

بررسی تأثیر پارامترهای فرایند پیلگر بر رفتار تغییر شکل یک فولاد زنگنزن آستنیتی

محمدحسین موسیزاده میبدی، رضا وفائی، احسان محمدشریفی^{*} و خسرو فرمنش دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت مقاله: ۶/۵/۷۹ – دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۸/۵/۱۹)

چکیده- در این پژوهش، بهمنظور مشخصهیابی رفتار تغییر شکل یک فولاد ضدزنگ آستنیتی AISI 321 حین فرایند پیلگر، شبیهسازی المان محدود انجام شد و نتایج آن با مقادیر تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. تأثیر پارامترهای فرایند، شامل نرخ تغذیه (چهار و هشت میلی متر) و زاویه چرخش (۱۵، ۳۰ و ۶۰ درجه) در مقدار آسیب ایجاد شده نیز ارزیابی شد. بهمنظور شبیهسازی رفتار سیلان ماده از مدل جانسون-کوک استفاده شد. در ادامه با درنظر گرفتن تنشهای فشاری زیربرنامه بهبودیافتهای از مدل آسیب لاتام-کاککرافت محاسبه و برای تعیین پارامترهای بهینه فرایند مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که کرنشهای شعاعی و محیطی در تمامی شرایط فشاری و کرنش محوری کششی است. مقدار کرنش ایجاد شده (صوفنظر از حالت فشاری یا کششی آن) نیز در سطح خارجی لوله در مقایسه با سطح داخلی بیشتر است. با درنظر گرفتن تعداد سیکلهای خستگی یک المان لوله حین فرایند، نرخ تغذیه هشت میلی متر، زاویه چرخش درجه و کمترین ضریب اصطکاک به عنوان پارامترهای بهینه تعیین شدند.

واژههای کلیدی: فرایند پیلگر، شبیهسازی المان محدود، فولاد زنگنزن ۳۲۱، آنالیز تخریب

Investigation of the Effect of Pilgering Process Parameters on Deformation Behavior of an Austenitic Stainless Steel

M. H. Musazadeh, R. Vafaei, E. Mohammad Sharifi* and Kh. Farmanesh

Department of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology.

Abstract: Finite element (FE) simulations in conjunction with experimental analysis were carried out to characterize the deformation behavior of an AISI 321 austenitic stainless steel (ASS) during cold pilgering process. The effect of process parameters including feed rate (4 and 8 mm) and turn angle (15, 30 and 60°) on damage build-up were also evaluated. The Johnson-cook model was used to simulate the flow behavior of material. By considering compressive stresses, a new revised Latham-Cockcraft damage was calculated and used to determine the optimum process parameters. It was found that the radial and hoop strains in all friction conditions were compressive, while the axial strains were observed to be tensile. The amount of strain (whether it is compressive or tensile strain) was also higher on the outside of the tube compared to its inside. By considering fatigue cycles of a tube element during the process, the feed rate of 8mm, turn angle of 60° and the lowest coefficient of friction were determined as optimum parameters.

Keywords: Pilgering process; Finite element simulation; AISI 321 statinless steel; Damage analysis.

۵۷

۱ – مقدمه

لولههای بدون درز با دقت بالا بهطور عمده در صنایع هوافضا، صنایع هستهای و نفت استفاده می شود. فرایند پیلگر بـهعنـوان فرايند اصلي توليد لولههاي بدون درز شناخته ميشود [۱]. چارچوبهای تحلیلی مختلفی برای بررسی حرکت رفت و برگشتی غلتکها، توزیع کرنش [۲]، سیلان ماده [۳]، تاریخچه مکانیکی [۴] و تأثیر نیروی غلتکها [۵] حین ایـن فراینـد در مورد فلزات مختلف ارائه شده است. به عنوان مثال، در ابتدا یک مدل دو بعدی عددی برای شبیهسازی پیلگر سرد ارائه شده است [۶]. از سوی دیگر، مقادیر کرنش ایجاد شده حین فرایند پیلگر با چاپ شبکه روی لوله توسط یوشیدا و همکاران، اندازه گیری و سپس تانسور تنش محاسبه شده است. بر اساس توزیع تنش نیز نیروی عکس العملی غلتکها بهدست آمده و نتایج آن با مقادیر واقعی مورد مقایسه قرار گرفته است. در ادامه، با استفاده از یک مدل تحلیلی سهبعدی، محاسبات نظری تنش، کرنش و نیروهای وارد بر غلتکها حین فرایند پیلگر انجام شده است [۴]. با استفاده از نتایج این مدل، غلتکهای جدیدی نیز طراحی شده و لولههایی با دقت ابعادی مطلوبتر تولید شده است. بررسی های آزمایشگاهی و شبیه سازی پیلگر لوله های زیرکونیمی نیز انجام شده و تاریخچه تنش/کرنش و نیروی غلتکها تعیین شده است [۷]. شبیهسازی سهبعدی المان محدود یک حرکت رو به جلو غلتکها توسط مولوت و همكاران انجام شده است [٨]. هدف اصلى اين مطالعه بررسـى صحت فرضیهها و نتایج بهدست آمده از روش اسلب کـه در پژوهش پیشین [۷] مورد استفاده قرار گرفته، بوده است. بر ایـن اساس و در ادامه، مدل گفته شده توسط مونت میتونت و همکاران توسعه یافته و سه مرحله از حرکت رفت و برگشتی غلتکها مورد شبیهسازی قرار گرفته است [۹]. معادلات پایهای متعددی در شبیه سازی المان محدود برای پیش بینی رفتار دقیق مواد در شرایط مختلف وجود دارد. مدل جانسون کوک (JC) [۱۰] بهدلیل ثابتهای کمتر و سادگی تعیین آنها، بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است.

از آنجایی که لولههای AISI321 با فرایند پیلگر ساخته شده است، درک رفتار تغییر شکل این ماده و تعیین پارامترهای بهینه فرایند، بسیار مهم است. بنابراین، در این پژوهش مطالعه رفتار سیلان ماده حین فرایند با استفاده از معادلات سازگاری جانسون کوک مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با استفاده از مدل بهینه شده آسیب Latham-Cockcraft پارامترهای بهینه فرایند نیز تعیین شدهاند.

۲– مواد و روش تحقیق

در این تحقیق نوع تجاری فولاد زنگنزن آستنیتی AISI321 استفاده شد. ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده شامل ۱۷/۷۸ كروم، ٩/٧٧ نيكل، ١/٩٩ منگنـز، ٢٢/٥ موليبـدن، ٣٧/٥ سيليسـيم، ۰/۲۶ تیتانیم، ۰۸/۰ نیوبیم و ۰/۰۶۷ کربن (مقادیر برحسب درصد وزنی) بوده است. از دستگاه پیلگر سرد موجود در شرکت سوره بهمنظور انجام فرايند استفاده شد. مشخصات دستگاه مورد استفاده در قالب جدول (۱) ارائه شده است. به منظور مطالعات ریزساختاری، نمونه ها قبل و پس از فرایند مطابق با روشهای متالوگرافی استاندارد برای میکروسکوپ نوری ا (Olympus GX71 ،OM) و ميكروسكوپ الكتروني روبشي^۲ (TESCAN MIRA3 ،SEM) تهیه شد. برای نشاندادن فاز مارتنزیت ناشی از تغییر شکل در ریزساختار، یک محلول مخلوط حاوی ۱۵/۰ گرم Na₂S₂O₅ در ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر و ۱۰ میلی لیتر HCl در ۱۰۰ میلی لیتر آب به عنوان محلول اچ استفاده شد. اندازه گیری درصد فاز مارتنزیت بهوجود آمده پس از فرایند پیلگر سرد، با استفاده از یک فريت اسكوب (Fischer MP30) انجام شد. علاوه بر اين، اثـر مغناطیسی معکوس^۳ (اثر ویلی) با استفاده از ضریب اصلاح ۱/۷، که قبلاً توسط تالونن و همکاران تخمین زده شده بود [۱۱]، جبران شد. به منظور ارزیابی نتایج به دست آمده از این آزمون و همچنین تعیین فازهای موجود در لوله پیلگر شده، آزمون پراش پرتو ایکس^{*} (XRD) انجام شد. برای تعیین مارتنزیت ناشی از تغییرشکل، آزمون پراش پرتو ایکس از

زاويه چرخش	قطر غلتک،ها	طول ناحيه تغيير شکا	ميزان تغذيه	ضخامت محصول	قطر خارجی محصول	ضخامت لوله اه ليه	قطر خارجی لوله اه له
(درجه)				میلیمتر)	。)	<u> </u>	<u> </u>
۶۰ -۳ ۰-۱۵	۳۲۰	360	۴-۸	۴	۲۸	٧	44

جدول ۱- مشخصات دستگاه پیلگر مورد استفاده

جدول ۲- خواص مکانیکی لوله مسی

٣۴	تنش تسليم (مگاپاسکال)	٨٩。。	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
۲۱۰	استحکام نهایی (مگاپاسکال)	۰/٣۴	ضريب پواسون
۰/۵	كرنش نهايي	١١٠	مدول الاستیک (گیگا پاسکال)

سطوح خارجی و داخلی لوله انجام شد. آزمون پراش پرتو ایکس برای ۲۵ بین ۲۰ تا ۹۰ درجه، با اندازه گام ۲۰/۰ درجـه و زمـان ۱۰ ثانیه در هر مرحله انجام شد.

در ادامه با توجه به نتایجی که در پژوهش های پیشین از اندازه گیری کرنش حین فرایند منتشر شده بود [۷]، از روش پین گذاری در ضخامت لوله استفاده شد. علاوه بر اندازه گیری کرنشها، نتایج ایـن آزمـون بـا نتـایج شـبیهسـازی مقایسـه و ارزیابی شد. لوله مورد آزمون بهدلیل محدودیت در امکانات تجهیزاتی (شکستن ماندرل درصورت استفاده از فولاد) و هندسی بودن پارامتر کرنش (عدم وابستگی به جنس ماده)، از جنس مس درنظر گرفته شد. خواص مکانیکی لوله مسی مورد استفاده در جدول (۲) ارائه شده است. در این روش ۵۹ پین در سوراخهایی به قطر ۴/۰ میلیمتر و در فواصل ۱۰ میلی-متری از یکدیگر در جهت ضخامت لوله جایگذاری شد. رفتار تغيير شكلي پينها بايد مشابه با لوك مورد أزمون بوده و همچنین دارای رنگی متفاوت با رنگ آلیاژ زمینه باشـند. همچنین باید درنظر داشت که چنانچه ماده مورد استفاده برای پین بسیار نرم باشد، علاوه بر این که قرار دادن آن در سوراخ-ها با مشکلاتی همراه خواهد بود، احتمال خروج آن از سوراخ حین فرایند نیز بیشتر است. از طرفی چنانچه ماده بسیار سخت باشد، سیلان لوله را تحت تأثیر قرار داده و ارزیابی

خوبی از فرایند را بهدست نخواهد داد. بنابراین در این تحقیق از آلیاژ AI-Ag-Cu به عنوان آلیاژ مورد نظر برای پین ها با توجه به نزدیکی تنش تسلیم آن با مس استفاده شد. در ادامه و پس از انجام فرایند پیلگر، قسمت مخروطی لوله (ناحیه تغییر شکل) استخراج و از موقعیت جدید پین ها ابعادبرداری شد. ابعاد بهدست آمده در نرمافزار Solidworks وارد و سپس کرنش های برشی اندازه گیری شد. نتایج به دست آمده با نتایج محاسبه شده از شبیه سازی مقایسه و صحت مدل ارائه شده ارزیابی شد. علاوه بر این ابعاد نهایی لوله پیلگر شده نیز با دقت اندازه گیری و به عنوان یک پارامتر دیگر برای مقایسه نتایج عملی با شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفت. هر چند بررسی های پایداری انرژی نیز به منظ ور بررسی اولیه مدل درنظر قرار گرفته شده است.

آزمون های کشش و فشار برای بررسی خواص مکانیکی لوله ها قبل و بعد از فرایند پیلگر به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM-E8 و ASTM-E9 انجام شد. آزمون کشش در دمای اتاق و نرخ کرنش ۰/۱ بر ثانیه و با استفاده از دستگاه Santam-STM400 انجام شد. مدول الاستیک، تنش تسلیم و ضریب پواسون به دست آمده برای لوله پیش از فرایند پیلگر به ترتیب ۱۹۳ گیگاپاسکال، ۲۰۵ و ۳/۰ مگاپاسکال تعیین شد.

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۸



شکل ۱– نمای کلی مدل شبیهسازی شده فرایند پیلگر پیش از انجام فرایند با استفاده از نرمافزار المان محدود آباکوس

۲–۱– نظریه و شبیهسازی

نمای کلی مدل شبیه سازی شده از فرایند پیلگر در شکل (۱) نمایش داده شده است. در این چیدمان دوغلتک با فاصله مورد نظر در مقابل یکدیگر قرار گرفته اند و محور ماندرل و قطعه کار در مرکز مقطع شیار غلتک جانمایی شده است. با توجه به اینکه میزان تغییر شکل در این فرایند زیاد است با درنظر گرفتن فرایند به صورت شبه استاتیک^۵ روش حل Dynamic Explicit انتخاب شد. در شکل (۱) بارگذاری قطعات نیز نمایش داده شده است. غلتکها دارای حرکت دورانی رفت و برگشتی و شده است. غلتکها دارای حرکت دورانی رفت و برگشتی و ماندرل در محل خود حرکت طولی نداشته و در بازههای زمانی مشخص همراه با قطعه کار حول محور خود چرخیده می شود. قطعه کار در بازههای زمانی که غلتکها ثابت هستند همزمان با شده (در اینجا ۴ میلی متر) تغذیه شده و به سمت جلو حرکت میکند.

قطعات مدل شامل لوله (تغییرشکل پذیر)، غلتکهای دارای شیار متغیر (صلب) و ماندرل مخروطی شکل (صلب تحلیلی) است. لوله اولیه مطابق با جدول یک دارای قطر خارجی ۴۴ میلی متر و ضخامت ۷ میلی متر بوده و با استفاده از ۱۱۴۲۴ المان C3D8R شبکهبندی شد. برای تعریف شرایط اصطکاکی

بین ابزارها و لوله، مدل اصطکاک کولومبی با ضرایب اصطکاک مختلف (۰٫۳ و ۰٫۴) در نظر گرفته شد.

رفتار سیلان این ماده با استفاده از مدل جانسون کوک شبیه سازی شد (رابطه یک). بر اساس این مدل [۱۰]، تنش سیلان ماده تحت تأثیر سه نوع سختشوندگی مختلف قرار میگیرد. بخش اول رابط و یک تنش سیلان ناشی از سخت شدن ایزوتروپیک را نشان می دهد. بخش دوم و سوم رابط و زیر سخت شدن ناشی از نرخ کرنش و حرارت را نمایش می دهد. لازم بهذکر است که این سه نوع سختشوندگی مستقل از یکدیگر هستند. معادله ریاضی مدل جانسون کوک عبارت است از

$$\sigma = (A + B\varepsilon^{n})(1 + Cln\varepsilon^{*})(1 - T^{*m})$$
(1)

در ایـن رابط و σ تـنش سیلان، A تـنش تسلیم، B ضریب کرنش، ع کرنش حقیقی، n نرخ کارسختی و C ضریب نرخ کرنش است. ⁶ ε⁻/ε⁻ = ^{*-} که نسبت نرخ کرنش را در مقایسه با نرخ کرنش در حالت مرجع (۰/۱) نمایش می دهـد. ^{*}T دمـای همگن و m نیز ضریب نرمشوندگی با دماست. با استفاده از نتایج آزمون فشار گرم که پیش تر توسط نویسندگان این مقالـه انجـام شـده بـود، ثوابـت مـدل جانسـون کـوک بـرای آلیـاژ (جدول ۳).



جدول ۳– پارامترهای مدل جانسون کوک برای فولاد زنگنزن AISI321

۳- نتايج

۳–۱– ارزیابی صحت مدل ارائه شده

به منظور اعتبار سنجی مدل سه بعدی المان محدود ارائه شده از قانون بقای انرژی استفاده شد. شکل (۲) نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی را برای مدل گفته شده نمایش می دهد. با توجه به شکل ملاحظه می شود که نسبت KE/IE پس از گذشت حدود ۲۰ ثانیه برابر با ^۳-۲۰۱۰ (تقریبا برابر با صفر) است. از طرفی این مقدار در طول مدت زمان باقی مانده فرایند نیز ثابت و پایدار باقی مانده است. همانگونه که مشاهده می شود مقدار انرژی جنبشی بسیار کمتر از انرژی داخلی (کمتر از ۱ درصد) است. بنابراین با توجه به قانون بقای انرژی و نمودار به دست آمده، نتایج حاصل از مدل ارائه شده دارای اعتبار کافی است.

بهمنظور ارزیابی عملی نتایج شبیهسازی، اندازهگیری کـرنش با استفاده از پینگذاری روی نمونه مسی قبـل از فراینـد پیلگـر

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۸

انجام گرفت. شکل (۳) نمایی از تغییر شکل یک المان را قبل و بعد از تغییر شکل در مختصات استوانهای نشان میدهد. با اندازه گیری زوایای _۲۱ و _۲۷ مقدار کرنش های برشی ₂۵ و _۳۵ بهدست می آید. برای اندازه گیری کرنش برشی در طول منطقه تغییر شکل در نرمافزار موقعیت کلیه پین ها مطابق با پارامترهای زیر تعیین شد:

r: شعاع مقطع لوله در موقعیت پین، Teta: زاویه پین اصلی نسبت به خط عمود در مقطع عرضی پین، z₁: موقعیت طولی پین اصلی نسبت به ابتدای لوله، z₂: موقعیت طولی پین کناری نسبت به ابتدای لوله و Alpha: زاویه پین کناری نسبت به خط عمود در مقطع پین. با توجه به این پارامترها با استفاده از روبط زیر داریم:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{2\theta} &= \varepsilon_{23} = \frac{1}{2} \left(\gamma_1 + \gamma_2 \right) \\ \varepsilon_{r\theta} &= \varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left(\gamma_1 + \gamma_2 \right) \\ r \end{aligned}$$
step (*) itilizes the transmission of the second state of the transmission of transmission of transmission of the transmission of transm



شکل ۳- تغییر شکل المان قبل و بعد از پیلگر در مختصات استوانه ای

ε _{rθ}	$\epsilon_{z\theta}$	γ1	γ2	S	Alpha	Z2	z_1	Teta	r	شماره نقطه
-	-	-	-	۳۰/۱۲	۴٣/٣٢	۳۰۲/۱	٣٠٢	34/21	22/22	١
o	_ • / • • \	• / • • \	_ • / • • ٣	W1/0V	41/13	٣٢٢/٣	377773	34/SV	22/11	٢
•/••Y	•/••Y	•/•• 9	_ • / • • \	۳۱/۶۰	۴٧/٣	3447/2	341/10	34/14	۵ / ۲۲	٣
_ • / • • Y	_•/••٣	- • / • • ۵	•	31/42	۴٧/٨۶	362/6	3627/9	34/18	۲1/۷۶	۴
۰/۰۰۳	0/00¥	•/•• \$	• / • • \	۳١/٨١	41/19	۳۸۳/۱	TAT/V	٣۴/٧٨	21/02	۵
0/00¥	0/00¥	• / • • ٩	•	29/25	49/34	۴۰۴/۸	404/4	34/11	۲0/۶۶	۶
•/•• 9	•/••A	•/•\\	•/••۵	۲۸/۱۰	41/41	471/V	421/1	٣۴/۲۸	19/11	V
۰/۰۲۷	۰/°۲۸	۰/۰۳۷	۰/۰۱۹	26/90	49/41	409	404	37/14	11/97	٨
•/•YY	۰/۰\V	•/•YV	•/••A	۲۶/۰۷	۵۰/۷۶	410/9	474/2	۳۱/۲۱	11/77	٩
۰/۰۴۵	0/0¥1	•/•¥V	۰/۰۳۵	74/QV	23/24	019	618/V	۲٧/۱۸	11/44	١٠
•/• % •	0/0¥9	•/• ۵ ۴	۰/۰۳۸	23/96	۵۹/۰۸	208/2	203/8	77/79	1 <i>9</i> /VV	11
۰/۰ <i>۸۶</i>	•/• ۵ ٩	°/°9V	۰/۰۵۲	77/ 4 V	۶٣/۶	09V/4	094/4	۱۶/۸۸	18	١٢
۰/۱۵۰	•/•V9	۰/۱۰۰	°/°DY	۲۱/۶۰	۶٩/٨۵	843/0	۶۳۹/۲	۱۰/۸۹	10/88	١٣
۰/۱۴۶	۰/۰ ۸ ۲	۰/۰۸۱	۰/۰۸۲	۲۰/۴۰	۷۹/۳۳	۶۹۵/۸	۶۹۲/۵	1/49	14/4V	14
۰/۱۷۹	۰/۰۹۱	•/•AA	৽/৽ঀ٣	19/91	٩ • /۶٨	VAT/V	٧۴٩/٢	-٩/٢١	14	۱۵
۰/۱۸۴	0/10Y	•/•AA	۰/۱۱۶	19/39	107/01	A11	$\Lambda \circ V / \hat{\mathcal{F}}$	-22/0	۱۳/۸۸	18
۰/۰ <i>۸۶</i>	۰/۰V١	0/0¥1	۰/۱۰۱	۱۹/۵۸	114/19	٨٦٩/٣	$\Lambda \mathcal{P} V / V$	-۳۴/۱	۱۳/۸۸	١٧

جدول ۴- نتایج عملی کرنش های برشی

شکل که ابعادبرداری آن امکانپذیر بوده است را نشان میدهد. ۹۰ درجه اندازه گیری شده است. بنابراین مقدار کرنش های برشی ٤_{zθ} برابر خواهد بود با:

مقدار تقریبی کرنشهای برشی _۹۱ **و** _۲۷ بهترتیب برابـر ۷۹ و

			-					
کرنش برشی Erθ		$\epsilon_{z\theta}$	كرنش برشى		ان	عنو		
۰/۱۷			•/•AA			مقدار اندازهگیری		
۰/۱۵			•/•VV		مقدار شبيهسازي			
Ĩ								
			• • •					
		Az	tial Distance (mm)				
50	100	150	200	250	300	350	400	

ری از ابتدای شروع	ده با اندازهگی	مسی پیلگر ش	سکل در لوله	خروط تغيير ش	ردار هندسی م	شکل ۴- نمو		
	ئترونيكي)	در نسخه الک	باندرل (رنگی	یه مخروطی ه	زاو			
	کرنش برشی ε _{rθ} ۰/۱۷ ۰/۱۵ 50 50 ری از ابتدای شروع	کرنش برشی ۳۵۵ ۰/۱۷ ۰/۱۵ 50 100 50 100 ده با اندازه گیری از ابتدای شروع	در نسخه الکترونیکی) در نش برشی ۹۳۵ در نسخه الکترونیکی)	کرنش برشی ۳۵ کرنش برشی ۳۰۰۰ ۰/۱۷ ۰/۰۸۸ ۰/۱۵ ۰/۰۷۷ ۰/۵۵ ۰/۰۷۷ ۰/۵۵ ۰/۰۷۷ ۰/۵۵ ۸xial Distance (50 100 150 200 ۰/۵۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۵۰ ۲۵0 150 200 ۰/۵۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۵۰ ۲۵0 ۲۵0 200 ۰/۵۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۵۰ ۲۵0 ۲۵0 ۲۵0 ۰/۵۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۵۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰ ۰/۰۰	کرنش برشی ۵ ۰/۱۷ ۰/۰۸۸ ۰/۱۵ ۰/۰۷۷ ۸xial Distance (mm) 50 100 150 200 250 50 100 150 200 250 50 100 450 200 250 50 100 450 200 250 50 100 450 200 250 50 200 200 50 200 200 50 200 200 50 200 200 50 200 200 50	ان کرنش برشی ۶۵ کرنش برشی ۱۰ م ازهگیری ۸۸۸ م/۰۷ یه سازی مراب ۸۵ مراب ۷۷ م معاون ۷۷ مرب ۸۵ مرب ۲۵ م معاون ۸۵ میل ۲۵ میل میلگر شده با اندازه گیری از ابتدای شروع ردار هندسی مخروطی ماندرل (رنگی در نسخه الکترونیکی)	العنوان کرنش برشی ۲۵۵ کرنش برشی ۳۵۵ مقدار اندازه گیری ۰/۱۵ ۰/۰۷ مقدار شببه سازی ۰/۰۵ ۰/۰۵ مقدار شببه سازی ۰/۵ ۰/۰۵ ۸ ۸ ۰/۰۵ ۸ ۸ ۰/۰۵ ۸ ۸ ۰/۰۵ ۸ ۸ ۲ ۸ ۸ ۲ ۸ ۸ ۲ ۸ ۸ ۲ ۸ ۸ ۲ ۸ ۸ ۲ ۸ ۸ ۲ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸ ۸	

جدول ۵- مقایسه نتایج عملی و شبیهسازی کرنش برشی

جدول ۶– ارزیابی نتایج شبیهسازی و آزمون عملی						
قطر خارجي	انحراف	ضخامت لوله	انحراف	[.		
(میلیمتر)	(درصد)	(میلیمتر)	(درصد)	تنايج		
$\circ/\circ\Upsilon\pm\Upsilon$ V/A	1	$\circ / \circ $ [*] ± [*] / \circ	o/\\\	عملى		
\circ/\circ t \pm t// \circ t	1	$\circ / \circ \Upsilon \pm 4 / \circ \chi$	-γω	شبيەسازى		

سازی را نمایش میدهد. بنابراین صحت و اعتبار مدل ارائه شده نتیجه گرفته میشود.

علاوه بر اندازه گیری کرنش های برشی به منظور صحت سنجی شبیه سازی ها، ابعادبر داری از قطر نهائی و ضخامت لوله تولید شده و مقایسه آن با هندسه مخروطی به دست آمده از شبیه سازی (شکل ۴) نیز می تواند به عنوان یک روش تاییدی برای اعتبار نتایج مدل باشد. جدول (۶) مقایسه نتایج به دست آمده را برای شبیه سازی و ابع ادبر داری (میانگین چهار بار اندازه گیری در جهت های مختلف) عملی نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه می شود میزان انحراف نتایج $\begin{aligned} & \epsilon_{z\theta} = \epsilon_{23} = \frac{1}{2} (\gamma_1 + \gamma_2) = \frac{1}{2} (0.082 + 0.095) = 0.088 \quad (\texttt{m}) \\ & \text{ (m)} \end{aligned}$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}.\boldsymbol{\phi} &= \mathbf{l}.\boldsymbol{\gamma}_2 \Longrightarrow \mathbf{13.88} \times \boldsymbol{\phi} = \mathbf{54} \times \mathbf{0.09} \Longrightarrow \boldsymbol{\phi} = \mathbf{0.34} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{r}\boldsymbol{\theta}} &= \boldsymbol{\varepsilon}_{12} = \frac{1}{2} \big(\mathbf{0.34} \big) = \mathbf{0.17} \end{aligned} \tag{(f)}$$

در ادامه شبیهسازی تغییر شکل لوله مسی نیز انجام و نتایج آن با مقادیر عملی بهدست آمده در جدول (۵) مقایسه شد. مقایسه نتایج توافق بسیار مناسبی بین نتایج آزمون عملی با نتایج شبیه

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۸

[DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.6.1]



شکل ۵– الگوی پراش نمونهها قبل و بعد از فرایند پیلگر (از سطوح داخلی و خارجی لوله)

بسیار اندک بوده (در حد ۱ درصد) و قابل اتکا بودن مدل بـرای شبیهسازی شرایط مختلف فرایندی را نشان میدهد.

۳-۲- ارزیابیهای متالورژیکی

شکل (۵) نتایج آزمون پراش پرتو ایکس پس از فرایند پیلگر از سطوح داخلی و خارجی لوله را در مقایسه با نتیجه بهدست آمده برای لوله پیش از فرایند پیلگر نشان میدهد. در این شکل قلههای آستنیت (صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۰۰)) با دایرههای توخالی و قلههای مربوط به مارتنزیت $\dot{\alpha}$ (صفحات (۱۱۰)، (۲۰۰) و (۲۱۱)) قلههای مربوط به مارتنزیت $\dot{\alpha}$ (صفحات (۱۱۰)، (۲۰۰) و (۲۱۱)) با دایرههای پررنگ مشاهده میشود. آزمون با طول موج ۱۹۵۱/۰ نانومتر انجام شده است. با توجه به شکل (۵) و عدم وجود مارتنزیت عه مکانیسم استحاله به صورت تبدیل آستنیت به نانومتر انجای مثانیکی و سپس مارتنزیت $\dot{\alpha}$ پیشنهاد میشود. اگرچه بر اساس نتایج بهدست آمده از تحقیق تیامیو و همکاران [۲۱]، صرف نظر از اندازه دانه مشخص شده است که ارتباط بین بردارهای برگرز، شوجی – نیشی یاما و کردجوموف – ساکس فازهای γ ، ع و شکل فشاری هدر دو مسیر فرون را طبی میکند. $\dot{\alpha}$ کرفشاری (۲) – (۲) – (۲) – (۲)

از سوی دیگر با درنظر گرفتن مقدار SFE برای آلیاژ AISI321 (کمتر از ۲۰ میلی ژول بر مترمربع [۱۳]) نیز هر دو مکانیسم برای استحاله پیشنهاد می شود. علاوه بر مکانیسم استحاله پیشنهادی، از مقایسه نتایج به دست آمده برای سطوح خارجی و داخلی لوله وجود بیشتر فاز مارتنزیت در سطح خارجی نسبت به سطح داخلی به وضوح قابل مشاهده است. این موضوع نشانگر میزان کرنش بیشتر و درنتیجه تغییر شکل شدیدتر در سطح مشترک غلتک ها با

شکل (۶) نتیجه بهدست آمده از آزمون کشش سرد روی لوله پیلگر شده ISI321 را در مقایسه با نمونه پیلگر نشده نمایش میدهد. میزان استحکام کشش نهایی لول و پس از فرایند پیلگر ۱۰۹۶ مگاپاسکال تقریباً دو برابر مقدار آن در آزمون کشش لول و قبل از فرایند پیلگر (۵۸۱ مگاپاسکال) است. وجود تغییر شکل فشاری شدید حین فرایند پیلگر موجب افزایش استحکام در نمونههای آزمون کشش شده است. از طرفی به خوبی نشان داده شده است که نرخ کار سختی فولادهای زنگنزن به انرژی نقص در چیده شدن (SFE) بستگی دارد [۱۳]. بنابراین باتوجه به مقدار کم SFE برای فولاد اکاتاکا که به آن اشاره شد، میزان کار سختی در این فولاد بالاست. با توجه به نرخ کار سختی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.6.1]



شکل ۶– الف) نتیجه آزمون کشش سرد لوله AISI321 پیلگر شده در مقایسه با نمونه پیش از فرایند و ب) نمونهها قبل و پس از آزمون کشش

بالا و وجود آستنیت نیمه پایدار در این فولاد، حین تغییر شکل شدید بخشی از ریزساختار به فاز مارتنزیت تبدیل می شود (مارتنزیت ناشی از کرنش). مارتنزیت به وجود آمده حین تغییر شکل در مقایسه با آستنیت زمینه دارای سختی و استحکام بیشتری است که موجب کرنش سختی و استحکام بیشتر نمونه-ها می شود. به عبارت دیگر این کرنش سختی را می توان به نوعی به اثر استحاله ناشی از تغییر شکل نسبت داد. در این نوع استحاله ترکیبی از استحکام و چقرمگی در فولاد زنگ نزن حین تغییر شکل و در شرایط آنیل به وجود می آید. فاز مارتنزیت ۵ تنش های بیشتر در مقایسه با فاز آستنیت را داشته و موجب افزایش استحکام نمونه ها می شود.

به منظور بررسی ریزساختار لوله پیلگر شده بررسی ها به کمک میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام و نتایج آن در شکل (۷) نشان داده شده است. تصاویر نمایانگر ساختاری با زمینه آستنیتی و تیغه های مارتنزیت است. درصد فاز مارتنزیت بر اساس آزمون فریتسنجی از سطح خارجی لوله ۶۷ درصد است. با توجه به نتایج حاصل از تحقیق اکایاسو و همکاران [۱۴]، حتی پس از اعمال درصدهای کرنش بسیار پایین نیز مقداری مارتنزیت ناشی از کرنش در نمونه ایجاد می شود. در آزمون کشش مقدار فاز مارتنزیت ایجاد شده

تا نقطه استحکام کشش نهایی چندان قابل توجه نبوده و پس از حد استحکام کششی تا نقطه شکست درصد فاز مارتنزیت بهطور قابل توجهی افزایش مییابد. بهطور کلی در بسیاری از فولادهای زنگنزن با درصد نیکل کم، فاز مارتنزیت پس از اندکی اعمال کرنش تشکیل میشود و با افزایش میزان کرنش طرفی با توجه به ناپایدار بودن فاز آستنیت در این فولاد و عمال تغییر شکل بالا حین فرایند پیلگر (کرنش کششی یک و کرنش فشاری ۵/۰) وجود فاز مارتنزیت قابل پیشبینی است. قابل توجه است که با توجه به نتیجه بیون و همکاران [۱۵]، میزان عرض ناحیه نقص در چیده شدن با کرنش برشی ارتباط دارد. بنابراین با توجه به کرنش برشی بهوجود آمده حین فرایند پیلگر، ناحیه نقص در چیده شدن ناپایدار بوده و استحاله فرایند پیلگر، ناحیه نقص در چیده شدن ناپایدار بوده و استحاله

۳-۳- نتایج شبیهسازی

شکل (۸) تغییرات مقادیر کرنش های محوری، شعاعی و محیطی را حین فرایند پیلگر نمایش میدهد. بر اساس نتایج بهدست آمده مقدار کرنش های فشاری شعاعی و محیطی در حین فرایند کاهش مییابند (کرنش های فشاری بیشتری اعمال می شود)، در حالی که کرنش محوری کششی افزایش مییابد

۶۵



شکل ۷– الف) تصویر ریزساختار نوری و ب) میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه لوله پیلگر شده AISI321 (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۸- نمودار تغییرات کرنش در جهتهای اصلی برحسب زمان فرایند پیلگر برای ضریب اصطکاک ۳/۰

شیب ماندرل، جمع شده و با گذشت زمان فرایند، افزایش مییابد. قابل توجه است میزان افزایش در کرنش کششی (از (شکل ۸). مقدار کرنش های شعاعی، محیطی و کششی در طول فرایند و بهواسطه مخروطی بودن شیار غلتکها و همچنین



مقدار صفر تا حدود یک)،که درنتیجه اصطکاک ایجاد می شود، تقریباً دو برابر میزان افزایش در مقدار کرنش های فشاری شعاعی و محیطی (از صفر تا حدود ۵/۰-) است. این موضوع موجب ازدیاد طول بیشتر لوله در ازای کاهش قطرهای داخلی و خارجی حین فرایند پیلگر می شود.

در ادامه به بررسی تغییرات تنشهای شعاعی، محیطی و محوری حین فرایند پیلگر پرداخته شده است. شکل (۹) تغییرات تنش شعاعی با زمان را در ضریب اصطکاک ۲۸° نشان می دهد. ماهیت نوسانی تنش حین فرایند پیلگر که در بسیاری از مطالعات گذشته نیز به آن اشاره شده است در شکل (۹) مشاهده می شود. دامنه نوسانات تنش شعاعی با پیشرفت فرایند افزایش یافته و از حد تنش تسلیم فولاد AISI321 (۵۰ مقادیر تنش با حرکت غلتکها می توان ملاحظه کرد که بیشترین تنش های فشاری با حرکت رو به جلو غلتکها همراه بوده در حالی که با شروع حرکت غلتکها در مسیر برگشت از مقدار تنش های فشاری کم شده و تنش های کششی ایجاد می شود. به عبارت دیگر قسمت اصلی تغییر شکل لوله حین فرایند پیلگر شامل کاهش قطرهای داخلی و خارجی با حرکت روبه جلو

د طول بیشتر لوله در ازای کاهش فطرهای داخلی و , فرایند پیلگر میشود. به بررسی تغییرات تـنش.هـای شـعاعی، محیطـی و ن فراینـد پیلگـر پرداختـه شـده اسـت. شـکل (۹) در این

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۳، یاییز ۱۳۹۸

غلتکها و تحت تنشهای فشاری رخ میدهد. علاوه بر موارد فوق وجود نوسانات در حالت کششمی یا فشاری میتواند موجب خستگی و عامل ایجاد ترک در لولهها باشد.

۳–۴– بررسی تأثیر پارامترهای فرایند (میزان تغذیه و زاویــه چرخش)

در این بخش با استفاده از شبیهسازی به بررسی تأثیر پارامترهای زاویه چرخش و میزان تغذیه لوله روی تنش، کرنش و پارامتر آسیب لاتام کاککرافت حین فرایند پیلگر پرداخته شده است. به این منظور در هر شبیهسازی تغییرات پارامترهای فرایند بهصورت زیر در دو مقدار پیشروی و سه مقدار زاویه چرخش درنظر گرفته شده است:

الف– بررسی اثر میزان تغذیه (چهار میلیمتر و هشت میلیمتر) و ب– بررسی اثر زاویه چرخش (۱۵، ۳۰ و ۶۰ درجه)

در ادامه نتایج مربوط به شبیهسازی های فوق به صورت جداگانه تهیه و مقایسه شده است. شکل (۱۰) توزیع تنش سیلان در نمایی که فقط لوله نمایش داده شده است را نمایش میدهد. این شکل نشان میدهد تنشها در جهت محوری، در لبههای آزاد غلتک، حین تغییر شکل کششی هستند

۶٧

DOI: 10.47176/jame.38.3.20701]



شکل ۱۰– توزیع تنش محوری در شبیهسازی پیلگر با زاویه چرخش ۶۰ درجه و میزان تغذیه هشت میلیمتر

وجود آمده در سطح مقطع لوله برای تغییرات پارامتر آسیب است. با توجه به زاویه چرخش لوله در این حالت (۶۰ درجه) بخشی از سطح مقطع لوله (نواحی بین راهراههای نارنجی رنگ) تحت تغییر شکل کوبشی کف شیار غلتکها قرار نمی گیرد. بنابراین میزان تنشهای فشاری و کرنش ایجاد شده در این نواحی کمتر از قسمتهای کناری بوده و میزان آسیب کمتری نیز در ماده ایجاد می شود. هرچند این شرایط با تغییر زاویه چرخش در حالتهای دیگر تغییر می کند. سایر شرایط نیز مورد شبیه سازی قرار گرفته و نتایج آن در جدول (۷) خلاصه شده است.

پس از بررسی نتایج شبیهسازی تأثیر زاویه چرخش و میزان تغذیه (جدول ۷)، می توان استنباط کرد در بازه انتخاب شده برای زاویه چرخش، روند خاصی برای اثر افزایش یا کاهش زاویه چرخش بر پارامتر آسیب مشاهده نمی شود. به عبارت دیگر با توجه به عدم وجود یک رابطه مستقیم بین زاویه چرخش و میزان آسیب ایجاد شده، نیاز به تعیین پارامترهای بهینه و مشخص هر فرایند ضروری به نظر می رسد. در بازه انتخاب شده برای زوایای چرخش، آسیب ایجاد شده در زاویه ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۱۵ و ۶۰ درجه افزایش قابل توجهی

و در مناطق کف شیار غلتک تنشرها اساساً فشاری هستند. تنش محوری (شکل ۱۰) که موجب ازدیاد طول در لوله و در عین حال عامل تأثیر گذار در مقدار پارامتر آسیب بهدست آمده حین فرایند است، دارای نوسانی بین ۸۴۷– (تنش فشاری در ناحیه کف شیار غلتکها) تا ۳۸۴ مگایاسکال است. دامنه بسیار زیاد این نوسان می تواند سبب خستگی ماده تحت سیکل های بسیار یایین و درنتیجه ایجاد ترکهای خستگی شود. هرچند دامنه نوسانات تـنش بـراي مولف متنش شـعاعي (بـهترتيـب ١٥٩٢ مگاپاسکال) بهمراتب از دامنه نوسانات تـنش.هـای محیطـی و محوری (بهترتیب ۱۲۸۶ و ۱۲۱۳ مگاپاسکال) بیشتر است. بنابراین عامل اصلی خستگی را می توان به نوسانات تنشهای شعاعی حین فرایند پیلگر نسبت داد. شکل (۱۱) نیـز پارامتر آسیب لاتام کاککرافت را نشان داده و مشخص است که بیشترین مقدار آن در این شرایط که دارای تقارن ۶۰ درجهای است، در حدود ۱۱۰ مگاپاسکال است. با توجه به توزيع پارامتر آسیب بهدست آمده برای میزان تغذیه هشت میلیمتـر و زاویه چرخش ۶۰ درجه (شکل ۱۱) مشاهده میشود که میزان آسیب با پیشروی فرایند و با افزایش کرنش اعمالی افزایش یافته است. از نکات قابل توجه در این تصویر حالت راهراه به



شکل ۱۱– توزیع پارامتر آسیب لاتام کاککرافت در شبیهسازی پیلگر با زاویه چرخش ۶۰ درجه و میزان تغذیه هشت میلی متر

كرنش برشى	آسيب سطح داخلي	آسيب سطح خارجي	زاويه چرخش	میزان تغذیه (د ا متر)
•/۲	۹ ۰	۱۰۲	۱۵ درجه	(میدی میز) ۸
•/۱۵	177	180	۳۰ درجه	٨
۰/١	٩۵) • V	۶۰ درجه	٨
۰ /۳۵	١٠٥	110	۱۵ درجه	۴
_	111	170	۳۰ درجه	۴
۰/۱۵	٩。	٩٧	۶۰ درجه	۴

جدول ۷– تأثیر میزان زاویه چرخش و تغذیه لوله روی میزان آسیب لاتام کاککرافت و کرنش برشی

چرخش و میزان تغذیه را نتیجه گرفت. از طرف دیگر کاهش نرخ پیشروی کرنش برشی بیشینه را افزایش داده است. هرچند بهطور کلی کاهش میزان تغذیه بهدلیل کاهش میزان تولید از نظر فرایندی چندان مطلوب نیست و باید این موضوع نیز بهعنوان یک عامل تأثیرگذار در طراحی فرایند درنظر گرفته شود.

۴- نتیجه گیری

به منظور بررسی فرایند پیلگر سرد 321 AISI321 یک مدل المان محدود سه بعدی با استفاده از نرمافزار آباکوس پیشنهاد شده است. خواص مکانیکی، ارزیابی ریزساختار، وضعیت تنش و کرنش در منطقه تغییر شکل به صورت عددی و تجربی حین را نشان میدهد. همچنین نتایج نشان میدهد که با کاهش زاویه چرخش میزان کرنش برشی بیشینه افزایش یافته است و درنتیجه در میزان پیشرویهای یکسان بیشترین کرنش برشی مربوط به زاویه ۱۵ درجه است. بنابراین با توجه به تأثیر مستقیم کرنشهای برشی در ایجاد میکروترکها که پیشتر بدان اشاره شد، باید علاوه بر میزان آسیب به مقادیر کرنشهای برشی نیز نرخ تغذیه انتخاب شده نشان میدهد که با کاهش نرخ تغذیه در زاویه ۱۵ درجه آسیب کاهش یافته است. بنابراین با توجه به این تغییرات میتوان وجود یک مقدار بهینه برای زاویه

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۸

پایین، که از عوامل ایجاد ترک در لولههای تولید شده با فرایند پیلگر است، را موجب شود. علاوه بر این، تأثیر پارامترهای فرایند (میزان تغذیه و زاویه چرخش) بر میزان آسیب بهوجود آمده حین فرایند پیلگر لوله AISI321321 نیز بررسی شد. بر اساس نتایج شبیهسازی، میتوان نتیجه گرفت که پارامترهای فرایند بهینه در این تحقیق هشت میلیمتر برای میزان تغذیه و زاویه چرخش ۱۵ یا ۶۰ درجه است. تعداد دورههای خستگی در شرایط اول کمتر است، درحالی که در شرایط دوم برشی کمتری وجود دارد. فرایند بررسی شد. مقایسه نتایج شبیهسازی و اندازه گیری شده مؤلفه های کرنش برشی نشانگر اعتبار مدل پیشنهادی است. علاوه بر این، ابعاد اندازه گیری شده لوله های نهایی نزدیک به نتایج مدل FEM است. بر اساس نتایج آزمون های پراش پرتو ایکس و فریتسنجی و با توجه به مقدار به دست آمده از SFE برای 221 AISI213، هر دو مکانیزم استحاله فاز از آستنیت به مارتنزیت **۵** محتمل است. علاوه بر این، کرنش های شعاعی و محیطی در همه شرایط فشاری و کرنش محوری کششی است. رفتار نوسانی مؤلفه های تنش، یکی از ویژگی های اصلی فرایند پیلگر است که این نوسانات می تواند خستگی تحت سیکل های

واژەنامە

- 1. optical microscopy
- 2. scanning electron microscopy
- 3. inverse magnetostrictive effect
- 1. Strehlau, O., "Introducing Cold Pilger Mill Technology an Overview of the Equipment and the Process, *Tube and Pipe Journal*, 2006..
- Pociecha, D., Boryczko, B., Osiko, J., and Mroczkowski, M., "Analysis of Tube Deformation Process in a New Pilger Cold Rolling Process", *Archive of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 376-382, 2014.
- Kumar, G., Balo, S., Dhoble, A., Singh, J., Singh, R., Srivastava, D., Dey, G. K., and Samajdar, I., "Through-Thickness Deformation Gradient in a Part-Pilgered Zirconium Tube: Experimental Measurements and Numerical Validation", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 48, No. 6, pp. 2844-2857, 2017.
- Furugen, M., and Hayashi, C., "Application of the Theory of Plasticity to the Cold Pilgering of Tubes", *Journal Mechanical Work Technology*, Vol. 10, pp. 273-186, 1984.
- Ragger, K. S., Kaiser, R., Paal, J., Fluch, R., and Buchmayr, B., "Modellierung des Kaltpilgerns-Betrachtung der Schädigungsentwicklung und ihre Beeinflussung durch die Vorformgeometrie", Association. of International Roll Pass Design and Rolling Mill Engineering, Vol. 75, pp. 28-41, 2014.
- Siebel, E., and Neumann, F. W., "Das Kaltpilgern Von Rohren-Versuch Ergebnisse aus Untersu-Chungen Iiber Dem Walzvorgang", *Stahl und Eisen*, Vol. 74, pp. 139-145, 1954.
- 7. Aubin, J. L., Girard, E., and Montmitonnet, P.,

4. X-ray diffractometer 5. quasistatic

- مراجع
- "Modelling of Damage in Cold Pilgering", *in Zirconium in the Nuclear Industry: Tenth International Symposium*, ed. Garde A. M. & Bradley E. M. (Eds.), ASTM STP, Vol. 1245, pp. 245-263, 1994.
- Mulot, S., Hacquin, A., Montmitonnet, P., and Aubin, J. L., "A Fully 3D Finite Element Simulation of Cold Pilgering", *Jouranl of Materials Processing Technology*, Vol. 60, pp. 1-4, pp. 505-512, 1996.
- Montmitonnet, P., Logé, R., Hamery, M., Chastel, Y., Doudoux, J. L., and Aubin, J. L., "3D Elastic-Plastic Finite Element Simulation of Cold Pilgering of Zircaloy Tubes", *Jouranl of Materials Processing Technology*, Vol. 125-126, pp. 814-820, 2002.
- Gupta, A. K., Krishnamurthy, H. N., Singh, Y., Prasad, K. M., and Singh, S. K., "Development of Constitutive Models for Dynamic Strain Aging Regime in Austenitic Stainless Steel 304", *Materials and Design*, Vol. 45, pp. 616-627, 2013.
- Talonen, J., Aspegren, P., and Hänninen, H., "Comparison of Different Methods for Measuring Strain Induced α'-martensite Content in Austenitic Steels", *Materials Science Technology*, Vol. 20, No. 12, pp. 1506-1512, 2004.
- Tiamiyu, A. A., Tari, V., Szpunar, J. A., Odeshi, A. G., and Khan, A. K., "Effects of Grain Refinement on the Quasi-Static Compressive Behavior of AISI 321 Austenitic Stainless Steel: EBSD, TEM, and XRD Studies", *International Journal of Plasticity*, Vol. 107, pp. 79-99, 2018.

DOI: 10.47176/jame.38.3.20701

 Leban, M. B., and Tisu, R., "The Effect of TiN Inclusions and Deformation-Induced Martensite on the Corrosion Properties of AISI 321 Stainless Steel", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 33, pp. 430-438, 2013.

14. Okayasu, M., Fukui, H., Ohfuji, H., and Shiraishi, T., "Strain-Induced Martensite Formation in Austenitic Stainless Steel", *Journal of Materials Science*, Vol. 48, pp. 6157-6166, 2013.

15. Byun, T. S., "On the Stress Dependence of Partial Dislocation Separation and Deformation Microstructure in Austenitic Stainless Steels", *Acta Materialia*, Vol. 51, No. 11, pp. 3063-3071, 2003.

۷١