

بررسی هندسه سطح مقطع سیم برنجی نورد تخت شده

محمد خدائی^{۱*} و محسن خلیلیان^۲

۱- عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، گروه مهندسی مواد، اصفهان، ایران

۲- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، گروه مهندسی مواد، اصفهان، ایران

*khodai1358@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۱۰)

چکیده

از فرآیند نورد تخت سیم‌ها برای ساخت برخی اجزای قطعات الکترونیکی، برخی فنرها و رینگ‌های پیستون استفاده می‌شود. به علت شرایط هندسی سیم در لحظه شروع نورد، تغییر شکل ایجاد شده غیر همگن می‌باشد. پیش‌بینی هندسه سیم‌های نورد تخت شده حین تولید مهم و ضروری می‌باشد، بنابراین در این پژوهش از فرآیند نورد تخت سیم با کرنش‌های مختلف برای ایجاد تغییر شکل غیر همگن در نمونه‌های برنجی استفاده شده است. نمونه‌ها با مقادیر مختلف کاهش سطح مقطع داده شده‌اند. از طرفی فرآیند نورد تخت سیم توسط نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده است. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی فرآیند نورد و اطلاعات هندسی نمونه‌های نورد شده و نتایج محققین پیشین دقت روابط ارائه شده و نتایج شبیه‌سازی برای سیم برنجی بررسی گردید. همچنین روابط جدیدی برای هندسه سطح مقطع و طول سیم‌های برنجی نورد شده، ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که روابط ارائه شده در این زمینه به جنس ماده مورد تحلیل بستگی دارد و رابطه تجربی جدیدی برای پیش‌بینی طول، دقت مناسبی به ویژه در کاهش ارتفاع‌های بیشتر دارد.

واژه‌های کلیدی:

نورد تخت، پروفیل سطح مقطع، شبیه‌سازی نورد، پیش‌بینی طول.

۱- مقدمه

دانشیته نابجایی‌ها و انرژی ذخیره شده در فلز کاهش یابد. فرآیند آنیل اندازه دانه فلز تغییر فرم یافته را تحت تأثیر قرار داده و خواص مکانیکی و فیزیکی را تغییر می‌دهد. این مسئله برای طراحان مواد از آن جهت اهمیت دارد تا بتوانند توزیع اندازه دانه را بعد از تبلور مجدد ماده تغییر فرم یافته پیش‌بینی کنند. از آنجا که در فرآیند تغییر فرم فلزات، تغییر فرم ناهمگن وجود دارد و انرژی ذخیره شده به تناسب ناهمگنی تغییر فرم در نقاط مختلف فرق می‌کند، لذا بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر توزیع

سیم‌های نورد تخت شده به مقدار وسیعی در ساخت تیغه‌های اره، فنرها و رینگ پیستون‌ها کاربرد دارند [۱ و ۲]. در حین تغییر شکل پلاستیک سرد فلزات، دانشیته نابجایی‌ها به میزان چند برابر افزایش می‌یابد. بنابراین انرژی ذخیره شده و همچنین نیروی محرکه برای فرآیند آنیل افزایش می‌یابد. همین مسئله منجر می‌شود تا استحکام افزایش یافته و فرم‌پذیری فلز کاهش یابد. در نتیجه فلز تغییر فرم یافته، تحت عملیات آنیل قرار می‌گیرد تا

جدول (۱): آنالیز و خواص آلیاژ مورد مطالعه.

نام آلیاژ	ترکیب شیمیایی آلیاژ			دمای کارگرم °C	دمای ذوب °C
	Cu%	Pb%	Fe%		
Muntz Metal Or C28000	باقی مانده	۰/۰۷	۰/۳ >	۶۲۵-۸۰۰	۹۰۰

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از سیم‌های برنجی با شماره آلیاژ C28000 (Muntz Metal) استفاده شده است که آنالیز اسمی و برخی خواص فیزیکی آلیاژ در جدول (۱) مشاهده می‌شود. نمونه‌ها به صورت استوانه‌هایی با قطر ۱ و طول ۶/۶۵ سانتی‌متر تهیه گردیده و در کاهش ارتفاع‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درصد نورد تخت شدند. دستگاه نورد مورد استفاده دارای ظرفیت ۲۰ تن و قطر غلتک‌ها ۱۳ سانتی‌متر بوده است و سرعت چرخش غلتک‌ها ۱۰ RPM تنظیم شد. سپس قسمت مرکزی قطعات برش داده شدند و سطح مقطع نمونه‌ها توسط دستگاه Profile Projector مورد مطالعه ابعادی قرار گرفته است.

۲-۱- شبیه‌سازی

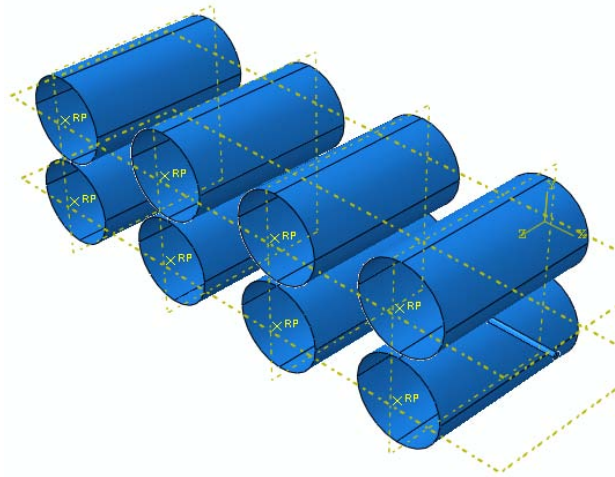
از طرفی فرآیند نورد تخت سیم توسط نرم‌افزار ABAQUS و به روش Dynamic Explicit و به صورت سه بعدی مورد تحلیل قرار گرفت [۱۰]. اساس کار این نرم‌افزار روش اجزای محدود^۱ می‌باشد. برای شبیه‌سازی المان‌های قطعه از المان C3D8R و برای المان‌های غلتک از المان R3D4 استفاده شده است. ضریب اصطکاک برای تمام شبیه‌سازی‌ها $\mu = 0.2$ در نظر گرفته شده است [۶]. شکل (۱) مدل اولیه شبیه‌سازی نورد تخت سیم برنجی را نشان می‌دهد. با استفاده از شبیه‌سازی ابعاد نهایی سیم و کرنش معادل برای کاهش ارتفاع‌های مختلف نورد به دست آمد.

۳- نتایج و بحث

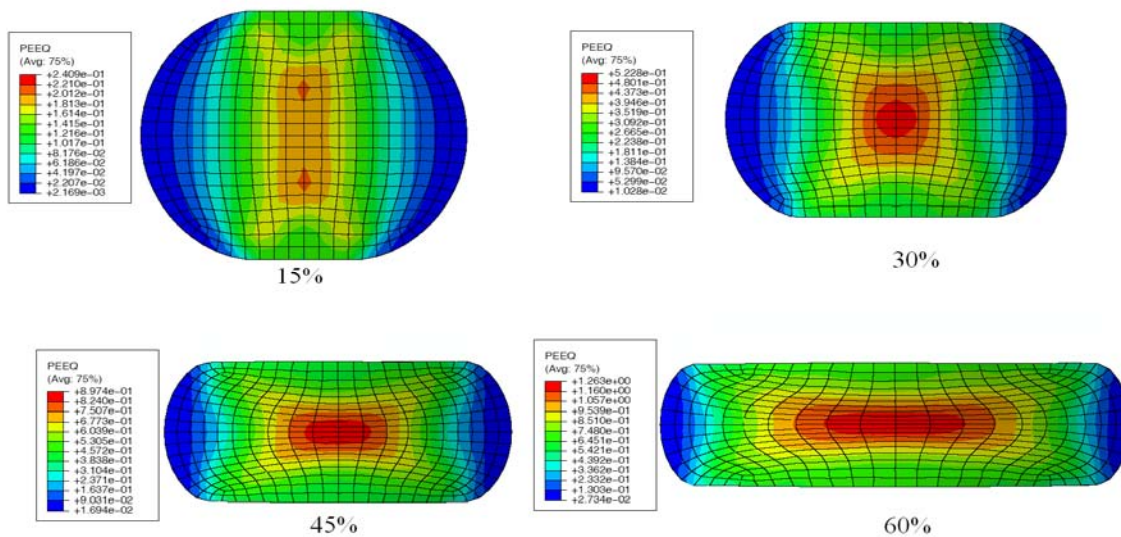
شکل (۲) کرنش معادل در کاهش ارتفاع‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درصد نورد تخت حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

ناهمگنی و نیز بررسی از بین بردن ناهمگنی ایجاد شده حین تغییر فرم ضروری است. تغییر فرم ناهمگن در فرآیندهای بسیاری مانند کشش سیم، اکستروژن و نورد تخت تختال توسط تعیین توزیع سختی و محاسبه‌ی میزان کرنش مطالعه شده است. برای تولید یک سیم تخت همانگونه که در بالا توضیح داده شد، یک سیم از میان غلتک‌ها عبور داده می‌شود تا یک نسبت ضخامت به عرض به دست آید. اما بر خلاف نورد صفحات، در این فرآیند پهن‌شدگی فقط در راستای طول نبوده و در جهت عرضی نیز فلز دچار پهن‌شدگی می‌شود. محققین روابط تجربی و تحلیلی بسیار برای پیش‌بینی هندسه سطح مقطع سیم نورد تخت شده ارائه داده‌اند [۳-۵].

پیش از این محققان به این نتیجه دست یافتند که سختی از مرکز به سمت لبه‌ی سطح مقطع کاهش می‌یابد. این محققین به این نتیجه رسیدند که در یک اندازه دانه اولیه ثابت، با افزایش مقدار تغییر فرم، فاکتور ناهمگنی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج آزمایشات آنها نشان داد که با افزایش دما و یا زمان آنیل، توزیع سختی در سطح مقطع سیم نورد شده، همگن‌تر می‌گردد [۶-۹]. در این پژوهش از فرآیند نورد تخت سیم با کرنش‌های مختلف برای ایجاد تغییر شکل غیر همگن در نمونه‌های برنجی استفاده شده است. نمونه‌ها با مقادیر مختلف کاهش سطح مقطع داده شده‌اند. از طرفی فرآیند نورد تخت سیم توسط نرم‌افزار ABAQUS/Explicit مورد مدلسازی قرار گرفته است. محل‌های صفحات برشی تعیین و همچنین روابط جدیدی برای هندسه سطح مقطع سیم‌های برنجی نورد شده ارائه گردیده است. در این تحقیق پیش‌بینی تغییرات طول توسط ارائه رابطه جدید تجربی نیز انجام شده است.



شکل (۱): مدل شبیه‌سازی شده نورد تخت سیم.



شکل (۲): سطح مقطع و کرنش معادل شبیه‌سازی شده در کاهش ارتفاع‌های مختلف.

نمونه‌های ۳۰ و ۴۵ درصد نورد شده، بیانگر محل خطوط لغزش در سطح مقطع هستند که این محل‌ها همخوانی مناسبی با نتایج شبیه‌سازی (شکل ۲) دارند. همچنین پهنای سیم نورد شده (w_1) و پهنای سطح تخت ایجاد شده روی قطعات (b) اندازه‌گیری شده‌اند و به همراه ابعاد به دست آمده از محاسبات شبیه‌سازی و در قیاس با داده‌های روابط تجربی کوبایشی^۲ [۳] و کاظمی‌نژاد - کریمی‌طاهری [۹]، در نمودار شکل‌های (۴) و (۵) آمده‌اند. البته ماده مورد بررسی توسط محققین مذکور، مس

همان طور که از شکل (۲) مشاهده می‌شود خطوط حداکثر کرنش معادل به صورت ضربدری است که نشان می‌دهد محل خطوط لغزش در روی یکی از این دو خط خواهد بود. خطوط حداکثر کرنش معادل در نمونه‌های با کاهش ارتفاع‌های ۳۰ و ۴۵ درصد مشهودتر است.

در شکل (۳) سطح مقطع و طول قطعات نورد شده مشاهده می‌گردد. از سطح مقطع نمونه ۶۰ درصد، به علت صدمه دیدن نمونه تصویر در دسترس نیست. ترک‌های مایل در سطح مقطع

خالص بوده است. در حالی که در این تحقیق از برنج دوفاز استفاده شده است.

مقایسه نمودارهای شکل (۴)، نشان می‌دهند که میزان پهن شدگی سیم‌های مسی در اثر نورد بیش از سیم‌های برنجی می‌باشد و پیش‌بینی‌های کوبایاشی و نتایج شبیه‌سازی مابین این دو حالت قرار دارند [۶]. البته در کاهش ارتفاع‌های کمتر، هماهنگی بیشتری بین نتایج این پژوهش و محققین پیشین وجود دارد. همچنین هماهنگی خوبی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند نورد و نتایج آزمایش مشاهده می‌شود. در شکل (۵) نیز مشاهده می‌گردد که میزان پهن شدگی منطقه تخت (b₁) سیم‌های مسی در اثر نورد بیش از سیم‌های برنجی می‌باشد و نتایج آزمایشات بر سیم برنجی انطباق بهتری با نتایج شبیه‌سازی با خواص برنج دارند [۶].

کازمی‌نژاد و کریمی‌طاهری معادله تجربی (۱) را برای پیش‌بینی پهنای سیم مسی نورد تخت شده ارائه داده‌اند:

$$\frac{W_1}{W_0} = 1.02 \left(\frac{h_0}{h_1} \right)^{0.45} \quad (1)$$

که در این رابطه W₁ پهنای نهایی و W₀ پهنای اولیه و h₀ ارتفاع اولیه و h₁ ارتفاع نهایی سیم نورد تخت شده هستند. همچنین ایشان رابطه تجربی (۲) را برای پیش‌بینی پهنای منطقه تخت در تماس با غلتک‌ها برای سیم مسی ارائه کرده‌اند:

$$b = 5.3 \sqrt{\Delta h} \quad (2)$$

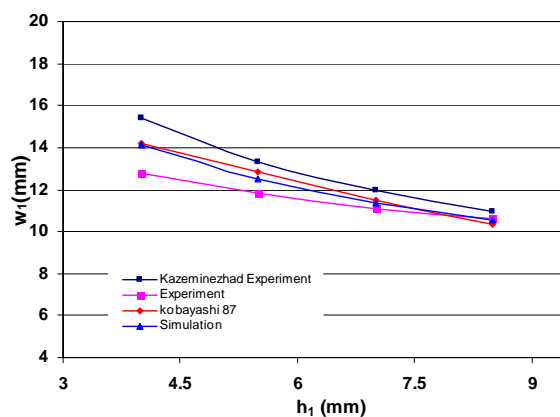
که در رابطه فوق b پهنای منطقه تخت در تماس با غلتک‌ها و Δh میزان کاهش ارتفاع سیم است. به علت عدم تطابق قابل قبول بین نتایج آزمایشات محققین پیشین بر سیم‌های برنجی، رابطه تجربی با ضرایب جدید برای سیم برنجی به روش زیر ارائه گردید. این مسئله به معنای عدم دقت در تحقیقات ایشان نمی‌باشد، بلکه روابط آنها را بر جنس مس محدود کرده است.

برای یافتن ضرایب جدید معادله $\frac{w_1}{w_0} = a \left(\frac{h_0}{h_1} \right)^p$ [۸ و ۹]، منحنی

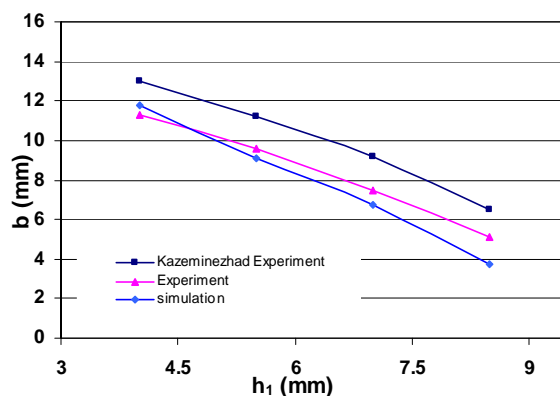
شکل (۶) رسم شده و سپس معادله جدید ثبت شده در شکل، بر آن انطباق داده شده است. در معادله فوق α عدد ثابتی نزدیک به عدد یک است.



شکل (۳): طول و سطح مقطع سیم‌های برنجی نورد شده.



شکل (۴): تغییرات پهنای (w₁) سیم نورد شده نسبت به کاهش ارتفاع.



شکل (۵): تغییرات پهنای منطقه تخت (b₁) سیم نورد شده نسبت به کاهش ارتفاع.

همچنین ضرایب جدیدی برای معادله تجربی پهنای منطقه تخت سیم برنجی با قطر اولیه ۱ سانتی متر و قطر غلتک ۱۳ سانتی متر به صورت شکل (۷) ارائه شده است.

با توجه به نمودار شکل های (۶) و (۷) می توان گفت که معادلات (۳) و (۴) که به صورت تجربی در این پژوهش ارائه شده اند، برای پیش بینی هندسه سطح مقطع سیم برنجی با قطر اولیه ۱ سانتی متر مناسب تر هستند.

$$\frac{w_1}{w_0} = 1.02 \left(\frac{h_0}{h_1} \right)^{0.25} \quad (3)$$

$$b = 4.28 \sqrt{\Delta h} \quad (4)$$

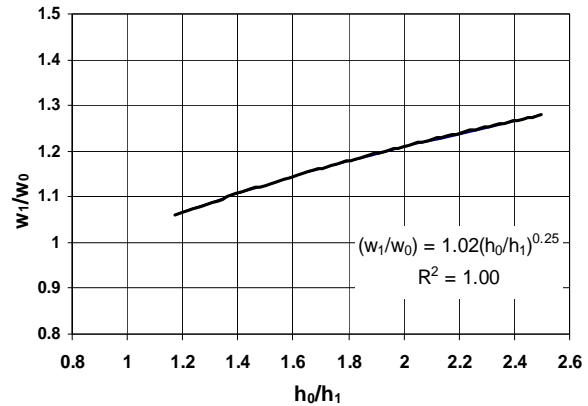
همچنین در این پژوهش برای پیش بینی طول سیم برنجی نورد تخت شده رابطه تجربی جدیدی (رابطه ۵) برای کاهش ارتفاع های بیش از ۲۵ درصد به شرح زیر ارائه گردید که مقایسه نتایج آزمایش و رابطه جدید و شبیه سازی فرآیند در نمودار شکل (۸) مشاهده می شود.

$$L_1 = \frac{\pi h_0^2 L_0}{2h_1(b+w_1)} \quad (5)$$

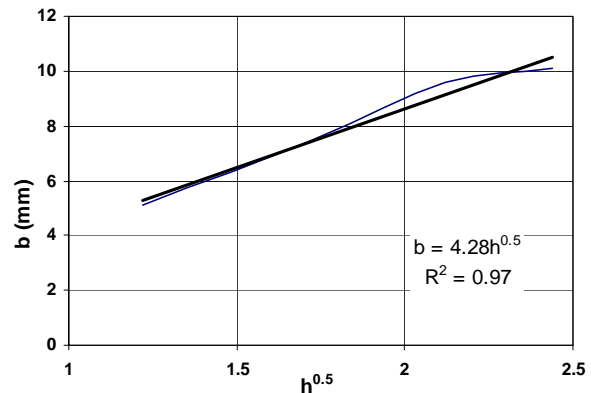
معادله (۵) بر مبنای اصل بقای جرم طراحی و ارائه شده است. در واقع در این رابطه برای به دست آوردن طول نهایی از تساوی حجم ماده پیش و پس از تغییر شکل استفاده شده است. به این ترتیب که حجم ماده پیش از تغییر شکل از رابطه $\pi R^2 L$ محاسبه شده و برای محاسبه حجم پس از تغییر شکل، سطح مقطع به صورت مستطیلی به ارتفاع h_1 و پهنای میانگین $\frac{b+w_1}{2}$ فرض شده است.

بررسی ها نشان می دهد که حداکثر اختلاف بین نتایج شبیه سازی و آزمایشات عملی $\pm 25\%$ و حداکثر اختلاف بین نتایج رابطه تجربی و آزمایشات 13% می باشد. البته میزان این اختلاف در کاهش ارتفاع های بیش از ۲۵ درصد به کمتر از 6% کاهش می یابد.

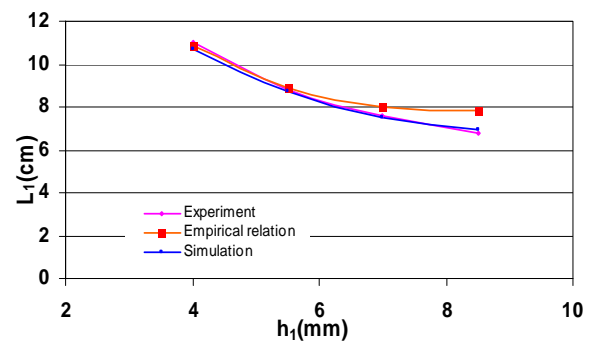
در شکل (۸)، مشاهده می شود که نتایج شبیه سازی و آزمایش همخوانی مناسب داشته و رابطه تجربی ارائه شده در کاهش



شکل (۶): نمودار حاصل از نتایج آزمایش که معادله تجربی محققین پیشین بر آن منطبق شده است.



شکل (۷): نمودار حاصل از نتایج آزمایش و انطباق معادله (۲) بر آن.



شکل (۸): تغییرات طول سیم نورد شده نسبت به کاهش ارتفاع.

- [5] A. Helmi and J. M. Alexander, "Geometric Factors Affecting Spread in Hot Flat Rolling of Steel", J. Iron Steel Inst., pp. 1110-1117, 1968.
- [6] M. Kazeminezhad, A. Karimi Taheri and A. Kiet Tieu, "A Study on the Cross Section Profile of Flat Rolled Wire", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 200, pp. 325-330, 2008.
- [7] C. W. Sinclair, W. J. Poole and Y. Brechet, "A Model for the Grain Size Dependent Work Hardening of Copper", Scripta Materialia, Vol. 55, pp. 739-749, 2006.
- [8] M. Kazeminezhad, A. Karimi Taheri and A. Kiet Tieu, "Utilization of the Finite Element and Monte Carlo Model for Simulating the Recrystallization of Inhomogeneous Deformation of Copper", Computational Materials Science, Vol. 38, pp. 765-773, 2007.
- [9] M. Kazeminezhad and A. Karimi Taheri, "An Experimental Investigation on the Deformation Behavior During Wire Flat Rolling Process", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 160, pp. 313-320, 2005.
- [10] R. Iankov, "Finite Element Simulation of Profile Rolling of Wire", J. Mater. Process. Technol., Vol. 142, pp. 355-361, 2003.

۶- پی نوشت

- 1- Finite Element Method
2- Kobayashi

ارتفاع‌های بیش از ۲۵ درصد، از دقت قابل قبول برخوردار می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

۱- با توجه به نتایج، معادلات تجربی با ضرایب جدید برای نورد سیم برنجی ارائه شد.

۲- هر چند نتایج شبیه‌سازی با دقت بیشتری با نتایج آزمایشات همخوانی دارند، اما روابط تجربی ارائه شده ساده‌تر هستند.

۳- رابطه تجربی جدید ارائه شده برای پیش‌بینی طول سیم نورد شده از دقت قابل قبول برخوردار است.

۴- محاسبه تغییرات طول سیم نورد شده، در کاهش ارتفاع‌های بیشتر، دقیق‌تر است.

۵- مراجع

- [1] M. Kazeminezhad and A. Karimi Taheri, "Deformation Inhomogeneity in Flattened Copper Wire", Materials and Design, Vol. 28, pp. 2047-2053, 2007.
- [2] H. Utsunomiya, P. Hartley and Pillinger, "Three-Dimensional Elastic-Plastic Finite-Element Analysis of the Flattening of Wire between Plain Rolls", J. Manuf. Sci. Eng., Vol. 123, pp. 397-404, 2001.
- [3] M. Kobayashi, "Influence of Rolling Conditions on Spreading in Flat Rolling of Round Wire", J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 19, pp. 630-637, 1978.
- [4] N. R. Chitkara and W. Johnson, "Some Experimental Results Concerning Spread in the Rolling of Lead", J. Basic Eng., pp. 489-499, 1966.