

بررسی تأثیر ضریب اصطکاک بر میزان عیب دم ماهی در فرایند نورد حلقوی گرم

امیر حسین قیصری^۱ محمدرضا فروزان^{۲*} عبدالعلی مراثی^۳

* نویسنده مسئول: forouzan@cc.iut.ac.ir

چکیده

نورد حلقوی گرم یک فرایند به شدت غیر خطی و ناپایدار است. ضریب اصطکاک میان رینگ با غلتک محرک و هرزگرد از این جمله اند که بر کیفیت محصول نهایی تأثیر به‌سزایی دارند. در این مقاله تأثیر این دو پارامتر بر نورد حلقوی گرم به کمک مدل سه بعدی المان محدود کوپل مکانیکی - حرارتی بررسی شده است. بدین منظور مدلی سه بعدی از فرایند نورد حلقوی گرم شامل رینگ، غلتک‌های محرک، هرزگرد و راهنما در نرم افزار آباکوس ایجاد شده و میزان عیب دم ماهی به ازای ضریب اصطکاک‌های مختلف میان غلتک محرک و حلقه و همچنین غلتک هرزگرد و حلقه اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضریب اصطکاک میان رینگ و غلتک هرزگرد یا کاهش ضریب اصطکاک میان رینگ و غلتک محرک میزان عیب دم ماهی کاهش می‌یابد. همچنین میزان تغییرات این دو پارامتر باید در محدوده معینی حفظ شده و از آن تجاوز ننماید. نتایج به‌دست آمده می‌تواند به عنوان راهنمایی به منظور بهینه‌سازی فرایند مزبور به کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: نورد حلقوی گرم، ضریب اصطکاک، عیب دم ماهی، مدل سه بعدی المان محدود، کوپل مکانیکی - حرارتی.

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲- دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۳- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر شاهین شهر.

۱- مقدمه

فرایند نورد حلقوی گرم یک فرایند پیشرفته با تأثیرات مکانیکی- حرارتی است. در سال‌های اخیر با افزایش روزافزون تقاضا در صنایع هوایی و فضایی برای رینگ‌های بزرگ و بدون درز از جنس آلیاژهای تیتانیوم، این فرایند به دلیل کاهش هزینه، مواد خام و کیفیت فوق العاده به عنوان فرایند برتر در تولید این رینگ‌ها تبدیل شده است.

در این فرایند یک قطعه دونات شکل پیشگرم شده، بر روی غلتک هرزگرد گذاشته می‌شود. فاصله میان غلتک هرزگرد و غلتک محرک (با شعاع بزرگتر) به آرامی کاهش می‌یابد. اصطکاک میان غلتک محرک و حلقه منجر به دوران حلقه شده و حلقه نیز غلتک هرزگرد را می‌چرخاند. با کاهش سطح مقطع شعاعی حلقه در طول فرایند، نورد محیطی در جهت چرخش رینگ اتفاق افتاده و قطر حلقه افزایش می‌یابد. در طول این فرایند عیوب مختلفی در قطعه ایجاد می‌شود که یکی از مهم‌ترین آنها عیب دم ماهی^۱ است. این عیب ناشی از ناصافی در صفحات بالایی و پایینی حلقه است، شکل (۱) را ببینید.



شکل (۱) نمونه‌ای از ایجاد عیب دم ماهی در حلقه در فرایند نورد حلقوی [۱].

با توجه به پیچیدگی فرایند فوق، بسیاری از مقالات تنها به توصیف و شبیه‌سازی آن پرداخته و از بررسی تأثیر پارامترهای فرایند بر کیفیت محصول اجتناب کرده‌اند. گائو و همکارانش رفتار تغییر شکل در نورد حلقوی سرد را مورد بررسی قرار دادند [۲]. وانگ و همکارانش مدل اجزا محدودی به منظور شبیه‌سازی نورد حلقوی گرم ارائه نمودند [۳]. لی و همکارانش تأثیر سرعت غلتک هرزگرد و غلتک اصلی را بر

کیفیت حلقه ارزیابی کردند [۴]. سان و همکارانش تأثیر ضریب اصطکاک بر یکنواختی توزیع دما و تغییر شکل را بررسی نمودند و در هر حالت ضریب اصطکاک بین رینگ با هر دو غلتک را برابر فرض کردند [۵]. انجامی و بسطی تأثیر ابعاد غلتک‌های فرم دهی در نورد حلقوی گرم را بر روی کیفیت قطعه نهایی از جمله میزان عیب دم ماهی مورد مطالعه قرار دادند [۶]. اما تأثیر پارامتر ضریب اصطکاک بر میزان عیب دم ماهی در نورد حلقوی گرم تاکنون بررسی نشده است.

در این مقاله، مدل المان محدود اعتبار سنجی شده برای نورد حلقوی گرم آلیاژهای تیتانیوم آماده شده و سپس تأثیر ضریب اصطکاک بین حلقه و دو غلتک فرم‌دهی بر محصول نهایی بررسی شده است.

۲- مدل سه بعدی اجزا محدود کوپل

مکانیکی-حرارتی

شکل (۲) مدل سه بعدی المان محدود کوپل مکانیکی- حرارتی مورد استفاده را که بر اساس نرم افزار آباکوس تهیه شده است نشان می‌دهد. این مدل شامل غلتک محرک، غلتک هرزگرد، دو غلتک راهنما و حلقه است.

در مقایسه با حلقه، میزان تغییر فرم غلتک‌ها به قدری ناچیزند که به صورت صلب در نظر گرفته شده‌اند. حلقه نیز به کمک المان‌های شش وجهی^۲ کوپل مکانیکی- حرارتی هشت گرهی شبکه بندی شده است. چهار تماس نیز میان حلقه و غلتک محرک، غلتک هرزگرد و دو غلتک راهنما تعریف شده است. در هر تماس علاوه بر ضریب اصطکاک، ضریب هدایت حرارتی رسانش نیز تعریف شده و انتقال حرارت تابش و همرفت نیز در نظر گرفته شده است.

به منظور کنترل حرکت غلتک‌های راهنما در طول فرایند، مسیر حرکت آن‌ها بر حسب زمان به صورت شرط مرزی بر آنها اعمال شده است. با توجه به اینکه غلتک‌های راهنما نقشی در فرم دهی حلقه نداشته و تنها از انحراف آن جلوگیری می‌نمایند و به علت ناچیز بودن نیروی اصطکاک

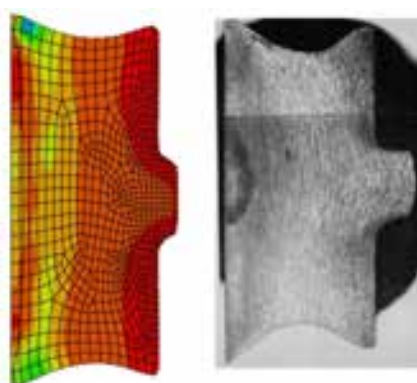
۲- Hexahedral

۱- Fishtale Defect

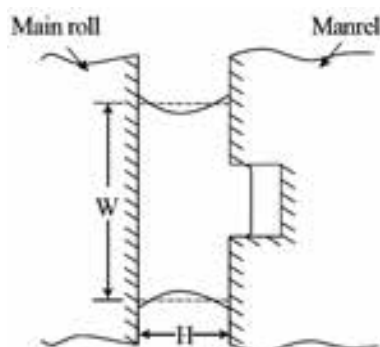
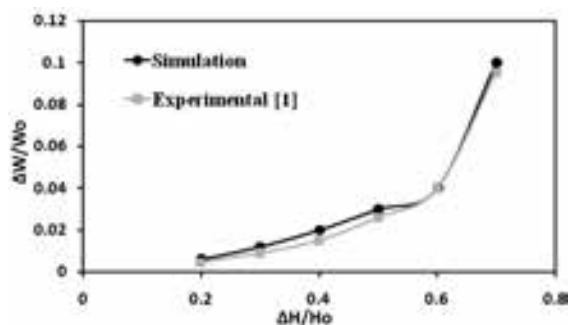
جدول (۱) اطلاعات آزمایش [۱]

جنس حلقه	HE۳۰ آلایز آلومینیوم
سرعت دورانی غلتک محرک	۳۱ rev/min
نرخ تغذیه غلتک هرزگرد	۰/۰۱۹ mm/rev

در شبیه سازی عددی نیز آلایز آلومینیوم HE۳۰ در نظر گرفته شد. تحت شرایط ارائه شده در جدول (۱)، شبیه سازی فرایند نورد حلقوی به انجام رسید. در شکل (۳) حلقه شبیه سازی شده و حلقه ناشی از فرایند علمی نشان داده شده است. در شکل (۴) مقایسه میان میزان گسترش در برابر نسبت کاهش ضخامت میان حلقه شبیه سازی شده و عملی ارائه شده است.



شکل (۳) مقایسه بین حلقه شبیه سازی شده و عملی.



شکل (۴) مقایسه میان میزان گسترش در برابر نسبت کاهش ضخامت میان حلقه شبیه سازی شده و عملی [۱] در وسط حلقه.

میان حلقه و غلتک های راهنما، ضریب اصطکاک میان آن ها و حلقه صفر در نظر گرفته شده است.

به منظور جلوگیری از واپیچش بیش از حد المان های حلقه در طول فرایند و حفظ کیفیت شبکه، از تکنیک شبکه بندی مجدد^۱ برای حلقه استفاده شده است. به منظور افزایش سرعت حل مساله توسط نرم افزار از تکنیک مقیاس دهی جرمی^۲ استفاده شده است. تکایا نشان داد این تکنیک به طور مجازی چگالی ماده را افزایش می دهد و روش مناسبی برای افزایش سرعت فرایند در صورت حساس بودن ماده به نرخ کرنش یا وجود پدیده های مکانیکی - حرارتی در فرایند است [۷]. لازم به ذکر است که تأثیرات اینرسی مجازی ناشی از مقیاس دهی جرمی ممکن است منجر به پاسخی نادرست شود، در نتیجه نتایج حاصل از حل مسئله توسط نرم افزار باید پیش از استفاده صحت سنجی شود. به عنوان یک قانون کلی به منظور صحت سنجی، انرژی جنبشی ماده تحت فرایند نایستی از ۵ الی ۱۰ درصد انرژی داخلی در طول فرایند بیشتر شود [۸].



شکل (۲) مدل سه بعدی المان محدود کوپل مکانیکی - حرارتی.

۳- اعتبار سنجی مدل

دقت مدل اجزا محدود به کمک آزمایش های عملی انجام گرفته توسط مامالیس بررسی شد [۱]. اطلاعات آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است.

۱- Remeshing Technique

۲- Mass Scaling

جدول (۲) خواص مکانیکی - حرارتی Ti-۶Al-۴V.

پارامتر	مقدار
چگالی	4370 kg/m^3
مدول الاستیسیته	$113/8 \text{ GPa}$
ضریب پواسون	$0/342$
ظرفیت گرمایی ویژه	$0/5283 \text{ J/g}^\circ\text{C}$
رسانش حرارتی	$6/9 \text{ W/mK}$
دمای اولیه حلقه	$950 \text{ }^\circ\text{C}$
دمای اولیه غلتک‌ها	$30 \text{ }^\circ\text{C}$
دمای محیط	$30 \text{ }^\circ\text{C}$
ضریب تابش	$0/7$

جدول (۳) شرایط شبیه‌سازی.

پارامتر	اندازه (mm)
شعاع غلتک محرک	۱۸۰
شعاع غلتک هرزگرد	۳۰
شعاع خارجی حلقه خام	۱۶۵
شعاع داخلی حلقه خام	۱۰۰
ارتفاع حلقه خام	۱۰۰

در این مقاله دو پارامتر مورد بررسی قرار گرفته است:

ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک محرک و ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک هرزگرد. به منظور انجام شبیه‌سازی پارامترهای فوق در جدول (۴) دسته‌بندی شده‌اند.

جدول (۴) پارامترهای فرایند.

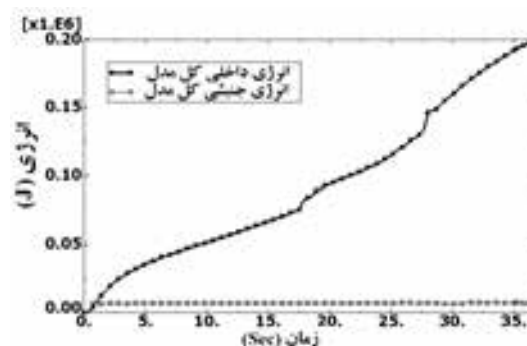
دسته	ضریب اصطکاک حلقه با غلتک محرک	ضریب اصطکاک حلقه با غلتک هرزگرد
۱	۰/۴	۱،۰/۵، ۰/۴، ۰/۳
۲	۰/۵	۱،۰/۵، ۰/۴، ۰/۳

۵- بحث و بررسی شبیه‌سازی

بر اساس مدل اجزا محدود استفاده شده و بر اساس شرایط محاسباتی ذکر شده، فرایند نورد حلقوی گرم شبیه‌سازی شده و تأثیر ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک‌های فرم‌دهی بر میزان عیب دم ماهی بررسی شد. در اینجا معیاری به منظور تشریح میزان عیب دم ماهی در حلقه نورد شده طبق شکل (۶) به صورت زیر تعریف می‌شود:

در این شکل W ارتفاع اولیه حلقه و ΔW اختلاف میان ارتفاع وسط حلقه و ارتفاع اولیه حلقه در هر لحظه است. همچنین H_0 ضخامت اولیه حلقه و ΔH اختلاف میان ضخامت حلقه و ضخامت اولیه حلقه در هر لحظه است. نتایج به دست آمده وجود تقریباً ۱۰ درصد خطا میان نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی را نشان می‌دهد که صحت نتایج بدست آمده را تأیید می‌نماید.

لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی فوق از ضریب مقیاس جرمی ۱۰۰ به منظور افزایش سرعت حل استفاده شد. شکل (۵) تاریخچه انرژی‌های داخلی و جنبشی حلقه را در طول فرایند نشان می‌دهد.



شکل (۵) تاریخچه انرژی‌های داخلی و جنبشی.

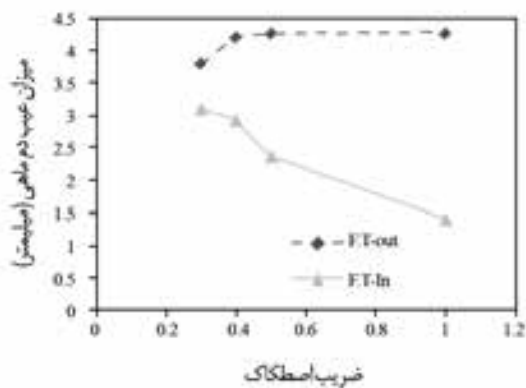
مشاهده می‌شود که انرژی جنبشی در مرحله گازگرفتگی فرایند، به یک مقدار خاص افزایش یافته و در ادامه تقریباً ثابت باقی می‌ماند که نشان‌گر شروع مرحله فرم‌گیری پایدار است. واضح است که مقدار انرژی جنبشی در فرایند کمتر از ۵ الی ۱۰ درصد انرژی داخلی بوده و بنابراین بر اساس قانون ذکر شده در بخش (۲) مقاله حاضر، حل ارائه شده قابل قبول است.

۴- شرایط شبیه‌سازی

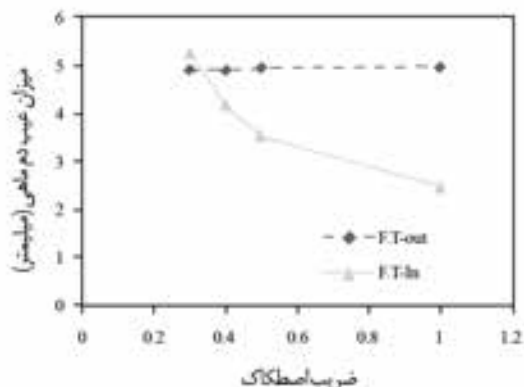
جنس حلقه آلیاژ Ti-۶Al-۴V است و خواص مکانیکی - حرارتی آن در جدول ۲ آورده شده است. در نورد حلقوی گرم بسیاری از خواص با تغییر دما تغییر می‌کنند. به همین دلیل در مدل اجزا محدود نیز تمام خواص فوق الذکر در دماهای مختلف برای نرم افزار تعریف شده است [۹]. شرایط شبیه‌سازی در جدول (۳) ارائه شده است.

نامحسوسی مقدار آن‌ها را افزایش می‌دهد، اما در مقابل باعث افزایش قابل توجه Y_4 و Y_5 می‌شود.

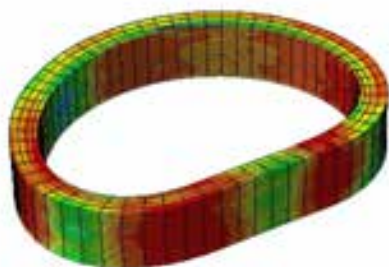
مطابق شکل (۹) افزایش بیش از حد ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک محرک موجب از دست رفتن گردی حلقه در طول فرایند می‌شود.



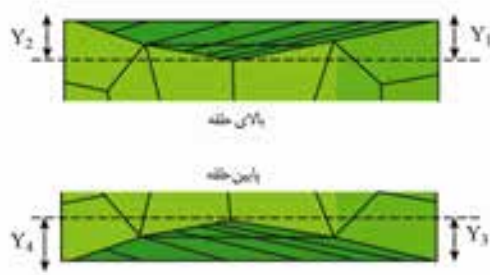
شکل (۷) منحنی میزان عیب دم ماهی - ضریب اصطکاک برای دسته ۱.



شکل (۸) منحنی میزان عیب دم ماهی - ضریب اصطکاک برای دسته ۲.



شکل (۹) تأثیر افزایش بیش از اندازه ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک محرک بر محصول نهایی



شکل (۶) پارامترهای معیار عیب دم ماهی.

$$F.T_{in} = \frac{Y_2 + Y_4}{2}, F.T_{out} = \frac{Y_1 + Y_3}{2} \quad (1)$$

به گونه ای که Y_2 ، Y_4 ، Y_1 و Y_3 ، به ترتیب میزان فاصله گوشه‌های داخلی و خارجی از پایین‌ترین سطح در بالا و پایین حلقه بوده و $F.T_{in}$ و $F.T_{out}$ میزان عیب دم ماهی در داخل و خارج حلقه هستند.

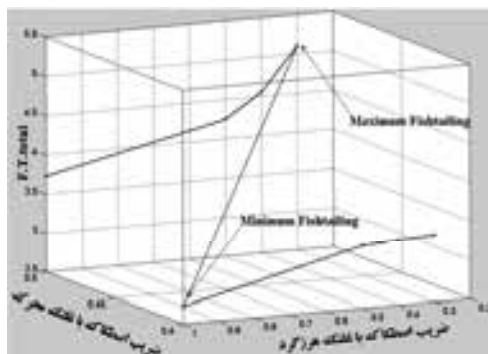
۵-۱- تأثیر ضریب اصطکاک بر پارامترهای Y

بر اساس شبیه سازی تحت داده‌های دو دسته ۱ و ۲ از جدول (۴)، تأثیر ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک‌های فرم‌دهی بر پارامتر عیب دم ماهی بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک هرزگرد، میزان جریان محوری ماده در تماس با غلتک هرزگرد کاهش یافته و در نتیجه پارامترهای Y_2 و Y_4 کاهش می‌یابند، اما در مقابل، دو پارامتر Y_1 و Y_3 با نرخ کاهنده‌ای افزایش می‌یابند (شکل (۷) و (۸)).

با افزایش هر چه بیشتر ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک هرزگرد، نرخ کاهش دو پارامتر Y_2 و Y_4 به تدریج کاهش یافته و مقدار این دو پارامتر تقریباً ثابت باقی می‌ماند، شکل (۷) و (۸) را ببینید.

کاهش بیش از اندازه ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک هرزگرد نیز موجب سر خوردن حلقه در راستای محوری شده و موجب عدم شکل‌گیری مناسب حلقه می‌شود.

افزایش ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک محرک تأثیر ناچیزی بر روی دو پارامتر Y_1 و Y_3 داشته و به طور



شکل (۱۱) منحنی $F.T_{total}$ بر حسب ضریب اصطکاک حلقه با غلتک‌های فرم دهی

۶- نتیجه گیری

یک مدل سه بعدی المان محدود کوپل مکانیکی - حرارتی برای نورد حلقوی گرم تولید شد. همچنین محدوده مناسبی از ضرایب اصطکاک به منظور دستیابی به کمترین عیب دم ماهی مشخص گردید. نتایج اصلی به شرح زیرند:

(۱) با افزایش ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک هرزگرد، پارامترهای Y_2 و Y_4 کاهش می‌یابند.

(۲) با افزایش ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک هرزگرد، پارامترهای Y_1 و Y_3 با نرخ کاهنده‌ای افزایش می‌یابند.

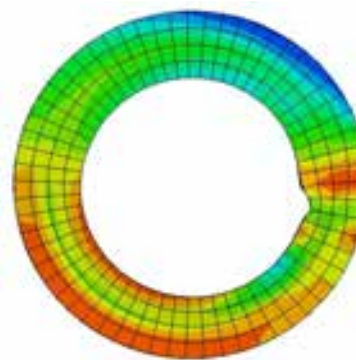
(۳) افزایش ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک محرک به طور نامحسوسی مقدار دو پارامتر Y_1 و Y_3 را افزایش می‌دهد.

(۴) افزایش ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک محرک باعث افزایش قابل توجه Y_2 و Y_4 می‌شود.

(۵) کمترین میزان عیب دم ماهی زمانی حاصل می‌گردد که ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک هرزگرد بیشترین مقدار ممکن بوده و ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک محرک کمترین مقدار مجاز خود باشد.

نتایج حاصله می‌تواند به عنوان منبعی برای کنترل میزان عیب دم ماهی در فرایندهای نورد حلقوی گرم به کار گرفته شود.

کاهش بیش از حد ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک محرک نیز موجب عدم چرخش حلقه در طول فرایند گشته و در نتیجه غلتک هرزگرد در حلقه فرو رفته و حلقه معیوب می‌شود، در شکل (۱۰) این موضوع به خوبی مشاهده می‌شود.



شکل (۱۰) تأثیر کاهش بیش از اندازه ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک محرک بر محصول نهایی.

۵-۲- تأثیر ضریب اصطکاک بر عیب دم ماهی

به منظور بررسی تأثیر ضریب اصطکاک بر روی میزان عیب دم ماهی، پارامتر زیر که بیانگر میزان انحراف ماده از پایین ترین سطح آن در بالا و پایین حلقه می‌باشد تعریف می‌شود:

$$F.T_{total} = \frac{F.T_{in} + F.T_{out}}{2} \quad (2)$$

$F.T_{total}$ مقدار کلی عیب دم ماهی در حلقه است. با استفاده از پارامتر فوق امکان انتخاب مناسب‌ترین ضرایب اصطکاک بین حلقه و غلتک‌های فرم دهی به منظور دسترسی به کمترین میزان عیب دم ماهی موجود است.

نتایج نشان می‌دهد که کمترین میزان برای عیب دم ماهی زمانی حاصل می‌شود که ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک هرزگرد بیشترین مقدار ممکن بوده و ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک محرک کمترین مقدار مجاز خود باشد.

همچنین بیشترین میزان عیب دم ماهی زمانی حاصل می‌گردد که ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک هرزگرد کمترین مقدار خود بوده و ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک محرک بیشترین مقدار خود باشد، (شکل (۱۱)).

۷- مراجع

- [1] Mamalis A.G., Hawkyard J.B., Jhonson W., Spread and flow patterns in ring rolling, *Int J. mech. Sci*, 18, 1975, pp. 11-16.
- [2] Guo L.G., Yang H., Zhan M., *Research on plastic deformation behavior in cold ring rolling by FEM numerical simulation*, Modeling and Simulation in Material Science and Engineering, 13, 2005, pp. 1029-1046.
- [3] Wang M., Yang H., Sun Z.C., Gup L.G., *Dynamic explicit FE modeling of hot ring rolling process*, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 16(6), 2006, pp. 1274-1280.
- [4] Li L.Y., Yang H., Guo L.G., Sun Z.C., , Research on interactive influence of parameters on T-shaped cold ring-rolling by 3d-FE numerical simulation, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 21(10), 2007, pp. 1541-1547.
- [5] Sun Z.C., Yang H., Ou X.Z., *Thermo-mechanical coupled analysis of hot ring rolling process*, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 18, 2008, pp. 1216-1222.
- [6] Anjami N., Basti A., Investigation of rolls size effects on hot ring rolling process by coupled thermo-mechanical 3D-FEA, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 2010, pp. 1364-1377.
- [7] Tekkaya, A.E., State-of-the-art of simulation of sheet metal forming. *J. Mater. Process. Technol.* 103, 2000, pp. 14-22.
- [8] Getting Started with ABAQUS, 2003, Version 6.9, ABAQUS Inc.
- [9] Software library: DEFORM-3D Software.