Archive of SID

نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۴، شماره ۳، آذرماه ۱۳۷۹، از صفحه ۴۵ تا ۵۷

طراحی لوح اولیهٔ ورق قطعات نامنظم و محاسبهٔ نیروی سمبه در مراحل مختلف کشش عمیق

پیام حیدری متین
فارغ التحصیل کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی مکانیک - دانشکدهٔ فنی - دانشگاه تهران
محمد حبیبی پارسا
استادیار گروه مهندسی متالورژی و مواد - دانشکدهٔ فنی - دانشگاه تهران
محمود موسوی مشهدی
دانشیار گروه مهندسی مکانیک دانشکدهٔ فنی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۸/۳/۱۸ ، تاریخ تصویب ۷۹/۷/۹)

چکیده

برای انجام عملیات کشش عمیق[1] یک ورق و تبدیل آن به قطعهٔ منشوری نامنظم[2] از قبل طراحی شده، باید شکل اولیه ورق (لوح[3])، درست طراحی شود. در غیر اینصورت، محصول نهایی سالمی تولید نخواهد شد. پس طراحی شکل لوح دارای اهمیت خاصی است. لوح را می‌توان با روشهای تجربی و یا محاسباتی، طراحی نمود، که روش محاسباتی، دارای مزایای بسیاری است. در این مقاله با استفاده از میدان خطوط لغزش[4] و باکمک مشخصات هندسی قالب، از قبیل زوایا و شعاع گوشه‌ها، طول اضلاع و ارتفاع کشش، روشی جدید جهت طراحی لوح اولیه ارائه گردیده است. در این روش کاملاً جدید، یک شبکهٔ اورتوگونال هم سطح[5] ، پیرامون قالب، تشکیل شده و بدین ترتیب منحنیهای جریان فلز و منحنیهای حرکت لوح، بدست آمده‌اند. سپس با کمک مشخصات مواد و استفاده از این شبکهٔ اورتوگونال هم سطح، نیروی سمبه در طول فرآیند کشش عمیق، حساب شده است. براساس روشهای ذکر شده، نرم‌افزاری نوشته شده که قادر است، شکل لوح، منحنیهای جریان فلز، منحنی‌های حرکت لوح و نیروی سمبه را با سرعتی مناسب و دقتی قابل قبول بدست دهد.

واژه های کلیدی : میدان خطوط لغزش، شکل اولیه لوح، کشش عمیق

مقدمه

برای انجام عملیات کشش عمیق ورق و تبدیل آن به قطعهٔ منشوری نامنظم از قبل طراحی شده، باید شکل اولیهٔ ورق (لوح)، درست طراحی شود. در غیر اینصورت، محصول نهایی، سالم تولید نخواهد شد. لوح را می‌توان به روشهای تجربی (سنتی) و یا محاسباتی، طراحی نمود. روش سنتی، برای پیدا کردن شکل لوح، روش سعی و خطا است، که مستلزم صرف وقت زیاد و دور ریز کردن مقدار قابل توجهی ورق اولیه می‌باشد، که باعث بالاتر رفتن هزینه‌ها می‌شود. پس استفاده کردن از یک روش محاسباتی، و بکارگیری آن در یک نرم‌افزار، می‌تواند، از هدررفتن وقت و مواد اولیهٔ ورق، جلوگیری کرده و هزینه‌ها را کاهش دهد. روشهای محاسباتی موجود، برای طراحی شکل لوح، عبارتند از، روش المان محدود[6]، روش تفاضل محدود[7] و روش تئوری میدان خطوط لغزش. استفاده از تئوری میدان خطوط لغزش، بدلیل سرعت زیاد و دقت قابل قبول آن، معقول‌تر است. روشهای متفاوتی بر پایهٔ این تئوری، توسط اشخاص مختلف، برای طراحی شکل اولیهٔ لوح، ابداع شده است. تعدادی از این روشها بدلیل انجام یک سلسله محاسبات وقتگیر مانند، محاسبهٔ میدان سرعت، محاسبهٔ منحنیهای جریان فلز و محاسبهٔ منحنیهای حرکت لوح [۱][۲] و یا ایجاد شبکهٔ اورتوگونال هم سطح [۳]، قبل از بدست آوردن لوح، از سرعت مناسبی برخوردار نبوده و دارای پیچیدگی خاصی هستند. روش Longe [۴]، اگر چه نسبتاً ساده و سریع است ولی بدلیل اینکه، شرط تراکم ناپذیری، فقط بروی یک گوشه از قطعهٔ تولیدی اعمال شده است، دقت چندانی ندارد. در این مقاله، روشی ارائه گردیده که با اعمال شرط تراکم ناپذیری برای کل قطعه و با ایجاد یک روش جستجوی جدید، برای منحنیی که شرط تراکم‌ناپذیری را ارضاء می‌کند، روش Longe اصلاح شده و دقت حاصل افزایش می‌یابد.

www.SID.ir

Archive of SID

سپس از این خاصیت که "با ایجاد یک شبکهٔ اورتوگونال هم سطح در منطقهٔ لبهٔ قطعه، منحنیهای جریان فلز و منحنیهای حرکت لوح، بدست می‌آیند. [۵]"، استفاده شده و روشی ساده و جدید برای ایجاد شبکه‌ای اورتوگونال و هم سطح ابداع شده است. بدین ترتیب، منحنیهای جریان فلز و حرکت لوح، بدست آمده‌اند. در نهایت با بکارگیری اصل کار مجازی، و با استفاده از شبکهٔ هم سطح ایجاد شده، نیروی سمبه در مراحل مختلف کشش عمیق، محاسبه شده است.

روش تحقیق

فرضیات

۱ ـ رفتار ماده صلب پلاستیک [۸] و ایزوتروپیک [۹] است.

۲ ـ در طول عملیات کشش عمیق، تغییر در ضخامت ورق، بسیار ناچیز بوده و شرایط کرنش صفحه‌ای [۱۰] برقرار است.

۳ ـ منحنی دهانهٔ ورودی قالب، بر یک منحنی تنش اصلی مینیمم منطبق است [۵].

۴ ـ منحنی لبهٔ لوح، نیز، بر یک منحنی تنش اصلی مینیمم منطبق است [۴].

۵ ـ حجم ورق، قبل و بعد از تغییر شکل ثابت است. (شرط تراکم ناپذیری [۱۱])

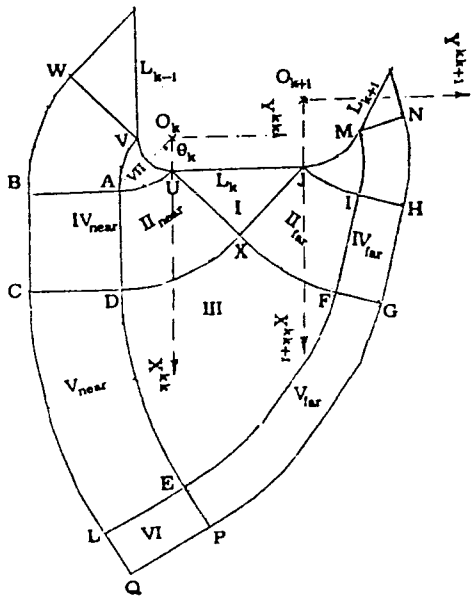
۶ ـ المانهای ورق در لحظهٔ رسیدن به دهانهٔ ورودی قالب، دارای سرعتی معادل با سرعت سمبه بوده و در جهت عمود بر منحنی دهانهٔ ورودی قالب، حرکت می‌کنند [۵].

تعریف خطوط لغزش

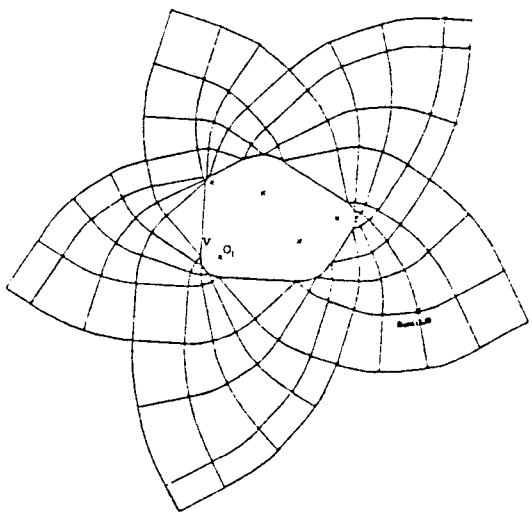
جفت منحنیهایی که در هر نقطه از صفحهٔ xy، بر هم عمود بوده و جهات آنها، منطبق بر جهات تنش برشی ماکزیمم می‌باشد، منحنیهای خطوط لغزش می‌باشند. پس واضح است که جهات تنشهای اصلی، در هر نقطه از صفحهٔ xy، با جهات خطوط لغزش، ۴۵ درجه اختلاف دارد. با برقرار بودن فرضهای (۱) و (۲) و (۵)، می‌توان از تئوری میدان خطوط لغزش استفاده نمود [۶].

بدست آوردن میدان خطوط لغزش پیرامون قالب

شکل (۱) را در نظر بگیرید. منحنی دهانهٔ ورودی قالب، چند ضلعی بسته‌ای است که از اضلاع و گوشه‌های متفاوتی، تشکیل شده است. با توجه به فرض (۳)، هر ضلع از قالب، به دو خط لغزش مستقیم و هر گوشه از آن، به دو خط لغزش اسپیرال لگاریتمی، ـ که زاویهٔ ۴۵° با منحنی قالب می‌سازند ـ محدود می‌شود [۸] و به ترتیب ناحیه‌های صلب I [۱۲] و ناحیه‌های کشش VII [۱۳] بوجود می‌آید. با معلوم شدن مرزهای این نواحی و با بکارگیری روابط تفاضل محدود Hill [۶]، ابتدا نواحی گذرا II_{near} [۱۴] و II_{far} و سپس ناحیهٔ کشش III محاسبه می‌شود. در مرحلهٔ بعد، پس از تعیین مرز نواحی صلب IV_{near} و IV_{far} ، بطریق مشابه، نواحی گذرای V_{near} ، V_{far} بدست آمده و در نهایت ناحیهٔ صلب VI محاسبه می‌گردد. بدین ترتیب میدان خطوط لغزش پیرامون قالب، مانند شکل (۲)، ساخته می‌شود.



شکل ۱: میدان خطوط لغزش مربوط به یک ضلع.



شکل ۲: میدان خطوط لغزش ساخته شده، پیرامون قالب .

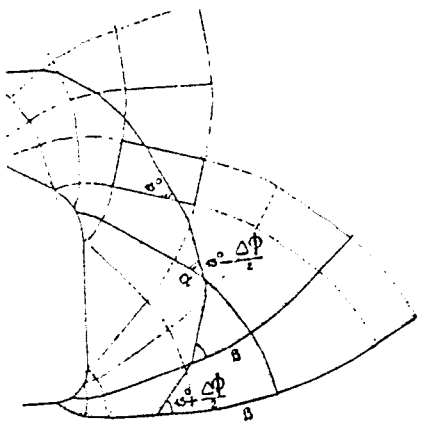
ترسیم یک منحنی تنش اصلی مینیمم و محاسبهٔ سطح داخلی آن

با توجه به مطالب ذکر شده، می‌توان با ترسیم مجموعه‌ای از

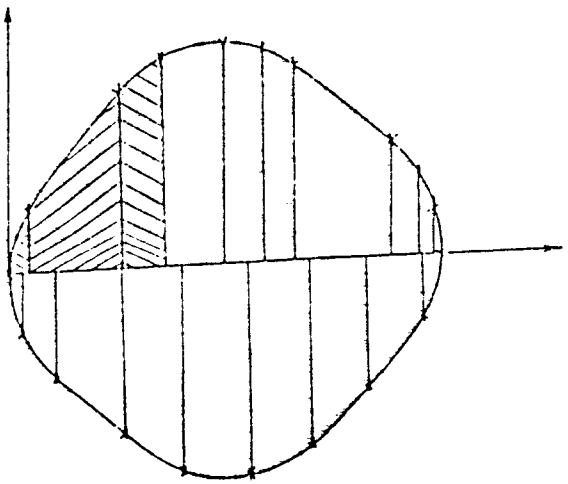
www.SID.ir

Archive of SID

خطوط مستقیم، پیرامون قالب، که در نقاط تقاطع با هر دو منحنی خط لغزش مجاور، زاویه‌ای نزدیک به ۴۵ درجه می‌سازند، به یک منحنی تنش اصلی مینیمم دست یافت [۷]. (شکل ۳). با پیدا کردن دو نقطه‌ای از این منحنی که بیشترین فاصله را از هم دارند و با قراردادن یکی از محورهای مختصات بروی خط واصل آندو، می‌توان سطوح مثلثی و ذوزنقه‌ای را محاسبه نمود و با جمع زدن آنها، سطح داخلی منحنی تنش اصلی مینیمم را بدست آورد [۷]. (شکل ۴)



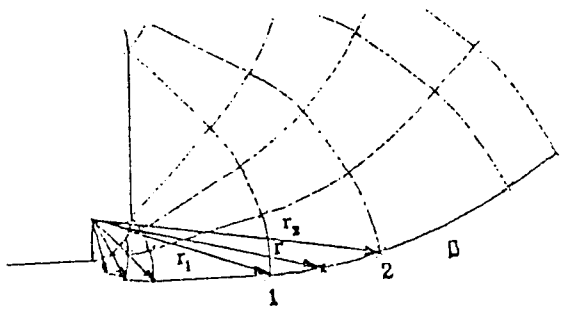
شکل ۳: چگونگی ترسیم یک منحنی تنش اصلی مینیمم.



شکل ۴: چگونگی محاسبهٔ سطح داخلی یک منحنی تنش اصلی مینیمم.

محاسبهٔ سطح لوح اولیه از روی سطح قطعهٔ تولیدی

با توجه به فرضهای (۵) و (۲)، می‌توان گفت که سطح لوح اولیهٔ ورق، همان سطح قطعهٔ تولیدی می‌باشد [۷]. قطعهٔ تولیدی از سه قسمت کف [۱۵]، دیواره [۱۶] و لبه [۱۷]، تشکیل شده است. با کمک مشخصات هندسی قالب، از جمله طول اضلاع، شعاع و زوایای گوشه‌ها، سطح کف قطعهٔ تولیدی محاسبه شده و سپس با کمک ارتفاع کشش، شعاع دهانهٔ ورودی قالب و شعاع سمبه، سطح دیوارهٔ آن محاسبه می‌گردد. سپس با استفاده از شکل هندسی لبه، سطح آن نیز، حساب می‌شود. با جمع کردن این سطوح، سطح لوح اولیه (A_{blank}) ، بدست می‌آید.



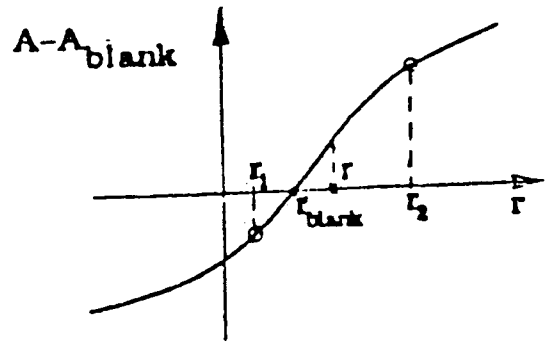
شکل ۵: محدودهٔ قطعی عبور لوح اولیهٔ ورق.

انتخاب لوح اولیهٔ ورق

با توجه به فرض (۴) واضح است که با ترسیم یک منحنی تنش اصلی مینیمم که سطح داخلی آن، همان سطح لوح اولیه (A_{blank}) باشد، می‌توان به منحنی لوح دست یافت. برای این منظور، ابتدا با اعمال شرط تراکم ناپذیری برای اولین گوشه از قالب، شعاع اولیهٔ تقریبی، محاسبه می‌شود [۴][۷]، تا محدوده‌ای از اولین خط لغزش β، که احتمالاً لوح اولیه از آن عبور می‌کند، حدس زده شود. سپس با رسم منحنیهای تنش اصلی مینیمم از هر دو نقطهٔ متوالی بروی همین خط لغزش، و با شروع از محدودهٔ حدسی، پاره خطی از این خط لغزش جستجو می‌گردد که سطوح منحنیهای تنش اصلی مینیمم رسم شده از ابتدا و انتهای آن، بترتیب از سطح لوح اولیه (A_{blank}) ، کوچکتر و بزرگتر، باشند. بدین ترتیب محدوده‌ای دقیق از اولین خط لغزش β، که لوح قطعاً از آن می‌گذرد، بدست آورده می‌شود. (محدودهٔ 2-1 شکل ۵). در این محدوده سطح داخلی هر منحنی تنش اصلی مینیمم (A)، تابعی صعودی از شعاع اولیه برای شروع ترسیمات (r) ، می‌باشد. برای بدست آوردن لوح اولیهٔ ورق، مناسبترین r ، شعاعی است که سطح منحنی تنش اصلی مینیمم متناظر با آن (A)، همان سطح لوح اولیه (A_{blank}) ، باشد پس می‌توان با اعمال روش دو بخشی [۱۸]، برای تابع $A-A_{blank}$ ، در محدودهٔ 12 ، بسوی ریشهٔ آن همگرا شد و سطح لوح اولیهٔ را بدست آورد [۷]. (شکل ۷)

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۶: روش دو بخشی برای همگرا شدن به سمت شعاعی که لوح از آن می‌گذرد.

بدست آوردن منحنیهای حرکت لوح و منحنیهای جریان فلز

با شروع فرآیند کشش عمیق، منحنی لوح، در مراحل مختلف کشش به سمت منحنی قالب حرکت می‌کند. در این مراحل منحنی لوح، بروی منحنیهای تنش اصلی مینیمم قرار می‌گیرد. از طرفی هر نقطه از منحنی لوح، در طول مراحل مختلف کشش، در جهت عمود بر لوح، به سمت قالب حرکت می‌کند. پس می‌توان گفت که مسیرهای جریان فلز، در طول فرآیند کشش عمیق، منحنیهایی هستند که، بر منحنیهای حرکت لوح (منحنیهای تنش اصلی مینیمم) عمودند. پس با ایجاد یک شبکهٔ اورتوگونال پیرامون قالب، می‌توان به منحنیهای حرکت لوح و منحنیهای جریان فلز دست یافت. برای اینکه محاسبهٔ نیروی سمبه، در مراحل مختلف کشش عمیق، امکان پذیر باشد، باید این شبکهٔ اورتوگونال، شبکه‌ای با خانه‌هایی هم سطح باشد. مراحل روشی که برای بدست آوردن منحنیهای حرکت لوح و منحنیهای جریان فلز، در قالب شبکه‌ای هم سطح، ابداع شده است، چنین می‌باشد [۷]:

۱ - ابتدا باید منحنیهای تنش اصلی مینیمم، در محدودهٔ بین قالب و لوح، بگونه‌ای رسم شوند که سطح بین آنها، دو به دو، با هم برابر باشد تا منحنیهای حرکت لوح بدست آیند. (شکل ۷)

۲ - باید تقاطع عمود و منصفهای اضلاع مختلف قالب، با منحنیهای حرکت لوح، محاسبه گردد. (شکل ۸)

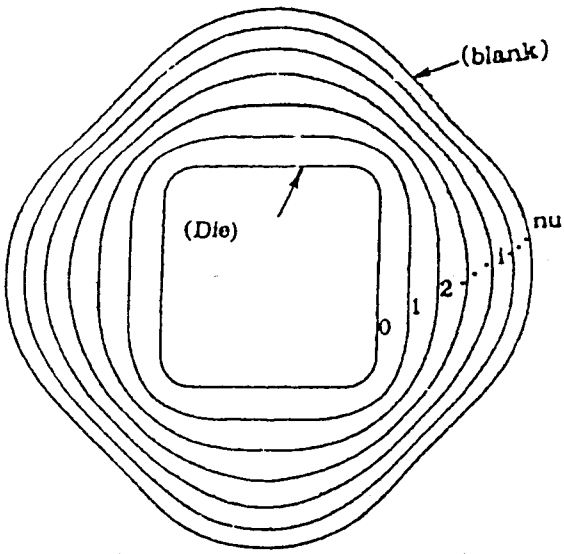
۳ - باید تقاطع نیمسازهای گوشه‌های مختلف قالب، با منحنیهای حرکت لوح، محاسبه گردد. (شکل ۹)

۴ - باید نوار مجاور به قالب، که از منحنی تنش اصلی مینیمم اول و منحنی قالب تشکیل شده است، به سطوحی از مستطیل و قطاعهایی حلقوی از دایره، مدل شود. (شکل ۱۰)

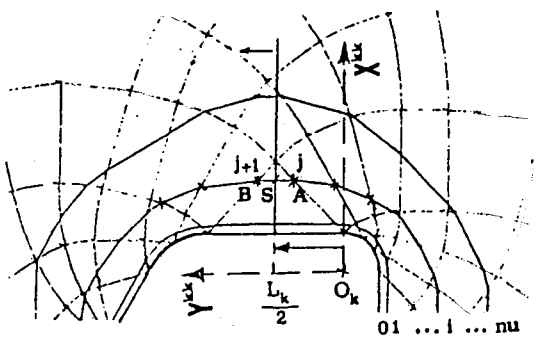
۵ - باید نوار مدل شده، به خانه‌هایی هم سطح تقسیم شود تا نقاطی از منحنیهای جریان فلز که بروی منحنی تنش اصلی مینیمم اول، قرار دارند، بدست آیند. (شکل ۱۱)

۶ - باید در محدوده‌های بین عمود و منصفهای اضلاع قالب و نیمسازهای گوشه‌های قالب، از نقاط تقسیم شدهٔ منحنی تنش اصلی مینیمم اول، به منحنی تنش اصلی مینیمم دوم، عمود کرد. بدین ترتیب نقاطی از مسیرهای جریان فلز که بروی منحنی تنش اصلی مینیمم دوم، قرار دارند، بدست خواهند آمد. (شکل ۱۲)

۷ - مجدداً مرحلهٔ (۶)، از نقاط بدست آمده بروی منحنی تنش اصلی مینیمم دوم، به سوی منحنی تنش اصلی مینیمم سوم، تکرار میشود. این روند، تا هنگام رسیدن به منحنی لوح ادامه می‌یابد تا نقاط روی منحنیهای جریان فلز، در مراحل مختلف محاسبات، تکمیل شوند. (شکل ۱۳)



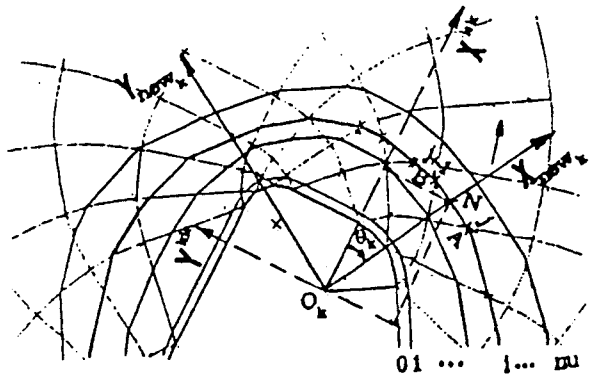
شکل ۷: منحنیهای حرکت لوح به سمت قالب.



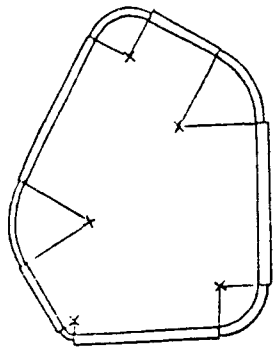
شکل ۸: تقاطع عمود منصفهای اضلاع قالب با منحنیهای حرکت لوح.

www.SID.ir

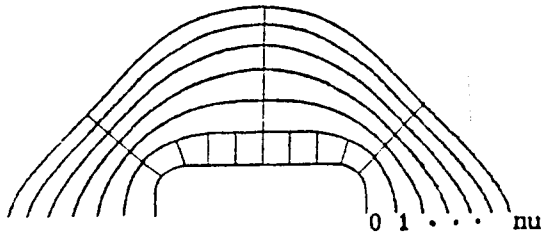
Archive of SID



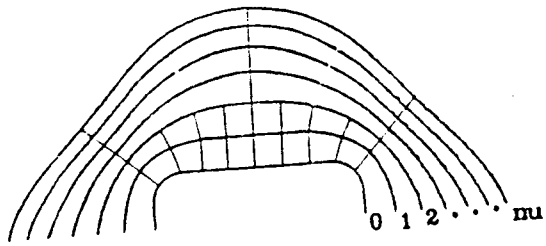
شکل ۹: تقاطع نیمسازهای گوشه‌های قالب با منحنیهای حرکت لوح .



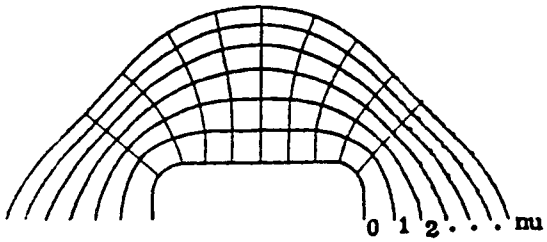
شکل ۱۰: مدل کردن نوار مجاور به قالب به سطوحی منظم.



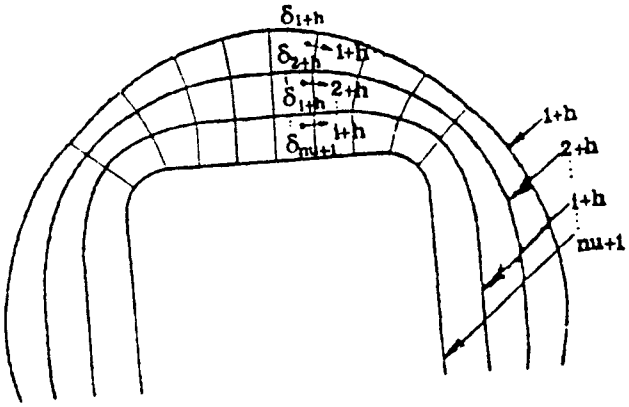
شکل ۱۱: تقسیم نوار مجاور به قالب به خانه‌هایی هم سطح .

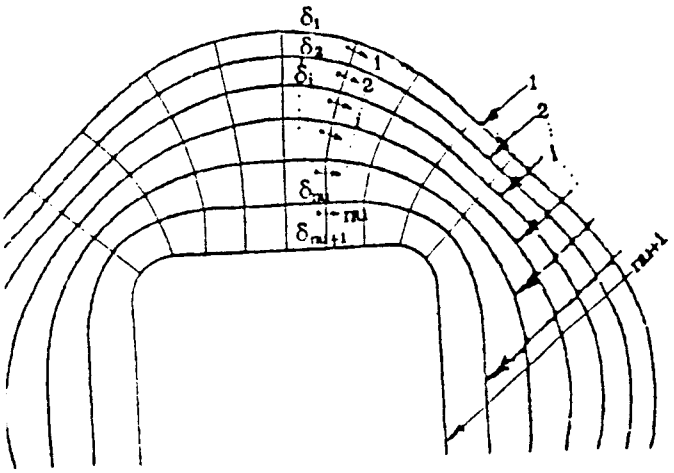


شکل ۱۲: ترسیم عمود از منحنی تنش اصلی مینیمم‌اول.



شکل ۱۳: ترسیم عمود به منحنیهای تنش اصلی مینیمم بالاتر.





شکل ۱۴: الف) لوح اولیهٔ ورق قبل از شروع عملیات کشش عمیق .
ب) لوح اولیهٔ ورق پس از h مرحله از کشش.

محاسبهٔ نیروی سمبه در مراحل مختلف کشش

در عملیات کشش عمیق، قسمت اعظم انرژی سمبه[۱۹] ، صرف کشش ورق شده و مابقی آن باعث خمش ورق در دهانهٔ ورودی قالب و نیز غلبه بر نیروی اصطکاک ناشی از ورقگیر[۲۰]، می‌گردد. با بکارگیری اصل کار مجازی[۲۱] می‌توان نیروی سمبه را در هر مرحله از

www.SID.ir

Archive of SID

کشش محاسبه نمود [۱]:

$$\int f du = \int \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} dv + \int M d\theta ds + W_f \quad (۱)$$

=کارنیروی سمبه

تلفات اصطکاک ورقگیر + انرژی خمشی ورق در دهانهٔ قالب + انرژی کرنشی کششی ورق

با در نظر گرفتن $\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^{n_1}$، اولین انتگرال بصورت زیر در می‌آید [۱][۷]:

$$W_h = \int \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} dv = \sum_{i=1}^{m_1} \frac{K}{n_{1}+1} \left(\bar{\varepsilon}_{2e_i}^{n_1+1} - \bar{\varepsilon}_{1e_i}^{n_1+1} \right) t . A_{inc} \quad (۲)$$

که t ضخامت ورق اولیه، A_{inc} سطح المان کوچک ورق (سطح هر خانهٔ شبکهٔ اورتوگونال هم سطح) بوده و $\bar{\varepsilon}_{1ei}$ ، $\bar{\varepsilon}_{2ei}$ کرنشهای معادل اولیه و ثانویهٔ المان i ام، پس از h امین مرحله، از کشش می‌باشند. با انجام h مرحله از کشش، شکل (۱۴-الف) تبدیل به شکل (۱۴-ب) می‌گردد. با توجه به این شکل کرنشهای اولیه و ثانویه قابل محاسبه هستند [۷]:

$$\bar{\varepsilon}_{1e_i} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{\delta_i}{\delta_{i+(h-1)}} \quad (۳)$$

$$\bar{\varepsilon}_{2e_i} = \frac{2}{\sqrt{3}} Ln \frac{\delta_i}{\delta_{i+h}} \quad (۴)$$

δ_i = طول اولیه المان iام قبل از شروع عملیات کشش

$\delta_{i+(h-1)}$ = طول ثانویهٔ المان iام قبل از شروع hامین مرحله از کشش

δ_{i+h} = طول ثانویهٔ المان iام پس از hامین مرحله از کشش

با کمک روابط (۳) و (۴)، و با تغییر i برای تمام المانهایی که در h امین مرحله از کشش، کرنشی را پیرامون قالب، تجربه میکنند، مجموع(۲) محاسبه می‌شود. با تقسیم این انرژی به میزان جابجایی سمبه. قسمتی از نیروی سمبه که باعث کشش ورق می‌شود، محاسبه می‌گردد [۷]. نیروی ناشی از خمش در دهانهٔ ورودی قالب، به کمک کرنشهای معادل المانهای مجاور به قالب، قابل محاسبه بوده [۷][۹] و نیروی اصطکاک ناشی از ورقگیر نیز به کمک ضرایب اصطکاک بین ورق و ورقگیر و نیز ورق و قالب، قابل محاسبه است. با جمع نمودن این نیروهای محاسبه شده، نیروی سمبه در h امین مرحله از کشش بدست می‌آید.

نتایج و بحث

در این قسمت ابتدا نتایج حاصل از محاسبات میدان خطوط لغزش ارائه شده و سپس اثر پارامترهایی چون تقریب محاسبهٔ سطح داخلی منحنیهای تنش اصلی مینیمم (A_{per})، دقت میدان خطوط لغزش ($\Delta\phi$)، عدد اصلاحی (mod) و ارتفاع کشش (h)، بروی خطای لوح اولیهٔ ورق بررسی می‌گردد. در ادامه به نتایج محاسبات منحنیهای حرکت لوح و منحنیهای جریان فلز اشاره شده و در نهایت اثر پارامترهای مختلفی چون، ضریب مقاومت ماده (K)، ضریب کار سختی (n_1)، ارتفاع کشش (h)، ضریب اصطکاک بین ورق و قالب (μ_d)، ضریب اصطکاک بین ورق و ورقگیر (μ_b)، نیروی خمشی و نیروی ورقگیر، بروی نیروی سمبه بررسی خواهد شد.

نتایج محاسبات میدان خطوط لغزش

شباهت و همخوانی میدان خطوط لغزش بدست آمده با نتایج افراد دیگر، مؤید صحیح بودن روش و الگوریتم بکار گرفته شده، می‌باشد. بررسی‌های بعمل آمده، نشان می‌دهد که با کوچکتر شدن زاویهٔ $\Delta\phi$ (زاویه‌ای که بکمک آن میدان خطوط لغزش، ساخته می‌شود [۶]) و نیز با افزایش تعداد اضلاع قالب (N)، حجم حافظهٔ اشغالی از کامپیوتر، بیشتر شده و زمان محاسبات، افزایش می‌یابد.

نتایج محاسبات لوح اولیه ورق

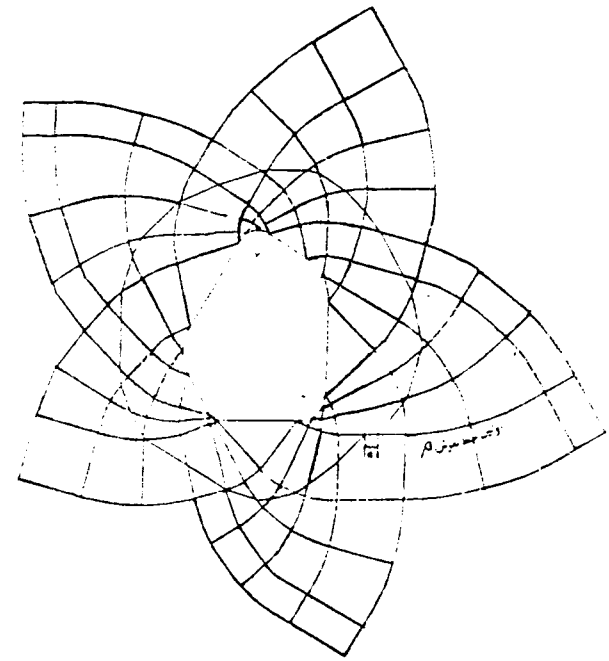
با ترسیم خطوطی که، زاویه‌ای نزدیک به ۴۵°، با میدان خطوط لغزش می‌سازند ($45^\circ + \frac{\Delta\phi}{2}$ یا $45^\circ - \frac{\Delta\phi}{2}$)، و تا رسیدن مجدد به اولین خط لغزش β، نقطه‌ای بروی این خط لغزش بدست می‌آید که مقداری با نقطهٔ شروع ترسیمات، فاصله دارد. این فاصله بخاطر خطای محاسبات و نیز خطای خطوط مدل شده، از منحنی تنش اصلی مینیمم واقعی متناظر با لوح، می‌باشد. این فاصله، که یک معیار سنجش خطا است، فاصلهٔ خطایی [۲۲] (d) نامیده شده (شکل ۱۵) و در صورت مینیمم شدن خطای محاسبات، صفر می‌گردد. در این بخش اثر پارامترهای مختلف، بروی این معیار، بررسی می‌گردد.

www.SID.ir

Archive of SID

اثر تقریب محاسبهٔ سطح داخلی منحنیهای تنش اصلی مینیمم (A_{per} یا ε)

بررسی‌های بعمل آمده، نشان می‌دهد که با افزایش تقریب محاسبهٔ سطح داخلی منحنی‌های تنش اصلی مینیمم (A_{per} یا ε) (کاهش دقت محاسبهٔ سطح داخلی)، فاصلهٔ خطایی (d)، به میزان نامحسوسی افزایش می‌یابد. این مطلب برای قالبی چهار ضلعی در شکل (۱۶) و برای قالبی پنج ضلعی در شکل (۱۷)، برای میدانهای



شکل ۱۵: معرفی فاصلهٔ خطایی بعنوان معیار سنجش خطا.

خطوط لغزشی با 15° و 5° و 3° و $1^{\circ}=\Delta\phi$، نشان داده شده است.

اثر دقت میدان خطوط لغزش ($\Delta\phi$)

پس از تحلیلهای انجام شده، مشخص گردید که افزایش دقت میدان خطوط لغزش (کاهش زاویهٔ $\Delta\phi$)، بسته به شکل هندسی قالب، می‌تواند، موجب کاهش و یا افزایش دقت لوح اولیه ورق گردد. برای قالبهای چهار ضلعی و پنج ضلعی، با کاهش $\Delta\phi$، فاصلهٔ خطایی (d)، کم شده (بترتیب شکلهای ۱۸ و ۲۰) و منحنیهای لوح، رفته رفته، بروی هم منطبق می‌شوند (شکل ۱۹) ولی برخلاف انتظار برای قالبهای شش ضلعی، با کاهش $\Delta\phi$، فاصلهٔ خطایی (d)، زیاد شده (شکل ۲۱) و منحنیهای لوح، رفته‌رفته، از هم فاصله می‌گیرند. علت آنست که در شش ضلعی، تعداد نواحی کشش زیاد است، پس در صورت افزایش دقت میدان خطوط لغزش، تعداد برخوردهای منحنی لوح با میدان خطوط لغزش، در این نواحی افزایش یافته و در نتیجه فاصلهٔ خطایی افزایش می‌یابد. در اشکالی که تعداد نواحی کشش کم باشد، برخوردها بیشتر در نواحی صلب و گذرا صورت می‌گیرند، پس عکس رفتار ذکر شده مشاهده می‌گردد. پس کاهش زاویهٔ $\Delta\phi$، بتنهایی برای بالاتر بردن دقت لوح اولیهٔ ورق، کافی نیست.

اثر عدد اصلاحی (mod)

با ترسیم خطوط راست $\frac{\Delta\phi}{\text{mod}} + 45^{\circ}$ ، $45^{\circ} - \frac{\Delta\phi}{\text{mod}}$، مدلی کلی‌تر، برای منحنی تنش اصلی مینیمم واقعی بدست می‌آید. با تغییر عدد mod در حوالی عدد ۲ می‌توان فاصلهٔ خطایی را تغییر داد و حتی آنرا مینیمم نمود و بدین ترتیب به منحنی تنش اصلی مینیمم واقعی نزدیک شد. عدد mod در واقع یک عدد اصلاحی [۲۳] می‌باشد.

با بررسی‌های انجام شده، مشخص گردید که فاصلهٔ خطایی (d)، با تغییر عدد اصلاحی (mod)، بصورت صعودی و یا نزولی تغییر کرده و در عدد اصلاحی خاصی، تبدیل به صفر می‌شود. شکلهای (۲۲) و (۲۳)، تغییرات فاصلهٔ خطایی را بر حسب عدد اصلاحی (mod)، برای میدانهای خطوط لغزشی با $\Delta\phi$ های متفاوت، بترتیب برای قالبهایی پنج ضلعی و شش ضلعی، نشان می‌دهد. این دو شکل بیانگر این واقعیت است که برای هر $\Delta\phi$ (حتی $\Delta\phi$های بزرگ مثل 15°)، می‌توان عدد اصلاحی خاصی یافت که به ازای آن، فاصلهٔ خطایی، ناچیز و نزدیک به صفر شود و لوحی بهینه بدست آید.

بررسی‌های انجام شده، نشان می‌دهد که لوحهای بهینه‌ای که، با تغییر عدد اصلاحی (mod)، در میدانهای خطوط لغزشی با $\Delta\phi$های متفاوت، حاصل شده‌اند، به یکدیگر بسیار نزدیک بوده و کاملاً بروی هم منطبقند. بنابراین در صورتیکه $\Delta\phi$ و mod، تواماً مناسب اختیار شوند، شکل منحنی لوح بهینه، مستقل از دقت میدان خطوط لغزش خواهد بود.

از آنجاییکه منحنیهای لوح بهینه، برای $\Delta\phi$های متفاوت، تقریباً یکسان بوده و بروی هم منطبقند، پس با بکارگیری $\Delta\phi$ های نسبتاً بزرگ (میدانهای خطوط لغزش کم دقت‌تر)، نیز می‌توان به لوحهای بهینه‌ای رسید که دقت مناسبی داشته باشند.

در اینصورت حجم محاسبات کمتر شده و در نتیجه زمان و حافظهٔ کمتری از کامپیوتر گرفته می‌شود. در ضمن بخاطر اینکه لوح بهینه با تعداد کمتری از نقاط، بدست آمده است، پیاده کردن آن توسط کارگر بروی ورق، آسانتر و سریعتر خواهد بود.

www.SID.ir

Archive of SID

اثر ارتفاع کشش

بررسی‌های بعمل آمده نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع کشش، فاصلهٔ خطایی (d) تغییر می‌کند ولی این تغییرات منظم و قانونمند نیست. شکلهای (۲۴) و (۲۵) ، تغییرات فاصلهٔ خطایی را بر حسب ارتفاع کشش، بترتیب برای قالبهایی پنج ضلعی و شش ضلعی، نشان می‌دهد. علت این تغییرات نامنظم، می‌تواند به کمک نواحی کشش توجیه شود. اگراکثر تقاطعها در نواحی کشش صورت گیرد، فاصلهٔ خطایی نسبتاً زیاد است در غیر اینصورت فاصلهٔ خطایی کم خواهد بود.

با بررسی‌های انجام شده، مشخص گردید که حتی در ارتفاع کشش نسبتاً زیاد نیز، برای هر $\Delta\phi$ (حتی برای $\Delta\phi$های بزرگ) می‌توان عدد اصلاحی خاصی یافت که به ازای آن، فاصلهٔ خطایی و در نتیجه خطای لوح اولیهٔ ورق، ناچیز شود و لوحی بهینه بدست آید.

حداقل کردن فاصلهٔ خطایی (d)، با بکارگیری روش دو بخشی

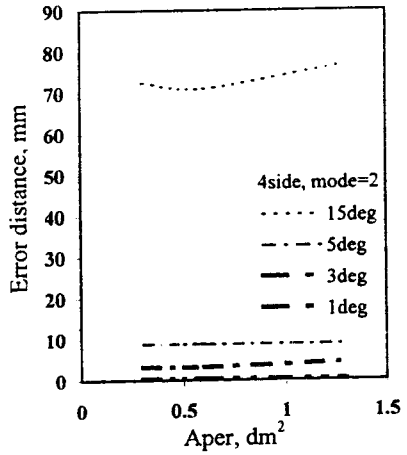
از آنجاییکه فاصلهٔ خطایی هر منحنی تنش اصلی مینیمم (d)، تابعی صعودی و یا نزولی، از عدد اصلاحی (mod) می‌باشد، و برای بدست آوردن لوح بهینهٔ ورق، مناسبترین عدد اصلاحی، عددی است که فاصلهٔ خطایی متناظر با آن (d)، صفر شود، پس می‌توان با بکارگیری روش دو بخشی [۲۴] بروی تابع d ، به سوی ریشهٔ آن (mod_{blank}) همگرا شد و لوحی بهینه را بدست آورد. بدین ترتیب همگرایی به سمت لوحی بهینه (لوحی که فاصلهٔ خطایی آن صفر باشد) سریعاً، صورت می‌گیرد.

حداقل کردن خطا در سطح داخلی لوح (A)، با بکارگیری روش دو بخشی

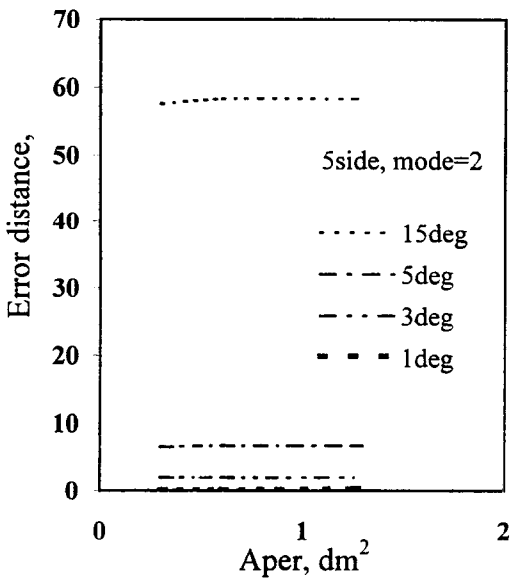
بکارگیری روش دو بخشی بروی تابع سطح داخلی منحنیهای تنش اصلی مینیمم (A) ، سبب شده است که همگرایی به سمت منحنیی که سطح داخلی آن همان سطح لوح (سطح قطعهٔ تولیدی) است، با تقریبی مناسب، خطایی کم و سرعتی زیاد، صورت گیرد.

نتایج محاسبات منحنیهای حرکت لوح و منحنیهای جریان فلز

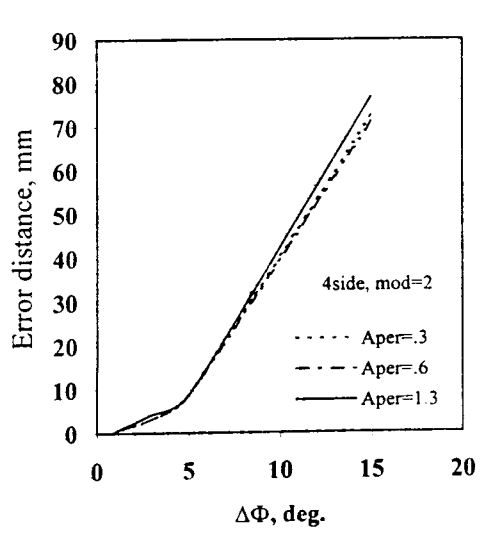
با بکارگیری روش ارائه شده در برنامهٔ کامپیوتری، منحنیهای حرکت لوح بسمت قالب و منحنیهای جریان فلز، در قالب شبکه‌ای هم سطح ، بدست می‌آیند. این منحنیها در شکل (۲۶ - الف) برای قالب چهار ضلعی با ارتفاع کشش کم و در شکل (۲۶ - ب) همان قالب با ارتفاع کشش نسبتاً زیاد آورده شده‌اند.



شکل ۱۶: اثر $A_{per}(\varepsilon)$ بروی فاصلهٔ خطایی برای چهار ضلعی.



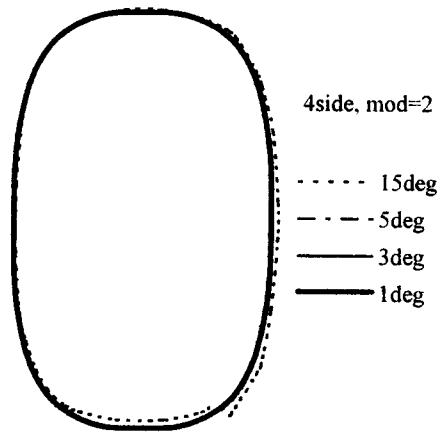
شکل ۱۷: اثر $A_{per}(\varepsilon)$ بروی فاصلهٔ خطایی برای پنج ضلعی.



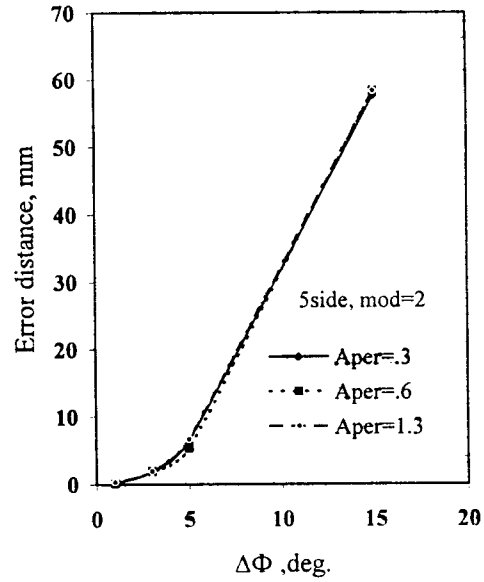
شکل ۱۸: فاصله‌های خطایی بر حسب $\Delta\phi$ برای قالبی چهار ضلعی

www.SID.ir

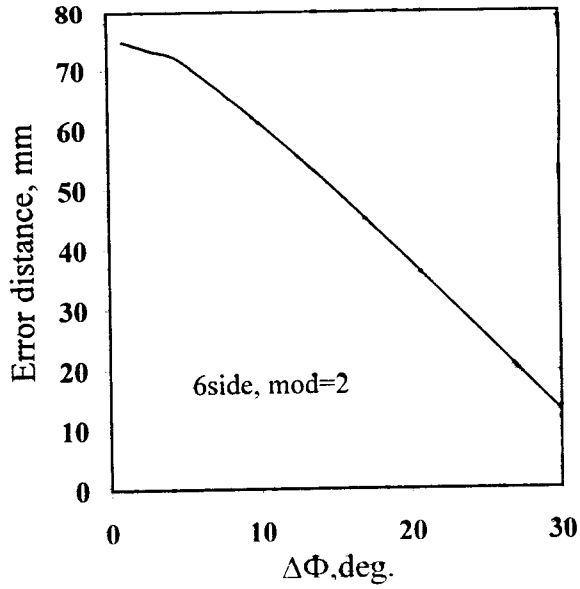
Archive of SID



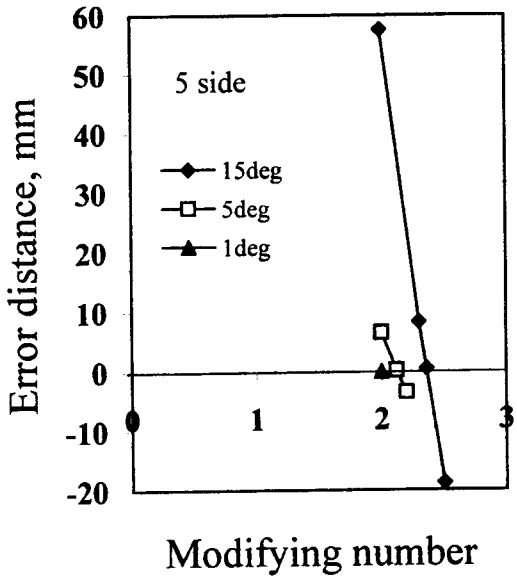
شکل ۱۹: لوحهای اولیهٔ ورق برای قالبی چهار ضلعی بر حسب $\Delta\phi$های متفاوت.



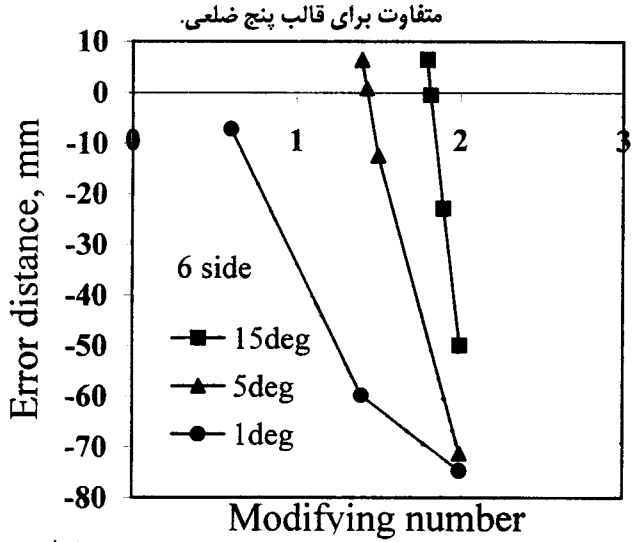
شکل ۲۰: فاصله‌های خطایی بر حسب $\Delta\phi$ برای قالبی پنج ضلعی.



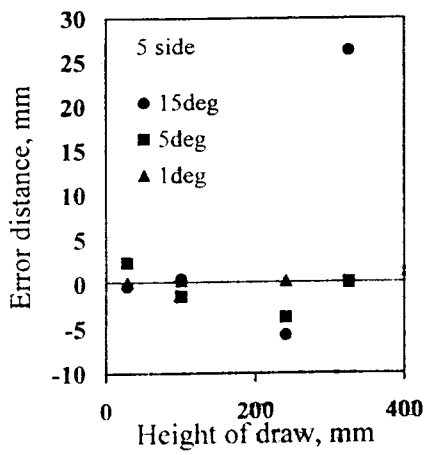
شکل ۲۱: فاصله‌های خطایی بر حسب $\Delta\phi$ برای قالبی شش ضلعی.



شکل ۲۲: فاصله های خطایی بر حسب عدد اصلاحی ، برای $\Delta\phi$های متفاوت برای قالب پنج ضلعی.



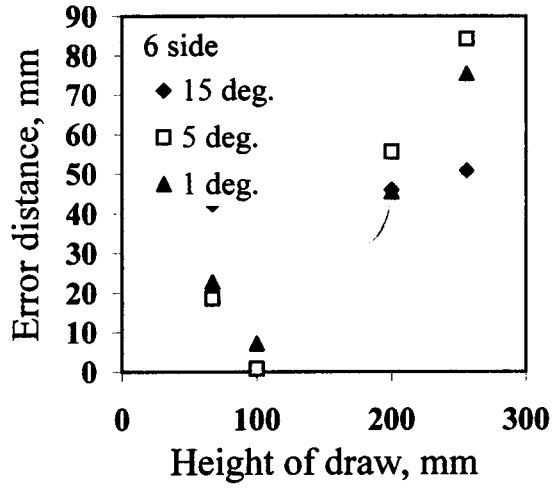
شکل ۲۳: فاصله های خطایی بر حسب عدد اصلاحی ، برای $\Delta\phi$های متفاوت برای قالب شش ضلعی.



شکل ۲۴: تغییرات فاصله خطایی بر حسب ارتفاع کشش برای قالبی پنج ضلعی

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲۵: تغییرات فاصله خطایی بر حسب ارتفاع کشش برای قالبی شش ضلعی

با توجه به این شکلها می‌توان به نکات زیر پی برد:

۱ ـ شباهت و همخوانی منحنیهای حرکت لوح و منحنیهای جریان فلز بدست آمده با منحنیهای افراد دیگر [۹،۳،۲،۱]، مؤید صحیح بودن روش و الگوریتم ابداعی بکار گرفته شده، می‌باشد.

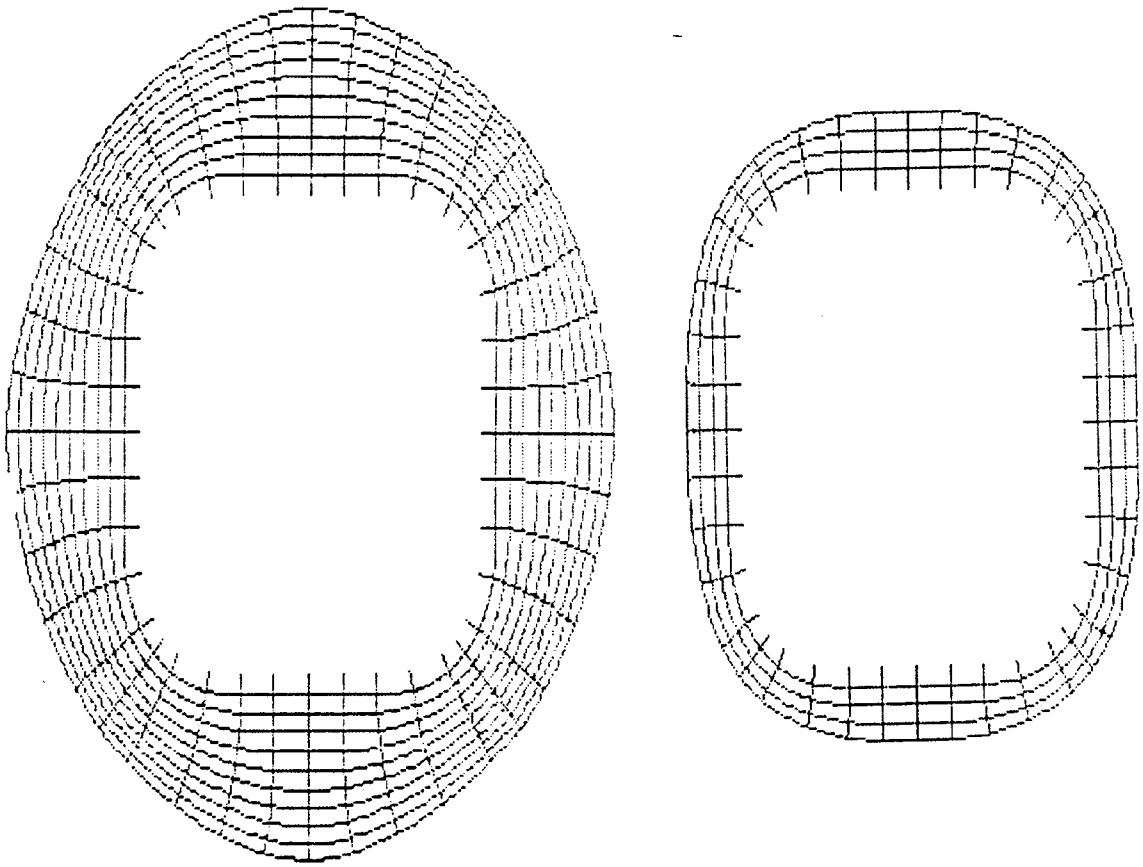
۲ ـ منحنیهای جریان فلز بر منحنی دهانهٔ ورودی قالب و نیز بر منحنیهای حرکت لوح بسمت قالب، عمود می‌باشند.

۳ ـ نقاط واقع بر منحنیهای حرکت لوح، در حوالی عمود منصفهای اضلاع قالب، حداکثر فاصله را از اضلاع قالب داشته و در حوالی گوشه‌های قالب، بیش از پیش، به قالب نزدیک می‌شوند.

۴ ـ در شکلهای حاصل شده از برنامه، بوضوح نواحی صلب مثلثی، دیده می‌شوند. در این نواحی، ابعاد المانها ثابت بوده و بدون تغییر باقی می‌ماند.

۵ ـ از آنجاییکه تقسیم نوار مجاور به قالب به خانه‌هایی هم سطح، از سمت عمود منصف اضلاع به سوی نیمسازهای گوشه‌ها، صورت گرفته است، اکثر خطای شبکهٔ اورتوگونال هم سطح، در حوالی نیمساز گوشه‌ها اتفاق افتاده و در این ناحیه‌ها محدود می‌شود.

لازم بتذکر است که روش ابداع شده برای بدست آوردن منحنیهای حرکت لوح و منحنیهای جریان فلز، نسبت به روشهای دیگران، از سادگی خاصی برخوردار بوده و بسیار سریعتر است. در ضمن از آنجاییکه این منحنیها در قالب شبکه‌ای هم سطح، بدست می‌آیند، در مرحلهٔ بعدی، محاسبهٔ نیروی سمبه را در طول مراحل مختلف کشش، بسیار ساده‌تر و سریع‌تر خواهند کرد.

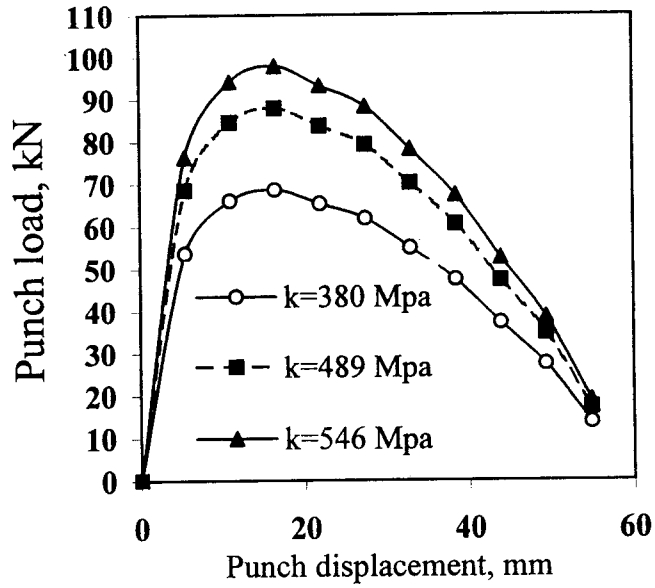


شکل ۲۶ : منحنی های حرکت لوح و منحنیهای جریان فلز برای قالبی چهارضلعی.

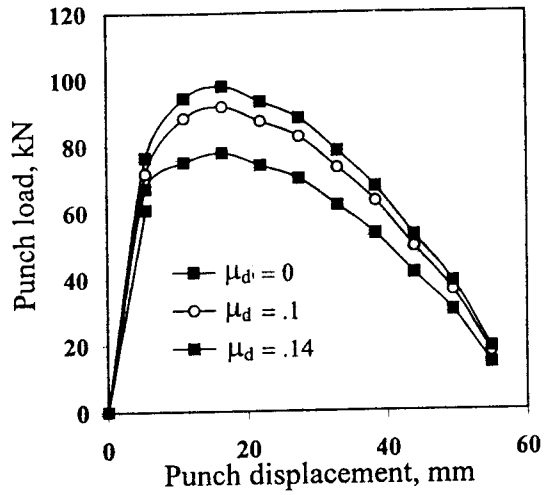
الف) ارتفاع کشش کم ب) ارتفاع کشش نسبتاً زیاد.

www.SID.ir

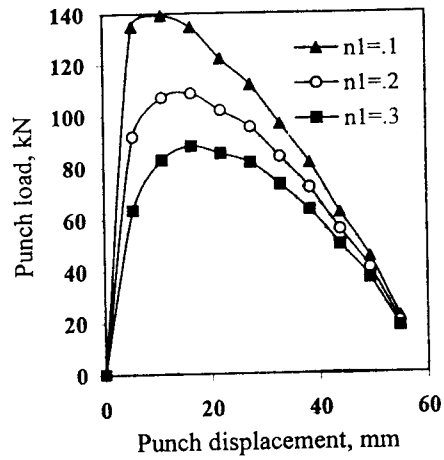
Archive of SID



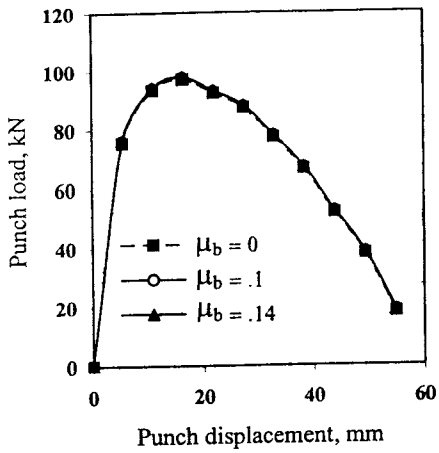
شکل ۲۷: اثر ضریب مقاومت ماده (K)، بروی نیروی سمبه.



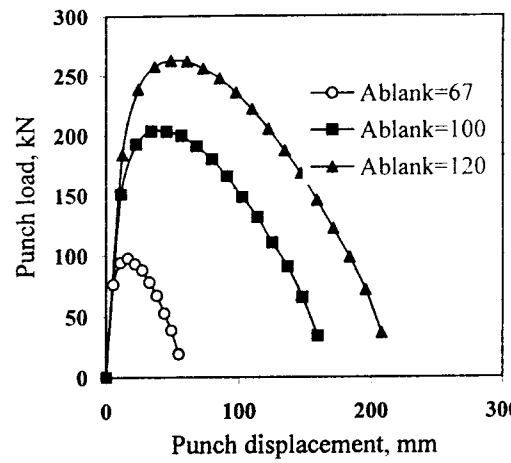
شکل ۳۰: اثر ارتفاع کشش بروی نیروی سمبه (μ_d) بروی نیروی سمبه .



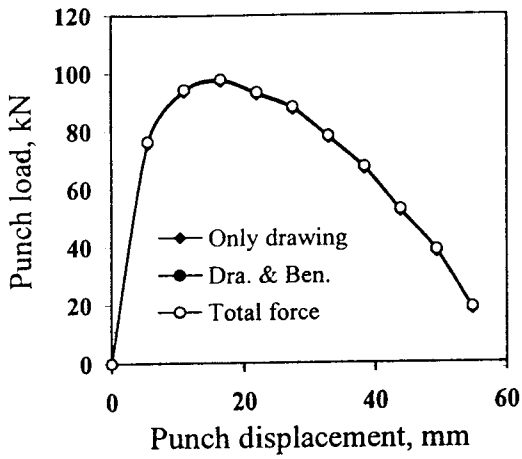
شکل ۲۸: اثر ضریب کار سختی (n_1)، بروی نیروی سمبه .



شکل ۳۱: اثر ضریب اصطکاک بین ورق و ورقگیر (μ_b)، بروی نیروی سمبه.



شکل ۲۹: اثر ضریب اصطکاک بین ورق و قالب.



شکل ۳۲: اثر نیروی خمشی و نیروی ورقگیر، بروی نیروی سمبه

www.SID.ir

Archive of SID

نتایج محاسبات نیروی سمبه

اثر ضریب مقاومت ماده (K)

بررسی‌های بعمل آمده، نشان می‌دهد که با افزایش ضریب مقاومت ماده (K)، نیروی سمبه افزایش می‌یابد و این افزایش در حوالی بار ماکزیمم، محسوس‌تر می‌باشد (شکل ۲۷). علت آن است که با افزایش این ضریب، مقاومت ماده بیشتر شده، و برای کشش آن، نیروی بیشتری باید وارد گردد.

اثر توان کار سختی (n_1)

اگر فولادی با آنالیز ثابت را در نظر گرفته و توان کار سختی آن را در شرایط آنیل شده و کار سخت شده مقایسه نماییم، مشاهده خواهیم کرد که در حالت آنیل شده توان کار سختی مقدار بالاتری در مقایسه با توان کار سختی در حالت کار سخت شده را داراست [۱۰]. بر همین اساس شبیه‌سازی جهت بررسی اثر مصرف فولاد در حالت آنیل شده و یا کار سخت شده بر روی نیروی سمبه با تغییر توان کار سختی انجام گرفت. نتایج محاسبات نشان دهنده آن است که با مصرف فولاد نرم (توان کار سختی بزرگتر) نیروی سمبه کاهش یافته و این کاهش در حوالی بار ماکزیمم محسوس‌تر می‌باشد (شکل ۲۸). همچنین با استفاده از فولاد نرم (توان کار سختی بزرگتر) نیروی ماکزیمم سمبه در جابجایی‌های سمبه بیشتر رخ میدهد که علت آن فرصت ورود المانهای بیشتر به داخل قالب جهت دستیابی به حداکثر نیروی سمبه می‌باشد.

اثر ارتفاع کشش (h یا A_{blank})

پس از بررسی‌های انجام شده، مشخص گردید که با بیشتر شدن ارتفاع کشش (h) (یا افزایش سطح قطعهٔ تولیدی (A_{blank}))، محدودهٔ جابجایی سمبه بیشتر شده و مقدار نیروی سمبه نیز، به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. (شکل ۲۹). علت آن است که با افزایش ارتفاع کشش، المانهای بیشتری از ورق باید کشیده شوند که موجب افزایش نیروی سمبه خواهد شد.

اثر ضریب اصطکاک بین ورق و قالب (μ_d)

بررسی‌های بعمل آمده، نشان می‌دهد که افزایش ضریب اصطکاک بین ورق و قالب (μ_d)، سبب افزایش نیروی سمبه، بخصوص در حوالی بار ماکزیمم، می‌گردد. (شکل ۳۰)

اثر ضریب اصطکاک بین ورق و ورقگیر (μ_b)

پس از بررسی‌های انجام شده، مشخص گردید که اثر تغییرات ضریب اصطکاک بین ورق و ورقگیر (μ_b)، در افزایش نیروی سمبه، بسیار نامحسوس و اندک است (شکل ۳۱). انطباق منحنیهای مختلف نیرو به ازای مقادیر مختلف μ_b، در شکل، این موضوع را بخوبی بیان می‌کند.

اثر نیروی خمشی و نیروی اصطکاک ورقگیر

بررسی‌های انجام شده، نشان می‌دهد که قسمت عمدهٔ نیروی سمبه را، نیروی کشش ورق، تشکیل می‌دهد و اثر نیروی خمشی و نیروی اصطکاک ورقگیر، در افزایش نیروی سمبه، بسیار اندک است. شکل (۳۲)، تغییرات نیروی کششی، تغییرات مجموع نیروی کششی و نیروی خمشی، و تغییرات مجموع نیروی کششی و نیروی خمشی و نیروی ورقگیر را بر حسب جابجایی سمبه، نشان می‌دهد. منطبق شدن این سه منحنی بروی یکدیگر حاکی از اثر اندک نیروی خمشی و نیروی اصطکاک ورقگیر، در افزایش نیروی سمبه، است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از میدان خطوط لغزش و با کمک مشخصات هندسی قالب، از قبیل زوایا و شعاع گوشه‌ها، طول اضلاع و ارتفاع کشش، روشی جهت طراحی لوح اولیهٔ ورق ارائه شده است. سپس با ابداع روشی کاملاً جدید، شبکه‌ای اورتوگونال و هم سطح، پیرامون قالب، تشکیل گردیده و منحنیهای حرکت لوح و منحنیهای جریان فلز، بدست آمده‌اند. در نهایت نیز، با کمک مشخصات مواد و استفاده از این شبکهٔ اورتوگونال هم سطح، نیروی سمبه در طول فرآیند کشش عمیق، محاسبه گردیده است. عملیات فوق از طریق برنامه‌ای به زبان C براحتی قابل اجرا می‌باشد.

این تحقیق را می‌توان برای قطعات L ـ شکل (که دارای زوایای مقعر نیز هستند)، قطعات غیر منشوری (قطعاتی که دیوارهٔ آنها، نسبت به کف قطعه، مایل است) و قطعات پله‌ای (قطعاتی که با چند مرحله از کشش تولید می‌شوند) ادامه داد.

مراجع

1 - Karima, M. (1989). "Blank development and tooling design for drawn parts using a modified slip

www.SID.ir

Archive of SID

line field based approach." *Jouranl of Engineering for Industry,* Vol. 111, PP. 345-350.

2 - Karima, M. (1988). "A novel approach to metal flow prediction and analysis for drawing of complex shapes." *Proc. of 16th NAMRC,* PP. 27-33.

3 - Jimma, T. (1970). "Deep drawing of convex polygon - shells." *J. Jpn. Soc. Tech. Plasticity*, Vol. 11, No. 116, PP. 653-660, (in Japanese).

4 - Hasek, V. V. and Lange, K. (1979). "Use of slip line field method in deep drawing of large irregular shaped components." *Proc. of 7th NAMRC, Ann Arbor,* Michigan, PP. 65-71.

5 - Toshihiko Kuwabara, and Wen-hua Si. (1997). "PC-based blank design system for deep-drawing irregularly shaped prismatic shells with arbitrarily shaped flange." *Jouranl of Materials Processing Technology,* Vol. 63, PP. 89-94.

6 - Hill, R. (1950). *The mathematical theory of plasticity.* London, Oxford university Press.

۷ - حیدری متین، پ. "ارائه روش و نرم‌افزار برای طراحی لوح بهینهٔ ورق برای انجام عملیات کشش عمیق قطعات نامنظم و محاسبهٔ نیروی سمبه در طول فرآیند کشش عمیق." پروژهٔ فارغ‌التحصیلی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک دانشکدهٔ فنی دانشگاه تهران، (۱۳۷۸).

8 - Sowerby, R. and Johnson, R. (1971). "Analysing flange drawing in non-circular cups using slip line fields." *Annals of the CIRP,* Vol. XVIV, PP. 491-499.

9 - Si, W., Kuwabara, T. and Shuuno, M. (1997). "Method for calculating punch strok - punch load curves in deep-drawing irregularly shaped cylindrical shells with arbitrarily shaped flanges." *Journal of the JSTP,* Vol. 38, No. 435, PP. 354-359, (in Japanese).

10 - Parsa, M. H., Yamaguchi, K., Takakura, N. and Imatani, S. (1994). "Consideration of the Re-drawing of sheet metals based on finite-element simulation." *Journal of Materials Processing Technology 47,* PP. 87-101.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Deep Drawing
2 - Irregular Prismatic Shell
3 - Blank
4 - Slip Line Field
5 - Equarial Orthogonal Net
6 - Finite Element Method
7 - Finite Difference Method
8 - Rigid Plastic
9 - Isotropic
10 - Plane Strain
11 - Incompressibility Condition
12 - Rigid Regions
13 - Drawing Regions
14 - Transition Regions
15 - Bottom
16 - Wall
17 - Flange
18 - Bisection Method
19 - Punch
20 - Blank Holder
21 - Virtual Work Principle
22 - Error Distance
23 - Modification Number
24 - Bisection Method

www.SID.ir

Archive of SID

www.SID.ir