۲W/mK

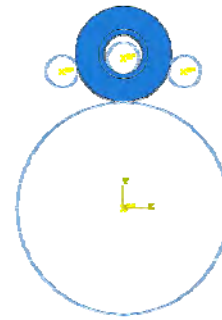
۲-۲- قلع ۶۳% (Sn) Tin

قلع یا آرزیز عنصری شیمیایی است که در جدول تناوبی با نشان Sn و عدد اتمی ۵۰ وجود دارد. این فلز ضعیف چکش‌خوار و به رنگ نقره‌ای که به آسانی در آزمایش‌های مربوط با هوا اکسید نمی‌شود در برابر فرسایش مقاوم است، در بسیاری از آلیاژها وجود داشته و به‌عنوان پوشش مواد دیگر جهت جلوگیری از فرسایش آنها به‌کار می‌رود. قلع را عمدتاً از ماده معدنی کاسیتریت که در آن به‌صورت اکسید وجود دارد، به‌دست می‌آورند. از برخی آلیاژهای مهم قلع می‌توان به برنز، مفرغ، بابیت، آلیاژ ریخته‌گری شده تحت فشار، مسوار (Pewter)، برنز فسفردار، لحیم نرم و فلز سفید اشاره نمود.

قلع به آسانی به آهن متصل شده و برای پوشش سرب، روی و فولاد مورد استفاده قرار می‌گیرد تا از پوسیدگی آنها جلوگیری

باید طوری حرکت کنند که در تماس مداوم با حلقه بوده و از طرفی دیگر نیروی بیش از حد به حلقه اعمال نکنند، در این صورت حلقه نهایی پس از تغییر شکل خاصیت دایروی بودن خود را از دست نخواهد داد.

کانتورهای تنش به دست آمده در شبیه سازی فرآیند نورد حلقه ای دولایه چسبیده نشان می دهد کمترین میزان تنش اعمال شده، معادل $1/146 \times 10^6 \text{ Pa}$ و بیشترین میزان آن به $1/800 \times 10^6 \text{ Pa}$ می رسد (شکل های ۲ و ۳). همچنین کانتورهای کرنش به دست آمده در شبیه سازی فرآیند مذکور نشان می دهد کمترین میزان کرنش اعمال شده، معادل صفر و بیشترین میزان آن به $1/187$ می رسد (شکل های ۴ و ۵).



شکل ۱) ترسیم فرآیند نورد حلقه ای دولایه چسبیده در نرم افزار و تعریف دو خاصیت متفاوت برای حلقه

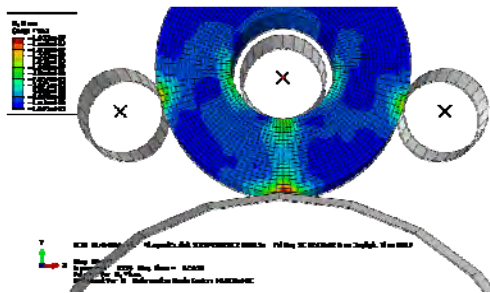
برای حل مسایل دارای تغییر شکل زیاد به روش المان محدود، دو نوع روش تحلیل صریح و ضمنی وجود دارد. روش تحلیل صریح برای مسایل دینامیکی با سرعت تغییر شکل بالا و یا تغییر شکل های شدید مناسب است و در آن هیچ کدام از ماتریس های جرم و سختی نیازی به مونتاژ نداشته و حل در سطح المان ها صورت می گیرد. به همین دلیل برای حل مسایل نیاز به حافظه کمتری است. این امتیاز سبب شده که سرعت حل در مقایسه با روش ضمنی بالاتر رود. لذا جهت شبیه سازی فرآیند نورد حلقه ای از روش انتگرال گیری صریح استفاده شده است.

با توجه به شرایط حل مساله توسط نرم افزار، قطعات غلتک اصلی، مندرل و غلتک های راهنما به صورت اجسام صلب تحلیلی و حلقه به صورت شکل پذیر و با مقادیر هندسی در جدول ۲ مدل سازی شدند.

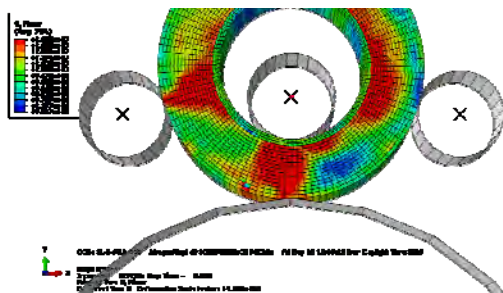
جدول ۲) مقادیر هندسی استفاده شده برای شبیه سازی نورد حلقه ای دولایه

ردیف	مشخصه	واحد	مقدار
۰۱	قطر غلتک اصلی	mm	۲۶۷
۰۲	قطر مندرل	mm	۱۰۰
۰۳	قطر غلتک راهنما	mm	۳۰
۰۴	قطر بزرگ غلتک مخروطی	mm	۴۲
۰۵	قطر کوچک غلتک مخروطی	mm	۲۳
۰۶	زاویه راس مخروط	deg	۱۲
۰۷	قطر بیرونی حلقه خارجی	mm	۱۹۸
۰۸	قطر درونی حلقه خارجی و قطر بیرونی حلقه داخلی	mm	۱۲۲
۰۹	قطر درونی حلقه داخلی	mm	۱۱۴
۱۰	ارتفاع حلقه ابتدایی	mm	۳۲

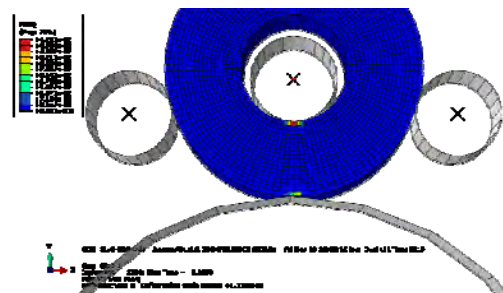
همچنین از مهم ترین چالش های نورد حلقه ای می توان به زمان حل بسیار طولانی و چگونگی شبیه سازی مسیر حرکت غلتک های راهنما اشاره کرد. دلیل زمان بردن حل مساله نورد حلقه ای، تغییر شکل چندباره یک المان در مراحل مختلف است. بدین معنی که هر المان تا انتهای فرآیند باید چندین بار از ناحیه نورد شعاعی و نورد محوری عبور کند. می توان این مشکل را با استفاده از مقیاس دهی جرمی کنترل شده تا حدودی رفع کرد. یکی دیگر از مشکلات اساسی که در شبیه سازی نورد حلقه ای وجود دارد مساله چگونگی کنترل مسیر حرکت غلتک های راهنما است. این غلتک ها



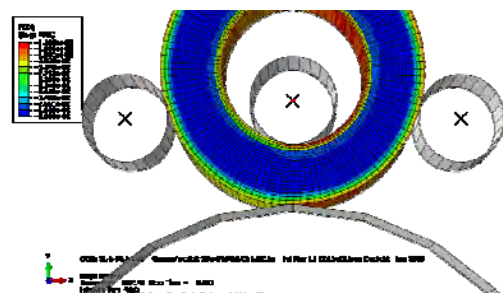
شکل ۲) کانتور تنش در آغاز فرآیند در نورد حلقه ای دولایه چسبیده



شکل ۳) کانتور تنش در پایان فرآیند در نورد حلقه ای دولایه چسبیده



شکل ۴) کانتور کرنش در آغاز فرآیند در نورد حلقه ای دولایه چسبیده



شکل ۵) کانتور کرنش در پایان فرآیند در نورد حلقه ای دولایه چسبیده

جدول ۴) طراحی آزمایش انجام فرآیند نورد حلقه‌ای دولایه

حلقه شماره	سرعت دورانی غلتک اصلی (rpm)	سرعت خطی مندرل (mm/s)
۰۰	-	-
۰۱	۱۰	۰/۵
۰۲	۲۰	۰/۵
۰۳	۱۰	۰/۶
۰۴	۲۰	۰/۶

۴- آزمایش تجربی

۴-۱- طراحی آزمایش‌ها

بررسی‌ها نشان می‌دهد که سرعت دورانی غلتک اصلی، سرعت پیشروی مندرل و وجود یا نبود غلتک‌های محوری بر مقادیر خروجی تاثیر داشته باشند؛ بنابراین دو مقادیر ورودی کمی فرآیند (سرعت دورانی غلتک اصلی و سرعت پیشروی مندرل) در ۲ سطح مختلف و یک مقادیر ورودی کیفی فرآیند (استفاده از دو فلز با جنس‌های متفاوت) انتخاب شد. لازم به ذکر است که مقادیر ورودی استفاده از دو فلز با جنس‌های متفاوت به صورت ورودی ثابت و مقادیر تاثیرگذار بر تمام فرآیند در همه آزمایش‌ها به کار گرفته شد. جدول ۳ نشان دهنده مقدار سطوح مقادیر مختلف است.

پس از وارد کردن اطلاعات متغیرها و تعیین سطوح آنها در نرم‌افزار مرتبط، تعداد آزمایش‌هایی که به روش سطح پاسخ، مشخص شد به تعداد ۴ عدد بود که در جدول ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است حلقه شماره ۰۰ ریخته‌گری شده و مورد نورد قرار نگرفته است تا بتوان خواص حلقه‌ها را قبل و بعد از نورد با یکدیگر مورد بررسی قرار داد. در نمودار ۱ تنش- کرنش حقیقی برای سرب خالص و قلع رسم شده است.

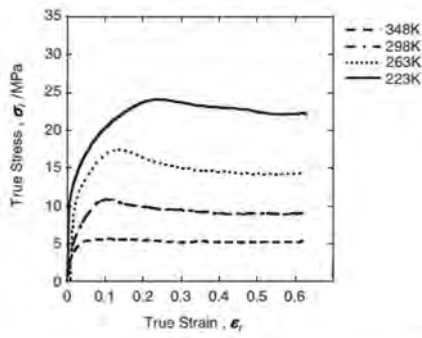
۴-۲- تولید حلقه اولیه (آماده‌سازی نمونه)

جهت آماده‌سازی حلقه اولیه برای نورد، ابتدا باید مدل ریخته‌گری آن طراحی و سپس ساخته شود. به جهت دولایه بودن حلقه مورد پژوهش باید مدل ریخته‌گری متشکل از سه قطعه باشد. مدل ریخته‌گری اول برای ریخته‌گری حلقه بزرگ (لایه بیرونی) که از جنس سرب بوده و مدل ریخته‌گری دوم و سوم به منظور ریخته‌گری حلقه کوچک (لایه داخلی) به کار می‌روند (شکل ۶).

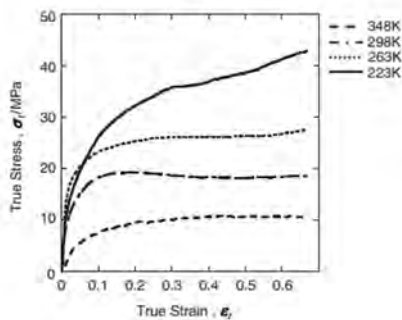
روند کار بدین صورت بود که ابتدا حلقه بزرگ با استفاده مدل ریخته‌گری اول تشکیل می‌شد و پس از سرد شدن، دوباره در قالب قرار گرفته و این بار دل ریخته‌گری دوم در داخل آن گذاشته می‌شد تا یک اختلاف سطح در زیر حلقه ریخته‌گری شده سرب ایجاد کند. این کار به منظور ایجاد محل نشیمنگاه ماهیچه‌ای بود که توسط مدل ریخته‌گری سوم تشکیل می‌شد تا با دقت در وسط حلقه بزرگ سرب قرار گرفته و بتوان حلقه کوچک قلع را در داخل آن ذوب‌ریزی نمود. لازم به توضیح است که حلقه بزرگ سرب قبل از ذوب‌ریزی قلع حتما باید پیش‌گرم شده تا مواد به راحتی به یکدیگر بچسبند (شکل‌های ۷ و ۸). جدول ۵ مقدار مواد مصرف شده به‌ازای هر حلقه دولایه و همچنین مجموع پنج حلقه دولایه را نشان می‌دهد.

جدول ۳) سطح‌بندی مقادیر ورودی نورد حلقه‌ای

نوع غلتک	محدوده عملکرد تجهیزات	سطح ۱	سطح ۲
سرعت دورانی غلتک اصلی	۰-۲۰rpm	۱۰	۲۰
سرعت خطی مندرل	۰-۱mm/s	۰/۵	۰/۶



الف

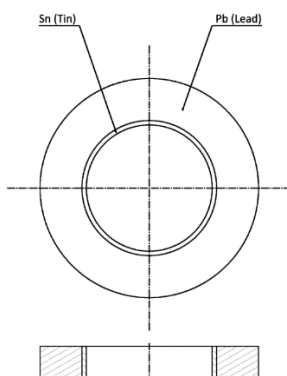


ب

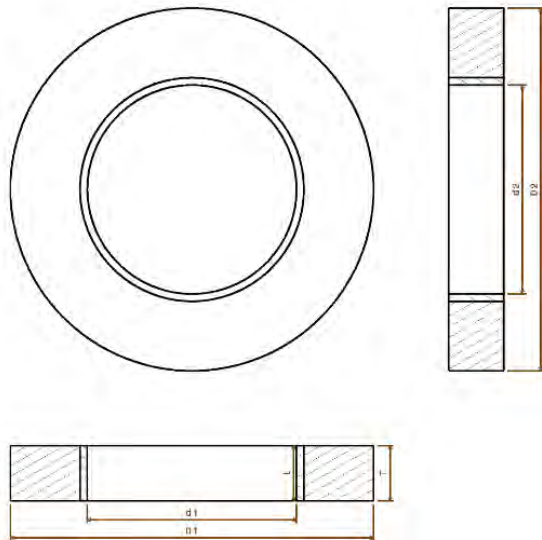
نمودار ۱) نمودارهای تنش- کرنش حقیقی سرب خالص (الف) و قلع (ب) [۹]



شکل ۶) مدل‌های مورد استفاده در ریخته‌گری حلقه‌های دولایه



شکل ۷) نمای شماتیک حلقه دولایه و نمایش جنس هر لایه



شکل ۹) پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش تجربی



شکل ۸) نمایی نزدیک از حلقه دولایه و نمایش جنس لایه‌های آن



شکل ۱۰) دستگاه نورد حلقه مورد استفاده جهت انجام آزمون‌های تجربی

جدول ۵) جنس لایه‌های حلقه‌ها و مقدار وزنی مواد به‌کار رفته در آنها

ردیف	نام	چگالی ماده (Kg/m ³)	وزن لایه (kg)	تعداد حلقه‌ها	وزن کل (kg)
۱	سرب	[6]۱۱۳۴۰	۶/۴۹۸	۵	۳۲/۴۹
۲	قلع	[6]۷۳۱۰@۲۰ °C (β)	۰/۳۲۵	۵	۱/۶۲۵

۵- آزمایش عدم گردی حلقه‌ها (اندازه‌برداری ابعادی)

نتایج ابعادی به‌دست‌آمده از آزمایش تجربی حلقه‌های نوردشده براساس جدول طراحی آزمایش، به‌صورت جدول ۶ و شکل ۹ قابل مشاهده هستند. نتایج این جدول حاکی از آن است که دقت دستگاه نورد حلقه‌ای (شکل ۱۰) در تولید حلقه‌های گرد با دقت بالا، کارآمد بوده و دورریز مواد را در مراحل بعدی تولید نهایی حلقه کاهش می‌دهد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲).

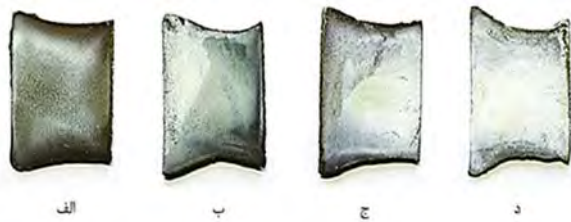
جدول ۶) نتایج ابعادی به‌دست‌آمده از آزمایش تجربی حلقه‌های نورد شده

شماره حلقه	نوع حلقه (دولایه)	d (mm)	D (mm)	T (mm)	t (mm)
۰۰	حلقه اولیه = ریخته‌گری شده	d1=۱۱۴ d2=۱۱۴	D1=۱۹۸ D2=۱۹۸	۳۰	۳۰
۰۱	حلقه نهایی = نورد شده	d1=۱۶۰ d2=۱۶۱	D1=۲۲۳ D2=۲۲۴	۴۰	۳۸
۰۲		d1=۱۶۵ d2=۱۶۶	D1=۲۲۸ D2=۲۲۹	۴۱	۳۸
۰۳		d1=۱۶۲ d2=۱۶۵	D1=۲۲۵ D2=۲۲۸	۴۲	۳۸
۰۴		d1=۱۶۴ d2=۱۶۵	D1=۲۲۵ D2=۲۲۶	۴۲	۳۸



شکل ۱۱) الف) حلقه ریخته‌گری شده (حلقه شماره ۰۰، ب) حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی ۲۰RPM و سرعت خطی مندرل ۰/۶mm/s (حلقه شماره ۴)

کششی، نمونه آزمون کشش با استفاده از دستگاه وایرکات تهیه شد. یک نمونه آزمون کشش در شکل ۱۴ دیده می‌شود.



شکل ۱۳ سطح مقطع حلقه‌های نورد شده با سرعت‌های بیشینه و کمینه غلتک اصلی و مندرل؛ الف) حلقه شماره ۰۱- حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی 10RPM و سرعت خطی مندرل 0.5mm/s ، ب) حلقه شماره ۰۲- حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی 20RPM و سرعت خطی مندرل 0.5mm/s ، ج) حلقه شماره ۰۳- حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی 10RPM و سرعت خطی مندرل 0.6mm/s ، د) حلقه شماره ۰۴- حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی 20RPM و سرعت خطی مندرل 0.6mm/s



الف

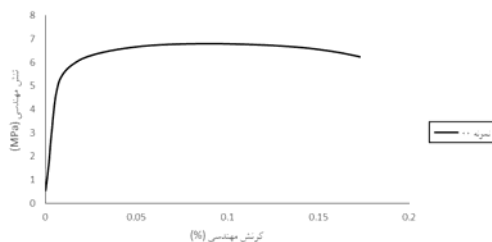


ب

شکل ۱۴ نمونه وایرکات شده جهت انجام آزمون کشش نمای بالا (الف) نمای جانبی (ب)؛ در تصویر (ب) قسمت بالا قلع و قسمت پایین سرب را نشان می‌دهد.

در این آزمایش از دستگاه آزمون کشش مدل SANTAM - STM با ظرفیت ۵ تن استفاده شد. این آزمون در دمای محیط و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. از نرخ کرنش 0.001mm/mm متر بر دقیقه استفاده شد. نمونه کشش مطابق استاندارد ASTM E8/E8M ایجاد شد.

نتایج آزمون کشش نشان می‌دهد (نمودارهای ۲ و ۳) که هر چه سرعت شکل‌دهی فرآیند افزایش (افزایش سرعت دورانی غلتک اصلی و افزایش سرعت خطی مندرل) یابد استحکام کششی به کمترین حد خود کاهش می‌یابد که این اتفاق به دلیل رشد ترک‌ها رخ می‌دهد.



نمودار ۲ نمودار تنش- کرنش مهندسی آزمایش تجربی حلقه ریخته‌گری شده (نمونه ۰۰- حلقه ریخته‌گری شده)



شکل ۱۲ حلقه‌های نورد شده با سرعت‌های بیشینه و کمینه غلتک اصلی و مندرل؛ الف) حلقه شماره ۰۱- حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی 10RPM و سرعت خطی مندرل 0.5mm/s ، ب) حلقه شماره ۰۲- حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی 20RPM و سرعت خطی مندرل 0.5mm/s ، ج) حلقه شماره ۰۳- حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی 10RPM و سرعت خطی مندرل 0.6mm/s ، د) حلقه شماره ۰۴- حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی 20RPM و سرعت خطی مندرل 0.6mm/s

این امر زمانی اهمیت می‌یابد که حلقه تولید شده از دولایه تشکیل شده باشد. بدین معنی که اگر حلقه دارای گردی مناسب نباشد، در مراحل بعدی تولید ضخامت لایه‌ها در جهت شعاعی و محوری یکسان نبوده و محصولی بی‌کیفیت را ارایه خواهد نمود. تاثیر سرعت بالای غلتک اصلی و همچنین حرکت خطی مندرل بر روی کرنش پلاستیک ایجاد شده در فرآیند بسیار بالا بوده و با توجه به داده‌های به دست آمده از آزمایش تجربی با توجه به جدول طراحی آزمایش نشان می‌دهد که سرعت‌های بالا در نظر گرفته شده برای انجام فرآیند (سطر شماره ۴) باعث ایجاد تردی بالا در حلقه دولایه نورد شده می‌گردد.

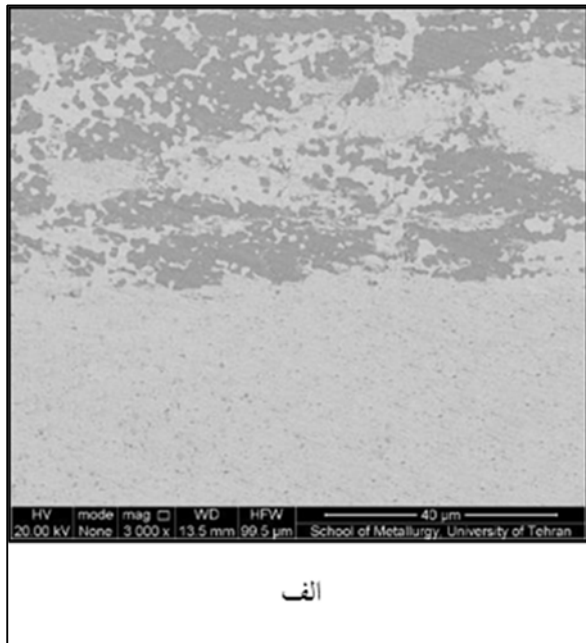
۶- بررسی عیب دم‌ماهی (Fishtail defect) در حلقه‌های نورد شده

همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌گردد، عیب دم‌ماهی در حلقه شماره ۰۱ که با کمترین سرعت دورانی غلتک اصلی و سرعت خطی مندرل تولید شده، کمترین میزان خود را دارا است و به همین ترتیب این عیب در حلقه شماره ۰۴ که با بیشترین سرعت دورانی غلتک اصلی و سرعت خطی مندرل تولید شده، بیشترین میزان خود را دارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت کمترین سرعت شکل‌دهی در این فرآیند، موجب تولید محصولی با سطح مقطع مطلوب را موجب خواهد شد.

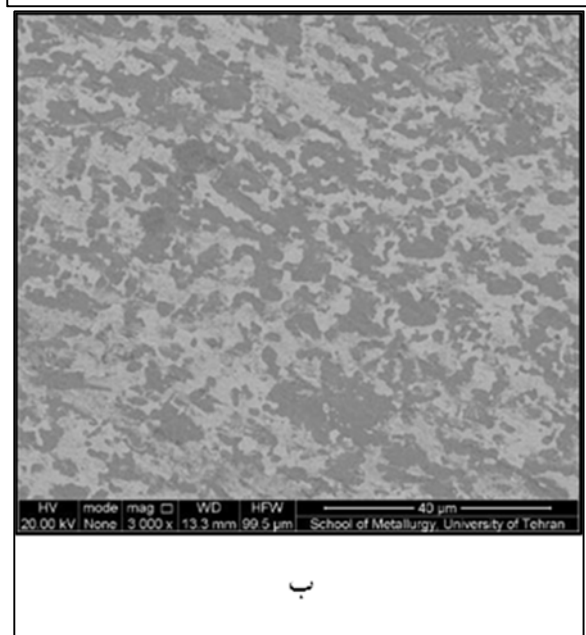
۷- آزمون کشش

به منظور بررسی رفتار حلقه دولایه سرب- قلع ریخته‌گری شده و همچنین حلقه‌های دولایه سرب- قلع نورد شده تحت تنش‌های

پودرهای آلومینیومی ۱/۰ و ۰۵/۰ میکرومتری برای دستیابی به بهترین سطح ممکن پولیش خوردند. نمونه‌های متالوگرافی در جهتی برش خوردند که سطح قابل مشاهده عمود بر سطح مقطع حلقه‌ها است. شکل ۱۵- الف تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر (۴۰ میکرومتر)، اتصال دو فلز سرب و قلع را با فرآیند ریخته‌گری (حلقه شماره ۰۰) نشان می‌دهد. شکل ۱۵- ب تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر (۴۰ میکرومتر)، مرز حلقه نورد شده نفوذ مواد (سرب و قلع) را در یکدیگر بر اثر کرنش ایجاد شده توسط فرآیند نورد حلقه‌ای را نشان می‌دهد.

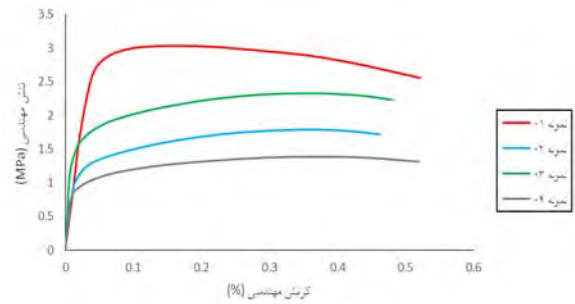


الف



ب

شکل ۱۵) نمایش تصویر برداری SEM؛ الف) مرز سرب- قلع حلقه ریخته‌گری شده با بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر (حلقه شماره ۰۰- حلقه ریخته‌گری شده)، ب) مرز سرب- قلع حلقه نورد شده با بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر (حلقه شماره ۰۴- حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی ۲۰ RPM و سرعت خطی مندرل ۰/۶ mm/s)



نمودار ۳) نمودار تنش- کرنش مهندسی آزمایش تجربی حلقه‌های نورد شده؛ نمونه ۰۱: حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی ۱۰ RPM و سرعت خطی مندرل ۰/۵ mm/s، نمونه ۰۲: حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی ۲۰ RPM و سرعت خطی مندرل ۰/۵ mm/s، نمونه ۰۳: حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی ۱۰ RPM و سرعت خطی مندرل ۰/۶ mm/s، نمونه ۰۴: حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی ۲۰ RPM و سرعت خطی مندرل ۰/۶ mm/s

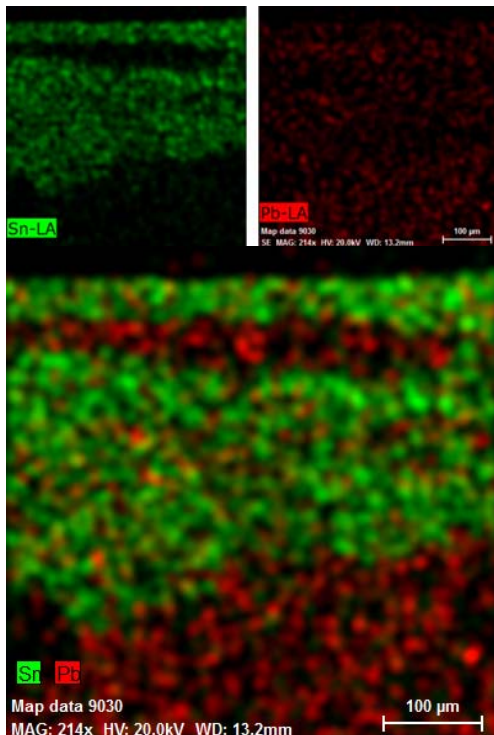
همچنین با کاهش سرعت شکل‌دهی که نتیجه آن کاهش تغییرات ریزساختاری حاصل از کرنش بوده باعث می‌شود، استحکام کششی فرآیند افزایش می‌یابد (مقایسه حلقه ۰۱ و حلقه ۰۴ در نمودار ۳). نتایج دیگری که می‌توان از آزمایش‌های کشش دریافت آن است که کاهش سرعت دورانی غلتک اصلی بر افزایش استحکام فرآیند تاثیر بالایی دارد (مقایسه حلقه ۰۲ و حلقه ۰۳ در نمودار ۳).

تغییرات درصد ازدیاد طول برحسب زمان فرآیند نورد حلقه‌ای در نسبت سرعت‌های دورانی غلتک اصلی و سرعت خطی مندرل در نمودار ۳ نمایان است. در زمان‌های اولیه فرآیند، کرنش سختی نقش اساسی در میزان نرمی ماده را دارد و کاهش درصد ازدیاد طول در شکل واضح است. با افزایش زمان نورد در فرآیند نورد حلقه‌ای، چسبندگی فلز- فلز افزایش می‌یابد. این افزایش چسبندگی بر چقرمگی (Ductility) کامپوزیت ساخته شده به صورت عکس تاثیر می‌گذارد. این تاثیر معکوس باعث می‌گردد که درصد ازدیاد طول در زمان‌های بعدی فرآیند نورد تقریباً تغییر نکند. علاوه بر این، با در نظر گرفتن فرآیند نورد حلقه‌ای، می‌توان دریافت که با افزایش نسبت سرعت غلتک اصلی به سرعت خطی مندرل، درصد ازدیاد طول به طور محسوسی کاهش پیدا می‌کند. دلیل این امر، ایجاد کرنش سختی بیشتر بوده که در اثر افزایش نسبت سرعت غلتک‌ها به کامپوزیت ساخته شده اعمال می‌گردد. افزایش کرنش سختی بر میزان شکل‌پذیری مواد تاثیر گذاشته و درصد ازدیاد طول را به طور محسوسی کاهش می‌دهد.

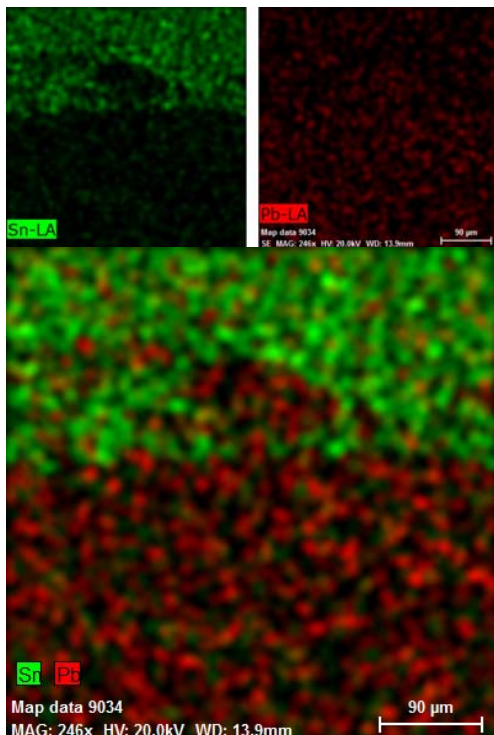
۸- بررسی ریزساختار نمونه‌ها

نمونه‌ها برای انجام عملیات متالوگرافی مانند سرد دو بخشی (رزین اپوکسی (Epoxy Resin) + هاردنر (Hardener)) شد. سپس جهت حصول صافی سطح مناسب توسط ورق‌های سمباده کاربایدی از گرید ۵۰۰ تا گرید ۲۵۰۰ سمباده زده شده و در نهایت توسط دستگاه‌گردان با استفاده از دو نمد پولیش اولیه و ثانویه و

مندرل 0.5mm/s شکست نرم رخ داده (به شکل حفره) که در سطح نمونه قابل مشاهده است (شکل‌های ۱۸ و ۱۹).



شکل ۱۶) تصویر آنالیز صفحه‌ای (Map) حلقه نورد شده (حلقه شماره ۰۲- حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی 20RPM و سرعت خطی مندرل $\text{mm}/0.5\text{s}$)



شکل ۱۷) تصویر آنالیز صفحه‌ای (Map) حلقه نورد شده (حلقه شماره ۰۳- حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی 10RPM و سرعت خطی مندرل $\text{mm}/0.6\text{s}$)

لازم به ذکر است فلز سنگین‌تر معیارهای مورد استفاده جهت تعریف فلزات سنگین عبارت از چگالی، وزن اتمی، عدد اتمی و جایگاه عنصر در جدول تناوبی بوده و در حال حاضر هیچ معیاری که مورد پذیرش عموم باشد جهت تعریف فلزات سنگین وجود ندارد. رنگ روشن‌تر نسبت به فلز دیگر موجود در تصاویر، قابل مشاهده است. در اینجا رنگ روشن نمایانگر فلز سرب بوده و رنگ تیره، فلز قلع را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی حلقه ریخته‌گری شده و همچنین حلقه نورد شده نشان می‌دهد که نفوذ فلز سرب در فلز قلع بر اثر کرنش ایجاد شده توسط فرآیند رخ داده است.

۹- بررسی آنالیز صفحه‌ای نمونه‌هایی از حلقه‌های نورد شده

تصاویر مربوط به آنالیز صفحه‌ای نمونه‌هایی از حلقه‌های نورد شده نشان می‌دهد که تحت کرنش اعمالی فرآیند به حلقه، سبب تسلیم، گلوپیی شدن و سپس شکست فلز تردتر (سرب) و ترکیب شدن آن با فلز نرم‌تر (قلع) می‌گردد. دو نتیجه مهم از تصویر آنالیز صفحه‌ای حلقه‌های نورد شده مشاهده می‌شود:

۱- در یک زمان ثابت، میزان بی‌نظمی‌های موجود در ساختار کامپوزیت سرب و قلع بیشتر است. این بی‌نظمی‌ها به صورت مختلف از جمله پدیده گلوپیی شدن و نفوذ مواد در یکدیگر مشاهده می‌گردد (شکل ۱۶ و ۱۷).

۲- با اعمال زمان بیشتر فرآیند نورد، ضخامت لایه‌های سرب و قلع با افزایش نسبت سرعت‌های دورانی غلتک اصلی و سرعت خطی مندرل کاهش می‌یابد.

دلیل افزایش بی‌نظمی‌ها و همچنین کاهش بیشتر ضخامت لایه‌ها را می‌توان به اعمال کرنش بیشتر اعمالی در فرآیند نورد حلقه‌ای نسبت داد. به عبارت ساده‌تر، اعمال کرنش برشی بیشتر از طریق فرآیند نورد حلقه‌ای، باعث سیلان بیشتر مواد می‌شود. کاهش سرعت دورانی غلتک اصلی و سرعت خطی مندرل سیلان بیشتر مواد را باعث شده و سبب می‌شود تا مواد بیشتری در محل شیارهای موجود در حلقه‌ها جریان یابد. پدیده فوق، باعث افزایش قدرت پیوند بین لایه‌های سرب و قلع شده و بی‌نظمی‌های مختلفی را در ریزساختار کامپوزیت به وجود می‌آورد. علاوه بر این، سیلان مواد بیشتر در فرآیند نورد حلقه‌ای کاهش بیشتر ضخامت لایه‌ها را در پی خواهد داشت.

۱۰- بررسی نتایج تصویربرداری مورفولوژی سطح نمونه‌های آزمون کشش

نتایج تصویربرداری مورفولوژی سطح نمونه‌های آزمون کشش نشان می‌دهد که برای نمونه‌های آزمون کشش حلقه ریخته‌گری شده (حلقه شماره ۰۰) و همچنین حلقه نورد شده (حلقه شماره ۰۱) با کمترین سرعت دورانی غلتک اصلی 10RPM و سرعت خطی

۱۱- نتایج

در این پژوهش به شبیه‌سازی، بررسی تحلیلی و آزمون تجربی فرآیند نورد حلقه‌ای چسبیده جهت تولید حلقه دولایه پرداخته شد. نورد به صورت شعاعی-محوری بوده و تمامی غلتک‌های اصلی، مندرل، راهنما به غیر از مخروطی‌ها به دلیل ماهیت تحلیل دوبعدی در شبیه‌سازی‌ها وارد شدند. مقایسه نتایج حاکی از خطای قابل قبول شبیه‌سازی‌ها است و می‌توان با در نظر گرفتن خطای ناشی از شبیه‌سازی، از نتایج اجزا محدود به دست آمده در موارد لازم استفاده کرد. نتایج به دست آمده از فرآیندهای مختلف تحلیل شده به صورت زیر دسته‌بندی شدند:

- ۱- حلقه داخلی در نورد حلقه‌ای دولایه باید از فلز نرم‌تر نسبت به حلقه خارجی در نظر گرفته شود.
- ۲- ضخامت حلقه داخلی باید به نسبت زیادی از ضخامت حلقه خارجی کمتر باشد.
- ۳- با کمترین سرعت دورانی غلتک اصلی و کمترین سرعت خطی مندرل می‌توان حلقه‌ای با کیفیت بالاتری از نظر خواص مکانیکی و متالورژیکی نسبت به حلقه‌ای که بیشترین سرعت دورانی غلتک اصلی و بیشترین سرعت خطی مندرل را دارد، تولید نمود.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مد نظر گرفته و هنگام استفاده از منابع علمی به آن‌ها به‌عنوان مرجع اشاره کرده‌اند.

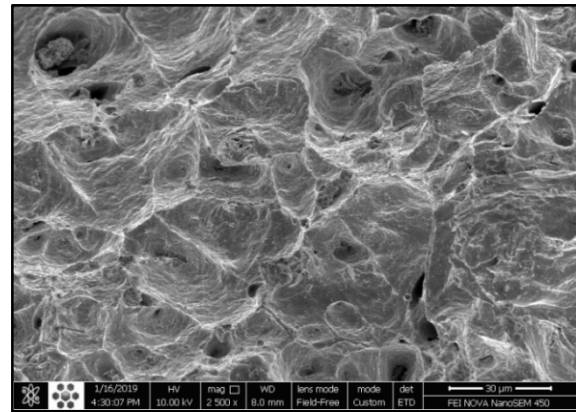
تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور در این مقاله توسط نویسندگان آن انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

سهم نویسندگان: مهدی عباسزاده گورانی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ محمدجعفر حداد (نویسنده دوم)، روش‌شناس (۴۰٪)؛ علی پرویزی (نویسنده سوم)، نگارنده بحث (۱۰٪)

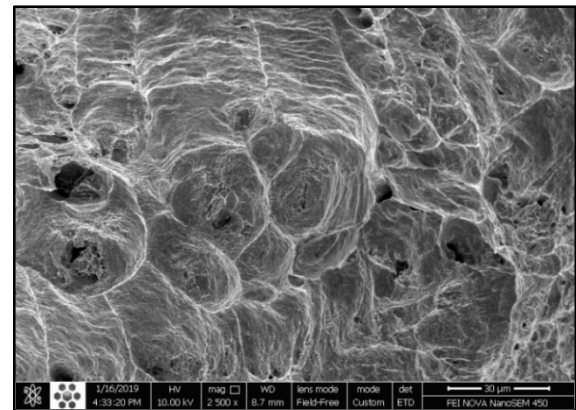
منابع مالی: تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

منابع

- 1- Wang M, Yang H, Sun ZC, Guo LG. Analysis of coupled mechanical and thermal behaviors in hot rolling of large rings of titanium alloy using 3D dynamic explicit FEM. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(7):3384-3395.
- 2- Joun MS, Chung JH, Shivpuri R. An axisymmetric forging approach to preform design in ring rolling using a rigid-viscoplastic finite element method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1998;38(10-11):1183-1191.
- 3- Hua L, Qian DS, Pan LB. Analysis of plastic penetration in process of groove ball-section ring rolling. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2008;22(7):1374-1382.
- 4- Li L, Yang H, Guo L, Sun Z. A control method of guide rolls in 3D-FE simulation of ring rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;205(1-3):99-110.
- 5- Forouzan MR, Salimi M, Gadala MS, Aljawi AA. Guide roll simulation in FE analysis of ring rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;142(1):213-223.

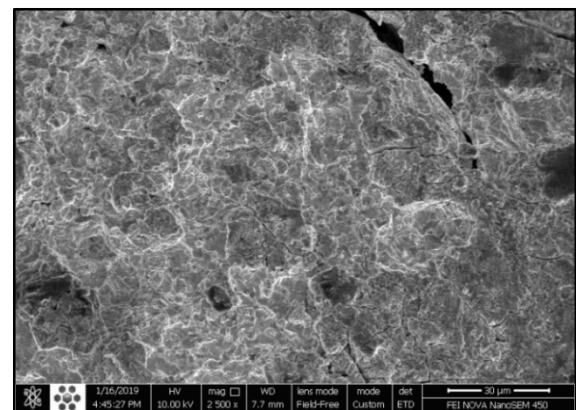


شکل ۱۸) تصویر مورفولوژی سطح شکست آزمون کشش در نمونه ۰۰ با بزرگنمایی ۲۵۰۰ برابر (حلقه شماره ۰۰- حلقه ریخته‌گری شده)



شکل ۱۹) تصویر مورفولوژی سطح شکست آزمون کشش در نمونه ۰۱ با بزرگنمایی ۲۵۰۰ برابر (حلقه شماره ۰۱- حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی ۱۰ RPM و سرعت خطی مندرل ۰/۵ mm/s)

به همین ترتیب برای نمونه آزمون کشش حلقه نورد شده (حلقه شماره ۰۴) با بیشترین سرعت دورانی غلتک اصلی ۲۰ RPM و سرعت خطی مندرل ۰/۶ mm/s ترد اتفاق افتاده (به شکل صفحه‌ای) که می‌توان آن را در سطح نمونه مشاهده نمود (شکل ۲۰). لذا نتایج آزمون کشش با نتایج تصویربرداری مورفولوژی سطح تایید شده و قابل استناد هستند.



شکل ۲۰) تصویر مورفولوژی سطح شکست آزمون کشش در نمونه ۰۴ با بزرگنمایی ۲۵۰۰ برابر (حلقه شماره ۰۴- حلقه نورد شده با سرعت دورانی غلتک اصلی ۲۰ RPM و سرعت خطی مندرل ۰/۶ mm/s)

Measurements. Structural shielding design for medical X-ray imaging facilities. Bethesda: NCRP; 2004.

9- Hotta S, Matsumoto K, Murakami T, Narushima T, Ouchi C. Dynamic and static restoration behaviors of pure lead and tin in the ambient temperature range. Materials Transactions. 2007;48(10):2665-2673.

6- Encyclopedia.com [Internet]. Unknown City: Encyclopedia; 2019 [Cited 2019 Jun 6]. Available From: <https://www.encyclopedia.com/>

7- Greenwood NN, Earnshaw A. Chemistry of the elements. Amsterdam: Elsevier, 2012.

8- National Council on Radiation Protection and