

ارزیابی تحلیلی تأثیر شعاع شانهای قالب و سنبه بر نیروی کشش عمیق*

مصطفی منصوری نژاد^(۱)بهمن میرزاخانی^(۲)

چکیده در این تحقیق با استفاده از روابط هندسی موجود بین سنبه و برخی از مشخصات فرایندی، چگونگی تشکیل و توسعه‌ی نواحی مختلف درون قطعه در فرایند کشش عمیق پیش‌بینی شد و رابطه‌ی بین زاویه‌ی خم، شعاع شانهای قالب و سنبه و میزان کرنش در دورلبه (flange) و شانهای قالب به‌ازای مقادیر دلخواه جابجایی سنبه به‌دست آمد. افزون بر این، مؤلفه‌های مختلف نیروی تغییر شکل محاسبه شد و به‌کمک رابطه‌های به‌دست آمده، نمودار نیرو-جابجایی سنبه در میزانهای مختلف شعاع شانهای قالب و سنبه ترسیم و تأثیر این مؤلفه‌ها بر نمودارهای حاصل بررسی شد. نتایج به‌دست آمده نشان دادند که تأثیر شعاع شانهای قالب و سنبه بر میزان جابجایی سنبه در نقطه‌ی بیشینه‌ی نیرو یکسان است. تطابق بسیار خوبی بین نتایج این تحقیق و نتایج تجربی سایر محققان به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی کشش عمیق، شعاع شانهای قالب، شعاع شانهای سنبه، نیروی سنبه، جابجایی سنبه.

Analytical Evaluation of the Effect of Die and Punch Profile Radii on Deep Drawing Force

M. Mansourinejad

B. Mirzakhani

Abstract

In this study, the formation of different parts of a cup during deep drawing process has been investigated analytically using the geometrical relationships. For a given punch travel, the effects of the bending angle, and those of the die and shoulder radii on the flange and die shoulder strains were examined. In addition, different components of the deformation force were calculated and the punch force - punch travel diagrams for different die and punch shoulder radii were studied. The results showed that the die and punch shoulder radii have similar effects on the punch travel at the maximum force. There was a very good agreement between the calculated results in this research and those obtained by other investigators.

Key Words Deep drawing, die shoulder radius, punch shoulder radius, punch force, punch travel.

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۰/۴/۶ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۰/۸/۸ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) مربی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

(۲) نویسنده‌ی مسوول: استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

جابجایی سنبله مطالعه و تحلیل شده است. برای ارزیابی دقت تحلیل به کار رفته، محاسبات مطابق با شرایط عملی در مرجع شماره ۶ انجام شد، و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی موجود در این مرجع مقایسه شدند.

تئوری

نحوه‌ی شکل‌گیری هندسه‌ی قطعه با پیش‌روی

سنبله. در شروع فرایند، پس از تماس سنبله با ورق و با ادامه‌ی پیش‌روی آن، ورق بر روی شانه‌ی قالب و سنبله خم می‌شود، سطح تماس آن با این مناطق افزایش یافته و زاویه‌ی خم θ که در شانه‌ی قالب و سنبله یکسان است، بیش‌تر می‌شود. زاویه‌ی خم θ نشان‌دهنده‌ی مکان هندسی آخرین نقطه‌ی تماس ورق با شانه‌ی قالب و یا شانه‌ی سنبله است (شکل (۱)). با استفاده از روابط هندسی و اعمال اصلاحات لازم در معادلات ارائه شده در مرجع ۱ به منظور استفاده از آن به عنوان مدل تحلیلی در این مقاله، ارتباط زاویه‌ی خم با شعاع شانه‌های قالب و سنبله، لقی بین آن‌ها و جابجایی سنبله با رابطه‌ی زیر نمایش داده می‌شود:

$$\theta = A \sin \left[\frac{r_i(C+r_i) + (L-r_i)\sqrt{(C+r_i)^2 + (L-r_i)^2 - r_i^2}}{(C+r_i)^2 + (L-r_i)^2} \right] \quad (1)$$

که در آن، $r_i = r_p + r_d$ ، r_p و r_d به ترتیب شعاع شانه‌ی قالب و سنبله، C میزان لقی بین قالب و سنبله و L میزان جابجایی سنبله ($L=0$ در لحظه‌ی تماس سنبله با ورق در ابتدای فرایند) می‌باشند. زاویه‌ی خم θ بر حسب رادیان بیان می‌شود.

در شکل (۲) مشاهده می‌شود که روند افزایش θ با افزایش r_p آهسته‌تر می‌شود. به عبارت دیگر، با افزایش r_p زاویه‌ی خم θ در جابجایی بیش‌تری از سنبله به مقدار دلخواه می‌رسد. از آن‌جا که r_p و r_d در رابطه‌ی (۱) نقش یکسانی دارند، تأثیر این دو عامل بر چگونگی افزایش زاویه‌ی خم یکی است. بنابراین، نمودار مذکور برای $r_p = 6 \text{ mm}$ و $r_d = 4 - 12 \text{ mm}$

مقدمه

کشش عمیق یکی از مهم‌ترین فرایندهای شکل‌دهی ورق‌ها است. این فرایند کاربردهای زیادی در صنایع مختلف از جمله صنایع خودروسازی، هوا و فضا، لوازم خانگی و مانند آن دارد [1]. آگاهی از میزان نیروی تغییر شکل و عوامل مؤثر بر آن از دیدگاه فنی و اقتصادی اهمیت بسیار زیادی دارد. نیروی لازم برای کشش عمیق با استفاده از برخی از روابط کلاسیک قابل محاسبه است، ولی این روابط دو اشکال اساسی دارند. اول آن‌که نیروی واقعی تغییر شکل با تقریب نسبتاً بالایی محاسبه می‌شود و ثانیاً، تأثیر عوامل مختلفی از جمله نسبت کشش، شعاع شانه‌ی قالب و سنبله، لقی بین سنبله و قالب و نظیر آن (که بر نیروی کشش عمیق تأثیر زیادی دارند) نادیده گرفته می‌شوند [1]. به نظر می‌رسد که افزون بر به دست آوردن نیروی نزدیک به واقعی تغییر شکل و اطلاع از تأثیر عوامل فرایند بر آن، چگونگی تغییر نیرو و حین فرایند نیز مهم باشد، زیرا در بسیاری از موارد هدف تبدیل‌گرده‌ی ورق به استوانه‌ی کامل نیست، بلکه تولید یک استوانه همراه با لبه مطلوب است. در این شرایط، با دسترسی به نمودار نیرو-جابجایی سنبله نیروی سنبله به‌ازای مقادیر مختلف ارتفاع قابل پیش‌بینی است.

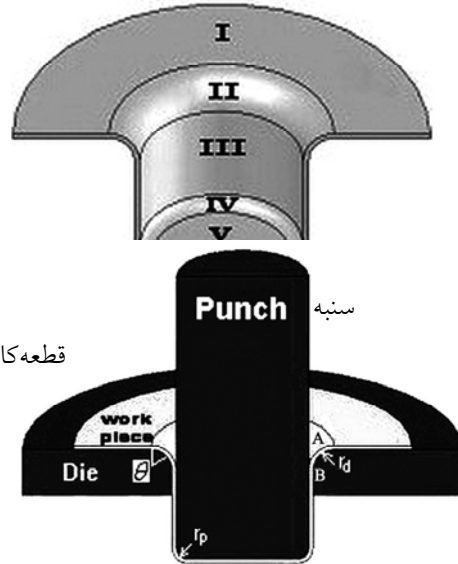
به دست آوردن شرایط مناسب فرایند با انجام آزمایش‌های متعدد مستلزم صرف وقت و هزینه‌ی زیادی است. بنابراین، واضح است که پیش‌بینی نیروی تغییر شکل و روند تغییرات آن شرایط لازم برای تولید محصول سالم را فراهم خواهد کرد [2,3]. بعضی از محققان در گذشته ارتباط بین نیرو و جابجایی سنبله را در یک شرایط خاص با استفاده از روش اجزای محدود به دست آورده‌اند، ولی تأثیرپذیری این ارتباط از متغیرهای فرایند کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است [4,5].

در این تحقیق، تأثیر اندازه‌ی شعاع شانه‌ی قالب و سنبله بر نیروی کشش عمیق و تغییرات آن با

نیز صادق است. بنابراین، جمع‌شدگی محیطی و کشیدگی شعاعی اجزای گرده‌ی اولیه تا موقعی است که آن‌ها با شانه‌ی قالب در تماس باشند. به عبارت دیگر، پس از آخرین تماس ماده با شانه‌ی قالب (طی کردن زاویه‌ی θ)، اجزای ماده حرکت صلب خواهند داشت.

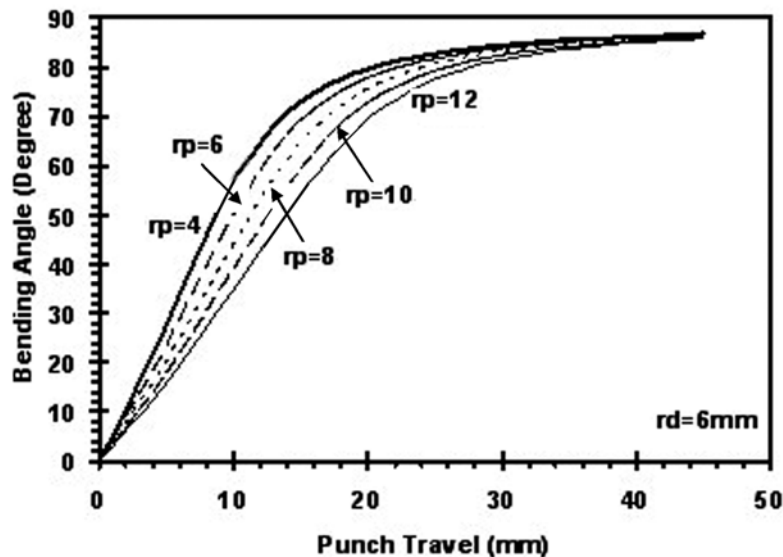
همان‌طور که در شکل (۱-الف) مشاهده می‌شود، با پیش‌روی سنبه گرده‌ی ورق اولیه به شعاع R_0 به یک قوطی نیمه کشیده‌ای تبدیل می‌شود که از پنج قسمت تشکیل شده است. مساحت این پنج ناحیه با در نظر گرفتن اجزای کوچک در ماده و انتگرال‌گیری، به کمک روابط هندسی محاسبه می‌شود [1].

ناحیه‌ی I: این ناحیه حلقوی شکل است و مساحت آن برابر با $\pi[R^2 - (R_1 + C + r_d)^2]$ می‌باشد. در این رابطه، R شعاع لحظه‌ای گرده (شعاع نقاط لبه‌ای دورلبه) و R_1 شعاع سنبه است.



شکل ۱ الف) تصویری از فرایند کشش عمیق، (ب): مناطق مختلف در قطعه‌ی کشیده شده

در این بحث، فرض بر این است که تغییر شکل ماده تنها در نواحی دورلبه و شانه‌ی قالب رخ می‌دهد.



شکل ۲ تأثیر شعاع شانه‌ی سنبه بر چگونگی افزایش زاویه‌ی خم

الف- تنش لازم برای کشش شعاعی ماده. بعد از پیش روی سنجه به میزان L ، رابطه‌ی (۵) برای شعاع اولیه‌ی ρ_0 برقرار است. این رابطه با توجه به شکل (۱) و فرض ثابت بودن ضخامت به دست آمده است:

$$\pi \rho_0^2 = \pi(R_1 - r_p)^2 + S_p + S_w + S_d + S' \quad (5)$$

دو حالت زیر برای S' وجود دارد:

۱- اگر ρ_0 به شکلی باشد که پس از جابجایی سنجه به میزان L ، اجزای کوچک با شعاع ρ_0 به شانه‌ی قالب نرسند. در این حالت، S' سطحی حلقوی شکل در ناحیه‌ی دورلبه است و مساحت آن برابر با $\pi[\rho_1^2 - (R_1 + C + r_d)^2]$ می‌باشد. ρ_1 شعاع جزء کوچکی است که شعاع ابتدایی آن ρ_0 بوده است.

۲- اگر ρ_0 به شکلی باشد که پس از جابجایی سنجه به میزان L ، اجزای کوچک با شعاع ρ_0 وارد شانه‌ی قالب شوند. در این حالت، S' یک رویه‌ی دوار با قوس بیرونی خواهد بود و اگر چه مساحت آن با استفاده از رابطه‌ی مشابه با رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود، اما می‌توان کمیت ρ را به گونه‌ای تعریف کرد که S' مانند حالت اول قابل محاسبه باشد. به این ترتیب، رابطه‌ی (۵) به رابطه‌ی زیر تبدیل خواهد شد:

$$\pi \rho_0^2 = \pi(R_1 - r_p)^2 + S_p + S_w + S_d + \pi[\rho_1^2 - (R_1 + C + r_d)^2] \\ \rho_1 = R_1 + C + r_d + x, \quad -r_d \sin \theta \leq x \leq R_0 - (R_1 + C + r_d) \quad (6)$$

بنابراین، به ازای جابجایی دلخواه L و با فرض ثابت بودن ضخامت گرده‌ی اولیه، کرنش شعاعی ایجاد شده در هر جزء اولیه به شعاع ρ_0 با جای‌گذاری رابطه‌ی (۶) در رابطه‌ی کرنش به دست می‌آید:

$$\varepsilon_{\pi} = \ln \frac{\rho_0}{\rho_1} = \\ \ln \sqrt{\frac{(R_1 - r_p)^2 + (S_p + S_w + S_d) / \pi - (R_1 + C + r_d)^2}{\rho_1^2} + 1} \quad (7)$$

ناحیه‌ی II: رویه‌ای مدور با قوس بیرونی است که با شانه‌ی قالب در تماس بوده و مساحت آن (S_d) برابر است با:

$$S_d = 2\pi r_d [(R_1 + C)\theta + (\theta + \cos \theta - 1)r_d] \quad (2)$$

ناحیه‌ی III: این ناحیه سطح جانبی یک مخروط ناقص است که مساحت آن (S_w) با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$S_w = p\sqrt{1 + \tan^2 q} \{ [R_1 + C + R_d(1 - \sin q)]^2 - [R_1 - r_p(1 - \sin q)]^2 \} \quad (3)$$

ناحیه‌ی IV: رویه‌ای مدور با قوس داخلی است که با شانه‌ی پانچ در تماس بوده و مساحت آن (S_p) برابر است با:

$$S_p = 2\pi r_p [R_1 \theta + (1 - \theta - \cos \theta)r_p] \quad (4)$$

ناحیه‌ی V: این ناحیه معادل سطح صاف کف سنجه است و مساحت آن برابر با $\pi(R_1 - r_p)^2$ می‌باشد.

با ادامه‌ی پیش‌روی سنجه، نواحی II، III و IV به‌طور پیوسته توسعه می‌یابند و وسعت ناحیه‌ی I کاهش می‌یابد، در حالی که ناحیه‌ی V در طول فرایند ثابت باقی می‌ماند.

محاسبه‌ی نیروی سنجه

نیروی سنجه برابر است با حاصل ضرب مساحت سطح مقطع دیواره‌ی محصول در تنش اعمالی بر آن. تنش وارد بر دیواره‌ی محصول در حالت کشش از چند بخش تشکیل شده است [6]:

الف- تنش لازم برای کشش شعاعی ماده (Radial Tension)

ب- تنش لازم برای غلبه بر اصطکاک بین ماده و ورق‌گیر، و ماده و قالب

پ- تنش لازم برای خمش ورق

ت- تنش لازم برای غلبه بر اصطکاک بین قطعه و قالب در ناحیه‌ی شانه‌ی قالب

ث- تنش لازم برای بازخمش ورق

دلخواه واقع در ناحیه‌ی دورلبه، تنش کششی (σ_r) برای کشش شعاعی اجزای کوچک دورلبه تا آخرین نقطه‌ی تغییر شکل (آخرین نقطه‌ی تماس ماده با شانه‌ی قالب) و تشکیل دیواره‌ی محصول با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [8]:

$$\sigma_r = 1.155 \bar{y}_i \ln \frac{R}{\rho_1} \quad (10)$$

اگر در رابطه‌ی (۶) به جای ρ_1 و ρ_0 به ترتیب R_0 و R قرار داده شود، و R به دست آمده از آن در رابطه‌ی (۱۰) جای‌گزین شود، تنش کششی خالص به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_r = 1.155 \bar{y}_i \ln \frac{\sqrt{R_0^2 - (R_1 - r_p)^2 - (S_p + S_w + S_d) / \pi + (R_1 + C + r_d)^2}}{R_1 + C + r_d (1 - \sin \theta)} \quad (11)$$

ب- تنش لازم برای غلبه بر اصطکاک بین ورق‌گیر و قالب. با استفاده از رابطه‌های ذکر شده در مرجع ۶، تنش اصطکاکی (σ_{ff}) به شکل زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\sigma_{ff} = \frac{\mu F_{bh}}{\pi (R_1 + C + r_d) t_0} \quad (12)$$

در این رابطه، μ ضریب اصطکاک، F_{bh} نیروی ورق‌گیر و t_0 ضخامت ورق است (فرض بر این است که ضخامت در طول فرآیند ثابت باقی بماند).

پ- تنش لازم برای خمش ماده. در نقطه‌ی A (فصل مشترک دورلبه و شانه‌ی قالب)، اجزای کوچک ماده دچار خمش می‌شوند. با در نظر گرفتن یک جزء کوچک و نوشتن تعادل نیروها و موازنه‌ی نرخ کار ورودی و خروجی به این جزء، تنش لازم برای خمش ماده به شکل زیر محاسبه می‌شود [6,9]:

$$\sigma_b = \frac{t_0 [\bar{y}_f^2 + (\sigma_{ff} + \sigma_{ff}')^2]}{\sqrt{3} \bar{y}_f (2r_d + t_0)} \quad (13)$$

مشاهده می‌شود که در جابجایی سنبه به میزان L ، بیش‌ترین مقدار کرنش در جزء اولیّه‌ای اتفاق می‌افتد که شعاع آن (ρ_0) به کم‌ترین مقدار ρ_1 تبدیل شده باشد. بنابراین، برای دستیابی به بالاترین میزان کرنش، لازم است تا x در رابطه‌ی ۶ برابر با $-r_d \sin \theta$ باشد. در این صورت، S' در رابطه‌ی (۵) با $-S_d$ برابر شده و رابطه‌ی (۷) که بیش‌ترین میزان کرنش شعاعی ایجاد شده به ازای L دلخواه را به دست می‌دهد، به رابطه‌ی زیر تبدیل خواهد شد:

$$\varepsilon_r = \ln \sqrt{\frac{(R_1 - r_p)^2 + (S_p + S_w) / \pi}{R_1 + C + r_d (1 - \sin \theta)}} \quad (8)$$

از آن‌جا که حالت کرنش در ناحیه‌ی دورلبه صفحه‌ای است، کرنش مؤثر (ε_{ef}) برابر با $1.155 \varepsilon_r$ خواهد بود. رفتار کارسختی اغلب فلزات و آلیاژها از رابطه‌ی لودویک- هولومن ($\sigma = k \varepsilon^n$) پیروی می‌کند. در این تحقیق نیز فرض شده است که این رابطه برقرار است و بنابراین، تنش سیلان میانگین از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\bar{y}_i = \frac{k \varepsilon_{ef}^n}{1+n} \quad (9)$$

اگر فرض کنیم که ε_{ef} تنها در نتیجه‌ی کشش شعاعی ایجاد شده باشد، \bar{y}_i تنش سیلان میانگین اجزای کوچکی است که زاویه‌ی خم آن‌ها برابر با θ است. در رابطه‌ی (۹)، ضریب استحکام n توان کارسختی است. لازم به ذکر است که مطابق شکل (۱)، زاویه‌ی خم صفر درجه هنگامی رخ می‌دهد که جابجایی سنبه صفر باشد.

علی‌رغم این‌که نویسندگان مقاله از ناهم‌سان‌گردی مواد در مقیاس میکروسکوپی آگاه هستند، اما هم‌سان‌گردی ماده در مدل ارائه شده در این تحقیق پیش فرض شده است. بنابراین، با فرض هم‌سان‌گرد بودن ماده و برقراری حالت تعادل برای نیروها و اعمال شرایط مرزی برای یک جزء کوچک

آزمایشگاهی مرجع ۶، به صورت نمودارهای نیرو-جابجایی سنبله ارائه و مقایسه گردید.

شکل (۳) تغییرات نیروی سنبله و اجزای تشکیل دهنده آن را بر حسب جابجایی سنبله نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، نیروی کششی شعاعی همانند نیروی کل تغییر شکل پس از رسیدن به نقطه‌ی بیشینه دوباره به صفر می رسد، زیرا از طرفی با ادامه‌ی پیش روی سنبله ماده کرنش بیش تری را تجربه کرده و تنش سیلان آن در نتیجه‌ی کارسختی به طور پیوسته در حال افزایش خواهد بود، و از طرف دیگر، شعاع گرده (R) به شکل پیوسته کاهش می باشد. بنابراین با توجه به رابطه‌ی ۱۰، برهم کنش سیر صعودی تنش سیلان ماده و سیر نزولی شعاع گرده باعث می شود تا نیروی کششی شعاعی ابتدا افزایش و سپس کاهش یابد.

اگر چه نیروی لازم برای غلبه بر اصطکاک بین ماده و شانه‌ی قالب تقریباً کم است، اما با توجه به رابطه‌ی (۱۶) تغییرات آن شبیه به نیروی کششی شعاعی است. با توجه به رابطه‌ی (۱۳) و این نکته که مقدار عددی σ_{ff} نسبت به مقادیر $\bar{\sigma}_f$ و σ_{ff} بسیار کم تر است، نیروی لازم برای خمش ماده در نقطه‌ی A بیش ترین تأثیر را از $\bar{\sigma}_f$ و σ_{ff} می پذیرد. همان گونه که قبلاً گفته شد، $\bar{\sigma}_f$ همانند تنش سیلان در هر نقطه‌ی در حال تغییر شکل به طور پیوسته افزایش می یابد، و σ_{ff} نیز پس از رسیدن به نقطه‌ی اوج دوباره افت می کند. بنابراین، برهم کنش این تغییرات باعث می شود تا F_b تا نقطه‌ی اوج نیروی کششی شعاعی افزایش یابد و پس از آن ثابت باقی بماند. چگونگی تغییرات F_{un} نیز همانند F_b شرح داده می شود، و مقدار F_{ff} نیز ناچیز و تقریباً برابر با صفر است.

$\bar{\sigma}_f$ تنش تسلیم المانی است که در جابجایی L به نقطه A رسیده و σ_{ff} نیز تنش شعاعی لازم جهت کشش شعاعی المانهای فلنج تا نقطه A می باشد. کرنش مؤثری که در نقطه‌ی A ایجاد می شود، با استفاده از رابطه‌ی زیر به دست می آید:

$$\varepsilon_{ff} = 1.155 \ln \frac{\sqrt{(R_1 - r_p)^2 + (S_p + S_w + S_d)/\pi}}{R_1 + C + r_d} \quad (14)$$

$\bar{\sigma}_f$ را می توان با استفاده از رابطه‌ی مشابه با رابطه‌ی (۹) محاسبه کرد، و σ_{ff} نیز همانند آنچه در مورد σ_{ff} شرح داده شد، به صورت زیر و مشابه با رابطه‌ی (۱۱) قابل محاسبه خواهد بود:

$$\sigma_{ff} = 1.155 \bar{\sigma}_f \ln \frac{\sqrt{R_0^2 - (R_1 - r_p)^2 - (S_p + S_w + S_d)/\pi + (R_1 + C + r_d)^2}}{R_1 + C + r_d} \quad (15)$$

ت- تنش لازم برای غلبه بر اصطکاک بین ماده و شانه‌ی قالب. با برقراری حالت تعادل بین نیروهای اعمالی بر اجزای کوچک در شانه‌ی قالب، تنش اصطکاکی (σ_{fs}) محاسبه می شود:

$$\sigma_{fs} = (\sigma_{ff} + \sigma_{ff} + \sigma_b)(e^{\mu\theta} - 1) \quad (16)$$

ث- تنش لازم برای بازخمش (خم گشایی) ماده. همانند روش محاسبه‌ی σ_b ، تنش بازخمش (σ_{un}) که در نقطه‌ی B اعمال می شود نیز به شکل زیر قابل محاسبه است [6,9]:

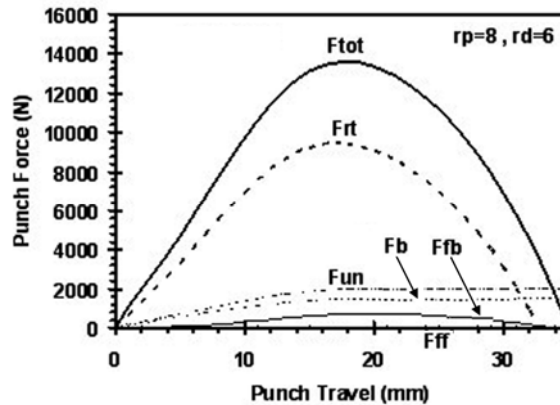
$$\sigma_{un} = \frac{t_0 [\bar{\sigma}_f^2 + (\sigma_{ff} + \sigma_{ff} + \sigma_{fs} + \sigma_b)^2]}{\sqrt{3} \bar{\sigma}_f (2r_d + t_0)} \quad (17)$$

بنابراین، نیروی کشش عمیق (F_{tot}) با استفاده از رابطه‌ی زیر به دست خواهد آمد:

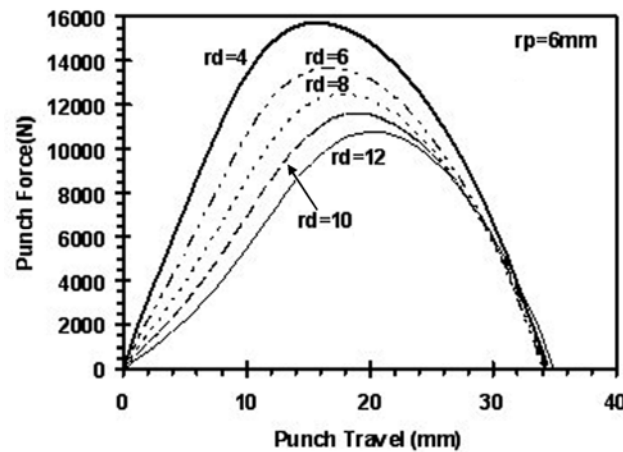
$$F_{tot} = 2\pi R_1 t_0 (\sigma_{ff} + \sigma_{ff} + \sigma_{fs} + \sigma_b + \sigma_{un}) \quad (18)$$

نتایج و بحث

نتایج محاسباتی این تحقیق مطابق با شرایط



شکل ۳ تغییرات نیروی سنبه و اجزای تشکیل دهنده آن بر حسب جابجایی سنبه



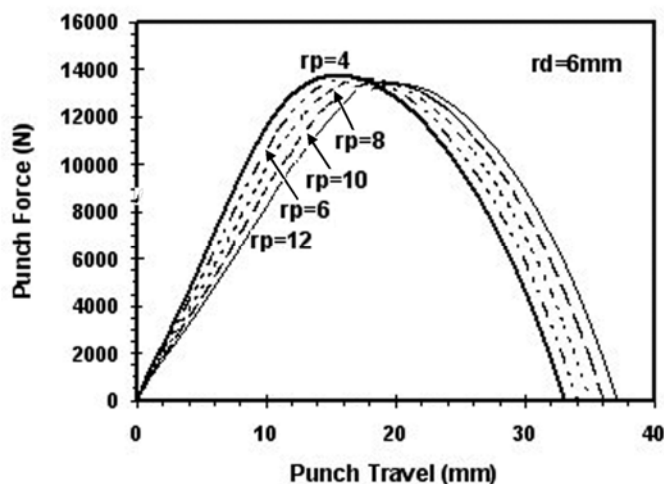
شکل ۴ تأثیر شعاع شانه‌ی قالب بر نیروی کشش عمیق و چگونگی تغییرات آن با جابجایی سنبه

نقطه‌ی تماس ماده با شانه‌ی قالب (ρ_1) به‌ازای L معین برابر با $R_1 + C + r_h(1 - \sin \theta)$ است، افزایش شعاع شانه‌ی قالب به دو شکل مستقیم (افزایش r_h) و غیر مستقیم (کاهش θ) باعث افزایش ρ_1 و در نتیجه، کاهش نسبت کشش و F_{fr} می‌شود. دلیل این‌که با افزایش r_h بیش‌ترین میزان نیروی تغییر شکل در جابجایی بیش‌تری از سنبه رخ می‌دهد آن است که مطابق با شکل (۱)، زاویه‌ی خم θ با افزایش r_h یا r_p کوچک‌تر می‌شود. بنابراین، با افزایش r_h به پیش‌روی بیش‌تری از سنبه برای رسیدن به‌میزان مشخصی از θ که خود مستلزم افزایش نیروی سنبه به‌میزان معینی است، نیاز خواهد بود.

در شکل (۴) تأثیر شعاع شانه‌ی قالب بر نیروی تغییر شکل و چگونگی تغییرات آن با جابجایی سنبه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع شانه‌ی قالب از ۴ به ۱۲ میلی‌متر، اولاً بیش‌ترین نیروی تغییر شکل از ۱۴ به ۱۱/۴۷ کیلو نیوتن کاهش یافته است و ثانیاً، این افزایش در جابجایی بیش‌تری از سنبه (از ۱۶ به ۲۰ میلی‌متر) رخ داده است. کاهش F_{tot} با افزایش r_h به‌دلیل کاهش میزان عوامل موجود در رابطه‌ی F_{tot} ، یعنی F_{fr} ، F_b ، F_{fb} ، F_{un} می‌باشد، زیرا با افزایش r_h از یک طرف شعاع خم و بازخم افزایش و F_b و F_{un} کاهش (مطابق با رابطه‌های ۱۳ و ۱۷) می‌یابند و از طرف دیگر، چون شعاع آخرین

بنابراین، افزایش r_p منجر به کاهش غیر مستقیم نسبت کشش می‌شود و به این ترتیب، F_{tot} نیز کمی کاهش می‌یابد. تأثیر اندک r_p بر F_{tot} در مقایسه با r_d کاملاً منطقی است، زیرا اولاً با توجه به رابطه‌ی (۱۱) و این‌که عامل مستقل r_d در مخرج ظاهر شده است، از دیدگاه ریاضی واضح است که تأثیر r_d بر F_{it} بسیار بیش‌تر از تأثیر r_p است، و ثانیاً بر خلاف آن‌که r_p بر F_b و F_{in} تقریباً بی‌تأثیر است، r_d بر روی این دو عامل نیرو تأثیر زیادی دارد.

در شکل (۵)، تأثیر شعاع شانه‌ی سنبه بر نیروی تغییر شکل و چگونگی تغییرات آن با جابجایی سنبه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیش‌ترین نیروی تغییر شکل با افزایش r_p کاهش اندکی می‌یابد، و این افزایش در جابجایی بیش‌تری از سنبه رخ می‌دهد. با توجه به رابطه‌ی (۱)، میزان و چگونگی تأثیر r_p بر جابجایی سنبه در نیروی بیشینه دقیقاً شبیه به تأثیر r_d است. همان‌گونه که قبلاً گفته شد، افزایش r_p به‌ازای مقادیر دلخواه L باعث کاهش زاویه‌ی خم می‌شود.



شکل ۵ تأثیر شعاع شانه‌ی سنبه بر نیروی کشش عمیق و چگونگی تغییرات آن با جابجایی سنبه

جدول ۱ مقایسه‌ی نتایج محاسبه شده و تجربی پیرامون تأثیر شعاع شانه‌ی قالب بر بیش‌ترین نیرو و جابجایی مربوط به آن

r_d (mm)	F_{max} تجربی (N)	F_{max} محاسبه شده (N)	جابجایی سنبه به‌ازای مقادیر تجربی F_{max} (mm)	جابجایی سنبه به‌ازای مقادیر محاسبه شده F_{max} (mm)	درصد خطای مربوط به F_{max} محاسبه شده (%)	درصد خطای مربوط به جابجایی محاسبه شده سنبه (%)
۴	۱۴۰۰۰	۱۵۷۰۰	۱۷	۱۶	+۱۲	-۵
۶	۱۳۴۰۰	۱۳۷۰۰	۱۷	۱۷	+۲	۰
۸	۱۲۸۰۰	۱۲۵۰۰	۱۹	۱۸	-۲	-۵
۱۰	۱۲۱۰۰	۱۱۶۰۰	۱۸	۱۹	-۴	+۵
۱۲	۱۱۴۰۰	۱۰۸۰۰	۱۹	۲۰	-۵	+۵

جدول ۲ مقایسه‌ی نتایج محاسبه شده و تجربی پیرامون تأثیر شعاع شانه‌ی سنبله بر بیش‌ترین نیرو و جابجایی مربوط به آن

r_p (mm)	F_{max} (N) تجربی	F_{max} محاسبه شده (N)	جابجایی سنبله به‌ازای مقادیر تجربی F_{max} (mm)	جابجایی سنبله به‌ازای مقادیر محاسبه شده (mm) F_{max}	درصد خطای مربوط به F_{max} محاسبه شده (%)	درصد خطای مربوط به جابجایی محاسبه شده سنبله (%)
۴	۱۳۵۰۰	۱۳۸۰۰	۱۷	۱۶	+۲	-۶
۶	۱۳۴۰۰	۱۳۷۰۰	۱۷	۱۷	+۲	۰
۸	۱۳۳۰۰	۱۳۶۰۰	۱۹	۱۸	+۲	-۵
۱۰	۱۳۷۰۰	۱۳۵۰۰	۲۲	۱۹	-۱	-۱۳
۱۲	۱۳۵۰۰	۱۳۴۰۰	۲۲	۲۰	-۱	-۹

۳- افزایش r_h از ۴ به ۱۲ میلی‌متر منجر به کاهش نیروی بیشینه‌ی کشش از ۱۵/۷ به ۱۰/۸ کیلو نیوتن می‌شود. افزون بر این، افزایش r_p به همین میزان منجر به کاهش نیروی بیشینه‌ی کشش از ۱۳/۸ به ۱۳/۴ کیلو نیوتن می‌شود.

۴- کاهش r_h تأثیر بسیار بیشتری در مقایسه با r_p بر افزایش نسبت کشش دارد. این نکته یکی از دلایل اصلی تأثیر زیاد r_h و تأثیر اندک r_p بر نیروی بیشینه به حساب می‌آید.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از مسئولان دانشگاه اراک به دلیل حمایت مالی از انجام طرح تحقیقاتی به شماره‌ی ۸۹/۲۷۲۶ تشکر و قدردانی می‌کنند.

برای بررسی تأثیر شعاع شانه‌ی قالب و سنبله بر بیش‌ترین نیروی کشش عمیق و جابجایی مربوط به آن، داده‌های محاسبه شده در این تحقیق و اطلاعات تجربی موجود در مرجع ۶ که در فرایندی مشابه به‌دست آمده‌اند، در جدول‌های (۱) و (۲) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق نشان داده شد که:

۱- تأثیر شعاع شانه‌ی قالب و سنبله بر زاویه‌ی خم مشابه است.

۲- تأثیر شعاع شانه‌ی قالب و سنبله بر جابجایی سنبله در نیروی بیشینه یکسان است، به‌گونه‌ای که با افزایش r_h یا r_p از ۴ به ۱۲ میلی‌متر جابجایی سنبله در نیروی بیشینه به‌طور خطی افزایش یافته و از ۱۶ به ۲۰ میلی‌متر می‌رسد.

مراجع

1. Johnson, W. "Engineering Plasticity", Ellis Horwood Limited, Chichester, (1983).
2. Browne M.T. and Hillery M.T., "Optimising the variables when deep-drawing C.R.I cups", J. Mater. Process. Technol., 136, pp. 64-71, (2003).

3. Leu D.K., "Prediction of the maximum drawing load in the deep drawing process of sheet metals", J. Mater. Process. Technol., 72, pp. 256-261, (1997).
4. Mamelis A.G., Manolakos D.E. and Baldoukas A.K., "Simulation of sheet metal forming using explicit finite-element techniques: effect of material and forming characteristics, part I: deep drawing of cylindrical cups", J. Mater. Process. Technol., 72, pp. 48-60, (1997).
5. Freshteh-Saneiee F. and Montazeran M.H., "A comparative estimation of the forming load in the deep drawing processes", J. Mater. Process. Technol., 140, pp. 555-561, (2003).
6. Moshksar M.M. and Zamanian A., "Optimization of the tool geometry in the deep drawing of aluminum", J. Mater. Process. Technol., 72, pp. 363-370, (1997).
7. Dejmali I., Tirosh J., Shirizly A. and Rubinsky L., "On the optimal die curvature in deep drawing processes", Int. J. Mech. Sci, 44, pp. 1245-1258, (2002).
8. Mahdavian S.M. and He D., "Production thickness analysis in pure cup-drawing", J. Mater. Process. Technol., 51, pp. 387-406, (1995).
9. Marciniak Z. and Duncan J.L., "The Mechanics of Sheet Metal Forming", First ed., Edward Arnold, London, (1992).

Archive of SID