



یک مدل تغییر شکل جدید برای فرآیند اکستروژن لوله‌های دو فلزی

محمد بیرانوند، حشمت اله حقیقت*

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۴ آذر ۱۳۹۴
بازنگری: ۶ بهمن ۱۳۹۴
پذیرش: ۱۸ بهمن ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۲۱ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

اکستروژن
لوله دوفلزی
کرانه بالایی
تابع جریان
اجزا محدود

چکیده: در این مقاله، فرآیند اکستروژن لوله‌های دو فلزی با قالب مخروطی به روش کرانه بالایی و با استفاده از تابع جریان تحلیل شده است. دو فلز ابتدا به هم چسبیده نبوده و مدل تغییر شکل ارائه شده، به بررسی چسبیدن و اتصال دو فلز به هم در سطح مشترک بین آن‌ها در ناحیه تغییر شکل می‌پردازد. به این منظور، منطقه تغییر شکل به سه ناحیه تقسیم شده، برای هر ناحیه یک میدان سرعت مجاز ارائه و براساس آن توان‌های داخلی، برشی، اصطکاکی و نیز توان کل تغییر شکل محاسبه شده‌اند. توان کل نسبت به شکل مرزهای سه ناحیه تغییر شکل و موقعیت نقطه اتصال دو فلز به هم، بهینه‌سازی شده و نیروی اکستروژن محاسبه شده است. نیروی اکستروژن به‌دست آمده از حل تحلیلی با نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط دیگر محققان و همچنین با حل اجزا محدود (نرم‌افزار آباکوس) مقایسه شده که تطابق خوبی را نشان می‌دهند. در پایان اثر شرایط مختلف فرآیند شامل درصد کاهش سطح مقطع و نیم‌زاویه قالب بر نیروی اکستروژن و چسبندگی بین دو فلز بررسی شده‌اند.

۱- مقدمه

پوسته را بررسی کردند. در سال ۱۹۹۱ یانگ^[۵] اکستروژن متقارن محوری میله‌های مرکب با قالب‌های منحنی را به روش کرانه بالایی تحلیل کرد و نتایج به‌دست آمده را با نتایج آزمایش مقایسه کرد. وی برای تحلیل با استفاده از توابع جریان مرتبه دو و سه ریاضی در نهایت به این نتیجه رسید که تابع جریان مرتبه دو انطباق بیشتری با نتایج آزمایش دارد. همچنین فرض کرد که دو فلز در ناحیه تغییر شکل روی هم می‌لغزند؛ اما درست در لحظه خروج از قالب به یکدیگر چسبیده و سرعت دو لایه فلز یکسان می‌شود. چیتکارا^[۴] و آلیم^[۶] در سال ۲۰۰۱ به روش‌های کرانه بالایی و آزمایش به بررسی اکستروژن متقارن محوری لوله دو فلزی از بیلت دایره‌ای توپر پرداختند. آن‌ها اثر پارامترهای نسبت اکستروژن، نیم‌زاویه قالب و درصد کاهش در سطح مقطع را روی نیروی اکستروژن بررسی کردند. در سال ۲۰۰۲ هوانگ^[۸] و هوانگ^[۷] به بررسی رفتار تغییرشکل پلاستیک اکستروژن میله مرکب در قالب مخروطی به هر دو روش کرانه بالایی و انجام آزمایش پرداخت. وی برای تحلیل فرض کرد که دو فلز روی هم می‌لغزند و در نهایت با سرعت‌های متفاوت از قالب خارج می‌شوند. در سال ۲۰۰۴ مؤمنی و همکاران^[۱] اثر منحنی قالب و زاویه قالب را بر روی نیروی اکستروژن و کیفیت محصول توسط آزمایش بررسی کردند. همچنین اثر جابه‌جایی جنس

لوله‌های دوفلزی، به علت خواص ویژه آن‌ها به ویژه استحکام بالا، رسانایی و مقاومت به خوردگی بالاتر نسبت به لوله‌های تک‌فلزی، کاربردهای زیادی در صنایع مختلف از جمله صنایع شیمیایی، نفتی، مبدل‌های حرارتی و مخازن تحت فشار دارند [۱]. از بین فرآیندهای شکل‌دهی مختلف که برای تولید لوله‌های دو فلزی کاربرد دارند، اکستروژن دارای مزیت‌هایی است که در دیگر فرآیندها نیست. به دلیل فشاری بودن حالت تنش در اکستروژن، این فرآیند، یک انتخاب مناسب برای شکل‌دهی لوله‌های دو فلزی است [۲]. در این فرآیند، اطلاع از میزان نیروی شکل‌دهی لازم و این‌که دو لایه فلز در پایان فرآیند به هم کاملاً چسبیده و یکپارچه شده‌اند، بسیار مهم است. این زمینه تاکنون تلاش‌هایی از سوی محققان مختلف صورت گرفته است. هارتلی^[۳] یک میدان سرعت مجاز برای اکستروژن لوله‌ها ارائه کرد که با میل کردن شعاع مندرل به سمت صفر به میدان سرعت مجاز برای اکستروژن میله‌ها تبدیل می‌شود. آویتزور^[۲] و همکاران^[۴] عوامل اثرگذار بر جریان دو لایه در اکستروژن میله دوفلزی شامل درصد کاهش سطح مقطع، نیم‌زاویه قالب، ثابت اصطکاک بین قالب و پوسته و نسبت ضخامت هسته به

3 Yang
4 Chitkara
5 Aleem
6 Hwang

1 Hartley
2 Avitzur

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hhaghighat@razi.ac.ir

۲-۱- ناحیه اول

الگوی جریان در هر ناحیه به صورت توابع جریان جداگانه‌ای فرض شده است که با نماد ϕ نمایش داده می‌شود. تابع جریان ϕ_I الگوی جریان در ناحیه I را بیان می‌کند که به صورت رابطه (۱) فرض شده است.

$$\phi_I = Q_1 \left[\frac{r^2 - r_2^2}{r_1^2 - r_2^2} + A_1 (r^2 - r_1^2) (r^2 - r_2^2) \right] \quad (1)$$

$$r_1 = r_1(z) = R_{1f} + \frac{R_{1o} - R_{1f}}{Z_5} z \quad (2)$$

$$r_2 = r_2(z) = R_{2f} + \frac{R_{2o} - R_{2f}}{Z_4 - Z_1} (z - Z_1) \quad (3)$$

که Q_1 دبی حجمی جریان را در هر سطح مقطع از ناحیه I نشان می‌دهد. r_1 و r_2 به ترتیب توابع مرزی در امتداد سطح قالب و سطح بین دو فلز هستند. تابع r_2 به صورت خطی فرض شده است که ممکن است شیب آن با شیب تابع r_1 متفاوت باشد. مقادیر Z_1 تا Z_5 موقعیت افقی محدوده مرز ورودی و خروجی نواحی تغییرشکل را نشان می‌دهد. A_1 نشان‌دهنده گرادینان توزیع سرعت افقی به صورت یک تابع درجه دو از z فرض شده است.

$$A_1 = b_1 z^2 + c_1 z + d_1 \quad (4)$$

رابطه (۱) شامل دو قسمت است که قسمت اول آن یک جریان یکنواخت در امتداد هر سطح مقطع عمودی را نشان می‌دهد. این در حالی است که قسمت دوم آن یک جریان غیریکنواخت با نرخ جریان برآیند صفر در امتداد هر سطح مقطع عمودی است.

میدان سرعت در ناحیه I، با مشتق‌گیری مستقیم از تابع جریان ϕ_I قابل محاسبه است.

$$V_r = -\frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \phi_I}{\partial z} = \frac{Q_1}{2\pi r} [-2R(z) + 2A_1 r_2' r_2 (r^2 - r_1^2) + 2A_1 r_1' r_1 (r^2 - r_2^2) - A_1' (r^2 - r_1^2) (r^2 - r_2^2)] \quad (5)$$

$$R(z) = \frac{r_2' r_2 (r^2 - r_1^2) - r_1' r_1 (r^2 - r_2^2)}{(r_1^2 - r_2^2)^2}$$

$$V_z = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \phi_I}{\partial r} = \frac{Q_1}{\pi} \left[\frac{1}{r_1^2 - r_2^2} + A_1 (2r^2 - r_1^2 - r_2^2) \right] \quad (6)$$

$$V_\theta = 0 \quad (7)$$

میدان سرعت به‌دست آمده شرایط مرزی سرعت را در امتداد سطح قالب و سطح بین دو فلز ارضا می‌کند. با جایگذاری $r=r_1$ در روابط (۵) و (۶):

$$\left[\frac{V_r}{V_z} \right]_{r=r_1} = r_1' \quad (8)$$

هسته و پوسته بر نیروی اکستروژن را نیز مورد بررسی قرار دادند. تایال^۱ و ناتاراجن^۲ [۹] و آلکاراز^۳ و سویلانوا^۴ [۱۰] ترازهای تنش و کرنش را در فرآیند اکستروژن متقارن محوری به ترتیب برای میله و لوله دوفلزی بررسی کردند. در سال ۲۰۰۹ خسروی‌فرد و ابراهیمی [۱۱] به بررسی پارامترهای مؤثر بر استحکام مرز اکستروژن میله دوفلزی آلومینیوم - مس به کمک نرم‌افزار اجزا محدود انسیس^۵ و انجام آزمایش پرداختند. حقیقت و عسگری [۱۲] در سال ۲۰۱۱ به بررسی فرآیند اکستروژن لوله دوفلزی با فرض کوچک بودن شعاع مندرل به روش کرانه بالایی پرداختند. آن‌ها منطقه تغییر شکل را به دو ناحیه تقسیم و فرض کردند که دو لایه فلز از ابتدا تا انتهای فرآیند به هم چسبیده و با سرعت‌های یکسان از قالب خارج می‌شوند. همچنین فرض کردند که مرزهای ناحیه‌های تغییر شکل ثابت و به شکل کروی می‌باشند.

در این مقاله یک مدل تغییر شکل جدید برای فرآیند اکستروژن لوله‌های دوفلزی با شعاع مندرل دلخواه ارائه شده است. دو فلز ابتدا به هم چسبیده نبوده و مدل تغییر شکل ارائه شده که در آن مرزهای ناحیه‌های تغییر شکل انعطاف‌پذیر می‌باشند، به بررسی چسبیدن و اتصال دو لایه فلز به هم، در سطح مشترک بین آن‌ها در ناحیه تغییر شکل می‌پردازد. به این منظور، منطقه تغییر شکل به سه ناحیه تقسیم شده که براساس شرایط فرآیند، مرزهای ناحیه‌های تغییر شکل و موقعیت نقطه شروع چسبندگی دو فلز به هم در سطح مشترک بهینه‌سازی شده‌اند.

۲-۲ روش کرانه بالایی

شکل ۱ اکستروژن لوله دوفلزی با قالب مخروطی را نشان می‌دهد. در این فرآیند لوله دوفلزی با شعاع خارجی لایه داخلی (هسته)، R_{1o} ، و شعاع خارجی لایه خارجی (پوسته)، R_{2o} و با سرعت ورودی V_o وارد قالب مخروطی با نیم‌زاویه قالب α می‌شود. در این شکل R_{1f} و R_{2f} به ترتیب شعاع داخلی هسته و پوسته در خروج از قالب و R_m شعاع مندرل را نشان می‌دهند. دو فلز در ابتدای فرآیند به هم چسبیده نبوده و نقطه با موقعیت L ، نقطه شروع چسبندگی دو لایه است؛ یعنی، در سطح S_8 دو فلز به هم چسبیده و حرکت نسبی بین آن‌ها وجود ندارد. اگر L بر نقطه Z_1 منطبق شود، دو فلز تا انتهای فرآیند و خروج از قالب روی هم می‌لغزند و با سرعت‌های متفاوت از قالب خارج می‌شوند؛ اما اگر مقدار L با Z_4 مساوی باشد، دو فلز از ابتدای قالب تا انتها به هم چسبیده هستند؛ بنابراین منطقه تغییرشکل پلاستیک در فرآیند به سه ناحیه تقسیم شده که در شکل ۱ با نواحی I، II و III نشان داده شده‌اند. نواحی I و III مربوط به پوسته و ناحیه II مربوط به هسته می‌باشند.

- 1 Tayal
- 2 Natarajan
- 3 Alcaraz
- 4 Sevillano
- 5 Ansys

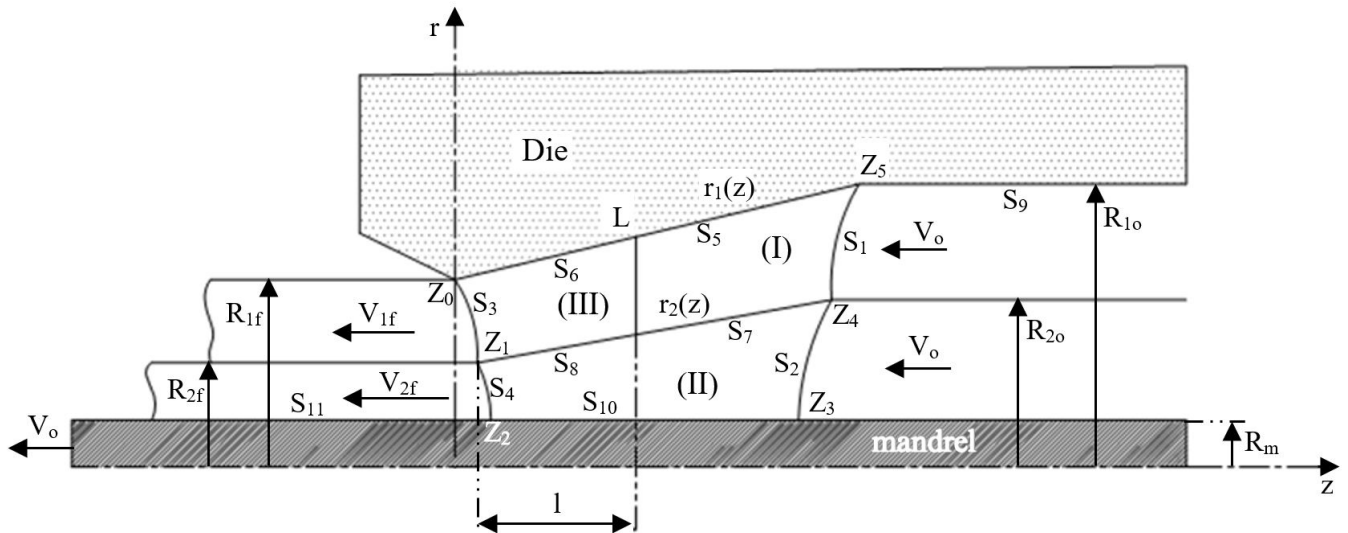


Fig. 1. Geometric parameters and deformation zones in bimetal tube extrusion process

شکل ۱: فرآیند اکستروژن لوله دوفلزی، پارامترهای هندسی و نواحی تغییر شکل آن

که Q_2 دبی حجمی جریان را در هر سطح مقطع از ناحیه II نشان می‌دهد. A_2 نشان‌دهنده گرادیان توزیع سرعت افقی در ناحیه II است که به صورت تابع درجه دو از z فرض شده:

$$A_2 = b_2 z^2 + c_2 \quad (13)$$

میدان سرعت در ناحیه II با مشتق‌گیری از تابع جریان Q_2 به دست می‌آید.

$$V_r = -\frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \phi_2}{\partial z} = \frac{Q_2}{2\pi r} \left[\frac{2r_2' r_2 (r^2 - R_m^2)}{(r_2^2 - r R_m^2)^2} + \frac{2A_2 r_2' r_2 (r^2 - R_m^2) - A_2' (r^2 - r_2^2)(r^2 - R_m^2)}{(r_2^2 - r R_m^2)^2} \right] \quad (14)$$

$$V_z = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \phi_2}{\partial r} = \frac{Q_2}{\pi} \left[\frac{1}{r_2^2} + A_2 (2r^2 - r_2^2) \right] \quad (15)$$

$$V_\theta = 0 \quad (16)$$

مانند ناحیه I و به روش مشابه اثبات می‌شود که میدان سرعت بیان شده برای ناحیه II شرایط مرزی سرعت را ارضا می‌کند.

مشابه حالت ϕ_1 برای به دست آوردن مرزهای ناحیه II، ϕ_2 که به ترتیب تابع جریان در مرز ورودی و خروجی برای لایه داخلی قطعه هستند، محاسبه می‌شوند و با اعمال خطوط پیوستگی جریان، مرز S_2 و S_4 به صورت روابط (۱۷) و (۱۸) بیان می‌شوند.

$$r_{S_2} = \sqrt{r_2^2 + \frac{1/(R_{20}^2 - R_m^2) - 1/(r_2^2 - R_m^2)}{A_2}} \quad (17)$$

$$r_{S_4} = \sqrt{r_2^2 + \frac{1/(R_{2f}^2 - R_m^2) - 1/(r_2^2 - R_m^2)}{A_2}} \quad (18)$$

و به طریق مشابه، با جایگذاری $r=r_2$ در روابط (۵) و (۶):

$$\left[\frac{V_r}{V_z} \right]_{r=r_2} = r_2' \quad (9)$$

قبل از اینکه قطعه وارد قالب شود دارای سرعت یکنواخت است؛ بنابراین تابع جریان برای لایه بیرونی قبل از ورود به قالب به صورت رابطه (۱۰) بیان می‌شود.

$$\phi_{10} = Q_1 \left(\frac{r^2 - R_{20}^2}{R_{10}^2 - R_{20}^2} \right) \quad (10)$$

با اعمال پیوستگی خطوط جریان، یعنی $\phi_1 = \phi_{10}$ در ورودی قالب، تابع مرز ورودی ناحیه تغییرشکل S_1, I قابل محاسبه است.

$$r_{S_1} = \begin{cases} \sqrt{\frac{-B_1 + \sqrt{B_1^2 - 4A_1 C_1}}{2A_1}}; & z_4 < z_5 \\ \sqrt{\frac{-B_1 - \sqrt{B_1^2 - 4A_1 C_1}}{2A_1}}; & z_4 > z_5 \end{cases}, \quad (11)$$

$$B_1 = \frac{1}{r_1^2 - r_2^2} - A_1 (r_1^2 + r_2^2) - \frac{1}{R_{10}^2 - R_{20}^2},$$

$$C_1 = -\frac{r_2^2}{r_1^2 - r_2^2} + A_1 r_1^2 r_2^2 + \frac{R_{20}^2}{R_{10}^2 - R_{20}^2}$$

۲-۲- ناحیه دوم

با جایگذاری توابع مرزی $r=R_m$ و r_2 به ترتیب در r_1 و r_2 در رابطه (۱) تابع جریان ϕ_2 که الگوی جریان در ناحیه II را نشان می‌دهد، به صورت رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

$$\phi_2 = Q_2 \left[\frac{r^2 - R_m^2}{r_2^2 - R_m^2} + A_2 (r^2 - R_m^2)(r^2 - r_2^2) \right] \quad (12)$$

۲-۳- ناحیه سوم

تابع جریان ϕ_3 الگوی جریان در ناحیه III را مشابه ناحیه I طبق رابطه (۱۹) نشان می‌دهد:

$$\phi_3 = Q_3 \left[\frac{r^2 - r_2^2}{r_1^2 - r_2^2} + A_3 (r^2 - r_1^2) (r^2 - r_2^2) \right] \quad (19)$$

که Q_3 دبی حجمی جریان در هر سطح مقطع از ناحیه III است و مقدار آن باید با Q_1 برابر باشد. A_3 گرادیان توزیع سرعت افقی با مشخص شدن شرایط مرزی روی سطح S_8 به دست می‌آید. میدان سرعت در ناحیه III مشابه ناحیه I است.

$$V_r = -\frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \phi_3}{\partial z} = \frac{Q_3}{2\pi r} [-2R(z) + 2A_3 r_2' r_2 (r^2 - r_1^2) + 2A_3 r_1' r_1 (r^2 - r_2^2) - A_3' (r^2 - r_1^2) (r^2 - r_2^2)] \quad (20)$$

$$R(z) = \frac{r_2' r_2 (r^2 - r_1^2) - r_1' r_1 (r^2 - r_2^2)}{(r_1^2 - r_2^2)^2}$$

$$V_z = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \phi_3}{\partial r} = \frac{Q_3}{\pi} \left[\frac{1}{r_1^2 - r_2^2} + A_1 (2r^2 - r_1^2 - r_2^2) \right] \quad (21)$$

$$V_\theta = 0 \quad (22)$$

مشابه حالت ϕ_1 و ϕ_2 تابع مرزی S_3 در خروجی قالب برای لایه پوسته، از پیوستگی خطوط جریان قابل محاسبه است.

$$r_{S3} = \sqrt{\frac{-B_3 - \sqrt{B_3^2 - 4A_3 C_3}}{2A_3}}, \quad B_3 = \frac{1}{r_1^2 - r_2^2} - A_3 (r_1^2 + r_2^2) - \frac{1}{R_{1f}^2 - R_{2f}^2}, \quad C_3 = -\frac{r_2^2}{r_1^2 - r_2^2} + A_3 r_1^2 r_2^2 + \frac{R_{2f}^2}{R_{1f}^2 - R_{2f}^2} \quad (23)$$

۲-۴- شرط تراکم ناپذیری

با استفاده از روابط تانسور نرخ کرنش در دستگاه مختصات استوانه‌ای، در هر ناحیه تانسور نرخ کرنش در میدان سرعت قابل محاسبه است. مؤلفه‌های عمودی تانسور نرخ کرنش از روابط زیر به دست می‌آیند.

$$\dot{\epsilon}_{rr} = \frac{\partial V_r}{\partial r} = \frac{1}{2\pi r^2} \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z \partial r} \quad (24)$$

$$\dot{\epsilon}_{zz} = \frac{\partial V_z}{\partial z} = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z \partial r} \quad (25)$$

$$\dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \frac{V_r}{r} = -\frac{1}{2\pi r^2} \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (26)$$

در نتیجه مجموع مؤلفه‌های تانسور نرخ کرنش برابر با صفر است؛ بنابراین، میدان سرعت ارائه شده، میدان سرعت مجاز است.

۲-۵- شرایط مرزی

از آنجا که روی سطح بین ناحیه‌های II و III لغزش وجود ندارد؛ بنابراین:

$$Z_1 \leq z \leq L; \quad [(V_z)_{r=r_2}]_{III} = [(V_z)_{r=r_2}]_{II} \quad (27)$$

در نتیجه A_3 قابل محاسبه است.

$$A_3(z) = \frac{1}{(r_1^2 - r_2^2)^2} - \frac{Q_2 (1 + A_2(z) (r_2^2 - R_m^2)^2)}{Q_3 (r_2^2 - R_m^2) (r_1^2 - r_2^2)} \quad (28)$$

مؤلفه‌های افقی و عمودی سرعت در امتداد سطح بین نواحی I و III که به صورت یک خط مستقیم عمودی فرض شده است، باید هر دو طرف با هم برابر باشند؛ یعنی:

$$z = L; \quad (V_r)_{III} = (V_r)_I, \quad (V_z)_{III} = (V_z)_I \quad (29)$$

بنابراین:

$$A_1(L) = A_3(L), \quad A_1'(L) = A_3'(L) \quad (30)$$

از روابط (۲۹) و (۳۰) و همچنین شرط مرزی هندسی $r_{s1}(Z_4) = R_{20}$ ضرایب b_1 ، c_1 و d_1 در رابطه (۴) محاسبه می‌شوند.

$$b_1 = \frac{F_o G_o - A_3(L)}{(Z_4 - L)^2} - \frac{A_3'(L)}{(Z_4 - L)}, \quad F_o = \frac{1}{R_{20}^2 - r_1^2(Z_4)}, \quad G_o = \frac{1}{R_{10}^2 - R_{20}^2} + F_o \quad (31)$$

$$c_1 = A_3'(L) - 2b_1 L \quad (32)$$

$$d_1 = A_3(L) - b_1 L^2 - c_1 L \quad (33)$$

از شرایط مرزی هندسی، $r_{s2}(Z_3)$ و $r_{s4}(Z_2)$ ثابت‌های b_2 و c_2 به دست می‌آیند.

$$b_2 = \frac{1}{Z_3^2 - Z_2^2} (I_o - I_f) \quad (34)$$

$$c_2 = I_o - b_2 Z_3^2, \quad I_o = \frac{1}{r_2^2(Z_3) - R_m^2} \left(\frac{1}{r_2^2(Z_3) - R_m^2} - \frac{1}{R_{20}^2 - R_m^2} \right), \quad I_f = \frac{1}{r_2^2(Z_2) - R_m^2} \times \left(\frac{1}{r_2^2(Z_2) - R_m^2} - \frac{1}{R_{2f}^2 - R_m^2} \right) \quad (35)$$

$$\Delta v_2 = \begin{cases} V_r \frac{dr}{dS} + (V_z - V_o) \frac{dz}{dS}; & z_3 < z_4 \\ V_r \frac{dr}{dS} - (V_z + V_o) \frac{dz}{dS}; & z_3 > z_4 \end{cases} \quad (42)$$

$$\Delta v_3 = V_r \frac{dr}{dS} - (V_z + V_{1f}) \frac{dz}{dS} \quad (43)$$

$$\Delta v_4 = V_r \frac{dr}{dS} - (V_z + V_{2f}) \frac{dz}{dS} \quad (44)$$

۲-۸- توان اصطکاکی

توان اصطکاکی از دست رفته در امتداد سطوح با ثابت اصطکاکی m از رابطه (۴۵) به دست می آید.

$$\dot{W}_f = \frac{m \sigma_m}{\sqrt{3}} \int_S |\Delta v| dS \quad (45)$$

برای سطوح اصطکاکی $S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$ و S_{11} مقادیر $|\Delta v|$ و از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$|\Delta v_5| = |(V_z)_I|_{r=r_1} \sqrt{1+r_1^2}, \quad dS_5 = \frac{2\pi r_1}{\cos \alpha} dz \quad (46)$$

$$|\Delta v_6| = |(V_z)_{III}|_{r=r_1} \sqrt{1+r_1^2}, \quad dS_6 = \frac{2\pi r_1}{\cos \alpha} dz \quad (47)$$

$$|\Delta v_7| = |(V_z)_I - (V_z)_{II}|_{r=r_2} \sqrt{1+r_2^2}, \quad dS_7 = \frac{2\pi r_2}{\cos \gamma} dz \quad (48)$$

$$|\Delta v_8| = 0, \quad dS_8 = \frac{2\pi r_2}{\cos \gamma} dz \quad (49)$$

$$|\Delta v_9| = |V_o|, \quad dS_9 = 2\pi R_{10} dz \quad (50)$$

$$|\Delta v_{10}| = |(V_z)_{r=R_m} - V_o|, \quad dS_{10} = 2\pi R_m dz \quad (51)$$

$$|\Delta v_{11}| = |V_{2f} - V_o|, \quad dS_{11} = 2\pi R_m dz \quad (52)$$

در نهایت کمیت‌های Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 و L و همچنین نسبت شعاع لایه هسته به شعاع کل قطعه در خروج از قالب، $\dot{\epsilon}_f = (R_{2f} - R_m) / (R_{1f} - R_m)$ ، پارامترهای متغیر برای کمینه ساختن توان کلی تغییرشکل هستند. نرخ کرنش مؤثر در هر ناحیه پلاستیک از مؤلفه‌های سرعت افقی و عمودی استخراج می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} &= \sqrt{\frac{2}{3} (\dot{\epsilon}_r^2 + \dot{\epsilon}_{zz}^2 + \dot{\epsilon}_{\theta\theta}^2 + 2\dot{\epsilon}_{rz}^2)}, \\ \dot{\epsilon}_r &= \frac{\partial V_r}{\partial r}, \quad \dot{\epsilon}_{zz} = \frac{\partial V_z}{\partial z}, \quad \dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \frac{V_r}{r}, \\ \dot{\epsilon}_{rz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (36)$$

۲-۶- توان داخلی تغییرشکل

توان داخلی تغییرشکل در ناحیه پلاستیک، \dot{W}_i ، از نرخ کرنش مؤثر و تنش سیلان میانگین ماده تغییرشکل یافته قابل محاسبه است.

$$\dot{W}_i = \sigma_m \int_V \dot{\epsilon} dV, \quad \sigma_m = \frac{\int_0^{\bar{\epsilon}_m} \sigma_c d\epsilon}{\bar{\epsilon}_m} \dot{\epsilon}_r \quad (37)$$

که σ_m ، تنش سیلان میانگین ماده است و $\bar{\epsilon}_m$ کرنش مؤثر میانگین برای هر لایه است که برای هسته از رابطه (۳۸) به دست می‌آید.

$$\bar{\epsilon}_{m2} = \ln \frac{R_{2o}^2 - R_m^2}{R_{2f}^2 - R_m^2} \quad (38)$$

و برای پوسته از رابطه (۳۹) قابل محاسبه است.

$$\bar{\epsilon}_{m1} = \ln \frac{R_{1o}^2 - R_{2o}^2}{R_{1f}^2 - R_{2f}^2} \quad (39)$$

۲-۷- توان برشی

رابطه کلی برای توان از دست رفته در امتداد سطوح ناپیوستگی سرعت در روش کرانه بالایی به صورت رابطه (۴۰) است.

$$\dot{W}_s = \frac{\sigma_m}{\sqrt{3}} \int_S |\Delta v| dS \quad (40)$$

که به ترتیب برای سطوح ناپیوستگی S_1, S_2, S_3 و S_4 اختلاف سرعت به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\Delta v_1 = \begin{cases} V_r \frac{dr}{dS} + (V_z - V_o) \frac{dz}{dS}; & z_4 < z_5 \\ V_r \frac{dr}{dS} - (V_z + V_o) \frac{dz}{dS}; & z_4 > z_5 \end{cases} \quad (41)$$

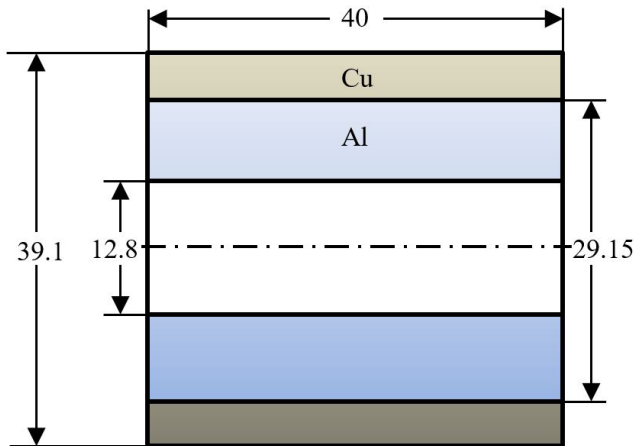
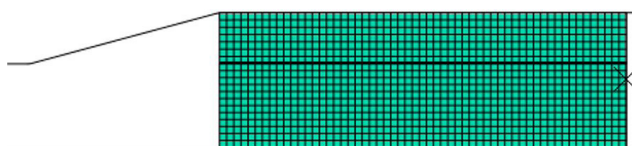
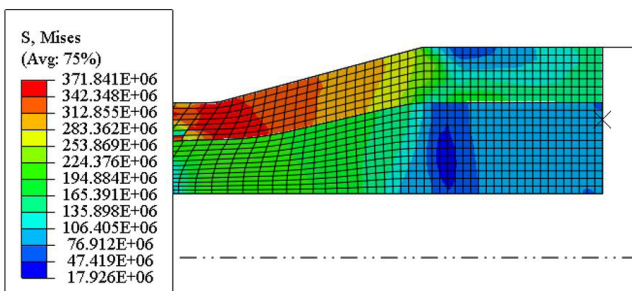


Fig. 2. Configuration of the bimetal tube before extrusion (dimension are in mm)

شکل ۲: ابعاد لوله دوفلزی قبل از اکستروژن (ابعاد بر حسب میلی متر)



(الف)



(ب)

Fig. 3. (a) The finite element mesh and (b) Von Mises contour for the deformed tube

شکل ۳: (الف) شبکه بندی اجزا محدود و (ب) تراز تنش فون میسز برای لوله تغییر شکل یافته

مقدار خطای مدل حاضر نسبت به آزمایش ۴ درصد است. این در حالی است که مقدار خطای حل کرانه بالایی مرجع [۱۲] نسبت به آزمایش ۱۲ درصد می باشد. از شکل مشخص است که حل اجزا محدود برای مقادیر جابه جایی بیشتر از ۰/۰۱۷ با نتایج آزمایش رفتار مشابهی ندارد؛ به همین علت حل کرانه بالایی با ایجاد حاشیه امنیت مناسب، احتمال خطا را به حداقل می رساند. اگرچه حل اجزا محدود در طول ۰/۰۱۷ بر آزمایش منطبق می شود و میزان خطا در این طول صفر است، این در حالی است که در مقادیر جابه جایی بالاتر، حل اجزا محدود پایین تر از نتایج آزمایش قرار گرفته است. همچنین یک حالت از خطوط جریان و مرزهای نواحی تغییر شکل برای

۲-۹- نیروی شکل دهی

توان کلی تغییر شکل، J^* ، از رابطه (۵۳) به دست می آید.

$$J^* = \dot{W}_i + \dot{W}_s + \dot{W}_f \quad (53)$$

و در نتیجه نیروی شکل دهی محاسبه می شود.

$$F_d = \frac{J^*}{V_o} \quad (54)$$

برای کمینه کردن نیروی شکل دهی که تابع متغیرهای Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 و L و r_f است از الگوریتم بهینه سازی شبیه سازی تبریید استفاده شده است.

۳- شبیه سازی اجزا محدود

به منظور اعتباردهی به نتایج تحلیلی، از قطعه دو فلزی آلومینیوم - مس با ابعادی که در شکل ۲ نشان داده شده است، استفاده شد. رابطه های تنش - کرنش برای مس و آلومینیوم به ترتیب از $\sigma_{Cu} = 389/7 \epsilon^{0.176}$ و $\sigma_{Al} = 218 \epsilon^{0.178}$ [۱] به دست می آیند. همچنین ثابت های اصطکاک $m_1 = 0/2$ ، $m_2 = 0/9$ و $m_3 = 0/1$ برای حل تحلیلی و شبیه سازی اجزا محدود استفاده شده است. فرآیند اکستروژن با استفاده از نرم افزار اجزا محدود آباکوس شبیه سازی شده است. با توجه به تقارن هندسی مسأله، مدل دوبعدی متقارن محوری برای حل آباکوس در نظر گرفته شده است. در تمامی حالات از اجزای CAX4R استفاده شد. قالب و سنبه به صورت کاملاً صلب فرض شده اند. قالب ثابت در نظر گرفته شده است و سنبه در جهت محور حرکت می کند. شکل ۳- الف لوله دوفلزی آلومینیوم-مس شبکه بندی شده در نرم افزار آباکوس قبل از اکستروژن را نشان می دهد. تراز تنش فون میسز برای لوله تغییر شکل یافته در شکل ۳- ب نشان داده شده است. تنش تسلیم پوسته (مس) و هسته (آلومینیوم) به ترتیب حدود ۲۶۰ مگاپاسکال و ۵۰ مگاپاسکال می باشد. همان طور که نشان داده شده، تنش فون میسز پوسته در ناحیه تغییر شکل در محدوده ۲۵۴ مگاپاسکال تا ۳۷۲ مگاپاسکال و تنش فون میسز هسته در ناحیه تغییر شکل در محدوده ۷۶ مگاپاسکال تا ۲۲۴ مگاپاسکال قرار دارند که از تنش تسلیم مس و آلومینیوم بیشتر است؛ بنابراین می توان نتیجه گرفت که هسته و پوسته در داخل قالب وارد ناحیه پلاستیک شده اند.

۴- نتایج و بحث

در این بخش اثر نیم زاویه قالب و درصد کاهش سطح مقطع بر نیروی اکستروژن و طول چسبندگی به دو روش حل تحلیلی و روش اجزا محدود بررسی شده است. همچنین نتایج به دست آمده از حل تحلیلی با نتایج آزمایش مرجع [۱] و شبیه سازی اجزا محدود مقایسه شده اند.

نیروی شکل دهی در فرآیند اکستروژن لوله دو فلزی نشان داده شده در شکل ۲، با نتایج آزمایش مرجع [۱]، حل کرانه بالایی [۱۲] و شبیه سازی در شکل ۴ مقایسه شدند. شکل ۴ نشان می دهد که نتایج مدل حاضر با نتایج آزمایش و نتایج حاصل از شبیه سازی تطابق خوبی دارد. همچنین

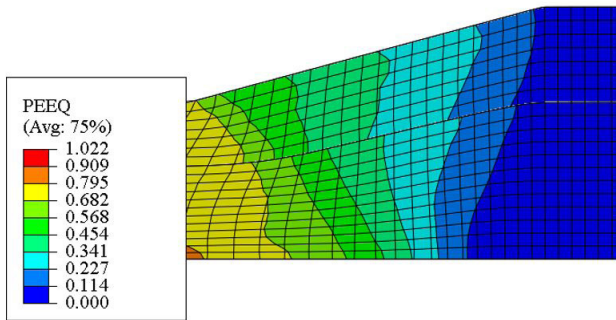


Fig. 6. Effective plastic strain contour for bimetal tube

شکل ۶: تراز کرنش مؤثر پلاستیک برای لوله دوفلزی

می‌دهد. مطابق شکل با افزایش میزان درصد کاهش سطح مقطع در نیم‌زاویه قالب ثابت، طول قالب بیشتر می‌شود و مرزهای تغییر شکل به سمت داخل قالب میل می‌کند. در واقع هرچه درصد کاهش سطح مقطع بیشتر شود نسبت طول ناحیه تغییر شکل به طول قالب کمتر می‌شود. در مقادیر کاهش سطح مقطع پایین تغییر شکل در طول قالب کم امکان پذیر نبوده و مرزهای ورودی ناحیه تغییر شکل به سمت خارج قالب رانده می‌شود. همچنین شکل ۷ نشان می‌دهد که میدان سرعت کروی که در کارهای گذشته برای لوله دوفلزی استفاده شده است، خطای زیادی دارد و فقط در مقادیر کاهش سطح مقطع‌های پایین به واقعیت نزدیک‌تر است.

شکل ۸ نسبت $l/(Z_4 - Z_1)$ را بر حسب نیم‌زاویه قالب نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش نیم‌زاویه قالب در میزان کاهش سطح مقطع ثابت ابتدا نسبت طول چسبندگی بیشتر می‌شود و استحکام بین دو فلز افزایش می‌یابد. پس از آن با افزایش نیم‌زاویه قالب نسبت طول چسبندگی کاهش می‌یابد تا از یک مقدار به بعد به دلیل کاهش سطح مقطع زیاد در طول قالب کم، دو فلز با سرعت‌های متفاوت از قالب خارج می‌شوند. همچنین با توجه به اینکه هرچه نسبت $l/(Z_4 - Z_1)$ به ۱ نزدیک‌تر باشد سطح اصطکاکی بین دو فلز و در نتیجه توان اتلافی اصطکاکی کمتر است؛ بنابراین شکل ۸ نشان‌دهنده مقدار نیم‌زاویه بهینه قالب براساس این نسبت است. با توجه به شکل بهترین حالت برای این معیار زاویه ۱۵ درجه است. در زاویه‌های کمتر از این مقدار به دلیل کمتر بودن فشار قالب استحکام قطعه نهایی کمتر است و توان بیشتری صرف اصطکاک می‌شود. در زاویه‌های بیشتر از ۱۶ نیز به دلیل تغییر شکل بالا در طول قالب کم قطعه نهایی استحکام کمتری دارد.

در شکل ۹ منحنی تغییرات نیروی اکستروژن بر حسب نیم‌زاویه قالب با تغییر درصد کاهش سطح مقطع در صورت ثابت بودن ثابت اصطکاک برشی نشان داده شده است. همان‌گونه که نشان داده شده، با افزایش درصد کاهش سطح مقطع، طول نیم‌زاویه بهینه قالب کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد کاهش سطح مقطع به دلیل آن که قطر خروجی قالب کاهش یافته، نیروی بیشتری برای انجام فرآیند لازم است.

اکستروژن لوله دوفلزی با لایه هسته از جنس آلومینیوم و لایه پوسته از جنس مس در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل میدان سرعت ارائه شده خطوط جریان فلز را به صورت منحنی نمایش می‌دهد.

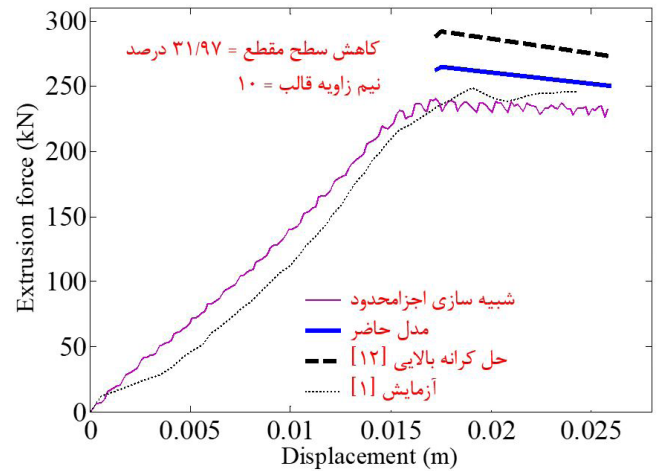


Fig. 4. Comparison of analytical model, FEM, experimental and the upper bound solution [2] force-displacement curves

شکل ۴: مقایسه نیروی اکستروژن لازم به دست آمده از مدل حاضر، آزمایش [۱]، شبیه‌سازی و حل کرانه بالایی مرجع [۱۲]

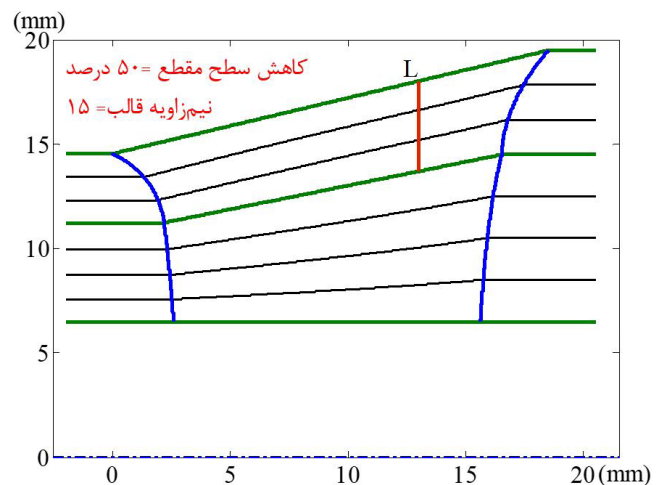


Fig. 5. The stream lines and the deformation zone boundaries in bi-metal tube extrusion

شکل ۵: خطوط جریان و مرزهای ناحیه تغییر شکل در اکستروژن لوله دوفلزی

برای مقایسه مرزهای نواحی تغییر شکل به دست آمده از حل کرانه بالایی در شکل ۵ با مرزهای نواحی تغییر شکل در شبیه‌سازی اجزای محدود، تراز کرنش مؤثر پلاستیک برای لوله دوفلزی در شکل ۶ نشان داده شده است. مقایسه شکل ۵ و شکل ۶ نشان می‌دهد که مرزهای ورودی و خروجی تطابق بسیار خوبی با حل تحلیلی دارند.

شکل ۷ نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی حل تحلیلی برای مقادیر مختلفی از درصد کاهش سطح مقطع به ازای نیم‌زاویه قالب ثابت را نشان

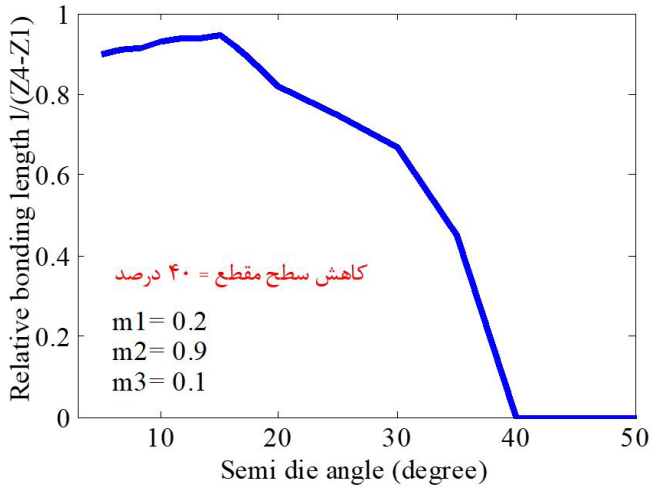


Fig. 8. Effect of semi die angle upon the bonding length at the interface between layers

شکل ۸: اثر نیم زاویه قالب بر طول چسبندگی سطح بین دو فلز

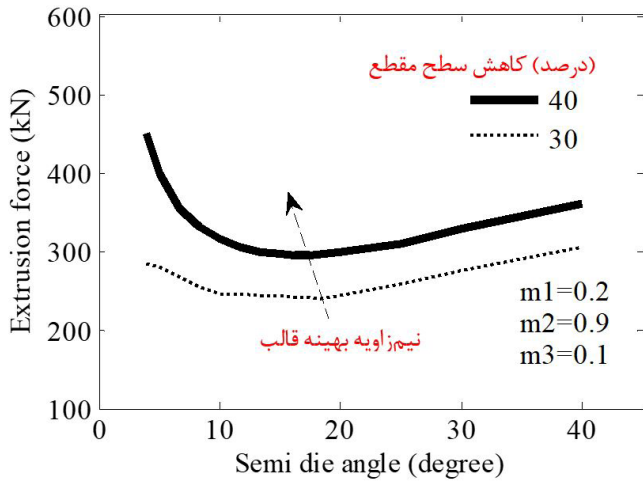


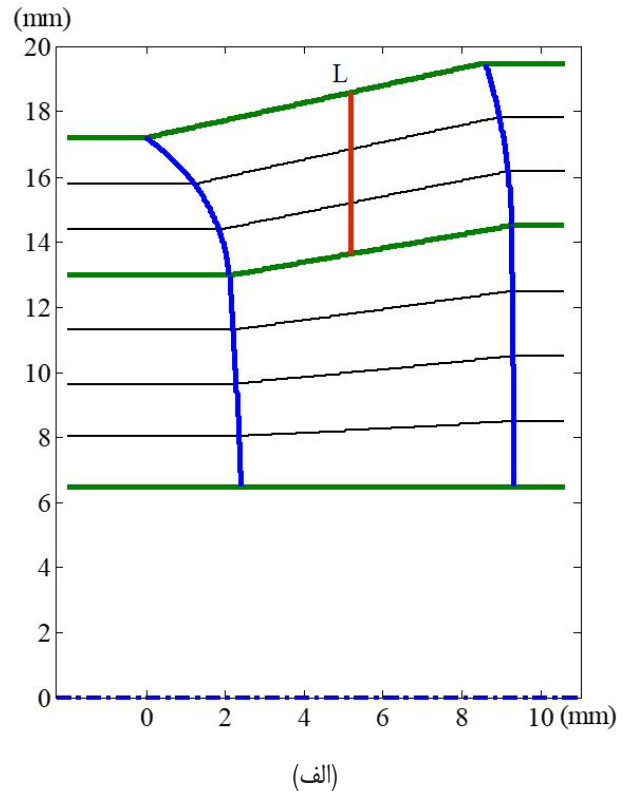
Fig. 9. The effect of reduction in area on the optimum semi die angle

شکل ۹: اثر درصد کاهش سطح مقطع بر نیم زاویه بهینه قالب

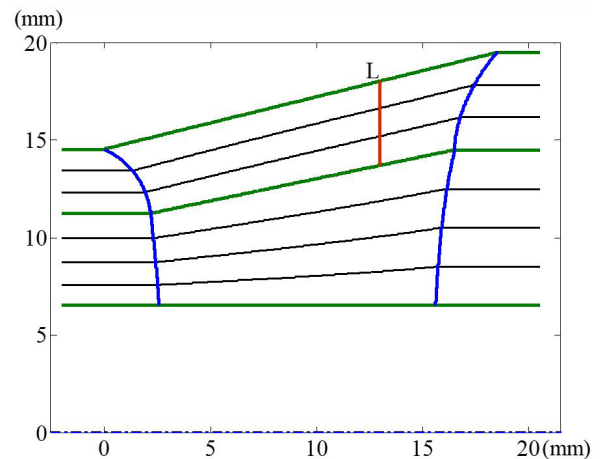
۵- نتیجه گیری

در این مقاله به تحلیل کرانه بالایی و شبیه سازی اجزا محدود اکستروژن لوله دوفلزی به روش تابع جریان پرداخته شد. مدل تحلیلی ارائه شده در کار حاضر برای لوله هایی با شعاع مندرل دلخواه رفتار چسبندگی دو فلز در سطح مشترک بین دو فلز را بررسی می کند. در این تحلیل از سه ناحیه تغییر شکل استفاده شده و موقعیت نقطه شروع چسبندگی دو فلز به هم در سطح مشترک، تعیین و نتایج زیر حاصل شد:

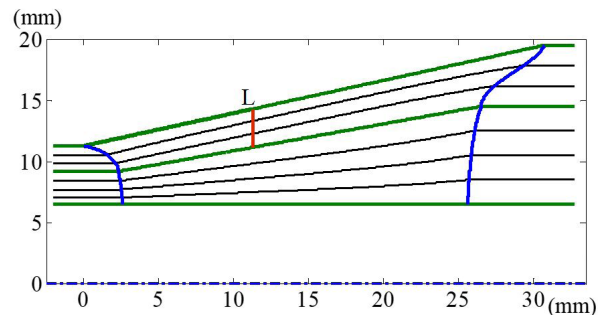
۱. با افزایش مقدار کاهش سطح مقطع در نیم زاویه قالب ثابت مرزهای ورودی نواحی تغییر شکل به سمت داخل قالب میل می کند و نسبت طول مرز تغییر شکل به طول قالب کاهش می یابد.
۲. با زیاد شدن نیم زاویه قالب چسبندگی دو فلز ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. در نیم زاویه های بالا چسبندگی بین دو فلز به وجود نمی آید.



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 7. Effect of reduction in area on the deformation zones for 15° of semi die angle (a) 25% (b) 50% (c) 75%

شکل ۷: اثر کاهش سطح مقطع بر نواحی تغییر شکل در نیم زاویه قالب ۱۵ درجه برای لوله دوفلزی (الف) ۲۵% (ب) ۵۰% (ج) ۷۵%

| | |
|-----------------------------------|-----------------------|
| نسبت ضخامت هسته به ضخامت کلی لوله | ξ |
| جریان تنش در ماده | σ |
| میانگین تنش سیلان | σ_m |
| کرنش مؤثر میانگین | $\bar{\varepsilon}_m$ |
| تابع جریان فلز | ϕ |
| مشتق () نسبت به z | $()'$ |

زیرنویس‌ها

| | |
|-----------------------------------|-----|
| بعد از اکستروژن (در خروج از قالب) | f |
| قبل از اکستروژن (در ورود به قالب) | O |
| پوسته | 1 |
| هسته | 2 |

منابع

- [1] S.T. Momeni, S.J. Hosseinipour, S. Nourouzi, A.H. Gorji, Experimental Investigation of Bimetallic Tubes, in: *AMPT Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2009.
- [2] S. Berski, H. Dyja, G. Banaszek, M. Janik, Theoretical analysis of bimetallic rod extrusion process in double reduction dies, *Journal of Materials Processing Technology*, 154 (2004) 153-583.
- [3] C.S. Hartley, Upper-bound analysis of extrusion of axisymmetric, piecewise, homogeneous tubes, *International Journal of Mechanical Sciences*, 15 (1973) 651-663.
- [4] B. Avitzur, R. Wu, S. Talbert, Y.T. Chou, Criterion for prevention of core fracture during extrusion of bimetal rods, *Journal of Engineering for Industry*, 104 (1982) 293-304.
- [5] D.Y. Yang, Y.G. Kim, C.M. Lee, An Upper Bound Solution For Axisymmetric Extrusion of Composite Rods Through Curved Dies, *Int. J. Mech. Tools Manufact*, 15 (1991) 651-663.
- [6] N.R. Chitkara, A. Aleem, Extrusion of axi-symmetric bi-metallic tubes from solid circular billets: application of a generalized upper bound analysis and some experiments, *International Journal of Mechanical Sciences*, 43 (2001) 2833-2856.
- [7] N.R. Chitkara, A. Aleem, Extrusion of axi-symmetric bi-metallic tubes: some experiments using hollow billets and the application of a generalized slab method of analysis, *International Journal of Mechanical Sciences*, 43 (2001) 2857-2882.
- [8] Y.M. Hwang, T.F. Hwang, An investigation into the plastic deformation behavior within a conical die during

۳. بیشترین طول چسبندگی نسبت به طول قالب در مرز دو فلز در نیم‌زاویه بهینه قالب حاصل می‌شود.
۴. با زیاد شدن میزان کاهش سطح مقطع، نیروی اکستروژن افزایش و نیم‌زاویه بهینه قالب کاهش می‌یابد.


فهرست علائم

| | |
|---|------------------------------|
| تابع گرادیان توزیع سرعت افقی | A |
| توان کلی تغییرشکل | J^* |
| نقطه شروع چسبندگی دو فلز | L |
| طول چسبندگی دو فلز | l |
| ثابت اصطکاک بین دو فلز | m_1 |
| ثابت اصطکاک بین پوسته و قالب | m_2 |
| ثابت اصطکاک بین مندرل و هسته | m_3 |
| دبی حجمی در هر سطح مقطع | Q |
| تابع مرزی در امتداد سطح قالب | r_1 |
| تابع مرزی در امتداد سطح بین دو فلز | r_2 |
| تابع مرزی در امتداد مرزهای نواحی تغییرشکل | $r_{s1} - r_{s4}$ |
| شعاع پوسته در خروج از قالب | R_{1f} |
| شعاع هسته در خروج | R_{2f} |
| شعاع اولیه پوسته | R_{1o} |
| شعاع اولیه هسته | R_{2o} |
| شعاع مندرل | R_m |
| سطوح ناپیوستگی سرعت | $S_1 - S_4$ |
| سطوح اصطکاک | $S_5 - S_{11}$ |
| سرعت لوله در ورودی و خروجی قالب | V_o, V_f |
| مولفه سرعت افقی و شعاعی | V_z, V_r |
| اختلاف سرعت مماسی در سطوح ناپیوستگی سرعت | $\Delta v_1 - \Delta v_4$ |
| اختلاف سرعت اصطکاک | $\Delta v_5 - \Delta v_{11}$ |
| توان اصطکاک از دست رفته | \dot{W}_f |
| توان داخلی تغییرشکل | \dot{W}_i |
| توان برشی از دست رفته | \dot{W}_s |
| موقعیت افقی مرزهای نواحی تغییرشکل | Z |

علائم یونانی

| | |
|-------------------------------|---------------------|
| نیم زاویه قالب | α |
| زاویه امتداد سطح میانی دو فلز | γ |
| نرخ کرنش ماده | $\dot{\varepsilon}$ |

- [11] A. Khosravifard, R. Ebrahimi, Investigation of parameters affecting interface strength in Al/Cu clad bimetal rod extrusion process, *Material and Design*, 31 (2009) 493-499.
- [12] H. Haghghat, G.R. Asgari, A generalized spherical velocity field for bi-metallic tube extrusion through dies of any shape, *International Journal of Mechanical Sciences*, 53 (2011) 248-253.
- composite rod extrusion, *Journal of Materials Processing Technology*, 121 (2004) 226-233.
- [9] A.K. Tayal, R. Natarajan, A finite element analysis of axisymmetric extrusion of composite rods, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 21 (1981) 227-235.
- [10] J.L. Alcaraz, J.G. Sevillano, An analysis of the extrusion of bimetallic by numerical simulation, *international Journal of Mechanical Sciences*, 38 (1996) 157-173.

| | |
|---|---|
| <p>Please cite this article using:</p> <p>M. Beyranvand and H. Haghghat, A New Deformation Model for Bimetal Tubes Extrusion Process, <i>Amirkabir J. Mech. Eng.</i>, 49(4) (2018) 819-828.</p> <p>DOI: 10.22060/mej.2016.808</p> | <p>برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:</p>  |
|---|---|