

تحلیل و بررسی میزان انحنای خروجی ورق در فرآیند نورد سرد ورقهای دو لایه آلومینیوم - فولاد

محمد تمیزی فر^۱، نصرت ا... صلح جویی^۲، مهران مرادی^۳

چکیده

نورد ورقهای دو لایه در زمره فرآیندهای نورد نامتقارن طبقه‌بندی می‌گردد. از جمله عوامل موثر در این فرآیند را می‌توان نسبت سرعت‌های دورانی، ضرایب اصطکاک و نسبت تنش‌های سیلان دو لایه نام برد. با افزایش نسبت سرعت دو غلتک، نیروی نورد کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند. بدلیل عدم برابری خواص مکانیکی ماده در راستای ضخامت ورق، توزیع کرنش پلاستیک نیز یکنواخت نبوده و رفتار ماده بصورت کرنش صفحه‌ای می‌باشد. از اینرو انتظار می‌رود با توجه به اینکه سیلان پلاستیک فلز ضعیف‌تر (فلز با استحکام کمتر) بیشتر از فلز قوی‌تر است، ورق به سمت ماده با تنش تسلیم بزرگتر (فلز با استحکام بیشتر) انحراف پیدا کند. با کنترل نسبت سرعت‌های دورانی و ضرایب اصطکاک می‌توان تا حدودی انحنای ورق را در خروجی تنظیم و کنترل نمود. مهمترین عواملی که در ایجاد انحنای در نسبت تنش‌های تسلیم پایین اثر دارد را می‌توان به کرنش‌های برشی در محل اتصال ورقها و همچنین کرنش‌های محوری دانست.

کلمات کلیدی: تنش سیلان - ورقهای دو لایه - انحنای

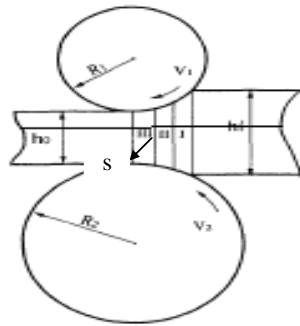
فهرست علائم

mpa	تنش تسلیم ورق آلومینیومی و فولادی (مگا پاسکال)	y_2, y_1
(m)	نقطه خنثی ورق زیرین و بالایی (متر)	x_1, x_2
(m/s)	سرعت خطی غلتک بالایی و پایینی (متر بر ثانیه)	v_2, v_1
(m)	ضخامت ورق بالایی و پایینی (متر)	t_2, t_1
(tan)	بار اعمالی (تن)	F
(m)	قطر غلتک‌های بالایی و پایینی (متر)	D_2, D_1
(mpa)	تنش برشی (مگا پاسکال)	τ
	ضریب اصطکاک بین غلتک بالایی و ورق آلومینیوم و ضریب اصطکاک ما بین غلتک زیرین و ورق فولادی	μ_2, μ_1
(mm)	ضخامت ورق در خروج و ورود	h_i, h_o
(pa)	فشار تماسی (پاسکال)	p
(m)	شعاع متوسط غلتک‌ها (متر)	R_m
	درصد کاهش ضخامت ورق	R

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (ساخت و تولید): mtf92@yahoo.com

۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۳- استادیار دانشگاه صنعتی اصفهان



شکل (۲): شماتیک مدل ریاضی

۲- فرآیند نورد سرد

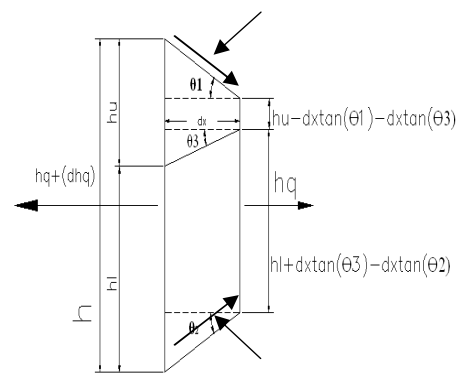
تختال‌ها پس از انجام عملیات نورد گرم، به ورق‌هایی تا ضخامت ۶ میلیمتر تبدیل می‌شوند. در ادامه جهت بدست آوردن ضخامت دلخواه همراه با کیفیت مطلوب، ورق‌ها را از میان غلتک‌ها عبور می‌دهند تا شکل و فرم غلتک‌ها را به خود بگیرند. بدلیل آنکه این فرآیند در زیر دمای تبلور مجدد انجام می‌پذیرد به آن نورد سرد گویند. این پروسه شکل‌گیری، بدلیل عدم برابری قطر غلتک‌ها و سرعت زاویه‌ای و همچنین ضرایب اصطکاک، به آن نورد نامتقارن نیز گفته می‌شود. از جمله مزایای این روش می‌توان به کاهش تناژ نورد، فشار وارده به غلتک‌ها و از همه مهمتر اقتصادی بودن آن اشاره نمود. نورد سرد ورق‌های دو لایه، دارای معایبی همچون انحنای ورق در خروج می‌باشد که این مورد نیز می‌تواند به عنوان نقطه قوت این روش در تولید ورق‌های دیواره‌های مخازن اشاره نمود.

۳- مدل ریاضی فرآیند

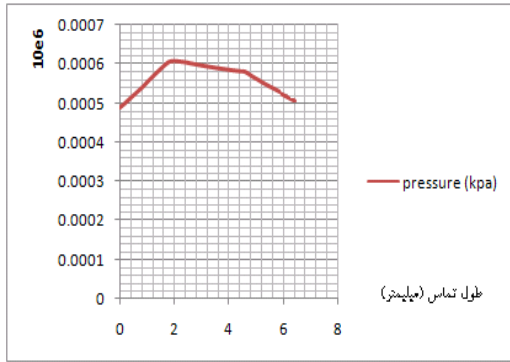
جهت بدست آوردن معادلات تعادل، با تقسیم‌بندی فواصل ورود و خروج ورق به فضای میان غلتک‌ها به سه منطقه، لازم است آثار بارگذاری به سطح عدم تقارن در پروسه، مشخص گردد. با توجه به اینکه سرعت خطی ورق بالایی در تماس با غلتک کوچکتر، کمتر از سرعت خطی ورق زیرین می‌باشد، انتظار می‌رود که دو نقطه خنثی به وجود آید. از این رو جهت به دست آوردن سطح زیر پروفیل فشار، نیاز به محاسبه این نقاط خنثی می‌باشد (نقطه خنثی مکانی است که سرعت خطی ورق و غلتک در آن نقطه برابر می‌شود). فرض می‌گردد ورق در هنگام ورود به فضای میان غلتک‌ها هیچ نوع محدودیت حرکتی ندارد و آزادانه وارد می‌شود. طول تماس متوسط L_p و روابط تعادلی و

۱- مقدمه

در طی چند دهه اخیر نورد ورق‌های چند لایه، بدلیل استفاده از خواص مکانیکی توامان هر یک از لایه‌ها و دستیابی به ضخامت‌های مورد نظر، مورد استقبال فراوانی قرار گرفته است. ساکز و کلینگر [۱] جزو اولین محققینی بودند که بر روی فرآیند نورد نامتقارن کار نمودند. ناکامورا و ماتسودا [۲] به بررسی آزمایشگاهی اثرات نورد بر روی انحنای ورق‌های آلومینیوم فولاد پرداختند. هوانگ و همکاران [۳] اولین بار از روش تحلیل قاجی جهت بدست آوردن تغییرات نیرو و گشتاور استفاده نمودند. ساسانی و همکاران [۴] نیز از روش قاجی تراز اصلاح شده جهت یافتن پارامترهای اصلی نورد نامتقارن برای یک ورق استفاده نمودند. تزو [۵] در تحقیق خود روش قاجی را با فرض اینکه ورق‌ها از قبل به هم پیوند نخورده‌اند بکار برد. گودور و همکاران [۶] بر اساس تحلیل سلیمی و همکاران [۷] نسبت به تخمین ضریب اصطکاک بر اساس تخت شدگی غلتک‌ها پرداختند. این مقاله با استفاده از روش تحلیل قاجی نسبت به پیدا کردن تناژ نورد و سپس مدل سازی فرآیند نورد آلیاژهای آلومینیوم فولاد که تا کنون انجام نشده است و مقایسه نتایج، با آزمایشات تجربی می‌پردازد. از دلایل استفاده از آلیاژهای فوق، خاصیت ضد جرقه بودن، مقاومت در برابر خوردگی، همراه با استحکام لایه فولادی است.



شکل (۱): المانی از ماده



نمودار (۱): پروفیل فشار بدست آمده از تحلیل Matlab

۴- شبیه سازی المان محدود

جهت بررسی اثر پارامترهای مختلف نورد بر روی انحنا، نیروی نورد و غیره از نرم افزار تجاری Abaqus6.9/Explicit با در نظر گرفتن صلبیت غلتکها (Rigid) و مش بندی ورق های دولایه از نوع CPE4R، همچنین چینش المانها از نوع Structured (منظم) استفاده شده است. غلتکها با توجه به ماهیت ترسیم (Analytical Rigid)، نیازی به مش بندی ندارند.

فرضیات مساله جهت شبیه سازی عبارتند از:

- الف: فرآیند مذکور به شکل ایزوتروپیک می باشد
- ب: مدل اصطکاکی از قانون کلمب پیروی می کند.
- ج: غلتکها بصورت صلب در نظر گرفته شده اند.
- د: ورقها قبل از رسیدن به فضای میان دو غلتک، به هم چسبیده اند.

پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی فرآیند نورد ورق های مذکور، در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴): نسبت پارامترهای اعمال شده در شبیه سازی

ویژگیها	D_1/D_2	V_1/V_2	μ_1/μ_2	t_1/t_2	Reduction %
اندازه	۰/۶۶	۱/۱۲۵	۱/۲	۰/۵	۳۰

۴-۱- اثر نسبت ضریب اصطکاک بر روی انحنا

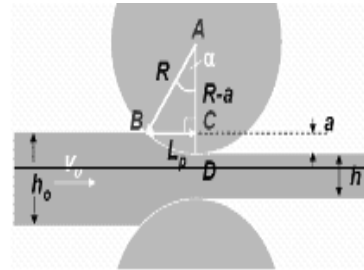
با تغییر در نسبت ضرایب اصطکاک با اعمال نسبت $\frac{\omega_1}{\omega_2} = 1$ و

نسبت تنش تسلیم $\frac{y_{up}}{y_1} = 5$ انحنا ی ورق را می توان به حد

همچنین ارتباط نقاط خشتی با یکدیگر در روابط زیر آورده شده است.

$$L_p = \sqrt{R_m \Delta h} \quad (1)$$

$$R_m = \frac{2R_1 * R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$



شکل (۴): طول تماس ورق با غلتک

با اعمال شرط تعادل در نقطه S (شکل ۲) و استفاده از شرایط مرزی در ناحیه II (cross shear) و معیار تنش فون میسز رابطه زیر حاصل می شود.

$$h \frac{dq}{dx} + (p + q) \frac{dh}{dx} = \tau_1 \frac{x^2}{R_1^2} + \tau_2 \frac{x^2}{R_2^2} + \tau_c \quad (3)$$

با توجه به برابری حجم در ناحیه ورود و خروج ورق به فضای میان غلتکها، می توان نقاط خشتی را به دست آورد.

$$(V_u \cos \theta \cos \theta_u = (V_l \cos \theta_l) h_l) \quad (4)$$

$$R_A = \frac{1}{R_m} - \frac{h_0}{2R_m^2} \quad (5)$$

$$X_{nu}^2 = V_\psi x_{n1}^2 + (V_\psi - 1) \frac{h_0}{R_A} + \quad (6)$$

$$\frac{1}{2R_m^2 R_A} (X_{nu}^4 - V_\psi x_{n1}^4)$$

در این رابطه $V_\psi = \frac{V_l}{V_u}$ می باشد.

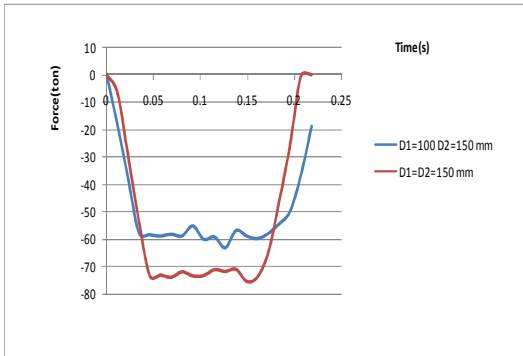
با انتگرال گیری از فشارهای وارده به غلتکها بر واحد طول در سه منطقه، نیروی لازم برای انجام عملیات نورد به دست می آید. نمودار (۱) مجموع این فشارها را نشان می دهد.

$$P = \left(\int_0^{x_1} p_m + \int_{x_1}^{x_2} p_{II} + \int_{x_2}^{l_p} p_I \right) dx \quad (7)$$

۳-۴- اثر تغییر Reduction بر روی تناژ نورد

با افزایش Reduction مقادیر تناژ، گشتاور و فشار متوسط افزایش می‌یابد. نمودار (۳-۴) نشان می‌دهد که با افزایش میزان کاهش ضخامت ورق خروجی در صورت برابری تمامی پارامترها، تناژ نورد بالا می‌رود.

۴-۴- اثر برابری قطر غلتک‌ها

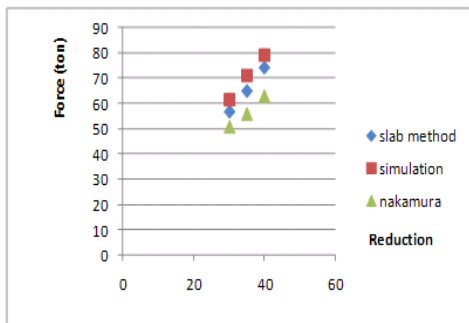


نمودار (۴-۴): اثر عدم تقارن پارامترهای نورد

با کاهش نسبت قطرهای غلتک‌ها، فاصله میان قله‌های فشار متناظر غلتک‌ها نیز کاهش پیدا می‌کند. علت این امر را می‌توان چنین بیان کرد که با کاهش قطر یکی از غلتک‌ها، نیروی عمودی از طرف آن غلتک در طول کمتری توزیع می‌شود که نتیجه آن افزایش اختلاف فشار می‌باشد. افزایش نسبت قطر غلتک‌ها باعث افزایش نیروی نورد می‌گردد (نمودار ۴-۴).

۵- مقایسه نتایج

با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل ریاضی و مقایسه آن با نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشات تجربی، در اکثر موارد میزان درصد خطا کمتر از ۵ درصد می‌باشد (نمودار ۵-۱).



نمودار (۵-۱): مقایسه نتایج

صفر رسانند. در (نمودار ۴-۱) انحنای ورق با نسبت قطر غلتک‌های ۱/۵ نشان داده شده است.

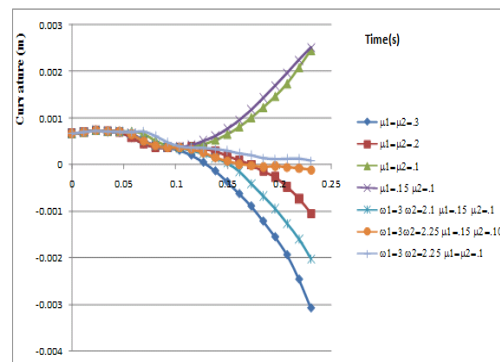


نمودار (۴-۱): میزان انحنای ورق با تغییر در نسبت ضرایب اصطکاک

نمودار (۴-۱) نشان می‌دهد که با افزایش نسبت ضرایب اصطکاک دو ورق از میزان خیز ورق کاسته می‌شود ولی با توجه به در نظر گرفتن اصطکاک کلمب، تغییر ضرایب اصطکاک، تاثیر چندانی در بهبود انحنای ورق ندارد.

۲-۴- بررسی نسبت تنش تسلیم، بر روی میزان انحنای خروجی ورق‌های دو لایه

نسبت تنش‌های تسلیم، مهمترین عامل اثرگذار بر روی کیفیت سطح و بالطبع بر روی خیز ورق می‌باشد. آلیاژهای مورد استفاده در این تحقیق A13003 و فولاد کم کربن می‌باشد. نمودار (۲-۴) نشان می‌دهد که با نسبت تنش تسلیم ۰/۵ در نورد آلیاژهای مذکور با تغییر در سرعت دورانی و یا ضرایب اصطکاک نمی‌توان از خیز ورق کاست. با افزایش مقدار نسبت تنش تسلیم دو لایه ورق، میزان انحنای ورق در محدوده اصطکاک کلمب، به سمت صفر تمایل دارد.



نمودار (۲-۴): انحنای ورق‌های دو لایه با تغییر در نسبت تنش تسلیم

۱-۵- نتیجه‌گیری

مدل اصطکاکی و نسبت قطر غلتک‌ها، برابر ۱/۱۲۵ بدست می‌آید. استفاده از نسبت تنش تسلیم پایین، با تغییر در نسبت سرعت‌ها و ضرایب اصطکاک، تاثیر زیادی در بهبود انحنای ورق ندارد. افزایش نسبت شعاع غلتک‌ها، باعث افزایش فواصل نقاط خشی از ورود و خروج غلتک‌ها می‌گردند. در صورتی که میزان خیز ورق‌ها زیاد مطرح باشد، با کاهش نسبت سرعت‌های خطی غلتک‌ها می‌توان آن را بهبود بخشید.

با توجه به شبیه سازی انجام شده می‌توان بیان نمود با افزایش لایه سخت‌تر، میزان انحنای در خروج افزایش می‌یابد. اما با افزایش ضخامت ورق در ورود به فضای میان غلتک‌ها نسبت به حالت مشابه، انحنای ورق کاهش می‌یابد. همچنین با بالا بردن ضخامت لایه بالایی نسبت به ضخامت کل، انحنای ورق افزایش می‌یابد. با توجه به کمترین مقدار انحنای بدست آمده در این تحلیل، مناسب‌ترین نسبت سرعت با توجه به در نظر گرفتن

مراجع:

- 1- Sachs G.,Klinger L.j., "The flow of metals through tools of circular contour", Trans.ASME, j.Appl. Mech, 69, pp.88-98, 1947.
- 2- Nakamura, m.,Maki, S., Matsuda, T., and Nagai,N., "Influence of Rolling condition on bond strength in cladding of steel sheet with Aluminium", J. jpn. soc.Technol. Plasticity, Vol. 30, pp. 71-76, 1989.
- 3- Hwang, Y.M., and Kiuchi, M., "Analysis of Asymmetric Clad Sheet Rolling by Stream Function Method", Int. J. Mech. Sci.,Vol. 38, pp.443-460, 1996.
- 4- Salimi, M.,and Sassani, F., "Modified Slab Analysis of Asymmetrical Plate Rolling", Int. J. Mech. Sci., Vol. 44, pp.1998-2023, 2002.
- 5- Tzou,M.N ,S.C. Pan, G.-Y. Huang, "Analysis of asymmetrical cold and hot bond rolling of unbounded clad sheet under constant shear friction", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 177, pp.114-120, 2006.
- 6- Gudur pp., Salunkhe,M.A.,Dixit U.S., "A theoretical Study on the application of asymmetrical Rolling for the estimation of friction",International journal of mech sci., Vol. 50, pp. 315-327, 2008.
- 7- Kadkhodaei M.,salimi M.,Poursina M., "Analysis of asymmetrical sheet Rolling by a genetic algorithm", International journal of mech.sci., pp.622-634, 2007