



تاثیر پارامترهای نورد گرم ورق‌های فولادی بر انتقال حرارت منتقله به غلتک

محمد مومنی*^۱، حسین شکوهمند^۲، محمد نیکیان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

۲- استاد، دانشکده مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

Momeni_natanz@yahoo.com

چکیده:

فرآیند نورد یکی از قدیمی‌ترین فرایندهای شکل‌دهی فلزات می‌باشد و نورد گرم به دلیل راحتی در شکل‌دهی فلزات مورد توجه قرار گرفته است. غلتک‌های مورد استفاده در نورد گرم به دلیل حساسیت در تولید ورق از اهمیت بسزایی برخوردار است. بنابراین بررسی میزان حرارت منتقل شده به آنها در حین فرآیند نورد علاوه بر اینکه در کیفیت محصول نهایی نقش اساسی دارد، هزینه تولید غلتک و یا تعمیر آن نیز بخشی از هزینه تولید را شامل می‌شود. در این پروژه با استفاده از یک برنامه نورد واقعی متعلق به شرکت فولاد مبارکه اصفهان و همچنین با کمک نرم‌افزار قدرتمند ABAQUS غلتک‌های نورد ورق شبیه‌سازی گردیده و پس از حل معادلات انتقال حرارت و اعمال شرایط مرزی مشابه واقعی، کانتور حرارتی و نمودارهای میانگین دمای غلتک در شرایط نرمال رسم گردیده است و با مقایسه با شرایط واقعی درستی مدل‌سازی بررسی شده است. در قسمت بعد با تغییرات در پارامترهای اصلی نورد یعنی سرعت نورد و ضریب اصطکاک و میزان کاهش ضخامت ورق، دمای میانگین غلتک در عمق‌های مختلف بررسی گردیده و نیروهای عکس‌العمل نورد نیز مورد توجه قرار گرفته است. علت‌های افزایش و یا کاهش دما نیز در هر بخش بیان شده است.

کلیدواژه‌ها: نورد گرم، انتقال حرارت، غلتک نورد، آباکوس، فولاد مبارکه اصفهان

Effect of Hot Rolling Parameters on Roller Heat Transfer

*Mohammad momeni*¹, Hossein shokoochmand², Mohammad nikian³*

1- MSc student, Department of Mechanical Engineering Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran

2- Professor, Department of Mechanical Engineering Tehran University, Tehran, Iran

3- Assistant prof, Department of Mechanical Engineering Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran

†Corresponding Author Email: Momeni_natanz@yahoo.com

Abstract

Rolling process is one of the oldest metal forming processes and hot rolling has been considered for easy metal forming. Rollers used in hot rolling are very important due to the sensitivity of plate production. Therefore, the study of the amount of heat transferred to them during the rolling process, in addition to being crucial to the quality of the final product, also includes the cost of producing a roller and also cladding a portion of the cost of production. In this project, work rollers are simulated using a real rolling program belonging to Mobarakeh Steel Co. of Isfahan and also with the help of the powerful ABAQUS software. And after solving the heat transfer equations and applying the same realistic boundary conditions. The thermal contour and diagrams of roller average temperature has been plotted in normal conditions and by comparison with actual conditions, modeling accuracy has been investigated. In the next section, with the variations in the main rolling parameters such as rolling speed, coefficient of friction and reducing the thickness of the plate, the roller average temperature at various depths and the rolling forces are also considered. The reason of the increase or decrease of temperature in each section has been reviewed.

Key Words: Hot rolling, Heat transfer, Work Roll, Abaqus, Mobarakeh Steel Company (M.S.C)

مختلف خنک کاری با شرایط مختلف از قبیل ضخامت‌های مختلف و دماهای مختلف ورق بررسی گردید. در این مدل حرارتی، شرایط مرزی واقعی، تعداد نامحدود نازل خنک کننده در ورودی و خروجی، فاصله‌های مختلف نازل از غلتک نورد و انواع مختلف نازل‌های آب پاش در نظر گرفته شده است و با بررسی شرایط واقعی و مقایسه با داده‌های نرم افزار شریط بهینه خنک کاری بررسی شده است.

در این پروژه توزیع دما در غلتک‌های نورد بررسی شده و همچنین معادلات حاکم بر انتقال حرارت منتقله ورق و غلتک مورد توجه قرار می‌گیرد. شرایط مرزی حرارتی و مکانیکی در نورد گرم بیان می‌شود و با مدل سازی غلتک‌های نورد گرم با استفاده از نرم افزار قدرتمند ABAQUS اثر پارامترهای سرعت نورد، گپ بین غلتک‌ها و ضریب اصطکاک بر میزان انتقال حرارت بررسی و با نمونه‌های عملی مقایسه می‌گردد.

۲- معادلات انتقال حرارت برای غلتک [۶]

برای اینکه بتوان انتقال حرارت در غلتک کاری را محاسبه کرد می‌بایست معادله انرژی را با شرایط مرزی متفاوت حل کرد. شکل (۱) شرایط مرزی حاکم غلتک را نشان می‌دهد.

در مختصات استوانه ای با پارامترهای r, θ, t معادله انرژی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} + v_r \frac{\partial T_w}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T_w}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T_w}{\partial z} = \alpha_w \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_w}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_w}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} \right] + \frac{q'''}{\rho_w C_w} \quad (1)$$

با توجه به عدم حرکت غلتک در راستای شعاعی $v_r=0$ و با توجه به این که حرکت محوری غلتک هیچ تاثیری بر انتقال انرژی حرارتی ندارد از انتقال حرارت هدایتی در جهت مماس بر جهت $\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_w}{\partial \theta^2}$ چشم پوشی می‌شود که دلیل آن سرعت زیاد غلتک در چرخش می‌باشد. با توجه به اینکه غلتک دارای منبع تولید حرارت نمی‌باشد و غلتک بصورت الاستیک در نظر گرفته شده است، تولید حرارت در غلتک صورت نمی‌گیرد بنابراین پس از ساده سازی و تغییر متغیر $\xi = \theta - \omega t$ معادله انتقال حرارت به صورت زیر ساده سازی شده است:

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \alpha_w \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_w}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

تاریخ راستین نورد به مفهوم امروزی آن ولی در شکل‌های بسیار ساده و اندازه‌های کوچک به سده هفدهم بر می‌گردد. به این صورت که دو غلتک چدنی در یک چارچوب چوبی قرار داده می‌شد و فلزاتی چون قلع و سرب را نورد می‌کردند. نورد داغ به دو دلیل اصلی انجام می‌گیرد: اولاً کاهش ضخامت محصول و رسیدن به ضخامت مورد نظر و ثانیاً بدست آوردن ریز ساختار کنترل شده که خواص مکانیکی و متالورژیکی مورد نظر را شامل شود. [۱]

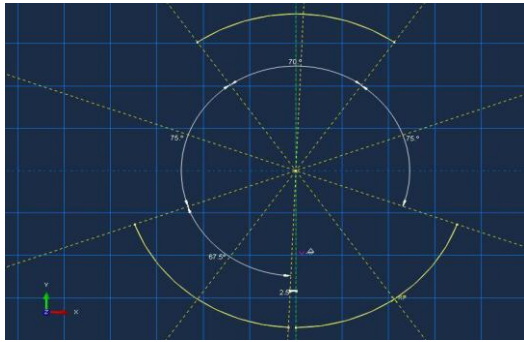
یونه یاما و همکاران [۲] در سال ۱۹۸۸ با استفاده از حسگرهای دمایی، تغییرات دمایی در سطح غلتک کاری و مرکز ورق‌های AA1050 را ثبت کردند و از ترکیب این نتایج با مدل حرارتی تفاضل محدود، ضریب انتقال حرارت در این نوع نورد را مورد بررسی و محاسبه قرار دادند آنها میانگین HTC را حدود $400 \frac{kw}{m^2/k}$ محاسبه نمودند که بیانگر عدم دقیق بودن HTC در محاسبات می‌باشد.

در سال ۲۰۰۷ مقاله‌ای توسط مارکادو و همکاران [۳] ارائه شده است که موضوع آن تولید یک دستگاه تست نورد ساده است که شامل یک دیسک باریک به جای غلتک کار و یک دیسک باریک دیگر که توسط یک گرم کن القایی مجهز شده بود به جای متریال اولیه می‌باشد.

لگران [۴] در سال ۲۰۱۲ با جاسازی دو نوع سنسوراز نوع حفره‌ای و شیاری در نزدیکی سطح غلتک و استفاده از یک مدل حرارتی به محاسبه ی ضریب انتقال حرارت غلتک و دمای سطح غلتک پرداخت و ضریب انتقال حرارت غلتک را $15-26 \frac{kw}{m^2/k}$ محاسبه نمود و میزان شار حرارتی سطح غلتک و نیز ضریب انتقال حرارت به ازای درصد کاهش در هر پاس را در شکل‌های زیر جمع بندی نموده است.

رافایل کولاس [۵] در سال ۱۹۹۵ انتقال حرارت در نورد گرم ورق را بررسی نموده است. پدیده‌هایی که در مقاله وی در نظر گرفته شده‌اند عبارتند از: اتلاف حرارت به علت تابش و همرفت به جو، اتلاف هدایت حرارتی به غلتک، اتلاف حرارت بدلیل استفاده از افشانک‌های خنک کننده، حرارت ادیاباتیکی که در حین تغییر شکل ایجاد می‌شود، هدایت حرارتی در حین ذخیره ورق و با بررسی این پارامترها دمای ورق را محاسبه نموده است.

در سال ۲۰۰۸ در دانشگاه صنعتی اصفهان آقایان صابونچی و عباس پور [۶] یک مدل سه بعدی از سیستم خنک کاری غلتک ارائه نمودند که در این مدل، موقعیت‌های



شکل (۲): زوایای مورد استفاده در شبیه سازی

در ناحیه تغییر شکل که مهمترین ناحیه در حین نورد می باشد موارد زیر قابل بررسی می باشد:

- حرارت منتقل شده در اثر تماس کامل ورق و غلتک
- حرارت منتقل شده به غلتک در اثر اصطلاک
- حرارت منتقل شده به غلتک در اثر تغییر شکل پلاستیک ورق

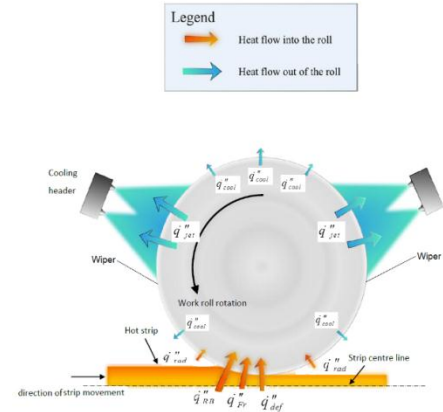
همان طور که قبلا نیز اشاره شد با توجه به درگیری ورق و غلتک معادلات دیفرانسیل مربوط به این نواحی و شرایط مرزی آنها به یکدیگر وابسته می باشند و این معادلات بایستی بصورت همزمان حل گردند. شرایط مرزی برای سایر قسمت های غلتک مطابق شکل (۱) اعمال گردیده است. مشخصات فیزیکی و مکانیکی غلتک و ورق مورد استفاده، در جداول (۱) و (۲) و شکل های (۳) و (۴) آورده شده است.

جدول (۱): خواص فیزیکی و مکانیکی مربوط به فولاد ST37

ظرفیت حرارتی (J/Kg.K)	ضریب انتقال حرارت (W/m.k)	ضریب حرارتی غیر الاستیک
459.2+0.224T	52.58-0.0253T	0.92

جدول (۲): خواص فیزیکی و مکانیکی غلتک های کروم بالا

خواص مکانیکی و حرارتی	واحد	چدن کرم بالا
استحکام کششی	N/mm ²	550-650
استحکام فشاری	N/mm ²	2000-2800
استحکام خمشی	N/mm ²	~1000
توان جذب انرژی	J/cm ²	5.5-7.5
مدول یانگ	N/mm ²	225
مدول برشی	N/mm ²	85
دانسیته	Kg/m ³	7500
ظرفیت حرارتی	J/Kg.°K	~500
ضریب نفوذ حرارتی	M ² /sec	4
ضریب انتقال حرارت	W/m.k	15-35
ضریب انبساط خطی	10 ⁻⁶ *K ⁻¹	~13.6



شکل (۱): شرایط مرزی انتقال حرارت در غلتک

در تحقیق حاضر جهت شبیه سازی فرآیند نورد گرم از شرایط واقعی منطبق با قفسه ۲ واحد finishing فولاد مبارکه اصفهان استفاده شده است و نتایج نرم افزاری با نتایج واقعی مورد بررسی قرار گرفته است.

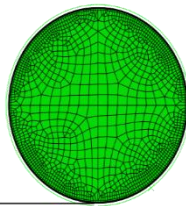
۳- هندسه مدل

تحلیل و شبیه سازی تنش های ایجاد شده در ورق و غلتک، نیروهای نورد در این نرم افزار قابل انجام می باشد. مهمترین خواسته ما در این تحلیل بررسی تنش های حرارتی وارده به غلتک در طول فرآیند نورد است که در نرم افزار Explicit Abaqus/ شبیه سازی و بررسی می گردد. کرنش ایجاد شده در ورق در راستای بعد عمود بر صفحه (محور ۳) در مقایسه با دو بعد دیگر بسیار ناچیز بوده بنابراین به خوبی و با دقت بالایی می توان هندسه مساله را بصورت دو بعدی صفحه-ای مدل کرد. با توجه به اینکه غلتک پشتیبان تاثیر کمی بر این شبیه سازی دارد و هدف ما بررسی تنش های حرارتی غلتک کاری می باشد، از تاثیر غلتک های پشتیبان صرف نظر گردیده است. با توجه به تقارن موجود برای مساله نورد، تنها غلتک بالایی و نصف ضخامت ورق شبیه سازی شده است.

با توجه به اینکه تغییر شکل در راستای سوم (عمود بر صفحه) در مقایسه با دو راستای دیگر بسیار ناچیز است و در ضمن مساله دینامیکی همراه با انتقال حرارت است از تحلیلگر coupled temperatu و خانواده حل Abaqus/Explicit displacement استفاده شد. و نوع هندسه حل خطی در نظر گرفته شد. در نهایت از امانهای پیوسته مربعی چهار گره ای کرنش صفحه ای دارای درجه آزادی حرارتی (CPE4RT) استفاده گردید. در این قسمت به شبیه سازی نورد دوبعدی که در حین فرآیند خنک سازی صورت می گیرد پرداخته شده است.

Tot. no. Elements	RF	RM	Pee q
1629	5.20E+06	2.65E+05	1.89
1949	4.50E+06	1.65E+05	1.77
5348	3.80E+06	1.55E+05	1.16
12464	3.84E+06	1.50E+05	0.95
13359	3.69E+06	1.58E+05	0.96

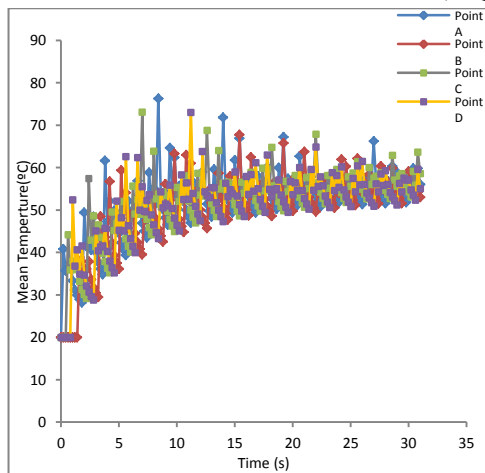
جدول (۳): بررسی تعداد المان و مقادیر نیرو و گشتاور تکیه گاهی و کرنش پلاستیک معادل غلتک



شکل (۵): مش بندی نهایی ورق و غلتک

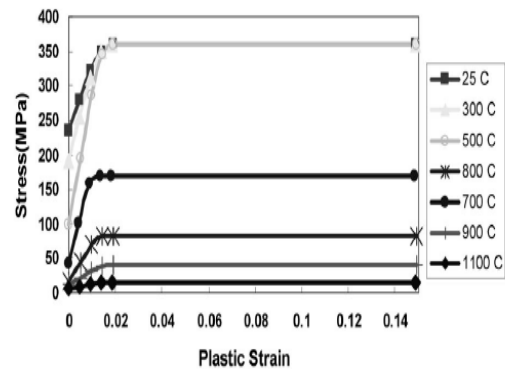
۴- نتایج و بحث

برای ادامه شبیه سازی و تغییر پارامترها بایستی به این نکته توجه کرد که مدلسازی اولیه بایستی دارای خروجی‌های شبیه به شرایط عملی داشته باشد. در شکل (۶) اولین داده‌های خروجی نرم افزار مشخص گردیده است.

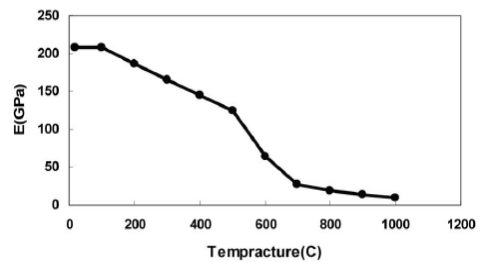


شکل (۶): نمودار تغییرات میانگین دمای تعادل در غلتک

همانطوری که بیان گردید میانگین دمای تعادل غلتک ۵۷ درجه سانتیگراد شد که با توجه به دمای اندازه‌گیری شده در سایت فولاد مبارکه که حدود ۶۰ درجه سانتیگراد می‌باشد، دارای درصد خطای ۵ درصد می‌باشد که بنظر معقول بنظر می‌رسد. طبق محاسباتی که در پروژه آقای صابونچی و هم-کاران گردیده است نیز دلیل به درستی مدلسازی توسط این نرم افزار می‌باشد که در شکل (۷) به وضوح دیده می‌شود اختلاف شدید بین دمای غلتک و سطح ورق مهم‌ترین عامل



شکل (۳): نمودار تنش-کرنش پلاستیک فولاد ST37 در دماهای مختلف



شکل (۴): تغییر مدول الاستیسیته فولاد ST37 در دماهای مختلف

گرمای ایجاد شده توسط اصطکاک بین تختال و غلتک تقسیم میشوند. با توجه به دمای بسیار پایین تر غلتک نسبت به ورق، ظرفیت پذیرش حرارت ناشی از اصطکاک به روش هدایتی در غلتک بیشتر از ورق می‌باشد. برخی از محققین این تقسیم بندی را به صورت زیر پیشنهاد می‌کنند:

$$q_f(plate) = \frac{1}{3} v_r \mu p a$$

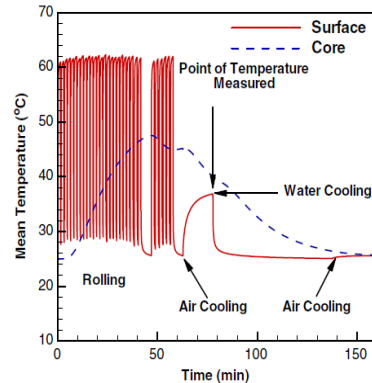
$$q_f(roll) = \frac{2}{3} v_r \mu p a \quad (۳)$$

همچنین با قرار دادن ضریب یک، کل انرژی تولید شده از اصطکاک به گرما تبدیل شده و ۳۳٪ آن به سطح Slave منتقل می‌گردد. لازم به ذکر است در قرار دادن ضریب اصطکاک در رفتار مماسی باید با توجه به معادله داده شده و قرار دادن این خواص به صورت نقطه به نقطه بر حسب دما صورت گیرد.

$$\mu = 4 \cdot 86 \times 10^{-4} \times T_{strip} - 0.0714 \quad (۴)$$

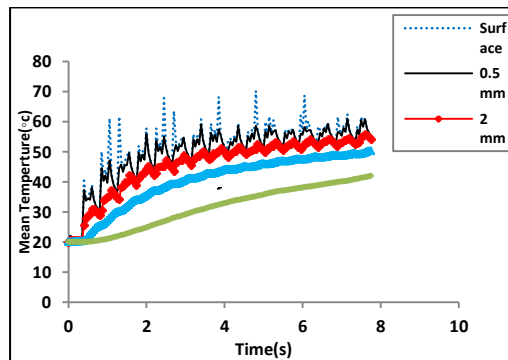
پس از اعمال شرایط مرزی همگرایی مش بندی مورد بررسی قرار گرفته است. نمودار همگرایی برای ۵ اندازه المان مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر نیرو و گشتاور تکیه گاهی غلتک و همچنین کرنش پلاستیک معادل به عنوان معیارهای همگرایی انتخاب شدند.

انتقال حرارتی از ورق به سمت غلتک می‌باشد. در حین نورد بعلت اینکه فشار زیادی از طرف غلتک به سمت ورق وارد می‌شود ضریب انتقال



شکل (۷): محاسبه میانگین دمای تعادل توسط دکتر صابونچی و همکاران

حرارت بین سطوح گرم و سرد زیاد می‌باشد و همین موضوع باعث ایجاد فلاکس حرارتی شدید در سطوح تماس می‌گردد. به‌رحال سه عامل گرمای تولیدی در اثر تغییر شکل، گرمای انتقال یافته از ورق به غلتک و اصطکاک بین سطوح درگیر، تعیین‌کننده دمای نهایی غلتک می‌باشند. همانطور که از شکل (۶) مشخص می‌باشد. دمای نقاط در عمق غلتک با شیب ملایم‌تری افزایش می‌یابد. ولی نکته‌ای که در مورد همه نقاط صدق می‌کند این است که در همه نقاط با افزایش تعداد دور، دما افزایش می‌یابد و با گذشت زمان به سمت یک دمای مشخص میل می‌کند. در واقع این دمای مشخص تعامل بین گرمای انتقال یافته از ورق به غلتک در اثر اصطکاک، تغییر شکل و جابجایی و همچنین گرمای هدر رفته از غلتک در اثر خنک کاری توسط نازل‌های آبپاشی، وجود لایه‌های آب بر روی غلتک و حتی تشعشعی که غلتک در این دمای پایین دارد را بیان می‌کند. دمای میانگین غلتک در عمق‌های مختلف در شکل (۸) نمایش داده شده است:



شکل (۸): تغییرات دمای غلتک در عمق‌های مختلف

۵- تأثیر پارامترهای نورد بر دمای غلتک

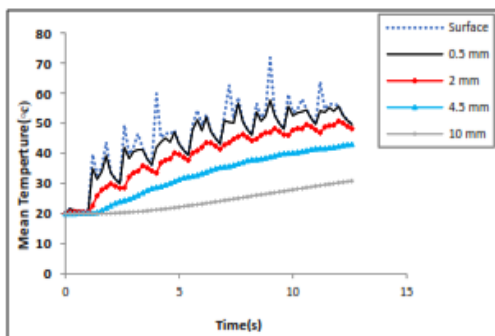
حرارت انتقال یافته به غلتک از این جهت مهم می‌باشد که

علاوه بر هزینه بر بودن ساخت غلتک و همچنین تراش غلتک که تا مقاطعی خاص می‌تواند ادامه یابد، بر ادامه روند نورد تأثیر گذار است و کیفیت ورق خروجی را تحت‌الشعاع خود قرار دهد. عوامل بسیار زیادی در این حرارت انتقال یافته نقش اساسی دارند ولی سه عامل سرعت چرخش غلتک، ضریب اصطکاک بین غلتک و ورق و میزان کاهش ضخامت ورق در این پروژه بررسی گردیده‌اند.

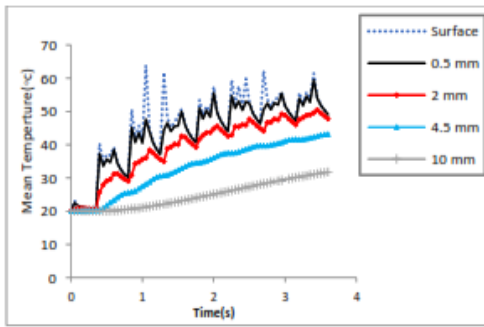
۱-۵- تأثیر سرعت چرخش غلتک بر روی توزیع و میزان

حرارت منتقله

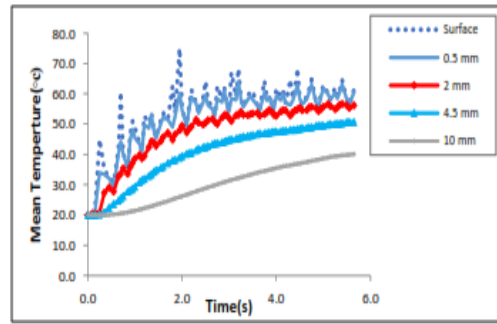
یکی از مهمترین پارامترهای قابل بررسی سرعت چرخش غلتک می‌باشد که مستقیماً بر روی نرخ کرنش، تنش سیلان، نیروی نورد، گرمای تغییر شکل و انتقال گرما تأثیرگذار است. در این پروژه با افزایش سرعت به نسبت‌های ۳۰٪ و ۵۰٪ و ۱۰۰٪ سرعت اولیه، به بررسی دمای تعادل نهایی و همچنین زمان رسیدن به این دما پرداخته شده است. با افزایش سرعت نورد، توزیع سرعت کرنش در ناحیه تغییر فرم افزایش یافته و افزایش نرخ کرنش سبب افزایش تنش سیلان می‌شود. افزایش تنش سیلان باعث می‌شود که نیروهای مقابله‌کننده با تغییر شکل افزایش یابند و به اصطلاح جریان ماده سخت تر می‌شود. بنابراین غلتک بایستی نیروی بیشتری جهت تغییر شکل به فلز وارد کند. افزایش نیروی غلتک‌ها سبب می‌شود دمای بیشتری به غلتک منتقل شود و موجب افزایش دمای غلتک گردد. ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که کرنش نشان‌دهنده میزان تغییر شکل ماده می‌باشد و از آنجایی که با تغییر سرعت در نورد، مقدار ماده تغییر شکل یافته تغییری نمی‌کند بنابراین کرنش به سرعت غلتک بستگی ندارد. از آنجایی که نرخ کرنش میزان تغییر شکل ماده بر واحد زمان است و کرنش مستقل از سرعت غلتک است بنابراین با تغییر در سرعت غلتک زمان کل فرآیند تغییر می‌یابد و نرخ کرنش دچار تغییر می‌شود. که در شکل (۱۰) تغییرات نیرو و بازای تغییر در سرعت نورد محاسبه گردیده است.



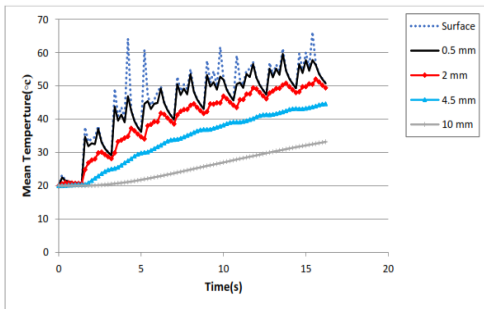
الف



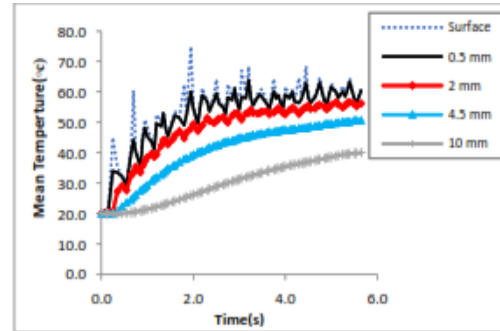
(الف)



(ب)

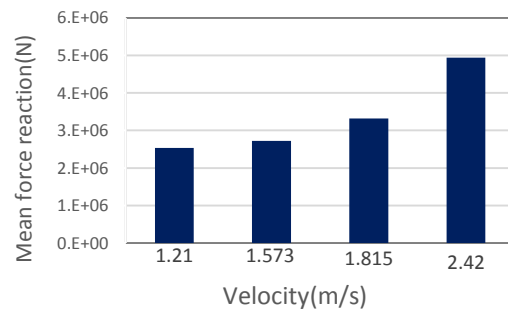


(پ)



(ج)

شکل (۹): تغییرات دمای میانگین غلتک بازای افزایش سرعت چرخش غلتک (الف) ۳۰ درصد (ب) ۵۰ درصد (ج) ۱۰۰ درصد سرعت اولیه

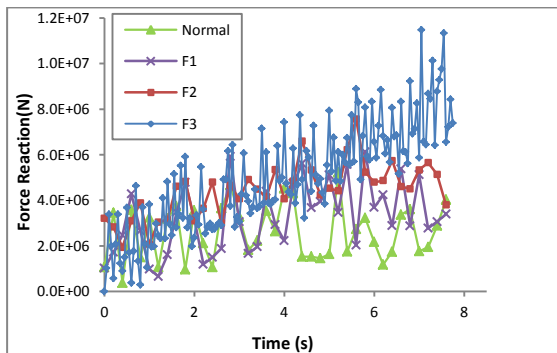


شکل (۱۰) تغییرات نیروی نورد به ازای تغییرات در سرعت نورد

۲-۵- ضریب اصطکاک

درک کلی از پارامترهایی که باعث ایجاد اصطکاک و ضریب اصطکاک می‌شوند هنوز هم نیاز به مطالعات بیشتر در آینده دارد. یکی از اصول نورد، وجود اصطکاک بین غلتک و ورق است. در حقیقت پارامترهای فرآیند نورد ورق مانند کاهش ضخامت، سرعت نورد، دمای نورد، زبری سطح و پوسته کردن سطح بر شرایط سطحی در منطقه درگیر ورق و غلتک تأثیر می‌گذارند و باعث ایجاد اصطکاک و ضریب اصطکاک می‌شوند.

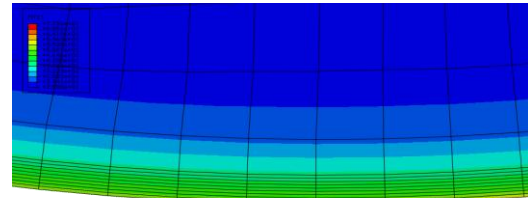
شکل (۱۱) تغییرات دمای میانگین غلتک بازای افزایش ضریب اصطکاک غلتک (الف) ۳۰ درصد (ب) ۵۰ درصد (ج) ۱۰۰ درصد مقدار اولیه



شکل (۱۲): تغییرات در نیروهای عکس العمل غلتک بازای زمان و تغییر در ضریب اصطکاک بصورت افزایش ۳۰٪ و ۵۰٪ و ۱۰۰٪ میزان اولیه ۳-۳- میزان کاهش ضخامت

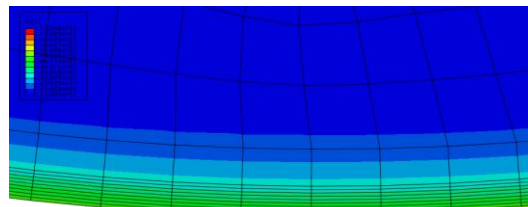
برای بررسی اثر ضخامت بر میانگین دمای غلتک، کانتور حرارتی مربوط به غلتک در شکل (۱۳) نشان داده شده است و بیانگر این موضوع است که میانگین دمای غلتک و ورق با افزایش میزان کاهش ضخامت افزایش یافته است با افزایش

درصد کاهش ضخامت نرخ کرنش افزایش می‌یابد و با افزایش میزان نرخ کرنش، نرخ تولید حرارت تغییر شکل بیشتر می‌شود و افزایش دمای ورق را به دنبال دارد. دو عامل مهم در توزیع حرارت نورد داغ نقش اساسی دارند یکی نرخ انتقال گرما و دیگری نرخ تولید گرمای تغییر شکل که در کل فرآیند با هم در رقابت هستند.



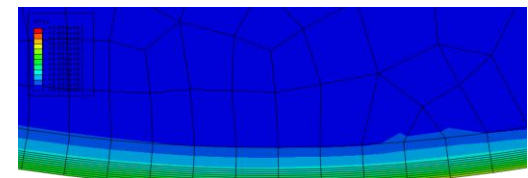
OCB: 06-P93-60m-11.sdb Abaqus/Explicit 6.14-1 Thu Jan 31 15:17:35 Std Standard Time 2017
Step: Step-1
Increment: 192712 Step Time = 6.200
Displacement: 1071.1
Deformed Via: U Deformation Scale Factor = 1.000e+00

(الف)



OCB: 12-P93-70m.sdb Abaqus/Explicit 6.14-1 Fri Jan 27 17:09:11 Std Standard Time 2017
Step: Step-1
Increment: 372470 Step Time = 7.450
Displacement: 1071.1
Deformed Via: U Deformation Scale Factor = 1.000e+00

(ب)



OCB: 09-P93-60m-03.sdb Abaqus/Explicit 6.14-1 Thu Feb 14 16:49:35 Std Standard Time 2017
Step: Step-1
Increment: 788500 Step Time = 6.600
Displacement: 1071.1
Deformed Via: U Deformation Scale Factor = 1.000e+00

(ج)

شکل (۱۳): کانتور حرارتی غلتک بازای تغییر در درصد کاهش ضخامت (الف) درصد کاهش ۲۰٪ (ب) درصد کاهش ۳۰٪ (ج) درصد کاهش ۵۰٪

افزایش دمای ورق نشان‌دهنده پیشی گرفتن نرخ تولید گرما، از نرخ انتقال گرما بوده و بالعکس در غلتک افزایش دما نشان‌دهنده پیشی گرفتن نرخ انتقال گرما از نرخ تولید گرما، می‌باشد. با افزایش درصد کاهش ضخامت و بالطبع آن افزایش مقدار نیروی اعمالی از طرف غلتک‌ها به ورق، میزان حرارت بین سطوح ورق و غلتک افزایش می‌یابد بنابراین حرارت بیشتری به غلتک وارد می‌شود. با توجه به سه عامل افزایش نیروی اعمالی به غلتک، افزایش زمان تماس ورق و غلتک و همچنین افزایش گرمای تولیدی در اثر تغییر فرم، دو عامل

اول موجب افت بیشتر دمای ورق و بالطبع افزایش دمای غلتک می‌گردند و عامل سوم نیز افزایش دمای ورق را در مرکز آن به دنبال دارد که تأثیر بسیار کمی در افزایش دمای غلتک دارد بنابراین دمای غلتک در مجموع افزایش می‌یابد.

۶- نتیجه گیری

عوامل زیادی بر کیفیت و قیمت تمام شده ورق تولیدی تأثیرگذار است یکی از این عوامل کیفیت غلتک مورد استفاده در حین عملیات نورد می‌باشد که حرارت منتقل شده به غلتک نه تنها در عمر مفید غلتک موثر است بلکه در شکل و کیفیت محصول نهایی نیز تأثیر بسزایی دارد. در این پروژه تأثیر سه پارامتر مهم در نورد مورد بررسی قرار گرفته است.

یکی از مهمترین عوامل در حین نورد سرعت نورد می‌باشد. در این پروژه با افزایش مقادیر سرعت به میزان ۳۰٪ و ۵۰٪ و ۱۰۰٪ سرعت اولیه، مشخص گردید که حرارت منتقل شده به غلتک افزایش چشم‌گیری داشته و افزایش ۲۰ درجه‌ای در میانگین دمای غلتک قابل مشاهده است. و نیروهای عکس العمل غلتک نیز در حالت دو بر ابر شدن سرعت، افزایش دو برابری داشت هر چند رابطه خطی این افزایش، مورد تأیید نیست. افزایش دمای غلتک، سبب ایجاد تنش‌های حرارتی و شوک‌های حرارتی در اثر خنک کاری می‌گردد و افزایش نیرو در تکیه گاه‌های غلتک، که قطری کمتر از قسمت بشک‌های غلتک دارد شکست در غلتک را در پی خواهد داشت که بایستی با انتخاب مقادیر بهینه این مشکل را به حداقل رسانید. ضریب اصطکاک یکی دیگر از پارامترهای مورد مطالعه در این پروژه می‌باشد. همانطور که از جداول و کانتورهای حرارتی در فصل قبل مشخص است افزایش در ضریب اصطکاک، نسبت به سرعت نورد تأثیر کمتری داشته و افزایش نهایتاً ۵ الی ۸ درجه‌ای در دمای میانگین غلتک مشاهده گردید اما تأثیر آن بر نیروی نورد، بارز و غیرقابل چشم‌پوشی است. همانطوری که از قسمت قبل مشخص است نیروی عکس العمل غلتک در طی افزایش دوبرابری ضریب اصطکاک افزایش چشم‌گیری داشته بنابراین بایستی اصطکاک در طی فرآیند نورد، به کمترین میزان خود رسانده شود. در برخی از پروژه‌ها پیشنهاداتی در خصوص استفاده از روانسازهای صنعتی ارابه گردیده است که سبب کاهش ضریب اصطکاک و بالطبع کاهش نیروی نورد در حین عملیات شکل دهی محصولات نوردی می‌گردد اما چیزی که مبرهن است انجام فرآیند نورد وابسته به وجود اصطکاک است و اصولاً "بدون اصطکاک، انجام فرآیند نورد غیرممکن است. بنابراین انتخاب ضریب اصطکاک بهینه بسیار مهم و ضروری است.

بررسی ضریب کاهش ضخامت بر حرارت انتقال یافته و تاثیر آن بر دمای میانگین غلتک در عمق‌های مختلف، سومین پارامتری بود که بررسی گردید. افزایش در ضریب کاهش ضخامت دو اثر در حین نورد ایجاد می‌کند:

۱- با افزایش در ضریب کاهش، زمان تماس بین ورق و غلتک و همچنین سطح درگیر ورق و غلتک افزایش میابد که دلیل آن افزایش نرخ کرنش می‌باشد. افزایش سطح و زمان درگیری باعث انتقال حرارت بیشتر در سطح مشترک ورق و غلتک می‌گردد و با توجه به دمای پایین تر غلتک، این انتقال حرارت از ورق به غلتک صورت گرفته و دمای غلتک افزایش میابد.

۲- افزایش در ضریب کاهش ضخامت، باعث افزایش کار مکانیکی می‌شود. بنابراین حرارت تولیدی در ورق افزایش میابد و همانطور که بیان شد این حرارت در لایه‌های مرکزی ورق مشهودتر است و با انتقال این حرارت به لایه‌های بالا و سطح مشترک ورق و غلتک، افزایش دمای غلتک را خواهیم داشت.

مراجع:

[۱] کوه بر، بهراد؛ پیش بینی میدان کرنش در ورق و غلتک در فرایند نورد سرد فولاد کم کربن، پایان نامه کارشناسی ارشد مواد، دانشکده مهندسی متالوژی، دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۸۹)

[۲] سراج زاده، سیامک؛ تعیین توزیع دما در منطقه تغییر فرم در نورد داغ میلگرد، پایان نامه کارشناسی ارشد مواد، دانشکده مهندسی متالوژی، دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۷۵)

[3] Yoneyama T., Hatamura Y., Measurement of Actual Stress and Temperature on a Roll Surface during Rolling. JSME Int. J. 31, 1988, pp. 465-469.

[4] R. D. Mercado-Solis, J. Talamantes-Silva, J. H. Beynon, M. A. L. Hernandez-Rodriguez, Modelling surface thermal damage to hot mill rolls, Wear 263 (2007) 1560-1567

[5] N. Legrand, N. Labbe, D. Weisz-Patrault, "Analysis of roll gap heat transfers in hot steel strip rolling through roll temperature sensors and heat transfer models. IntKey Engineering Materials 504-506 (2012) 1043-1048

[6] R. Colas, Modelling heat transfer during hot rolling of steel strip, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering 3 (1995), pp. 437-453.

[7] M. Abbaspour, A. Saboonchi, Work roll thermal expansion control in hot strip mill, Applied Mathematical Modeling 32 (2008) 2652-2669