چهاردهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی اصفهان
Website:http://isme2006.iut.ac.ir E-mail:isme2006@cc.iut.ac.ir

دانشگاه صنعتی اصفهان
انجمن مهندسان مکانیک

تاریخ: ۸۵/۳/۲۶
شماره: ۲۱۷۰/ک/۱۱۰

ISME2006

گواهی

بدینوسیله گواهی می شود آقایان محمدرضا جعفری، فرهاد کلاهان و سید مجتبی زبرجد مقاله‌ای تحت عنوان:

طراحی فرآیند شکل‌دهی آلیاژ آلومینیوم A356 در حالت نیمه‌جامد با بکارگیری شبیه‌سازی حجم محدود

برای چهاردهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک (اردیبهشت ماه ۱۳۸۵) ارسال داشته‌اند و این مقاله در داوری مورد پذیرش قرار گرفته است.

با تشکر

دبیرخانه چهاردهمین کنفرانس مهندسی مکانیک

آدرس: اصفهان- دانشگاه صنعتی اصفهان- دانشکده مهندسی مکانیک- کدپستی ۸۴۱۵۶
تلفن: ۰۳۱۱-۳۹۱۵۲۰۹ فاکس: ۰۳۱۱-۳۹۱۵۲۶۵

چهاردهمین کنفرانس سالانه و دهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک
اردیبهشت۱۳۸۵ اصفهان- دانشگاه صنعتی اصفهان

طراحی فرآیند شکل‌دهی آلیاژ آلومینیوم A356 در حالت نیمه‌جامد با بکارگیری شبیه‌سازی حجم محدود

محمدرضا جعفری[۱]، فرهاد کلاهان[۲]، سید مجتبی زبرجد[۳]

گروه مهندسی مکانیک وگروه مهندسی متالورژی-دانشکده فنی مهندسی-دانشگاه فردوسی مشهد،

m_jafari56@yahoo.com

چکیده

از آنجا که امروزه گسترش و توسعه شیوه‌های جدید و نو در زمینه تولید، به یک پارامتر اصلی در دنیای رقابت تبدیل شده است، لذا بکارگیری روشهای نوین در زمینه شکل‌دهی فلزات، از طریق بهره‌گیری از یک حالت خاص از فلزات (حالت نیمه‌جامد) مورد توجه فراوانی قرارگرفته است. فرآیندهای شکل‌دهی در حالت نیمه‌جامد (solid Forming-Semi) روشهای نسبتاً جدیدی بوده و تنها دو دهه از بکارگیری آنها می‌گذرد، لذا در بین محققین این زمینه، یک اتفاق نظر کلی درباره روش مورد استفاده برای شبیه‌سازی رفتار ماده در حالت نیمه‌جامد وجود ندارد. از این رو از روشهای ریاضی متعددی در قالب نرم‌افزارهای مختلف به منظور شبیه‌سازی رفتار ماده در حالت نیمه‌جامد استفاده شده است. یکی از این روشهای ریاضی، روش عددی حجم محدود می‌باشد که در سالهای اخیر به منظور حل معادلات حاکم بر فرآیندهای شکل‌دهی مورد استفاده قرار گرفته و بر اساس نتایج از سرعت تحلیل بالاتری در مقایسه با سایر روشهای عددی بخصوص روش اجزای محدود برخوردار می‌باشد. یکی از مهمترین و پرکاربردترین فرآیندهای شکل‌دهی در حالت نیمه‌جامد، روش اکستروژن پیشرو در حالت نیمه‌جامد می‌باشد که در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار حجم محدود geSuperFor به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. همچنین جوابهای حاصل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و نشان داده شده است که جواب بدست آمده با نتایج تجربی تطابق خوبی دارد.

واژه‌های کلیدی: فرآیند اکستروژن پیشرو در حالت نیمه‌جامد - آلیاژهای آلومینیوم در حالت نیمه‌جامد - شبیه‌سازی کامپیوتری - روش حجم محدود

۱- کارشناس ارشد

۲- دانشیار

۳- دانشیار

طراحی فرآیند شکل‌دهی آلیاژ آلومینیوم A۳۵۶ در حالت نیمه‌جامد با بکارگیری شبیه‌سازی حجم محدود

محمدرضا جعفری[۱]، سید مجتبی زبرجد[۲]، فرهاد کلاهان[۳]

گروه مهندسی مکانیک و گروه مهندسی متالورژی-دانشکده فنی مهندسی-

دانشگاه فردوسی مشهد، ص-پ ۱۱۱۱-۹۱۷۷۵

m_jafari56@yahoo.com

چکیده

از آنجا که امروزه گسترش و توسعه شیوه‌های جدید و نو در زمینه تولید، به یک پارامتر اصلی در دنیای رقابت تبدیل شده است، لذا بکارگیری روشهای نوین در زمینه شکل‌دهی فلزات، از طریق بهره‌گیری از یک حالت خاص از فلزات (حالت نیمه‌جامد) مورد توجه فراوانی قرارگرفته است. فرآیندهای شکل‌دهی در حالت نیمه‌جامد (Semi-solid Forming) روشهای نسبتاً جدیدی بوده و تنها دو دهه از بکارگیری آنها می‌گذرد، لذا در بین محققین این زمینه، یک اتفاق نظر کلی درباره روش مورد استفاده برای شبیه‌سازی رفتار ماده در حالت نیمه‌جامد وجود ندارد. از این رو از روشهای ریاضی متعددی در قالب نرم‌افزارهای مختلف به منظور شبیه‌سازی رفتار ماده در حالت نیمه‌جامد استفاده شده است. یکی از این روشهای ریاضی، روش عددی حجم محدود می‌باشد که در سالهای اخیر به منظور حل معادلات حاکم بر فرآیندهای شکل‌دهی مورد استفاده قرار گرفته و بر اساس نتایج از سرعت تحلیل بالاتری در مقایسه با سایر روشهای عددی بخصوص روش اجزای محدود برخوردار می‌باشد. یکی از مهمترین و پرکاربردترین فرآیندهای شکل‌دهی در حالت نیمه‌جامد، روش اکستروژن پیشرو در حالت نیمه‌جامد می‌باشد که در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار حجم محدود SuperForge به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. همچنین جوابهای حاصل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و نشان داده شده است که جواب بدست آمده با نتایج تجربی تطابق خوبی دارد.

واژه‌های کلیدی: فرآیند اکستروژن پیشرو در حالت نیمه‌جامد- آلیاژهای آلومینیوم در حالت نیمه‌جامد- شبیه‌سازی کامپیوتری- روش حجم محدود

مقدمه

از آنجایی که روشهای متداول شکل‌دهی فلزات در عمل به اندازه کافی پیشرفت نموده‌اند و دیگر امکان گسترش بیش از این برای آنها وجود ندارد، از این رو کمپانیهای درگیر با مقوله تولید محصولات فلزی به منظور حفظ موقعیت خود در رقابتهای جهانی به این سمت حرکت نموده‌اند که روشهای متداول در زمینه شکل‌دهی فلزات را با هم ترکیب نمایند و از طریق این تلفیق روشهای نوینی را ارائه دهند که بتواند اهداف اقتصادی آنها را تأمین کند. این روشهای جدید که در واقع ترکیبی از روشهای ریخته‌گری (Casting) و شکل‌دهی (Forming) می‌باشند، در حقیقت همان روشهای بکارگرفته شده در زمینه شکل‌دهی فلزات در حالت نیمه‌جامد هستند که از آنها به Thixoforming تعبیر می‌گردد[۱].

بخصوص در زمینه تولید محصول با فلزاتی که بکارگیری روشهای متداول در مورد آنها مشکل و سخت می‌باشد، بکار

۱- کارشناس ارشد

۲- دانشیار

۳- دانشیار

بردن فرآیند شکل‌دهی فلزات در حالت نیمه‌جامد پیشنهاد می‌گردد. آنچه که در زمینه شکل‌دهی فلزات در حالت نیمه‌جامد می‌بایستی به آن توجه نمود این است که اصول حاکم براین فرآیندها در واقع همان اصول حاکم بر فرآیندهای متداول شکل‌دهی فلزات می‌باشد با این تفاوت که ماده در حالت نیمه‌جامد از خواصی برخوردار می‌باشد که در فرآیند شکل‌دهی با تکیه بر این خواص می‌توان به نتایج سودمندی دست یافت[۲].

یکی از مهمترین و پرکاربردترین روشهای شکل‌دهی در حالت نیمه‌جامد، روش اکستروژن پیشرو در حالت نیمه‌جامد و یا Thixo Forward Extrusion می‌باشد که در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار SuperForge که اساس آن بر پایه روش حجم محدود می‌باشد، شبیه‌سازی شده و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. روش حجم محدود که اساس این تحقیق را به خود اختصاص می‌دهد یکی از روشهای حل تقریبی عددی است که در این روش، المانهای حجمی، تقسیمات ساده‌ای از فضا می‌باشند و بوسیله نقاط اتصالی‌تعریف می‌شوند که این نقاط در فضا ثابت بوده و در نتیجه شبکه حجم محدود نیز به صورت یک محدوده ثابت مرجع عمل می‌نماید. مواد از بین این المانهای با حجم ثابت حرکت نموده و جرم، اندازه حرکت و انرژی از هر المان به المان دیگر منتقل می‌شود. در واقع بر خلاف روش اجزای محدود، در روش حجم محدود نیازی به استفاده از روش شبکه‌بندی مجدد نمی‌باشد.

مفهوم حالت نیمه‌جامد (Semi-solid) در یک ماده

بر اساس کلی‌ترین تعریف حالت نیمه‌جامد در ماده عبارتست از حالتی از ماده که در آن مخلوطی از دو فاز جامد و مایع با درصدهای حجمی معین در کنار یکدیگر قرار گرفته اند[۳]. نمایی شماتیک از حالت نیمه‌جامد در یک ماده در شکل(۱) نشان داده شده است

به طور کلی در ساختار یک ماده نیمه‌جامد دو دسته از پارامترها دخالت دارند. این دو دسته پارامتر عبارتند از:

۱- عوامل ماکروسکوپی(خواص مکانیکی)

که شامل تنش سیلان،دمای کاری،کرنش،نرخ زمانی کرنش و غیره می‌باشند.

۲- عوامل میکروسکوپی(خواص متالورژیکی)

که شامل اندازه دانه‌ها، ساختار دانه‌بندی (globular,dendretic)، درصد بخش جامد، درصد بخش مایع و غیره می‌باشند.

از میان عوامل میکروسکوپی موثر در ساختار میکروسکوپی ماده نیمه‌جامد، درصد بخش جامد (Solid Fraction) یا f_S و درصد بخش مایع (Liquid Fraction) یا f_l بیشترین تاثیر را در رفتار ماده نیمه‌جامد می‌گذارند. این دو پارامتر با استفاده از قانون تعادل به گونه زیر تعریف می‌شوند:

$$\sigma_{Tij} A_T = \sigma_{Sij} A_S + \delta_{ij} p A_L \qquad (۱)$$

$$\sigma_{Tij} = \sigma_{Sij} \frac{A_S}{A_T} + \delta_{ij} p \frac{A_L}{A_T} = \sigma_{Sij} f_S + \delta_{ij} p f_L \qquad (۲)$$

$$f_S + f_l = 1 \qquad (۳)$$

علاوه بر این آنچه که در تعریف حالت نیمه‌جامد در یک ماده می‌بایستی به آن توجه داشت این است که مفهوم مخلوطی از دو فاز جامد و مایع در تعریف، به این معنی است که در واقع برای هر ماده‌ای، با کنترل درجه حرارت می‌توان حالتی را بدست آورد که درآن حالت ماده تنها به صورت یک فاز وجود ندارد بلکه از ترکیبی از دو فاز جامد و مایع با درصدهای حجمی معین تشکیل شده است. در مورد یک ماده خالص، هنگامی که ماده به دمای ذوب رسانده شود، ماده در دمای ثابت شروع به ذوب شدن می‌نماید و از آن پس با گذشت زمان می‌توان به درصدهای حجمی مختلفی از فاز مایع و فاز جامد دست یافت. یعنی زمانی که درجه حرارت یک ماده خالص به درجه حرارت نقطه ذوب می‌رسد، هرچه زمان بیشتری از فرآیند حرارت دادن بگذرد، بدون تغییر کردن درجه‌حرارت ماده، مقدار بیشتری از فاز جامد به فاز مایع تبدیل گشته و در واقع درصد حجمی بخش جامد کاهش پیدا می‌کند. اما چنانچه ماده یک ماده خالص نبوده بلکه یک آلیاژ باشد که از چند ماده خالص با نقاط ذوب مختلف تشکیل شده است، برای دست‌یابی به حالت نیمه‌جامد در ماده می‌بایستی دما، به بالاتر از دمای ذوب یکی از عناصر اصلی آلیاژ که نقطه ذوب آن از نقطه ذوب سایر عناصر کمتر می باشد، رسانده شود. در واقع در یک آلیاژ نقطه ذوب جای خود را به یک بازه‌ای از

درجه‌حرارت می‌دهد که نقطه شروع این بازه، نقطه ذوب عنصری است که کمترین نقطه ذوب را دارا بوده و نقطه انتهای این بازه، نقطه ذوب عنصری می‌باشد که از بیشترین نقطه ذوب برخوردار می‌باشد[۴].

تئوری پلاستیسیته مورد استفاده برای حالت نیمه‌جامد ماده

زمانی که یک ماده تا دماهای بسیار بالایی واقع در بازه دمایی نیمه‌جامد ماده حرارت داده شود، بنا بر تجربیات آزمایشگاهی از خود رفتار خمیرگونه یا پلاستیک نشان می‌دهد. از همین رو با استفاده از دیدگاه تئوری پلاستیسیته می‌توان رفتار ماده را در این حالت تفسیر و تشریح نمود. در مورد رفتار یک ماده در حالت نیمه‌جامد مدلهای پلاستیک مختلفی ارائه شده است که از میان آنها مدل رفتاری سنگ (Tseng) و همکارانش از تئوریهای معروف موجود در این زمینه می‌باشد[۵]. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، این تئوری برخلاف ظاهر ساده‌اش، رفتار پلاستیک بسیاری از آلیاژهای سرب، آلومینیوم و مس را در حالت نیمه‌جامد بر اساس مدل ریاضی زیر شبیه‌سازی می‌نماید :

$$\sigma_f = A\dot{e}^{Bf_S} \qquad (۴)$$

که در آن σ_f تنش سیلان ماده در حالت نیمه‌جامد، $\dot{e}$ نرخ زمانی کرنش ماده در حالت نیمه‌جامد، A ثابت تسلیم، B ضریب تصحیح و f_S درصد بخش جامد می‌باشد. این مدل رفتاری همان مدلی می‌باشد که به عنوان مدل توجیه‌کننده رفتار پلاستیک ماده در بسیاری از فرآیندهای شکل‌دهی مورد استفاده قرار می‌گیرد و به صورت زیر معرفی می‌گردد :

$$\bar{\sigma} = C\dot{\bar{\varepsilon}}^{M} \qquad (۵)$$

با این تفاوت که ثابت A و نمای Bf_S در فرمول(۴) به ترتیب با ثابت C و نمای M در فرمول(۵) جایگزین شده‌اند.

خصوصیات فرآیند شبیه‌سازی شده

در فرآیندهای شکل‌دهی در حالت نیمه‌جامد به دلیل برخورداری از نقطه ذوب پایینتر، برای جنس قطعه‌کار غالباً از آلیاژهای آلومینیوم استفاده می‌گردد و از میان آلیاژهای آلومینیوم، استفاده از آلیاژ آلومینیوم A۳۵۶ (AlSi7Mg و یا DIN3.2315) بیشتر متداول می‌باشد. در راستای شبیه‌سازی، علاوه بر خواص مکانیکی قطعه‌کار، خواص حرارتی قطعه‌کار نیز مورد نیاز می‌باشد. این خواص برای آلیاژ آلومینیوم A۳۵۶ در درجه حرارت ۵۸۰°C (با توجه به اینکه نقطه شروع ذوب آلیاژ ۵۵۰°C می‌باشد) یعنی زمانیکه $f_S = ۰/۸۰$ می‌باشد در جدول (۱) آورده شده است.

در مورد جنس کفه بالایی (سنبه) و کفه پایینی (محفظه و قالب)، ذکر این نکته ضروری است که جنس آنها به گونه‌ای می‌باشد که نقطه ذوب آنها از نقطه ذوب کامل جنس قطعه‌کار بسیار بالاتر می‌باشد. در شبیه‌سازی، جنس این قطعات، فولاد ابزار (Tool Steel و یا DIN 1.2312) انتخاب شده است. در راستای شبیه‌سازی با نرم‌افزار مورد نظر، تنها خواص حرارتی مربوط به جنس ابزار تغییر شکل (فولاد ابزار) مورد نیاز می‌باشد که این خواص در جدول (۲) آورده شده است.

با توجه به اینکه در فرآیند اکستروژن پیشرو در حالت نیمه‌جامد نرخ زمانی کرنش از کرنش با اهمیت‌تر می‌باشد، لذا در راستای شبیه‌سازی با نرم‌افزار مربوطه از مدل رفتار پلاستیک ماده مطابق با معادله (۵) استفاده می‌گردد. برای آلیاژ آلومینیوم A۳۵۶ در حالت نیمه‌جامد یعنی دمای ۵۸۰°C، مقادیر M و C به ترتیب شامل اعداد ۰/۲۰۸ و ۱/۴۱MPa می‌باشند[۳].

برای شبیه‌سازی شرایط تماسی، مدل قالبها صلب فرض شده و از مدل اصطکاکی کولمب استفاده شده است. این مدل اصطکاکی در معادله (۶) نشان داده شده است :

$$\tau = \mu\sigma_n \qquad (۶)$$

که در آن τ تنش برشی ایجاد شده بین سطح قطعه‌کار و سطح ابزار تغییرشکل، μ ضریب اصطکاک استاتیکی و σ_n فشار موجود بین این سطوح است که ناشی از نیروی عمودی موجود بین این سطوح می‌باشد. در این شبیه‌سازی میزان ضریب اصطکاک بر اساس مرجع [۸] برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

در طول فرآیند شبیه‌سازی، قطعه‌کار استوانه‌ای توپر با قطر۳۰mm و طول ۳۰mm در نظر گرفته شده است. قالب به عنوان اصلی‌ترین بخش از ابزار تغییر شکل دارای یک قطر اولیه به اندازه۳۱mm می‌باشد که برابر با قطر داخلی محفظه (Container) در نظر گرفته شده است. از

آنجا که قالب مخروطی در نظر گرفته شده است، لذا زاویه قالب (α) پارامتر دیگری است که در اینجا مقدار آن°۲۰ در نظر گرفته شده است. همچنین قالب از یک قطر نهایی نیز برخوردار می‌باشد که در این فرآیند شبیه‌سازی، متناسب با نسبت اکستروژن مورد نظر دارای مقادیر متفاوتی می‌باشد. در این شبیه‌سازی نتایج تحلیلی از تغییر دادن دو پارامتر در فرآیند شکل‌دهی حاصل شده‌اند که عبارتند از نسبت اکستروژن و سرعت سنبه. برای زاویه قالب مقدار °۲۰ و برای نسبت اکستروژن مقادیر ۴، ۱۶ و ۶۴ در نظر گرفته شده است. همچنین برای سرعت سنبه از مقادیر۱۰mm/s، ۲۰mm/s، ۴۰mm/s، ۶۰mm/s، ۸۰mm/s و ۱۰۰mm/s استفاده شده است.

استفاده از خاصیت تقارن محوری قطعات

با توجه به ساختار هندسی قطعات شرکت کننده در فرآیند شکل‌دهی، استنباط می‌شود که این قطعات دارای تقارن محوری می‌باشند. به این معنی که نسبت به محوری که از مرکز سطح مقاطع عرضی آنها می‌گذرد دارای تقارن می‌باشند. بنابراین نیازی به تحلیل مدل هندسی کامل قطعات نمی‌باشد بلکه بر اساس خاصیت تقارن محوری می‌توان تنها بخش و یا به تعبیر دقیقتر قطاعی از قطعات را تحلیل نمود. این مسئله باعث کاهش تعداد المانهای بکار گرفته شده برای مدلسازی و در نتیجه کاهش یافتن زمانهای اجرای برنامه می‌شود. از این رو در راستای شبیه‌سازی، قطاعهای°۳۰ از قطعات بکار گرفته شده‌اند که این مسئله در شکل (۲) نمایش داده شده است.

بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی

همانند هر مسئله حجم محدود، به عنوان اولین و مهمترین گام در راستای شبیه سازی فرآیند، تعداد دقیق مشهای (المانها) مورد نیاز برای مشبندی ساختار هندسی قطعه‌کار محاسبه شده است. اگر چه مهمترین مسئله در این تحقیق بررسی وضعیت حرارتی قطعه‌کار در طول فرآیند شکل‌دهی می‌باشد ولی تعداد دقیق و بهینه المانهای مورد نیاز برای مشبندی قطعه‌کار از طریق بکارگیری یک تحلیل نیرویی بدست آورده شده‌اند. در شکل (۳) نمودار حساسیت به مش رسم شده و تعداد بهینه المان مورد نیاز برای مشبندی قطعه‌کار (۱۷۷۰المان) مشخص شده است.

همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، نتایج مربوط به فرآیند اکستروژن رو به جلو در دو حالت از ماده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. حالت اول مربوط به یک شمش آلومینیومی با دمای ۵۸۰°C می‌باشد که این دما مربوط به منطقه دو فازی دیاگرام فازی این آلیاژ است. حالت دوم، رفتار همان شمش را در دمای ۴۵۰°C (منطقه تک فازی) نشان می‌دهد. دلیل کاهش دما با افزایش درصد جابجایی سنبه در حالت نیمه‌جامد ماده را می‌توان اینگونه تشریح نمود، با توجه به این مسئله که عوامل موثر بر درجه حرارت قطعه‌کار به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱-گرمای ایجاد شده ناشی از کار پلاستیک تولید شده

۲-انتقال حرارت صورت گرفته بین قطعه‌کار با ابزار تغییر شکل و محیط.

لذا این کاهش دما در قطعه‌کار به این دلیل می‌باشد که میزان گرمای منتقل شده به ابزار تغییر شکل و محیط در طول فرآیند بیشتر از میزان گرمای تولید شده ناشی از کار پلاستیک می‌باشد. بنابراین در طول فرآیند میزان درجه‌حرارت قطعه‌کار کاهش پیدا می‌نماید.

ولی علت ایجاد افزایش دما در حالت جامد تک فازی را می‌توان به ساختار ماده در این حالت مرتبط دانست. در واقع ماده جامد از نیروهای جاذبه بین ملکولی بزرگتری نسبت به یک ماده نیمه‌جامد برخوردار است. بدلیل رساندن دمای ماده به بازه دمایی نیمه‌جامد، انرژی موجود در یک ماده نیمه‌جامد به اندازه زیادی نیروهای جاذبه بین اتمی آنرا کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر برای گسستن پیوندهای بین ملکولی در یک ماده جامد تک فازی و ایجاد تغییر شکل مومسان در آن، به کار پلاستیکی بسیار بیشتری نسبت به حالت نیمه‌جامد، نیاز می‌باشد. کار پلاستیک بزرگتر یعنی تولید گرمای بیشتر و این بدان معنی است که در یک ماده جامد تک فازی میزان گرمای تولید شده ناشی از کار پلاستیک، نسبت به ماده نیمه‌جامد بیشتر می‌باشد. این مسئله باعث می‌شود که در یک ماده جامد تک فازی حرارت ناشی از کار پلاستیک بیشتر از حرارتی باشد که از طریق سطح تماس شمش و ابزار تغییر شکل انتقال می‌یابد.

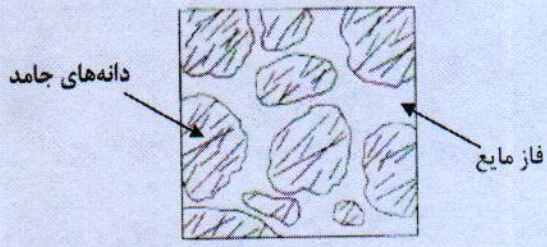
در نتیجه در طی فرآیند اکستروژن متداول بر خلاف روش TFE میزان درجه‌حرارت افزایش می‌یابد.

علاوه بر این با افزایش سرعت سنبه، میزان افت درجه‌حرارت بین ابتدا و انتهای فرآیند کاهش می‌یابد. این موضوع در شکل (۵) و برای زاویه قالب α=۲۰° و نسبت اکستروژن E.R.=۴ بوضوح نشان داده شده است. دلیل این امر را می‌توان به این صورت بیان نمود که با افزایش سرعت سنبه، گرادیان درجه حرارت در طول فرآیند کاهش می‌یابد یعنی اختلاف درجه حرارت بین ابتدا و انتهای فرآیند کاهش می‌یابد. این به دلیل آنست که هر چه سرعت سنبه زیادتر باشد، مدت زمان انجام فرآیند کمتر خواهد بود. در نتیجه قطعه‌کار فرصت کمتری برای تبادل حرارتی با ابزار تغییر شکل و محیط دارد. لذا درجه حرارت قطعه‌کار، دچار تغییرات کمتری می‌گردد. علاوه بر این، از یک دیدگاه دیگر می‌توان گفت که افزایش سرعت، موجب ازدیاد تنش سیلان، افزایش کار تغییر شکل و نتیجتاً ازدیاد درجه‌حرارت می‌شود و این ازدیاد درجه حرارت سبب کم شدن میزان کاهش دما می‌گردد. همچنین بر اساس شکل (۵) زمانی که میزان سرعت به مقادیر بسیار بالا نظیر ۸۰ mm/s و ۱۰۰mm/s رسانده می‌شود، گرادیان درجه حرارت در طول فرآیند تقریباً به سمت صفر میل می‌نماید. این به دلیل آن است که از آنجا که در سرعتهای بالا قطعه‌کار از فرصت چندانی برای تبادل حرارت با سنبه، مجموعه قالب و محیط برخوردار نمی‌باشد لذا درجه حرارت آن در طول فرآیند تقریباً در همان اندازه °C ۵۸۰ ثابت باقی می‌ماند و به تعبیر دیگر قطعه‌کار در یک فرآیند همدما (Isothermal) شرکت می‌نماید. علاوه بر این از دیدگاه دیگر می‌توان گفت که در سرعتهای بالا، حرارت ناشی از کار پلاستیک و اصطکاک با حرارتی که از طریق سطح تماس شمش و ابزار تغییر شکل انتقال می‌یابد، تقریبا برابر می‌باشد.

در شکل (۶) تغییرات درجه‌حرارت در طول فرآیند شکل‌دهی به ازای زوایای قالب مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همانگونه که نشان داده شده است افزایش زاویه قالب به ازای مقادیر مشخص سرعت سنبه و نسبت اکستروژن سبب لفزایش افت درجه‌حرارت در سرتاسر قطعه‌کار می‌گردد. از آنجا که مسافت پیموده شده توسط سنبه مقداری ثابت (۲۰cm) می‌باشد لذا افزایش زاویه قالب سبب می‌شود که قطعه‌کار سریعتر از انتهای قالب خارج شود و در نتیجه از مدت زمان کافی برای تبادل حرارتی با محیط برخوردار باشد. لذا گرمای بیشتری از قطعه‌کار به محیط منتقل شده و در نتیجه میزان افت درجه‌حرات در سرتاسر قطعه‌کار افزایش می‌یابد.

مقایسه تغییرات درجه‌حرارت در طول فرآیند شکل‌دهی به ازای نسبتهای اکستروژن در شکل (۷) نشان داده شده است. بر طبق این شکل، افزایش نسبت اکستروژن به ازای مقادیر مشخص زاویه قالب و سرعت سنبه منجر به لفزایش افت درجه‌حرارت در سرتاسر قطعه‌کار می‌گردد. زیرا افزایش نسبت اکستروژن باعث افزایش سطح تماس قطعه‌کار و قالب می‌گردد و در نتیجه گرمای بیشتری بین آنها مبادله می‌شود. این افزایش تبادل گرما در بین قطعه‌کار و قالب به معنی افزایش یافتن میزان افت درجه‌حرارت در سرتاسر قطعه‌کار می‌باشد.

از آنجا که در راستای فرآیند شبیه‌سازی سه پارامتر زاویه قالب، سرعت سنبه و نسبت اکستروژن به طور مستقل تغییر داده شده و برای هر کدام نیز مقادیر مختلفی در نظر گرفته می‌شود لذا برای فرآیند شبیه‌سازی شده حالتهای متعددی بدست می‌آید. هر کدام از این حالتها بر اساس میزان جابجایی سنبه به ده مرحله تقسیم‌بندی می‌شود و در هر مرحله توزیع درجه‌حرارت و در نتیجه توزیع درصد بخش جامد با مراحل دیگر متفاوت می‌باشد. به عنوان نمونه یکی از حالتهای فرآیند شبیه‌سازی شده حالتی است که در آن α=۲۰°، V=۱۰mm/s و E.R.=۴ می‌باشد که توزیع درجه‌حرارت در سرتاسر قطعه‌کار در مرحله سوم این حالت در شکل (۸) نمایش داده شده است. سپس با استفاده از این اطلاعات و بکارگیری دیاگرام فازی آلیاژ آلومینیوم مورد بحث و قانون اهرم، مقادیر درصد بخش جامد در تمامی بخشهای قطعه‌کار محاسبه شده و توزیع این مقادیر در سرتاسر قطعه‌کار در شکل (۹) نمایش داده شده است. علاوه بر این مقادیر مختلف درصد بخش جامد و درجه‌حرارت در بخش مرکزی قطعه‌کار در تمامی مراحل حالت ذکر شده در بالا از فرآیند در جدول (۳) نشان داده شده است. بر اساس اطلاعات جدول کاهش درجه‌حرارت در بخش مورد نظر سبب افزایش درصد بخش جامد می‌شود.



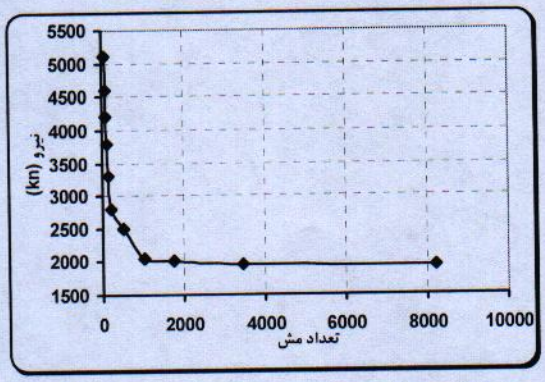
شکل۱- نمایی شماتیک از حالت نیمه‌جامد در یک ماده

جدول۱- خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ آلومینیوم A۳۵۶ در ۵۸۰°C [۶ و۳]

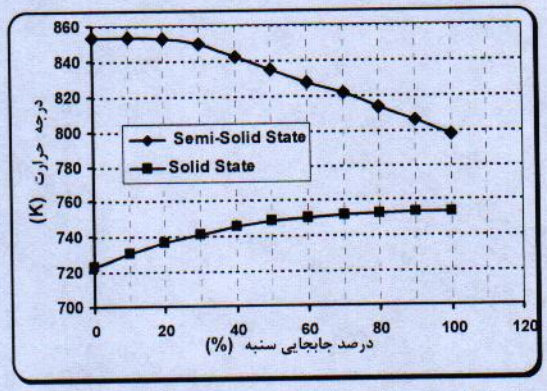
مدول الاستیسیته	۴٫۲(N/mm^2)
ضریب پواسون	۰٫۴
چگالی	۲۶۸۰(Kg/mm^3)
ضریب انتقال حرارت هدایتی	۱۵۹(W/mK)
ظرفیت گرمایی	۹۶۳(Joule/KgK)
ضریب انتقال حرارت جابجایی با محیط	۷(Watt/m^{2}K)
ضریب انتقال حرارت خطی	۲٫۳۶×۱۰$^{-۵}$(۱/°C)

جدول۲- خواص حرارتی مربوط به جنس ابزار تغییر شکل [۷]

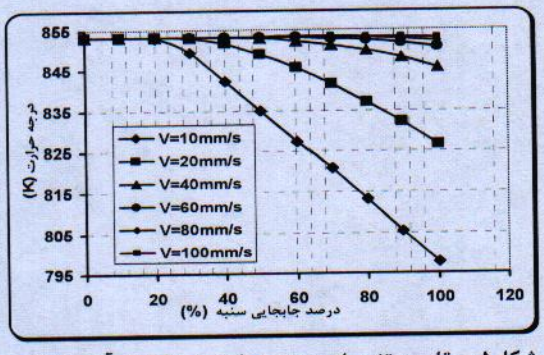
دمای اولیه ابزار تغییرشکل	۵۰۰°C
ضریب مقاومت سطح با قطعه‌کار	۳۵۰۰۰(Watt/m^{2}K)
ضریب انتقال حرارت جابجایی با محیط	۱۲(Watt/m^{2}K)



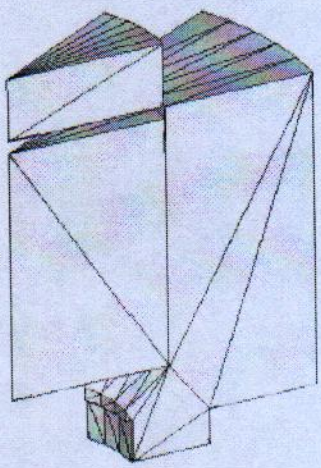
شکل۳- نمودار حساسیت به مش برای V=۶۰ mm/s و α =۲۰° و E.R.=۴



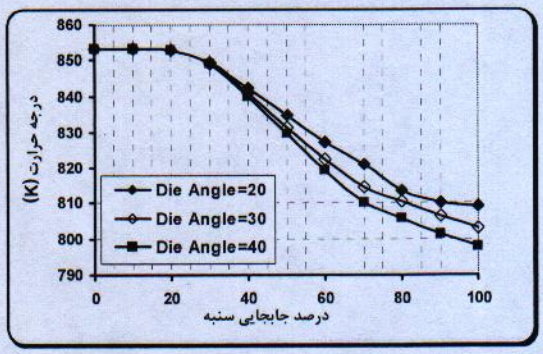
شکل۴- مقایسه تغییرات درجه‌حرارت برای ماده در حالت نیمه‌جامد و جامد تک فازی برای V=۱۰ mm/s و α =۲۰° و E.R.=۴



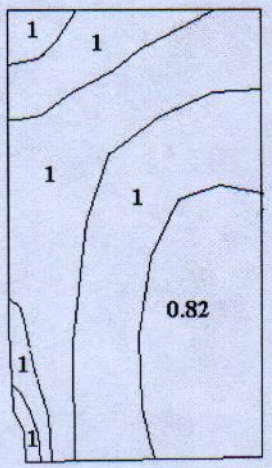
شکل۵- مقایسه تغییرات درجه‌حرارت در طول فرآیند به ازای سرعتهای مختلف برای α =۲۰° و E.R.=۴



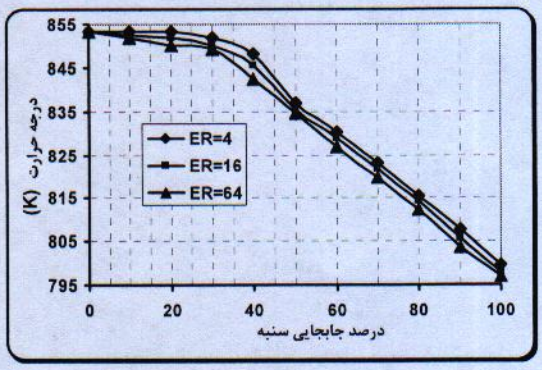
شکل۲- هندسه قالب و قطعه‌کار مورد استفاده در SuperForge



شکل۶- مقایسه تغییرات درجه‌حرارت در طول فرآیند به ازای زوایای قالب مختلف برای V=۱۰ mm/s و E.R.=۴



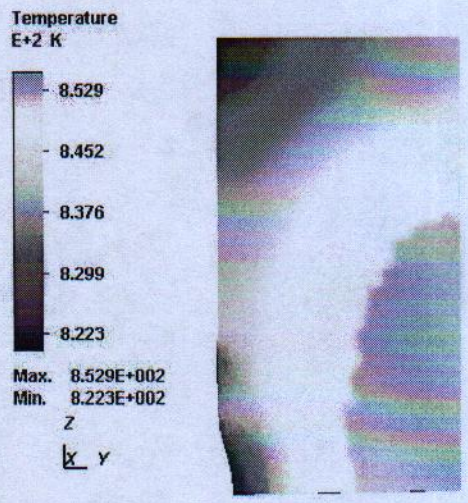
شکل۹- توزیع درصد بخش جامد در قطعه‌کار به ازای ۳۰٪ جابجایی سنبه برای V=۱۰mm/s و α =۲۰° و E.R.=۴



شکل۷- مقایسه تغییرات درجه‌حرارت در طول فرآیند به ازای نسبتهای اکستروژن مختلف برای V=۱۰mm/s و α =۲۰°

جدول۳- مقادیر درصد بخش جامد و درجه‌حرارت در بخش مرکزی قطعه‌کار برای V=۱۰mm/s و α =۲۰° و E.R.=۴

مرحله	درصد جابجایی قالب	f_s	درجه‌حرارت (°c)
۱	۱۰	۰/۸۰	۵۸۰
۲	۲۰	۰/۸۲	۵۸۰
۳	۳۰	۰/۸۸	۵۷۶
۴	۴۰	۰/۹۵	۵۶۹
۵	۵۰	۰/۹۸	۵۶۱
۶	۶۰	۱	۵۵۴
۷	۷۰	۱	۵۴۷
۸	۸۰	۱	۵۳۹
۹	۹۰	۱	۵۳۲
۱۰	۱۰۰	۱	۵۲۵



شکل۸- توزیع درجه‌حرارت در قطعه‌کار به ازای ۳۰٪ جابجایی سنبه برای V=۱۰mm/s و α =۲۰° و E.R.=۴

همچنین زمانیکه اندازه درجه‌حرارت کاهش پیدا کرده و به دمای انجماد (۵۵۵°C) می‌رسد، درصد بخش جامد برابر با عدد ثابت ۱ (بزرگترین مقدار خود) می‌شود و از آن به بعد اگر چه درجه‌حرارت کاهش بیشتری پیدا می‌نماید ولی میزان درصد بخش جامد هیچگونه تغییری نکرده و همواره میزان ثابت ۱ باقی می‌ماند.

جمعبندی

در این پژوهش فرآیند اکستروژن پیشرو در حالت نیمه‌جامد به کمک نرم‌افزار حجم محدود SuperForge شبیه‌سازی گشته و مورد تحلیل قرار گرفت. با استفاده از این شبیه‌سازی نتایج متعددی بدست آورده شد که پاره‌ای از آنها عبارتند از:

۱- تعداد بهینه المان مورد استفاده برای مشبندی قطعه‌کار ۱۷۷۰ عدد می‌باشد.

۲- با افزایش درصد جابجایی سنبه، در طول فرآیند بزرگترین درجه‌حرارت قطعه‌کار در ماده جامد افزایش و در ماده نیمه‌جامد کاهش می‌یابد.

۳- افزایش سرعت سنبه سبب کاهش گرایان درجه‌حرارت در طول فرآیند می‌شود.

۴- افزایش زاویه قالب به ازای مقادیر مشخص نسبت اکستروژن و سرعت سنبه تاثیر ناچیزی بر روی افت درجه‌حرارت در طول فرآیند شکل‌دهی دارد.

۵- به ازای مقادیر مشخص زاویه قالب و سرعت سنبه، افزایش نسبت اکستروژن تاثیر چندانی بر روی افت درجه‌حرارت در طول فرآیند شکل‌دهی ندارد.

۶- با بکارگیری توزیع درجه‌حرارت و قانون اهرم، توزیع درصد بخش جامد در قطعه‌کار محاسبه شده است. کنترل نمودن توزیع درصد بخش جامد می‌تواند در زمینه تولید قطعاتی با کیفیت بالا و برخوردار از خواص مکانیکی موردنظر بسیار مفید باشد.

مراجع

1- T. Brener, H. P. Mertens and G. Winning, "Thixoforging of aluminium alloys with a hydraulic forging press", Materials Science and Engineering, Vol.40, pp90-96, 1997.

2- R. Kopp and N. Witulski, Thixoextrusion of Aluminium Wrought Alloys, Journal of Materials Science and Engineering, vol.12, pp43-57, 1996.

3- C. G. Kang and J. H. Yoon, A finite element analysis on the upsetting process of semi-solid aluminum material, Journal of Materials Processing Technology, vol. 66, pp76-94, 1997.

4- J. H. Yoon, Y. T. Im and N. S. Kim, Finite element modeling of the deformation behavior of semi-solid materials, Journal of Materials Processing Technology, vol. 113, pp153-159, 2001.

5- A. A. Tseng and P. Kotrbacek, Deformation behavior of steels in mushy state, Materials Science and Engineering, vol. 56, pp65-73, 2000.

6- M. Koc, V. Vazquez, T. Witulski and T. Altan, Application of the finite element method to predict material flow and defects in the semi-solid forging of A356 aluminum alloys, Journal of Materials Processing Technology, vol. 59, pp106-112, 1996.

7- E. Ogris and P. J. Uggowitzer, Semi-solid backward extrusion of Al-7075, Journal of Materials Processing Technology, vol. 32, pp 90-102, 1999.

8- K. Watson and I. Demagor, Forming of Aluminium Alloy at Around Solidus Temperature, Journal of Machine Tools and Manufacture, vol.43, pp229-235, 2003.