

بررسی یک مدل نورد فویل همراه با اعمال اثرات روانسازی

مینا عرب اف

محمود سلیمی

محسن اصفهانیان

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک جامدات

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک،

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشگاه صنعتی اصفهان

*نویسنده مسئول: salimi@cc.iut.ac.ir

چکیده

در فرایند نورد سرد فویل ها، با توجه به ضخامت بسیار کم آنها (کمتر از $50 \mu\text{m}$) از تغییر شکل الاستیک غلتکها در برابر تغییر ضخامت ورق نمی توان صرف نظر کرد. بنابراین با در نظر گرفتن سیستم فویل و غلتک به عنوان یک سیستم فنر با ضریب سختی متغیر در طول ناحیه کاری و استفاده از تنش های تماسی هرگز می توان این تغییر شکل را به دست آورد. از طرف دیگر کاهش ضخامت در فویل ها احتیاج به نیروی نورد بالایی دارد که برای کاهش مقدار این نیرو و همچنین بهبود خواص سطحی می توان از روانسازهای ویژه ای استفاده کرد. در صورت صرف نظر کردن از این تغییرات تخمین دست پایینی از میزان نیروی نورد خواهیم داشت که آن نیز بر انتخاب نوع روانکار مؤثر می باشد. بسته به خواص روانساز مورد استفاده و سرعت فویل، مکانیزمهای روانکاری متفاوتی به وجود می آید. مکانیزم روانسازی مخلوط مکانیزم غالب در فرآیند نورد سرد است در این تحقیق فرایند نورد فویل ها همراه با روانکاری مخلوط با استفاده از روش قاچی مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: نورد سرد، فویل، روانکاری مخلوط، روش قاچی

۱- مقدمه

فرایندهای شکل دهی فلزات شدیداً وابسته به اصطکاک و روانکاری می‌باشند در نورد سرد فویل‌ها که در این تحقیق بررسی شده است، اصطکاک تأثیر به‌سزایی دارد، چرا که سطح تماس در مقایسه با حجمی از ورق که تغییر شکل پلاستیک می‌دهد بزرگ می‌باشد.

نکته قابل توجه دیگر در تولید فویل‌ها، خصوصیات سطحی ورق می‌باشد لذا تریبولوژی از جهات مختلف حائز اهمیت می‌باشد و مطالعات تجربی سیستم نورد و مدل‌سازی های تئوری در بهینه سازی ترکیب پارامترهای نورد و دستیابی به روانسازهای جدید می‌توانند نقش مؤثری را ایفاء کنند.

در طول سالیان دراز مدل های زیادی ارائه شده‌اند که فرایند نورد را توصیف می‌کنند. مدل های افرادی چون اروان و پورشکو [۱] موفقیت زیادی در پیش‌بینی میزان تنش نورد سرد ورق های ضخیم داشتند. این مدل‌ها براساس کمان تماس دایره‌ای و استفاده از فرمول هیچکاک برای پیش‌بینی شعاع غلتک تغییر یافته، تدوین یافته‌اند. هنگامی که این مدل‌ها بر روی نورد ورقهای بسیار نازک (فویل‌ها) اعمال شد، به دلیل دایره نبودن غلتک در این مورد، حلها واگرا شد و مدل‌ها جوابگو نبود. فلک و جانسون [۲] فرض کردند هنگامی که غلتک تغییر شکل می‌دهد، پروفیل غلتک شامل یک ناحیه هموار می‌باشد و توزیع فشار را با استفاده از تئوری هرتر بیان کردند. استالبرگ و کیف [۳] نیز به بررسی نورد فویل‌ها پرداختند و قسمت عمده تلاش خود را بر روی یافتن شکل خط تماس متمرکز کردند.

کیف و جونساتر [۴] به بررسی تأثیر روانکاری مخلوط در نورد فویل‌ها پرداختند. لو و کیف [۵] تأثیرات حرارت را نیز در مدل خود اعمال کردند. کیف و همکاران [۶] پیشنهاد کردند که ورق در ناحیه کاری منبسط می‌شود این انبساط می‌تواند هم در طول فرایند نورد و هم در طول مرحله فورجینگ، زمانی که چرخش غلتکها متوقف می‌شود، ایجاد شود. لی و ساتلکیف [۷] به استفاده از قانون هوک اصلاح شده برای شرایط کرنش صفحه‌ای به منظور محاسبه پروفیل فشار پرداختند، آنها دوباره اثبات کردند که پروفیل ورق در ناحیه میانی همچنان هموار باقی می‌ماند. کومار و دیکزیت [۸] اثرات کارسختی و اصطکاک را در نورد فویلها به همراه اثرات روانکاری مطالعه کردند.

مدل ارائه شده در این مقاله مشابه مدل های ارائه شده توسط کیف و جونتر میباشد و از معادله درجه اول رینولدز برای تعیین ضخامت روانکار استفاده شده است و با استفاده از فرض های زیر به اصلاح مقادیر بدست آمده پرداخته و یک حل همگرا برای سرعتهای معمول نورد بدست آمده است.

۲- مدل ریاضی

فرض های زیر در حل معادلات مربوط به تغییر شکل پلاستیک به همراه معادلات روانکاری به کار رفته است:

۱- کار سختی ماده به وسیله یک تابع خطی پله‌ای بیان و تغییر شکل های پلاستیک همسان فرض می‌شود

۲- با فرض شرایط کرنش صفحه‌ای از معیار تسلیم ون میز استفاده شده است.

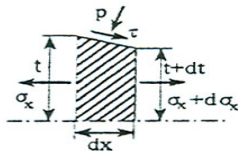
۳- جهت افقی و عمودی منطبق بر جهت تنش های اصلی می‌باشند.

۴- شرایط اصطکاکی منطبق بر اصطکاک کلمب در نظر گرفته می‌شود. لذا تنش اصطکاکی متناسب با فشار تماسی است و بیشینه مقدار تنش اصطکاکی برابر با تنش تسلیم برشی ماده کاری می‌باشد.

با استفاده از تئوری پلاستیسته و روش قاچی (Slab Method) بر روی المانی از ورق که در شکل (۱) نشان داده شده است، می‌توان فشار را به ضخامت ورق و موقعیت المان در طول خط تماس وابسته ساخت.

$$\frac{d\sigma_x}{dx}t + (\sigma_x + p)\frac{dt}{dx} + \mu p = 0 \quad V_R \geq V_f \quad (1)$$

$$\frac{d\sigma_x}{dx}t + (\sigma_x + p)\frac{dt}{dx} - \mu p = 0 \quad V_R \leq V_f \quad (2)$$



شکل ۱: المان به کار رفته در روش قاچی

$$C_3 = a_0 t g \alpha - t_0 \quad (۳-۹)$$

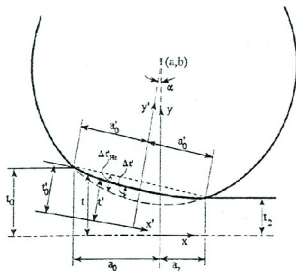
$$C_4 = R^2 (1 + t g^2 \alpha) \quad (۴-۹)$$

$$C_5 = C_4 - C_2 \quad (۵-۹)$$

رابطه بین p_0 و a_0 به صورت زیر بیان می شود.

$$p_0 2R(1 - \nu^2) \frac{1}{E_R} = \quad (۱۰)$$

$$\sqrt{\frac{1}{2} \left[a_0^2 - (t_0 - t_2) \sqrt{R^2 - a_0^2} + 2a_0 \sqrt{a_0^2 - (t_0 - t_2)(2\sqrt{R^2 - a_0^2} + t_0 - t_2)} \right]}$$

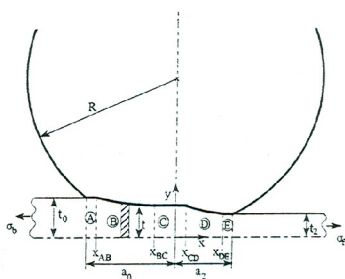


شکل (۳): جابجایی سطحی غلتک و انتقال سیستم مختصات به منظور تطبیق

تئوری هرتز با شرایط نورد [۳]

۳- ضخامت فویل در حین نورد و مرزهای نواحی مختلف

با توجه به وجود نواحی پننج گانه در حین نورد فویل ها (شکل (۴)) و وجود ناحیه تخت مرکزی به بررسی هر ناحیه به طور جداگانه پرداخته می شود.



شکل (۴): نواحی پننجگانه در مدل [۴]

۱- ناحیه E (بازیابی حالت الاستیک)

در این ناحیه ورق خاصیت الاستیک خود را باز می یابد. با این حال ما ورق را صلب فرض کرده و از تغییر شکلهای الاستیک صرف نظر می کنیم با توجه به برقراری معیار تسلیم در ابتدای این ناحیه رابطه (۲) به صورت زیر ساده می شود:

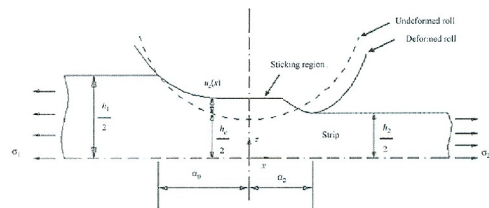
با نوشتن معادله تعادل در راستای محور Y داریم:

$$\sigma_y = -p(1 + \mu t g \alpha) \quad (۳)$$

با توجه به اینکه μ و $t g \alpha$ (برای غلتکهای نسبتاً بزرگ) دارای مقادیر کوچکی می باشند، می توان از عبارت $\mu t g \alpha$ در برابر ۱ صرف نظر کرد بنابراین:

$$\sigma_y = -p \quad (۴)$$

در حالتی که ماده ورق نرم باشد و یا حالتی که ضخامت ورق زیاد باشد (مانند نورد گرم) می توان از تغییر شکل الاستیک غلتکها صرف نظر نمود ولی در کاهش کوچک سطح مقطع و یا فویل ها ناحیه تماس کوچک می باشد، نمی توان از تغییر شکل الاستیک غلتکها صرف نظر نمود. در نورد فویل ها تغییر شکل الاستیک غلتکها به اندازه ای می باشد که در ناحیه تماس، منطقه ای ایجاد خواهد شد که غلتکها کاملاً تخت شده و کاهش ضخامت صورت نمی پذیرد (شکل (۲)).



شکل (۲): فرایند نورد برای زوایای درگیری غیر دایره ای [۶]

به منظور اعمال اثر تغییر شکل غلتک ها از نظریه هرتز برای تماس بین دو استوانه الاستیک به صورت زیر استفاده می شود.

$$p = p_0 \sqrt{1 - (x' / a_0')^2} \quad (۵)$$

$$a_0' = p_0 * 2R(1 - \nu^2) * \frac{1}{E_R} \quad (۶)$$

با در نظر گرفتن غلتکها به عنوان یک سیستم فنری با ضریب فنریت متغیر توزیع فشار به صورت زیر بیان می شود:

$$p = k(x') * \Delta t' \quad (۷)$$

با استفاده از هندسه نشان داده شده در شکل (۳) و با تبدیل دستگاه مختصات از $X'-Y'$ به $X-Y$ رابطه زیر حاصل میشود:

$$p = f(x, t) \quad (۸)$$

$$= p_0 \sqrt{1 - (C_1 - t t g \alpha + x)^2 * \frac{1}{C_2} * \left(\frac{t + x t g \alpha + C_3}{\sqrt{C_4 - (x - t t g \alpha + C_1)^2 - C_5}} + 1 \right)}$$

که ثوابت C برابرند با:

$$C_1 = (b t g \alpha) \quad (۱-۹)$$

$$C_2 = (a_0'^2)(1 + t g^2 \alpha) \quad (۲-۹)$$

۴- ناحیه C (ناحیه الاستیک)

در این ناحیه نیز فویل خاصیت الاستیک داشته، ضخامت ورق ثابت و برابر با t_1 خواهد بود. بسته به هندسه نورد و خصوصیات روانساز و فویل این ناحیه می تواند وجود داشته یا وجود نداشته باشد. توزیع فشار را می توان با استفاده از رابطه (۸) به دست آورد.

۵- ناحیه D و بررسی وجود ناحیه C

در این ناحیه نیز همانند ناحیه B، تغییر شکل پلاستیک به صورت کاهش ضخامت نمایان می شود. معیار تسلیم در طول ناحیه ارضاء می شود. می توان رابطه (۲) را به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$-\left(\frac{4}{3}A_i \frac{1}{t} \frac{dt}{dx} + \frac{dp}{dx}\right)t + \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_e \frac{dt}{dx} - \mu p = 0 \quad V_R \leq V_{f1} \quad (18)$$

در این ناحیه نیز معادله دیفرانسیلی به صورت زیر می توان بدست آورد:

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{tf(x,t) + \mu p(x,t)}{\frac{4}{3}A_i + g(x,t)t - \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_e} \quad (19)$$

این معادله به صورت عددی برای شرط مرزی $x = x_{DE} : t = t_2$ حل می شود. لذا شکل خط تماس و نحوه کاهش ضخامت در این ناحیه نیز مشخص می شود. توزیع فشار نیز در این ناحیه مستقیماً با استفاده از رابطه (۸) به دست می آید.

۴- پیوستگی جریان مواد و پارامتر لغزش رو به جلو

با توجه به شرایط کرنش صفحه ای و شرط پیوستگی جریان مواد داریم:

$$V_f * t = V_{f2} * t_2 = V_{f0} * t_0 = V_{f1} * t_1 \quad (20)$$

لذا طبق تعریف، پارامتر لغزش رو به جلو برابر است با:

$$s = \frac{t_1}{t_2} - 1 \quad (21)$$

۵- محاسبه نیروی مورد نیاز برای نورد

نیروی نورد بر واحد پهنا از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$F = \int_{x_1}^{x_2} p(t,x) dx \quad (22)$$

در هر ناحیه، با توجه به مشخص بودن تابعیت ضخامت (t) نسبت به X مقدار نیرو برای هر ناحیه به طور جداگانه به دست می آید و از این طریق کل نیروی مورد نیاز برای نورد مشخص می شود.

$$\frac{-dp}{dx} \Big|_{x=x_{DE}} t_2 - \mu p_{DE} = 0 \quad (11)$$

با انتگرال گیری از رابطه (۲) بر روی مرزهای ناحیه E و با اعمال کشش از جلویی برابر با σ_d در $x=a_2$ خواهیم داشت:

$$\frac{\mu}{t_2} \int_{x_2}^{DE} p dx + p_{DE} = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_e - \sigma_d \quad (12)$$

۲- ناحیه A (ناحیه الاستیک)

در این ناحیه فویل خاصیت الاستیک دارد. این ناحیه از نقطه شروع درگیری آغاز می شود و با تسلیم ورق و برقراری رابطه تسلیم پایان می پذیرد. با توجه به برقراری معیار تسلیم در انتهای این ناحیه رابطه (۱) به صورت زیر ساده می شود:

$$d\sigma_x = \frac{\mu p}{t_0} dx \quad (13)$$

با انتگرال گیری از رابطه (۱) بر روی مرزهای ناحیه A و با اعمال کشش از عقب برابر با σ_b در $x=a_0$ خواهیم داشت:

$$\frac{\mu}{t_0} \int_{x_0}^{AB} p dx - p_{AB} = \sigma_b - \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_e \quad (14)$$

۳- ناحیه B و بررسی وجود ناحیه C

در این ناحیه تغییر شکل پلاستیک به صورت کاهش ضخامت رخ می دهد. معیار تسلیم در کل ناحیه B برقرار بوده با استفاده از فرض های بیان شده می توان معادله (۱) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\left(-\frac{4}{3}A_i \frac{1}{t} \frac{dt}{dx} + \frac{dp}{dx}\right)t + \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_e \frac{dt}{dx} + \mu p = 0 \quad V_R \geq V_{f1} \quad (15)$$

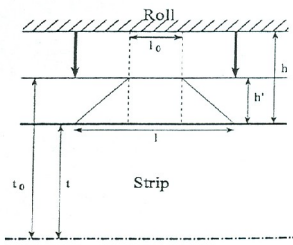
با مشتق گیری از رابطه (۸) نسبت به X می توان $\frac{dp}{dx}$ را به صورت مجموع دو تابع از X و t به دست آورد:

$$\frac{dp}{dx} = g(x,t) \frac{dt}{dx} + f(x,t) \quad (16)$$

با استفاده از رابطه اخیر و مرتب سازی آن معادله دیفرانسیلی به صورت زیر حاصل خواهد شد:

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{tf(x,t) - \mu p(x,t)}{\frac{4}{3}A_i + g(x,t)t - \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_e} \quad (17)$$

با اعمال شرط مرزی $x = x_{AB} : t = t_0$ ، می توان به حل این معادله دیفرانسیل به صورت عددی پرداخت و t را به صورت تابعی از X، به دست آورد. به این ترتیب شکل خط تماس در این ناحیه مشخص می شود. نقطه پایانی این ناحیه، جایی خواهد بود که $\frac{dt}{dx}$ برابر صفر شود. در این صورت $t = t_1^P$ و $X = X_{BC}$ خواهد بود.

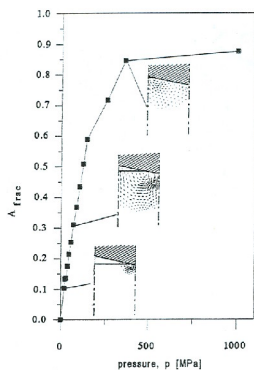


شکل (۵): کاهش ضخامت فیلم در نتیجه انبساط سطح فویل [۴]

۷- بررسی تماس ورق و غلتک

نتایج به دست آمده از محاسبات مختلف نشان داده که منحنی A_{frac} - P می تواند با سه رابطه خطی تقریب زده شود که هر کدام در محدوده فشاری خاصی صادق می باشند [۴]. شکل (۶) نمونه ای از این منحنی ها را نشان می دهد و نتایج حاصل از آن به صورت زیر می باشد:

$$A_{frac} = \begin{cases} 4.012 \cdot 10^{-3} \cdot p + 2.362 \cdot 10^{-2} & 0 \leq p \leq 140 \text{ Mpa} \\ 1.162 \cdot 10^{-3} \cdot p + 4.214 \cdot 10^{-1} & 140 < P \leq 365 \\ 4.758 \cdot 10^{-5} \cdot p + 8.278 \cdot 10^{-1} & 365 < P \leq 3620 \\ 1 & P > 3620 \end{cases} \quad (28)$$



شکل (۶): نتایج حاصل از آنالیز FE [۴]

با داشتن ضخامت لایه روغن در ناحیه کاری، h_{film} و ارتفاع برآمدگی ها می تواند اصلاح شده به صورت H_{frac} بیان شود.

$$H_{frac} = \begin{cases} 0 & h_{film} / h_{asp} > 1 \\ 1 - \frac{h_{film}}{h_{asp}} & \frac{h_{film}}{h_{asp}} > 1 - A_{frac} \\ A_{frac} & \frac{h_{film}}{h_{asp}} < 1 - A_{frac} \end{cases} \quad (29)$$

۶- استخراج ضخامت فیلم روغن ورودی به ناحیه پلاستیک

به منظور تعیین پارامتر h_{en} یا جدایی نامی سطوح در ناحیه ورودی از حل معادله هیدرودینامیک رینولدز استفاده می شود. در این تئوری فشار فیلم روغن در صفحه ورودی برابر با فشار تغییر شکل (PAB) قرار داده می شود که این مقدار طی یک حلقه تکرار بهتر می شود.

$$h_{en} = 1.417 \frac{\eta_0 (V_f + V_r)^{3/4} \sqrt{R}}{p' (a_0 + a_2)^{1/4}} \quad (23)$$

در این رابطه جانسون فرض کرده که غلتکها تحت تأثیر فشار هر تزی، تغییر شکل زیادی دارند. همچنین سطوح کاملاً هموار می باشند، ولی در عمل برجستگی های سطح غلتک ضخامت فیلم اولیه روانساز را تغییر می دهند. با فرض افزایش ضخامت فیلم روغن در ناحیه کاری و با توجه به مقادیر h_{en} و h_{asp} روابط زیر به دست می آید:

$$h^* = h_{en} + h_{asp} / 2 \quad h_{en} \geq \frac{1}{2} h_{asp} \quad (24)$$

$$h^* = \sqrt{2h_{en} h_{asp}} \quad h_{en} < \frac{1}{2} h_{asp}$$

۵- ضخامت فیلم روغن در ناحیه کاری

ضخامت فیلم روغن، h ، در هر نقطه از زاویه گاز توسط رابطه رینولدز به صورت زیر تعیین می شود:

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta (V_r + V_f) \left(\frac{h-h^*}{h^3} \right) \quad (25)$$

در شرایط همدمايي، ویسکوزیته روانساز با استفاده از رابطه باروس بیان می شود:

$$\eta = \eta_0 e^{\gamma p} \quad (26)$$

هنگامی که المان سطحی فویل از l_0 به l تغییر طول می دهد، ضخامت فیلم روانکار از h به h' کاهش می یابد (شکل (۵)). لذا می توان ضخامت فیلم روانکار را با توجه به گسترش سطح فویل در حین تغییر شکل پلاستیک اصلاح کرده و به صورت زیر ارائه کرد:

$$h' = \frac{2h}{\frac{t_0}{t} + 1} \quad (27)$$

۸- تنش برشی مماسی

با توجه به اساس رژیم روانکاری مخلوط به منظور تعیین تنش برشی میانگین (τ) به بررسی توأمان تنش برشی مماسی ناشی از برش، ویسکوزیته روغن (τ_h) و تنش برشی اصطکاکی ناشی از درگیری سطحی برجستگی‌های غلتک و ورق (τ_c) می‌پردازیم. طبق تعریف تنش اصطکاکی میانگین به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\tau = \frac{\tau_h A_h + \tau_c A_c}{A_h + A_c} \quad (30)$$

با تعریف نسبت تماس به صورت زیر:

$$A_{frac} = \frac{A_c}{A_c + A_h} \quad (31)$$

و پس از در نظر گرفتن اصلاح اعمالی بر روی نسبت سطح تماس خواهیم داشت

$$\tau = \tau_h (1 - H_{frac}) + \tau_c H_{frac} \quad (32)$$

که در این رابطه:

$$\tau_h = \frac{\eta |V_R - V_f|}{h'} \quad (33)$$

و

$$\tau_c = \mu_h * p \quad (34)$$

می‌باشند.

۹- تشریح فرایند حل معادلات

به منظور حل معادلات مورد نظر، مراحل زیر در نظر گرفته می‌شوند:

۱- ابتدا می‌بایستی به محاسبه توزیع فشار، شکل خط تماس و یافتن مرزهای نواحی پنج گانه پرداخته شود. به این منظور با فرض مقدار اولیه $H_{frac}=1$ ابتدا به بررسی ناحیه E می‌پردازیم. روابط (۱۰) برای $X=X_{DE}$ و (۱۱) و (۸) تشکیل یک دستگاه معادلات را می‌دهند که به وسیله آن می‌توان شرایط مرزی هندسی a_2 و a_0 و X_{DE} را به دست آورد. لذا فشار بین نواحی D و E یعنی p_{DE} و ماکزیمم فشار p_0 وابسته به معادله هرتز و ثوابت هندسی C به دست می‌آیند. از این طریق توزیع فشار در ناحیه خروجی قابل محاسبه می‌باشد. پس از آن در ناحیه A با حل عددی معادله (۱۴) می‌توان X_{AB} را به دست آورد و توزیع فشار بر روی ناحیه ورودی نیز به دست می‌آید. با استفاده از روش انتگرال رونگ- کوتا مرتبه ۷ و ۸ که از X_{AB} شروع می‌شود، معادله

دیفرانسیل (۱۷) حل می‌گردد. در نتیجه شکل خط تماس در ناحیه B به دست آمده همچنین شرط $\frac{dt}{dx}=0$ بررسی می‌گردد. بار دیگر از روش انتگرال گیری رونگ کوتا مرتبه ۷ و ۸ که از X_{DE} شروع می‌شود و در جهت خلاف X حرکت می‌کند استفاده کرده و این بار با حل معادله (۱۹) شکل خط تماس در ناحیه D به دست می‌آید. در صورت ارضاء شرط دوم وجود ناحیه C اثبات شده و مقادیر مرزی X_{BC} و X_{CD} به دست می‌آیند.

با مشخص شدن توزیع فشار p در کل نواحی می‌توان میزان تنش برشی خشک را با استفاده از رابطه $\tau = \mu_b * p$ با فرض $\mu_b=0.1$ به دست آورد.

۲- با استفاده از رابطه (۲۳) به محاسبه ضخامت فیلم اولیه روغن پرداخته می‌شود و سپس با توجه به میزان ارتفاع برجستگیها به اصلاح ضخامت فیلم روغن می‌پردازیم.

۳- با استفاده از مقادیر p و $\frac{dp}{dx}$ به دست آمده، به حل عددی رابطه (۲۵) پرداخته، مقادیر ضخامت فیلم روغن در ناحیه تغییر شکل پلاستیک به دست می‌آید و سپس با استفاده از رابطه (۲۷) به اصلاح این مقادیر پرداخته می‌شود.

۴- مقدار تنش برشی هیدرودینامیک τ_h با استفاده از رابطه (۳۳) در نقاط مختلف خط تماس به دست می‌آید.

۵- با توجه به روابط ارائه شده در معادله (۲۸) و با توجه به مقادیر فشار در نقاط مختلف خط تماس می‌توان توزیع A_{frac} را به دست آورد. با استفاده از رابطه (۲۹) به اصلاح آن پرداخت و توزیع H_{frac} را بر روی ناحیه کاری به دست آورد.

۶- با استفاده از رابطه (۳۲) می‌توان مقادیر τ را به دست آورده و توزیع ضریب اصطکاک (μ) را در طول خط تماس با استفاده از رابطه $\mu = \frac{\tau}{p}$ به دست آورد.

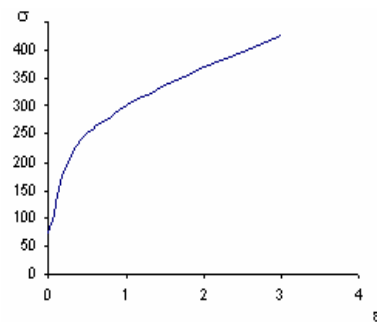
۷- مقدار میانگینی برای μ ضریب اصطکاک و در نتیجه توزیع فشار تماس جدیدی با توجه به مرحله ۱ به دست می‌آید.

۸- مراحل ۲ تا ۷ تا رسیدن به معیار همگرایی $\frac{|F_n - F_{n-1}|}{F_n} < 0.001$ تکرار می‌شود.

به منظور حل معادلات، برنامه ای در محیط نرم افزار MATLAB نوشته شده است.

۱۰- نتایج محاسبات

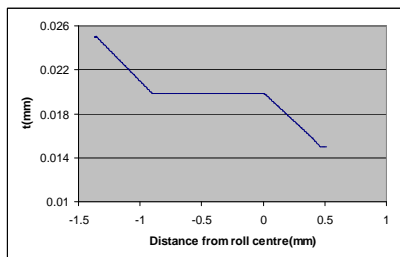
در مدل حاضر غلتک ها از جنس فولاد با مدول یانگ 210 Gpa و قطر 162 mm میلی متر در نظر گرفته شده است. سطح غلتکها سنگ زده شده تا زبری میانگین سطح معادل $0.1 \mu\text{m}$ حاصل شود. جنس ورقها از مس با ضخامت اولیه $2t_0=0.05 \text{ mm}$ و پهنای $w=1 \text{ mm}$ و زبری سطح معادل $5 \mu\text{m}$ می باشند. منحنی تنش - کرنش ماده ورق طبق نمودار شکل (۷) می باشد. ضخامت ورق مورد نظر برای تولید $2t_2=0.03 \text{ mm}$ می باشد. در نتیجه ضریب کاهش برابر 40% به دست می آید.



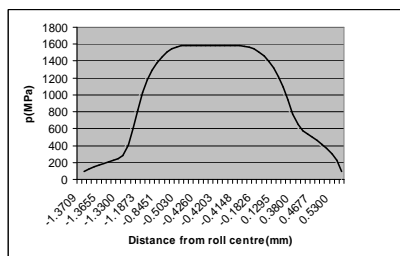
شکل (۷): منحنی تنش - کرنش برای ماده کاری مس

۱۰-۲) توزیع فشار تغییر شکل بر روی خط تماس

توزیع فشار تغییر شکل بر روی ورق مس با استفاده از مدل حاضر و در نظر گرفتن اثر اصلاحی بر روی A_{frac} و به دست آوردن H_{frac} در شکل (۹) آورده شده است. با استفاده از تئوری بیان شده در این مقاله مشابه تئوری نورد معمولی یک نقطه خنثی در ناحیه نورد وجود دارد و نیز منحنی فشار در همین نقطه دارای ماکزیمم فشار خود می باشد.

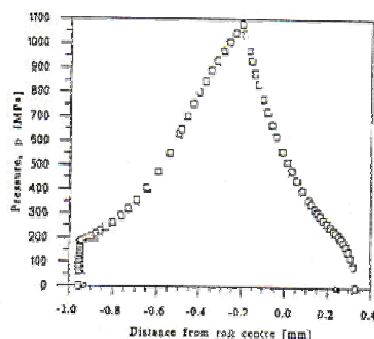


شکل (۸) شکل خط تماس در زاویه بلعش با استفاده از مدل حاضر برای ورق مس



شکل (۹): توزیع فشار تماسی در زاویه بلعش با استفاده از مدل حاضر

توزیع فشار تغییر شکل بر روی ورق آلومینیوم با استفاده از نتایج ارائه شده توسط کیف و جوناتر با شرایط مشابه آنچه در بخش قبل بیان شد به صورت شکل (۱۰) می باشد.



شکل (۱۰): توزیع فشار تماسی در زاویه بلعش با استفاده از مدل کیف جوناتر

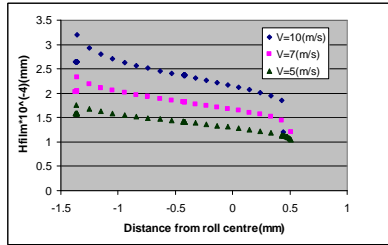
به منظور بررسی اثر نوع روغن و لزجت آن بر روی نتایج به دست آمده از مدل از سه نوع روغن متفاوت استفاده می شود که به تفکیک در جدول (۱) آورده شده است.

مقادیر کشش از عقب $\sigma_b=10 \text{ MPa}$ و کشش از جلو $\sigma_d=20 \text{ MPa}$ می باشد.

۱۰-۱) شکل خط تماس

شکل خط تماس به صورت شکل (۸) خواهد بود. نواحی ورودی، خروجی و همچنین ناحیه هموار مرکزی به خوبی دیده می شود. در مدل هایی که غلتک را به صورت دایره ای در نظر گرفته و از ناحیه تخت مرکزی صرف نظر می شود، نقطه انتهایی ناحیه کاری منطبق بر تقاطع خط المرکزین غلتکها و محور تقارن ورق می باشد در صورتی که در عمل به دلیل تغییر شکل الاستیک غلتکها، نقطه انتهایی ناحیه کاری دارای فاصله ای نسبت به این خط می باشد.

روغن کافی برای جدا کردن سطح تماس مشترک غلتک ها در قسمت ورودی، وارد نمی شود و سطح تماس به سرعت در قسمت ورودی افزایش می یابد. پس سرعت به عنوان عامل تعیین کننده نوع رژیم روانکاری می تواند در نظر گرفته شود.



شکل (۱۲): توزیع ضخامت فیلم روانکار در سرعت های مختلف با استفاده از مدل حاضر

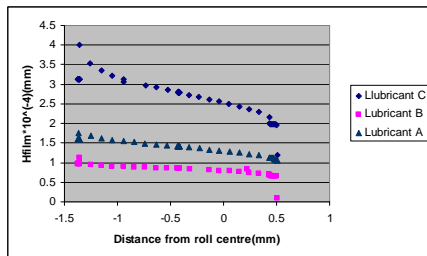
جدول (۱): ویسکوزیته دینامیک سه نوع روانکار در سه محدوده فشار متفاوت

$1000 \leq P \text{ Mpa}$		$30 \leq P < 1000 \text{ Mpa}$		$0 \leq P < 330 \text{ Mpa}$		روانکار
$\gamma (\text{mm}^2 / \text{N})$	$\eta_{0,3} (\text{NS} / \text{mm}^2)$	$\gamma (\text{mm}^2 / \text{N})$	$\eta_{0,2} (\text{NS} / \text{mm}^2)$	$\gamma (\text{mm}^2 / \text{N})$	$\eta_{0,1} (\text{NS} / \text{mm}^2)$	
۰/۰۰۰۲۲	$3/94 \times 10^{-6}$	۰/۰۰۲۰	$3/65 \times 10^{-6}$	۰/۰۲۹	$۰/76 \times 10^{-6}$	A
۰/۰۰۰۲۲	$7/88 \times 10^{-6}$	۰/۰۰۲۰	$7/29 \times 10^{-6}$	۰/۰۲۹	$1/2 \times 10^{-6}$	B
۰/۰۰۰۲۲	$1/97 \times 10^{-6}$	۰/۰۰۲۰	$1/82 \times 10^{-6}$	۰/۰۲۹	$3/۰ \times 10^{-6}$	C

۱۰-۵) بررسی تغییرات ضخامت فیلم روانکار در

روانکارهای متفاوت

با تغییر نوع روانکار همانگونه که در شکل (۱۴) آورده شده است ضخامت فیلم روغن با افزایش ویسکوزیته افزایش می یابد. که این به نوبه خود باعث کاهش ضریب اصطکاک شده و در نتیجه نیروی مورد نیاز برای نورد کاهش می یابد.

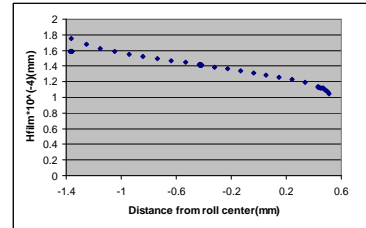


شکل (۱۴): تغییرات ضخامت فیلم روانکار در روانکارهای متفاوت

مشابه همین نتایج نیز توسط کیف و جونانتر ارائه شده است که با مقایسه شکلهای (۱۴) و (۱۵) می توان تطابق نتایج دو مدل را با یکدیگر مشاهده نمود.

۱۰-۳) توزیع ضخامت فیلم روانکار در ناحیه کاری

با توجه به تعریف رژیم روانکاری مخلوط که ضخامت روانکار بایستی از میانگین ارتفاع برجستگی ها کمتر باشد و با توجه به شکل (۱۱) می توان تشکیل فیلم روغن را در حالت روانکاری مخلوط مشاهده نمود. در عمل در صورتی که متوسط فیلم روغن از سه برابر میانگین ارتفاع زبری های سطح کمتر باشد رژیم روانکاری مخلوط حاصل می شود و عملاً برجستگیها با هم درگیر می شوند.



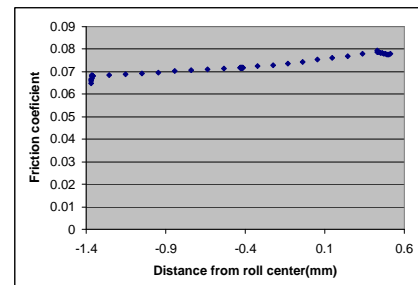
شکل (۱۱): توزیع ضخامت فیلم روانکار با استفاده از مدل حاضر برای ورق مس

شکل (۱۲) ضخامت فیلم روغن را در سرعت های مختلف نشان می دهد. داده های استفاده شده به جز سرعت مانند قسمت قبل است. همانطور که مشاهده می شود برای سرعت های بالای غلتک ضخامت فیلم روغن افزایش میابد. زیرا در سرعت های پایین،

۱۰-۴) بررسی ضریب اصطکاک میانگین در طول

ناحیه کاری

تغییرات ضریب اصطکاک از ورودی تا خروجی در طول فرایند نورد در شکل (۱۳) دیده می شود. در سرعت های نورد پایین، در اولین قسمت خط تماس شاهد افزایش ضریب اصطکاک میانگین ($\bar{\mu}$) به دلیل افزایش مقدار نسبت سطح تماس می باشیم، در حالی که در سرعتهای بالای نورد مقدار کافی روغن برای جدا کردن دو سطح از یکدیگر وجود دارد.

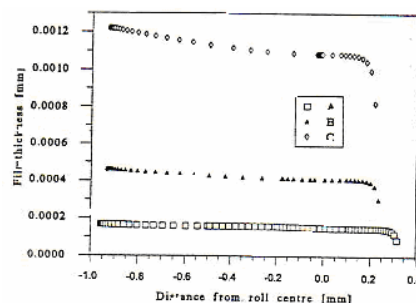


شکل (۱۳): توزیع ضریب اصطکاک میانگین در طول ناحیه کاری با استفاده از مدل حاضر بر روی ورق مس

- ۱- با توجه به تاثیر روانکار بر روی ضخامت ورق، با در نظر گرفتن این اثرات به نتایج دقیق‌تری می‌توان دست یافت.
- ۲- با تغییر مشخصات روانکار مورد استفاده می‌توان به روانساز بهینه دست یافت و به منظور تحویل و کنترل ضخامت مطلوب نهایی فویل علاوه بر دخالت دادن پارامترهای نیروی نورد و سرعت از آن استفاده کرد.
- ۳- استفاده از یک روانساز مناسب می‌تواند موجب کاهش اثر تماس زبری ها و در نتیجه بهبود کیفیت ورق شود.

فهرست علائم

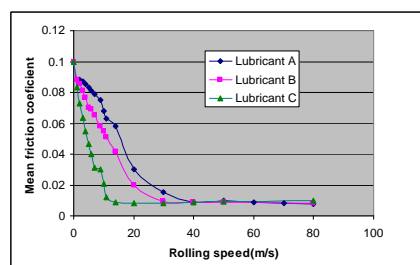
A_c	سطح تماس در روانکاری مرزی
A_{hi}	سطح تماس در روانکاری هیدرودینامیک
A_{frac}	نسبت سطح تماس
A_i, B_i	ضرایب ثابت در رابطه تنش کرنش
a_0	فاصله بین نقطه شروع درگیری و محور تقارن عمودی غلتکها
a_2	فاصله بین نقطه انتهای درگیری و محور تقارن عمودی غلتکها
b	فاصله بین مرکز غلتک و محور تقارن افقی غلتکها
$\Delta t'$	جابجایی سطح غلتک
E_R	مدول یانگ غلتک
F	نیروی نورد
h	ضخامت فیلم روانکار
h'	ضخامت فیلم روانکار پس از اعمال اثر گسترده‌گی سطح ورق
h_{asp}	ارتفاع برجستگیهای سطح
h_{en}	ضخامت فیلم روانکار در ورود به زاویه درگیری
$K(x)$	تابع موجود در رابطه خطی فشار-جابجایی
p	فشار تماسی
p_0	بیشینه مقدار فشار تماسی وابسته به هر تزر
R	شعاع غلتک
t	نصف ضخامت ورق
t_0	نصف ضخامت ورق قبل از نورد
t_1	نصف ضخامت ورق در نقطه خنثی یا ناحیه C
t_2	نصف ضخامت ورق بعد از نورد



شکل (۱۵): تغییرات ضخامت فیلم روانکار در روانکارهای متفاوت در مدل کیف و جونا تر

۱۰-۶) بررسی تغییرات ضریب اصطکاک میانگین در روانکارهای متفاوت

اثرات تغییرات نوع روانکار با استفاده از داده‌های جدول (۱) در شکل (۱۶) آورده شده است. با افزایش سرعت هر چه روغن دارای ویسکوزیته بالاتری باشد، میزان کاهش ضریب اصطکاک میانگین بیشتر خواهد شد.



شکل (۱۶) اثر ویسکوزیته روانکار بر روی ضریب اصطکاک میانگین

۱۱- بحث و نتیجه‌گیری

امروزه اکثر فعالیت‌ها بر روی مکانیزم روانکاری مخلوط متمرکز شده است. به دلیل سطح برآقی که این مکانیزم ایجاد می‌کند، نیرو و گشتاور نسبت به اصطکاک خشک بسیار کمتر است. چنین چیزی مطلوب کارخانه‌های نورد می‌باشد و سعی می‌کنند مکانیزم غالب، روانکاری مخلوط باشد. از طرفی نوع روغن مورد استفاده به منظور دستیابی به شرایط بهینه نیز حائز اهمیت می‌باشد. معمولاً تولید روغن‌های نورد انحصاری و دارای فرمول سری می‌باشد. لذا گاهی اوقات، کارخانه‌های نورد با کمبود نوع خاصی از روغن مواجه می‌شوند. آنها می‌توانند با استفاده از مدل‌هایی نظیر آنچه در اینجا بیان شد، روغن‌های مشابه را تشخیص داده و مشکلات خود را مرتفع سازند.

با مطالعه نتایج به‌دست آمده می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

[6]- Keife, H. Shi, J., Mc Elwain, D.L.S, and Lag Lands, T.A.M., "Foil Rolling : A New Interpretation of Empermental Results", J. of Mat. Proc. Techn., Vol. 121, pp. 50-59, 2002.

[7]- Le, H.R., Sutcliffe, M.P.F., "Rolling of Thin Strip and Foil: Application of a Tribological Model for Mixed Lubricatoin", J. of Tribology, Vol. 124, p. 129, 2002.

[8]- Kumar, D., Dixit, U.S., "A Slab Method Study of Strain Hardening and Friction Effects in Cold Foil Rolling Process", J. of Mat. Proc. Techn., Vol. 171, pp. 331-340, 2006.

V_f	سرعت ورق
V_r	سرعت غلتک
$x-y$	دستگاه مختصات کارتیزین
$x'-y'$	دستگاه مختصات کارتیزین در راستای مماس و عمود بر غلتک

فهرست علائم یونانی

α	زاویه بین دستگاه مختصات $x-y$ و $x'-y'$
γ	ضریب فشار لزجت
μ	ضریب اصطکاک
$\bar{\mu}$	ضریب میانگین اصطکاک
μ_b	ضریب اصطکاک در شرایط روانکاری مرزی
ν	نسبت پواسون برای ماده کاری غلتک
η	لزجت دینامیکی روانکار
η_0	لزجت دینامیکی روانکار در فشار مبنا
σ_b	کشش ورودی ورق
σ_d	کشش خروجی ورق
σ_e	تنش مؤثر در ماده کاری
σ_x	تنش افقی در ماده کاری
τ	تنش برشی اصطکاکی در روانکاری مخلوط
τ_c	تنش برشی اصطکاکی در روانکاری مرزی
τ_h	تنش برشی اصطکاکی در روانکاری هیدرودینامیک

مراجع:

[1]- Orowan. E., Porscoe. K.J., "A simple Method of Calculating Roll Pressure and Power Consumption in Hot Flat Rolling", Iron and Steel Institute, London, No.3, 4pp. 124-126, 1946.

[2]- Fleck, N. A., Johnson, K. L., "Towards a New Theory of Cold Rolling Thin Foil", Int. J. Mech. Sci., Vol. 29, pp. 7, 1987.

[3]- Stahlbery , Uif, Keife, H., "Improved Flatness in Cold Rolling of Copper Foils", J. of Mat. Proc. Techn., Vol. 37, pp. 157-174, 1993.

[4]- Keife, H., Jonsater, T., "Influence of Rolling Speed upon Friction in Cold Rolling of Foils", J. of Tribology, Vol. 119, pp. 349-357, 1997.

[5]- Luo, Ch., Keife, H., "A Thermal Model for the foil Rolling Process", J. of Mat. Proc. Techn., Vol 74, pp. 158-173, 1998.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.