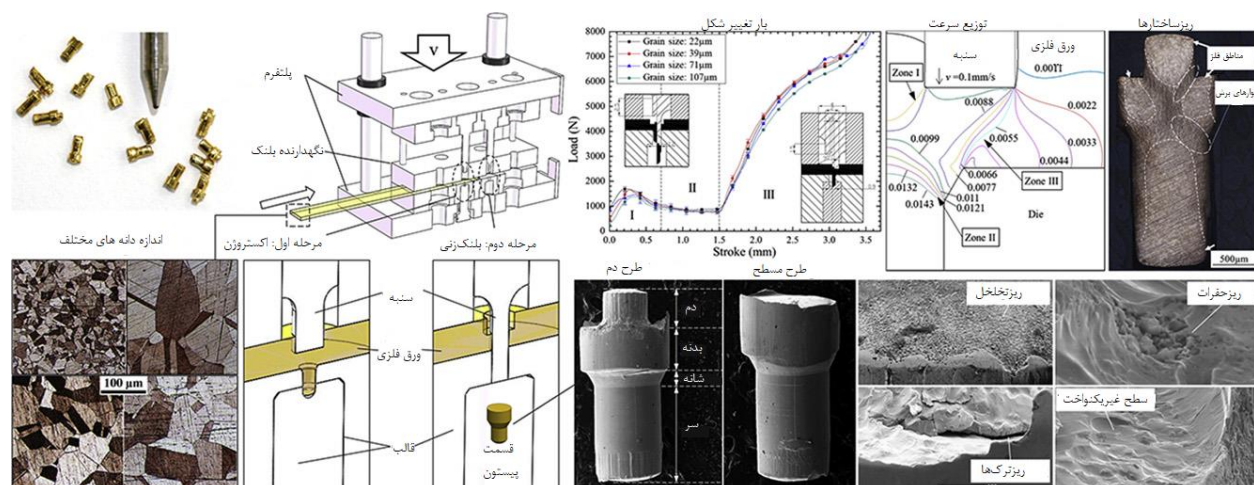


میکروفرمینگ چندمرحله‌ای قطعات پیستون پین‌شکل و تأثیر اندازه دانه بر کیفیت شکل‌دهی آنها

نکات برجسته

- یک سیستم میکروفرمینگ چندمرحله‌ای که مستقیماً از ورق فلزی استفاده می‌کند، برای ساخت میکروقطعات پین‌شکل به عنوان جایگزینی برای میکروماشینکاری توسعه داده شده است.
- قطعات پیستون با طرح دم الزامات تلورانس را برآورده می‌کنند، اما قطعات با طرح مسطح اینچنین نیستند.
- نتایج تجربی و عددی نشان داد که نوار برشی ترجیح می‌دهد با گرادپان سرعت و انباشتگی کرنش بیشتر تشکیل شود.
- کیفیت سطح میکروقطعات ریزدانه روی پروفیل‌های مدور قابل قبول است، اما در انتهای بخش سر نامطلوب است.

چکیده گرافیکی



چکیده

میکروفرمینگ چندمرحله‌ای میکروقطعات با استفاده مستقیم از ورق‌های فلزی برای رسیدگی به مسائل مربوط به موقعیت‌یابی پریفرم/بیلت، انتقال و خارج‌سازی در میکروفرمینگ توسعه داده شده است و پتانسیل آن را دارد که برای ساخت میکروقطعات پین‌شکل پیچیده با بهره‌وری بالا مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق، یک سیستم میکروفرمینگ چندمرحله‌ای با عملیات بلنک‌زنی و اکستروژن برای ساخت دو نوع قطعه پیستونی پین‌شکل با استفاده از ورق‌های برنجی توسعه داده شد و اثر اندازه دانه از جنبه‌های بار تغییر شکل، دقت ابعادی، تکامل ریزساختاری و کیفیت سطح بررسی شد. مشخص شد که اثر اندازه دانه منجر به انحراف جابجایی سنبه و تغییر

ابعاد قطعه می‌شود. شکل‌گیری و مشخصه‌های نوار برشی و منطقه فلز مرده به گرادیان سرعت و انباشتگی کرنش مربوط می‌شود. عیوب شکل‌دهی شامل میکروتُرک‌ها، ریزحفره‌ها، سطح ناهموار و بافت سطحی طولی به راحتی روی بخش بدنه و دم ایجاد می‌شود و میکروتخلخل‌ها در مواد درشت‌دانه ظاهر می‌شوند. با این حال، سطح مدور کیفیت مطلوبی را با هر اندازه دانه نشان می‌دهد. همه این یافته‌ها مبنایی برای تولید انبوه میکروقطعات پین‌شکل پیچیده با میکروفرمینگ چندمرحله‌ای فراهم نموده و دانش ما را از جنبه‌های رفتار تغییر شکل و جنبه‌های تضمین کیفیت محصول ارتقا می‌بخشد.

کلمات کلیدی: میکروفرمینگ چندمرحله‌ای، اثر اندازه دانه، نوار برشی، عیوب شکل‌دهی

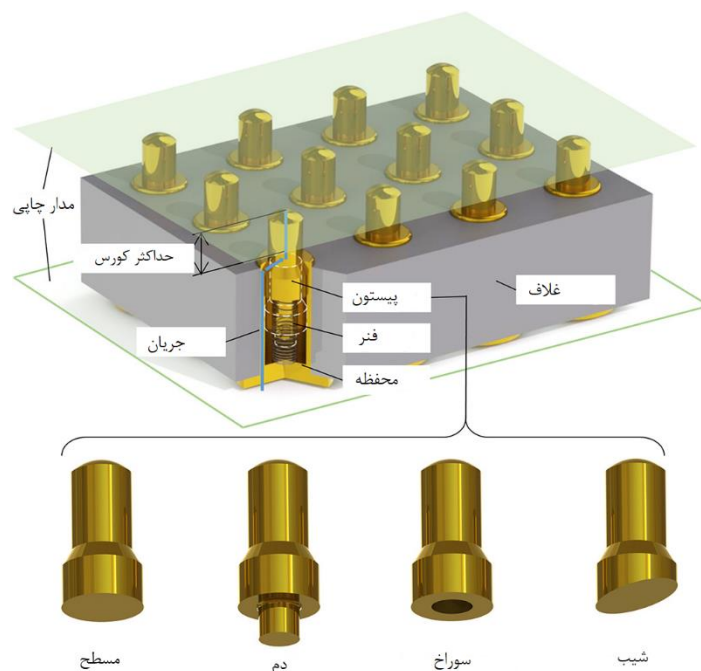
۱. مقدمه

روند رو به رشد کوچک‌سازی محصولات، تقاضا برای میکروقطعات مورد استفاده در الکترونیک، وسایل نقلیه و بسیاری دیگر از شاخه‌های صنعتی را به شدت افزایش می‌دهد [۱،۲]. بنابراین برای پاسخگویی به این تقاضا، فناوری‌های ساخت در مقیاس میکرو در اشکال مختلف مانند میکروماشینکاری، میکروتزریق، میکروفرمینگ و میکرومونتاژ به وجود آمده‌اند [۳]. پوگو پین^۱ به عنوان یک محصول مینیاتوری و یک نوع میکروکانکتور با دوام و استحکام خوب، که معمولاً در یک غلاف پلاستیکی مونتاژ می‌شود، نوعی قطعه است که به طور گسترده در الکترونیک برای ایجاد یک اتصال الکتریکی غیردائمی و انعطاف‌پذیر بین دو برد مدار چاپی^۲ (PCB) استفاده می‌شود و به طور کلی از پیستون با طرح‌های مختلف، مخفضه و فنر، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده، تشکیل شده است. هر قسمت در مجموعه پوگو پین میکروقطعه‌ای است که حداقل دو بعد کمتر از ۱ mm دارد. امروزه قطعات پیستون و مخفضه پوگو پین به طور معمول توسط میکروماشینکاری ساخته می‌شوند که برای ساخت بخش‌های مختلف به چند مرحله زمانبر نیاز دارد. چندین مرحله ماشینکاری اضافی برای ساخت استفاده می‌شود. برای برآورده شدن تلورانس و کیفیت مورد نیاز، عوامل زیادی از جمله سرعت برش، نرخ تغذیه، پرداخت سطح، انحراف ابزار و غیره باید در نظر گرفته شوند [۴]. از سوی دیگر، برای میکروفرمینگ، هیچ مرحله شکل‌دهی اضافی وجود ندارد، بلکه فقط یک ابزار پیشرفته با هندسه مناسب برای ساخت سازه‌های پیچیده با بهره‌وری بالاتر لازم است. فرآیند شکل‌دهی قابلیت کنترل بالاتری دارد و محصولات تولیدی با مجموعه ابزار یکسان قابل اعتمادتر هستند. بنابراین ثابت شده است که برای راندمان بالاتر و استفاده از مواد و خواص مکانیکی خوب قطعات نهایی امیدوارکننده است [۵،۶]. برای مقابله با مشکلات در جابجایی، حمل و نقل و خارج‌سازی بیلت/پریفرم/قطعه نهایی

^۱ pogo-pin

^۲ printed circuit board

در فرآیند شکل‌دهی و تسهیل کاربرد عملی میکروفرمینگ در صنایع، به اصطلاح میکروفرمینگ چندمرحله‌ای^۱ که یک روش بالقوه برای تحقق کاربرد گسترده صنعتی میکروفرمینگ برای تولید انبوه است توسعه و رشد یافته است. قطعات میکروفرمینگ چندمرحله‌ای متعددی مانند میکروقطعه فلنجی [۷]، میکروکانال [۸]، میکروگام^۲ [۹] و میکروقطعه مخروطی [۱۰] در تحقیقات قبلی ساخته شده‌اند. میکروفرمینگ چندمرحله‌ای، متشکل از چندین عملیات شکل‌دهی با یک توالی معین، به کارگیری مستقیم ورق‌های فلزی برای ساخت میکروقطعات توسط میکروابزارهای مرحله‌ای است، به این ترتیب که یک یا چند بخش خاص از میکروقطعاتی که باید ساخته شوند در هر عملیات شکل‌دهی مرحله‌ای شکل می‌گیرد و در نهایت میکروقطعات پیچیده با بخش‌های مینیاتوری پیچیده مختلف به تدریج تولید می‌شوند. مزایای اولیه این فرآیند عبارتند از: همترازی^۳ دقیق ابزار و قطعه کار، حمل آسان پریفرم برای عملیات بعدی، و خارج‌سازی کارآمد قطعات نهایی با عملیات بلنک‌زنی [۱۱]. در این تحقیق، امکان ساخت قطعات پین‌شکل با استفاده از فناوری میکروفرمینگ چندمرحله‌ای بررسی شد و یک سیستم میکروفرمینگ با هدف تولید کارآمد پوگو پین توسعه یافت. با در نظر گرفتن مشکلات احتمالی از نظر تغییر شکل و اثر اندازه دانه، درک و بینش علمی عمیقی در مورد فرآیند ایجاد شد.



شکل ۱. ساختار پوگو پین‌ها

¹ progressive microforming

² micro-pitch

³ alignment

در فرآیند میکروفرمینگ در مقیاس کوچک، تجربه و دانش توسعه یافته در روش‌های تولید ماکرو را به دلیل اثرات اندازه، به عنوان مثال اثرات هندسی، دانه‌های ریزساختاری و اندازه تریبولوژیکی و غیره نمی‌توان به طور مستقیم به کار برد [۱۲]. تحقیقات و بررسی‌های بسیاری برای مطالعه اثرات اندازه انجام شده است. مطالعات قبلی در مورد اثر اندازه دانه بر میکرواکستروژن نشان داد که مواد درشت‌دانه باعث شکل ناهمگن [۱۱]، سختی و استحکام کمتر [۱۳، ۱۴] و افزایش ضریب اصطکاک [۱۵، ۱۶] می‌شود. پاراسیز و همکاران [۱۴] نشان دادند زمانی که اندازه دانه در مقایسه با نمونه با مشخصه مینیاتوری رشد چشمگیری داشته باشد، نفوذ تغییر شکل برشی و سخت شدن در مناطق مرکزی اتفاق می‌افتد. جیانگ و همکاران [۱۷] تأثیر دما و اندازه دانه را در میکروفشردگی^۱ مطالعه نمودند و نشان دادند که ریزساختار درشت‌دانه درجه حساسیت به دمای شکل‌دهی را افزایش می‌دهد. فانگ و همکاران [۱۸] نشان دادند که وقتی نسبت ضخامت ماده به اندازه دانه به زیر یک کاهش می‌یابد، مکانیسم شکست از شکست نرم به شکست ترد تغییر می‌کند. لیو [۱۹] یک مدل تنش سیلان را برای تشخیص کشش میکرومقیاس از ماکرومقیاس با در نظر گرفتن نسبت ضخامت به اندازه دانه توسعه داد. ژائو و همکاران [۲۰] یک مدل زیرلی-آرمسترانگ^۲ تصحیح‌شده را برای نمایش ارتباط اندازه دانه و دما با تغییر شکل ماده پیشنهاد کردند. پارک و همکاران [۲۱] نشان دادند که کاهش اندازه دانه اولیه رفتار تبلور مجدد دینامیکی را بهبود می‌دهد که باعث افزایش ازدیاد طول^۳ مواد می‌شود. فن و همکاران [۲۲] اثر اندازه دانه را تحت تغییر شکل حرارتی و الکتریکی مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که مواد ریزدانه دمای گرمایش ژول^۴ بالاتری را نشان می‌دهند زیرا افزایش مرز دانه‌ها باعث کاهش رسانایی الکتریکی مواد می‌شود. منگ و همکاران [۲۳] اثر اندازه دانه و ضخامت و همچنین بافت کریستالوگرافی بر تغییر شکل ناهمسانگرد را با آزمون‌های کشش عمیق با مقیاس هندسی کاهش‌یافته بررسی کردند.

اثر اندازه موجب بروز مسائلی مانند رفتارهای تغییر شکل در فرآیند میکروفرمینگ و میکروفرمینگ چندمرحله‌ای، همچنین شکست سطحی، هندسه‌های نامطلوب و دقت ابعادی میکروقطعات می‌شود و توسط بسیاری از محققین مورد بررسی قرار گرفته است. فو و چان [۷] یک فرآیند شکل‌دهی چندمرحله‌ای را برای ساخت قطعات فلنجی میکرو و مسو با یک سوراخ موقعیت‌یاب مرکزی با استفاده از عملیات سوراخ‌زنی^۵ و اکستروژن توسعه دادند و دریافتند که اثر اندازه بر تنش سیلان، رفتارهای سیلان مواد و اشکال هندسی میکروقطعات تأثیر می‌گذارد. منگ و همکاران [۲۴] قطعات فلنجی چندسطحی^۶ را با میکروفرمینگ چهارمرحله‌ای ساختند. رابطه اثر اندازه دانه بین

¹ micro-compression

² Zerilli-Armstrong model

³ elongation

⁴ Joule heating temperature

⁵ punching

⁶ multi-level flanged part

تغییر شکل نامطلوب، دقت ابعادی و رفتارهای شکست نرم و اثرات معیارهای مختلف شکست نرم به طور نظام‌مند مورد بحث قرار گرفت. قاسمعلی و همکاران [۲۵] تأثیرات نسبت ابعادی پین و اثر فیله^۱ ورودی قالب بر روی میکروقطعات صفحه- پین تولیدشده توسط میکروفرمینگ چندمرحله‌ای را بررسی کردند. ژنگ و همکاران [۲۶] یک سیستم میکروفرمینگ چهارمرحله‌ای را برای ساخت قطعات فلنجی مخروطی توسعه دادند و تأثیر فرآیند شکل‌دهی بر اندازه هندسی و اندازه دانه، تغییر شکل نامطلوب، دقت ابعادی و عیوب سطحی قطعات را مورد مطالعه قرار دادند. ران و همکاران [۲۷] اثر استحکام‌بخشی نابجایی ناشی از منطقه فلز مرده^۲ را بر روی میکروفرمینگ چندمرحله‌ای بررسی و مدلی بر اساس این پدیده ایجاد کردند.

با وجود آنکه در مورد فرآیند میکروفرمینگ و میکروقطعات ساخته شده قبلاً مطالعاتی انجام شده است، هنوز تحقیقات کاملی در مورد میکروفرمینگ چندمرحله‌ای میکروقطعات پیچیده پین‌شکل وجود ندارد. قطعات پین‌شکل نه تنها به عنوان پیستون کانکتور به کار می‌روند، بلکه در سایر اجزای الکترونیکی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این تحقیق، یک سیستم میکروفرمینگ چندمرحله‌ای با دو عملیات بلنک‌زنی و اکستروژن با استفاده مستقیم از ورق‌های فلزی توسعه داده شد و دو نوع میکروقطعه پین‌شکل با و بدون بخش دم^۳ در شرایط اندازه دانه‌های مختلف ساخته شد. منحنی‌های بار-جابجایی فرآیندهای شکل‌دهی با سه مرحله تغییر شکل ریزساختارهای مختلف ارائه شد. اثر اندازه دانه بر تکامل ریزساختاری و انحراف ابعادی میکروقطعات میکروفرمینگ‌شده به صورت نظام‌مند مورد بررسی قرار گرفت. روش اجزای محدود با در نظر گرفتن اثر اندازه دانه نیز برای بررسی مکانیسم تشکیل نوار برشی استفاده شد. عیوب شکل‌دهی و شکست روی سطوح میکروقطعات مشاهده و تشکیل آنها مورد بحث قرار گرفت. کیفیت و زبری سطح با در نظر گرفتن اثر اندازه دانه مورد مطالعه قرار گرفت. بنابراین، یافته‌های این تحقیق دانش و درک فرآیند را برای پشتیبانی از طراحی میکروقطعات پین‌شکل پیچیده و ابزارهای میکروفرمینگ چندمرحله‌ای افزایش داده و کاربرد گسترده این فرآیند میکروفرمینگ کارآمد را به عنوان یک جایگزین مفید برای میکروماشینکاری معمولی ارتقا می‌بخشد.

۲. مدل نظری و ساختاری

به منظور به دست آوردن پاسخ مکانیکی و عملکرد ماده آزمایشی برای آنالیز عددی، مدل ساختاری جفت‌شده‌ای از مدل لایه سطحی و رابطه‌هال-پیچ با برازش داده‌های تجربی برای نشان دادن تنش سیلان مواد با اندازه دانه‌های مختلف ایجاد و فرمول‌بندی شد. آزمون‌های کشش تک‌محوری برای برنج CuZn35 برای به دست آوردن داده‌های

¹ fillet

² dead metal zone

³ tail feature

تجربی برای تولید مدل با استفاده از پنج آزمون تکراری نمونه‌های با ضخامت ۱/۵ mm و اندازه دانه‌های ۱۱، ۲۵ و ۱۳۳ μm انجام شد. تمام آزمایش‌ها بر اساس استاندارد ASTM: E8/E8M انجام شدند. در مطالعات قبلی، از مدل لایه سطحی استفاده شد که فرض می‌کند نمونه از دو بخش تشکیل شده است، یعنی دانه‌های سطحی که خواص آن تقریباً شبیه به تک‌بلور است و دانه‌های داخلی که چندبلوری است و لذا نظریه استحکام‌بخشی مرز دانه قابل استفاده می‌شود. [۲۸]. رابطه‌های-پیچ همراه با مدل لایه سطحی برای تنش سیلان با معادله زیر نشان داده می‌شود:

$$\begin{cases} \sigma_s(\varepsilon_p) = m\tau_R(\varepsilon_p) \\ \sigma_i(\varepsilon_p) = M\tau_R(\varepsilon_p) + k(\varepsilon_p)d^{-1/2} \\ \sigma(\varepsilon_p) = \eta\sigma_s(\varepsilon_p) + (1 - \eta)\sigma_i(\varepsilon_p) \end{cases} \quad (۱)$$

که در آن تنش سیلان، σ_s و تنش سیلان مرتبط با دانه‌های سطحی و دانه‌های داخلی است، k در یک مقدار کرنش معین ثابت و مربوط به خواص ماده است، ε_p کرنش پلاستیک، τ_R تنش برشی بحرانی اعمال شده است. m و M ضریب جهت‌گیری هستند که مقدار آنها به ترتیب برای تک‌بلور ۲ و برای چندبلور FCC ۳/۰۶ است، η کسر دانه‌های سطحی و d اندازه دانه است. برازش منحنی بر اساس داده‌های تجربی برای تعیین ضرایب در معادلات فوق انجام می‌شود. با توجه به معادله‌های-پیچ، تنش سیلان به صورت خطی با معکوس ریشه دوم اندازه دانه در جایی که تنش پلاستیک ثابت است، رابطه دارد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، $M\tau_R$ بر اساس نمودار توابع خطی برازش شده ایجاد می‌شود، و k را می‌توان بر اساس شیب به دست آورد. τ_R و k را می‌توان طبق تابع توانی ($y = a + bx^c$) با کرنش پلاستیکی برازش داد و معادلات زیر به دست می‌آید:

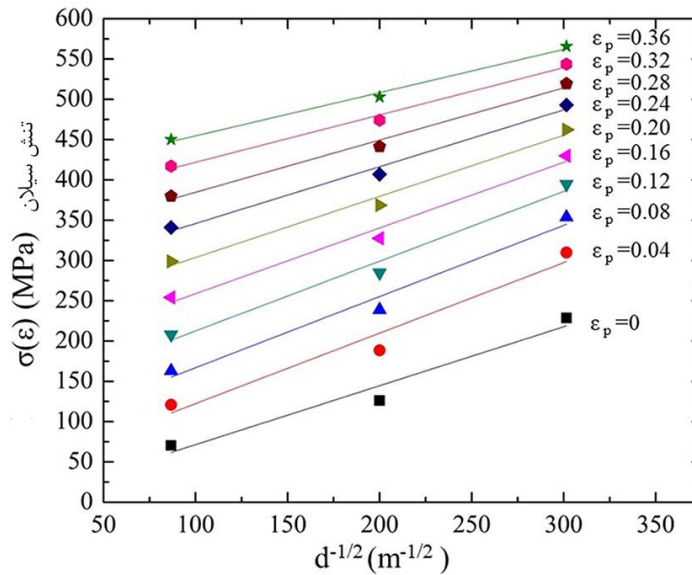
$$\begin{cases} \tau_R(\varepsilon_p) = 388.7\varepsilon_p^{1.043} \\ k = 0.903 - 2.162\varepsilon_p^{1.705} \end{cases} \quad (۲)$$

سپس دانه‌های سطحی برای اصلاح مدل موجود در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به مدل موضعی شدن دانه^۱ که توسط لای و همکاران [۲۹] پیشنهاد شده کسر دانه‌های سطحی در ورق‌ها با $\eta = 2d/t$ تعیین می‌شود که t ضخامت ورق است. با جایگزینی معادله (۲) در معادله (۱)، معادله برازش شده نهایی برای برنج CuZn35 به دست می‌آید:

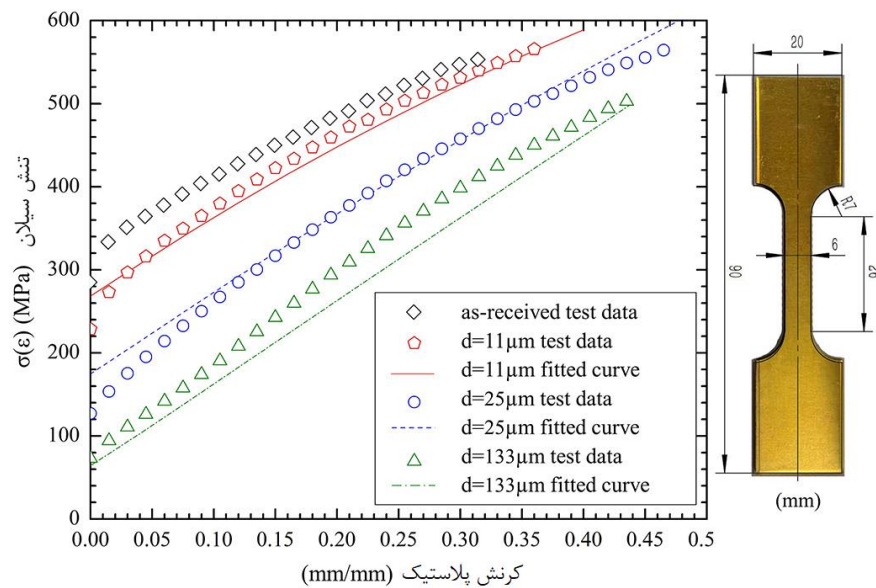
$$\sigma(\varepsilon_p) = (0.903d^{-1/2} + 1189\varepsilon_p^{1.043} - 2.162d^{-1/2}\varepsilon_p^{1.705}) + \eta(-0.903d^{-1/2} - 412\varepsilon_p^{1.043} + 2.162d^{-1/2}\varepsilon_p^{1.705}) \quad (۳)$$

منحنی تابع معادله (۳) و داده‌های تجربی مربوطه در شکل ۳ نشان داده شده است.

¹ grain localization model



شکل ۲. تنش سیلان و اندازه دانه به صورت رابطه هال-پچ برای برنج CuZn35



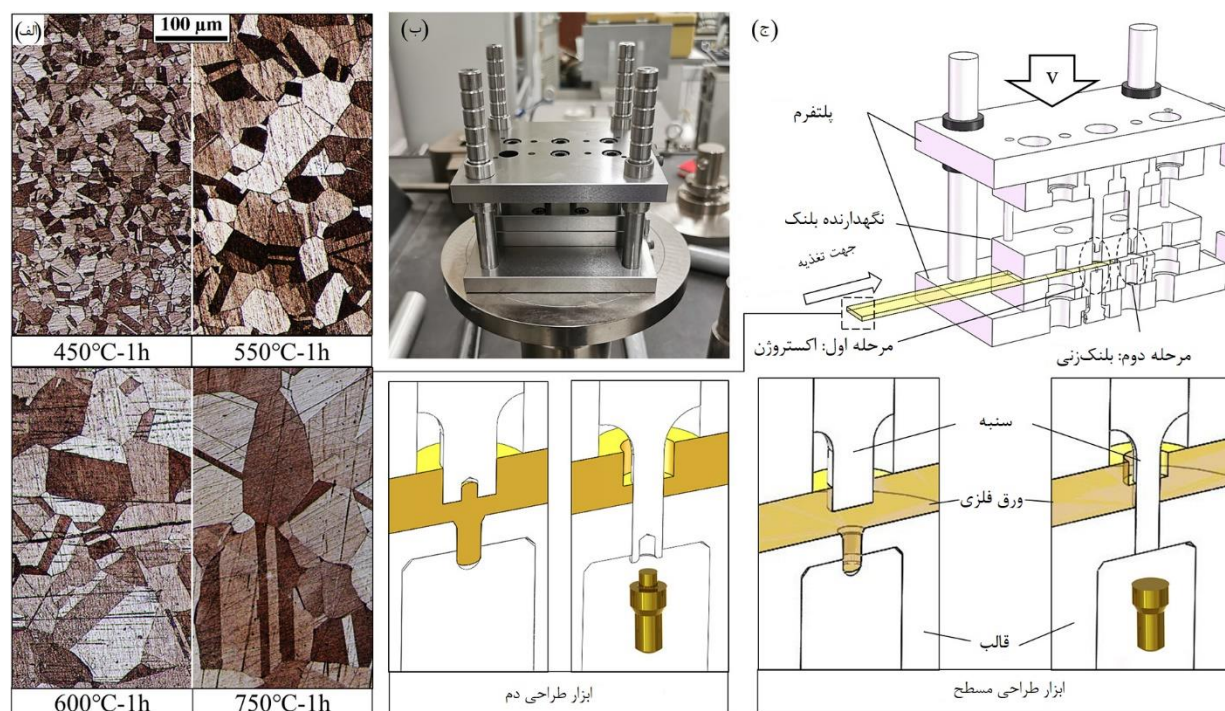
شکل ۳. تنش‌های سیلان آزمایشی و برازش شده با اندازه دانه مختلف برای برنج CuZn35

۳. مواد و آزمایش‌ها

۱,۳. ماده آزمایشی

برنج CuZn35 به دلیل کاربرد گسترده در ساخت پوگو پین‌ها و سایر قطعات الکترونیکی به دلیل رسانایی عالی و شکل‌پذیری خوب به عنوان ماده آزمایشی انتخاب شد. ورقه‌های برنجی با عرض ۲۰ mm و ضخامت ۲/۰ mm در

دماها و زمان‌های نگهداری مختلف در یک کوره با اتمسفر آرگون برای به دست آوردن اندازه دانه و ریزساختارهای مختلف، بازپخت شدند: دمای 450°C به مدت ۱ ساعت، دمای 550°C به مدت ۱ ساعت، دمای 600°C به مدت ۱ ساعت و دمای 750°C به مدت ۱ ساعت. محلول ۵ گرم FeCl_3 ، ۸۵ میلی‌لیتر H_2O و ۱۵ میلی‌لیتر HCl به عنوان اچ‌کننده پس از پرداخت برای اچ کردن سطح مقطع نمونه‌ها استفاده شد. ریزساختارها در امتداد جهت ضخامت نمونه تحت شرایط مختلف عملیات حرارتی در شکل ۴ (الف) نشان داده شده است. اندازه دانه‌ها بر اساس روش تقاطع خطی^۱ استاندارد ASTM E112 همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است اندازه‌گیری شد.



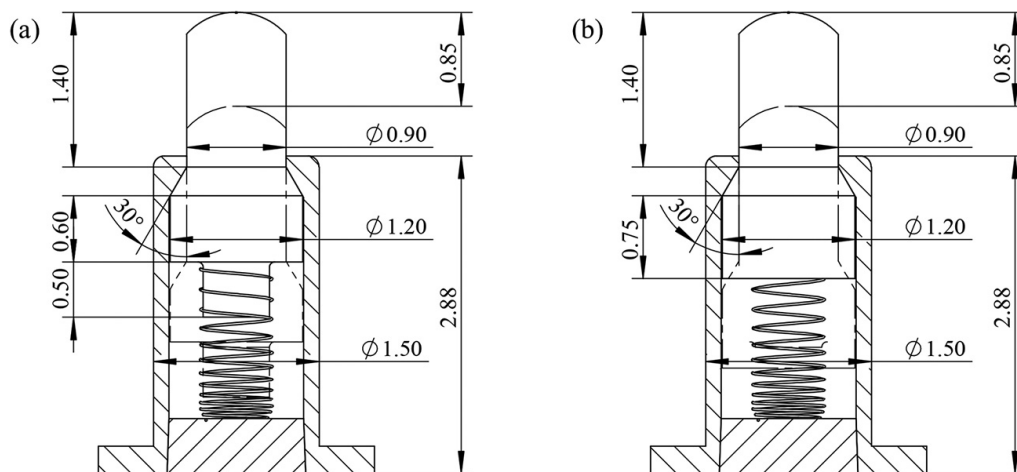
شکل ۴. (الف) ریزساختارهای اولیه ورق برنجی تحت شرایط بازپخت مختلف، (ب) تصویر سیستم شکل‌دهی چندمرحله‌ای، (ج) نمایش سیستم شکل‌دهی چندمرحله‌ای و مراحل شکل‌دهی برای دو طرح مختلف.

جدول ۱. شرایط بازپخت و اندازه دانه متناظر

دما ($^{\circ}\text{C}$)	۴۵۰	۵۵۰	۶۰۰	۷۵۰
اندازه دانه (μm)	22 ± 4	39 ± 1	71 ± 11	107 ± 15

^۱ linear intercept procedure

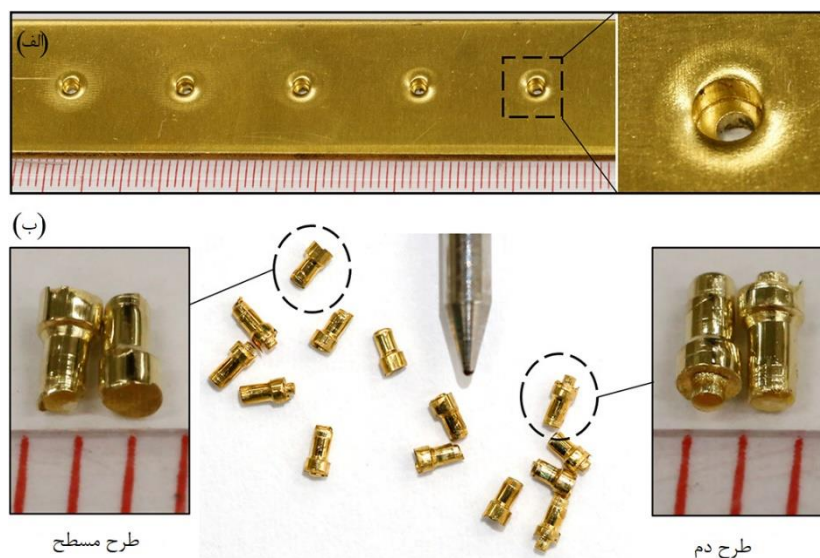
دو طرح از قسمت پیستون و ابعاد آنها در شکل ۵ نشان داده شده است. پیستون با طرح مسطح^۱، طرح پایه‌ای است که شکل ساده و خاصیت شکل‌پذیری خوبی دارد، اما در جهت جانبی ناپایدار است. پیستون با طرح دم^۲ یکی از طرح‌های بهبودیافته برای حل این مشکل است و از پایداری خوبی برخوردار است. برای محصول تجاری (Mill-Max Mfg. Corp.) تلورانس^۳ مونتاژ در طول مجموعاً ± 0.15 mm و در قطر ± 0.051 mm است. بنابراین برای قطعه منفرد، تلورانس طولی بخش سر قطعه جداگانه روی ± 0.075 mm تنظیم شد و تلورانس سایر قطعات غیرضروری است زیرا بر طول کلی مجموعه تأثیر نمی‌گذارد. تلورانس قطر بخش سر و بدنه ± 0.051 mm است. به‌علاوه، $0.5 \mu\text{m}$ طلا بر روی پوشش نیکل برای پرداخت سطح پیستون مورد نیاز است. در یک مطالعه نسبی [۳۰]، مشخص شد که ضخامت پوشش الکترورسوبده‌ی شده با افزایش زبری سطح زیرلایه کاهش می‌یابد. برای به دست آوردن کیفیت پوشش مطلوب باید Ra زیرلایه کمتر از $0.4 \mu\text{m}$ باشد. یک سیستم شکل‌دهی چندمرحله‌ای برای تولید دو قسمت پیستونی در شکل ۴ (ج) نشان داده شده است.



شکل ۵. ابعاد (mm) پیگو پین با (الف) طرح دم، (ب) طرح مسطح.

تفاوت ابزار در طراحی این است که سنبه برای پیستون با طرح دم دارای یک سوراخ در نوک خود است. این سیستم میکروفرمینگ چندمرحله‌ای شامل دو مرحله شکل‌دهی، یعنی اکستروژن و بلنک‌زنی است. در مرحله اول، مواد به داخل حفره سنبه و قالب اکستروژن شد. در مرحله بعد از گوشه پیش‌ساخته متصل به ورق برای موقعیت‌یابی

و از نگهدارنده بلنک برای جلوگیری از حرکت عمودی ورق استفاده شد. پس از انجام عملیات برشکاری، پیستون از ورق برنجی جدا شد. پیستون تشکیل شده با یک ضربه خارج و سپس نگهدارنده بلنک زنی آزاد شد. ورق برنجی در امتداد جهت تغذیه با طول یک گام به جلو حرکت داده شد. پس از آن، نگهدارنده بلنک پیچ شد و فرآیند شکل‌دهی مرحله‌ای بعدی شروع شد. کل فرآیند شکل‌دهی چندمرحله‌ای توسط یک دستگاه تست MTS با حداکثر ظرفیت بار ۵۰ KN انجام شد. روغن ماشین به عنوان روانکار در تمام سطوح برهمکنش بین سنبه، قالب و نمونه در هر دو مرحله شکل‌دهی استفاده شد. از سرعت آهسته ۰/۰۱ mm/s برای سنبه استفاده شد تا بتوان از اثر نرخ کرنش صرف‌نظر نمود. ورق برنجی پس از شکل‌دهی و میکروقطعات تولیدشده در شکل ۶ نشان داده شده است.



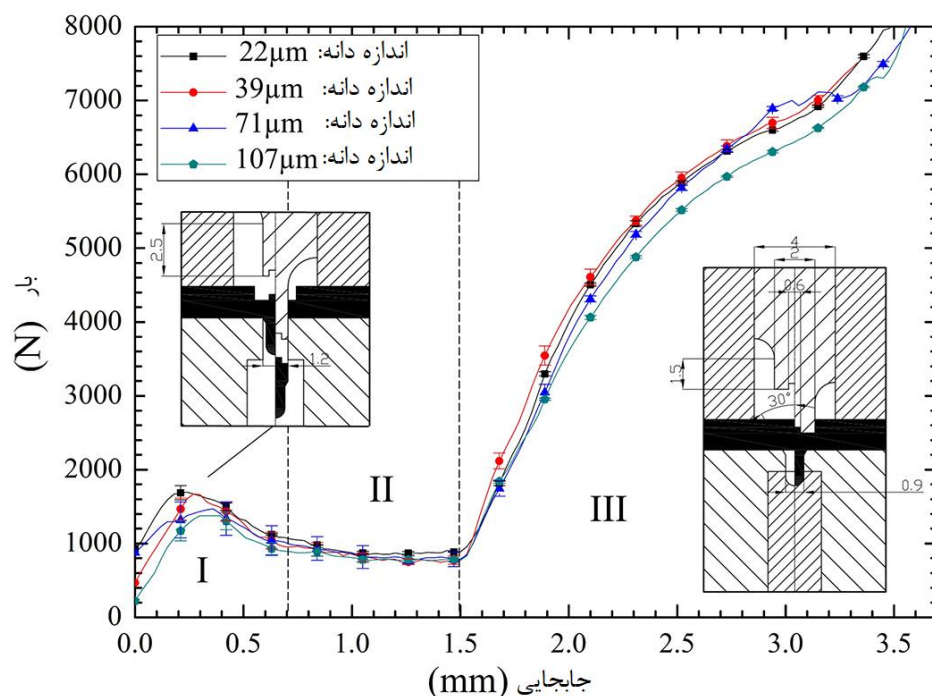
شکل ۶. (الف) ورق فلزی پس از شکل‌دهی، (ب) قطعات پیستون تولیدی.

۴. نتایج و بحث

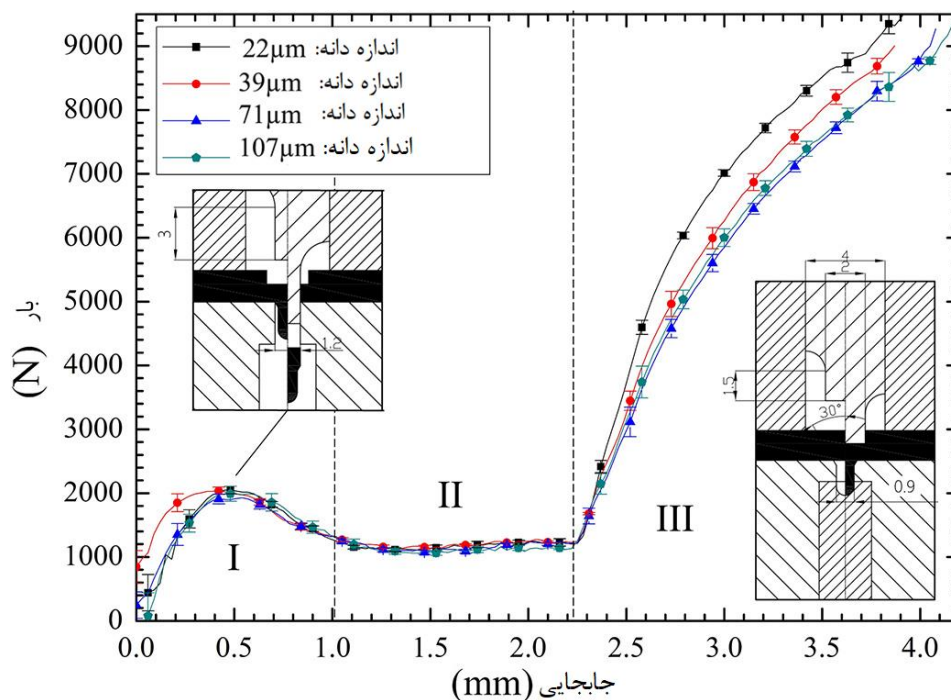
۴.۱. منحنی‌های بار-جابجایی

در تغییر شکل در فرآیند میکروفرمینگ، اندازه دانه یکی از پارامترهای کلیدی است که بر بار شکل‌دهی و جابجایی و همچنین بر دقت ابعادی و مورفولوژی قطعات نهایی تأثیر می‌گذارد. روابط بار-جابجایی با اندازه‌های مختلف دانه در فرآیند شکل‌دهی سناریوی پیستون با طرح دم و سناریوی پیستون با طرح مسطح در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. کل فرآیند شکل‌دهی در هر جابجایی سنبه به سه مرحله مبتنی بر عملیات میکروفرمینگ چندمرحله‌ای بلنک‌زنی و اکستروژن منفرد تقسیم می‌شود. مرحله I، از تماس سنبه بلنک‌زنی با ماده شروع می‌شود

و با شکست به پایان می‌رسد. ماده در معرض تغییر شکل برشی قرار می‌گیرد و سپس پیستون پیش‌ساخته از ورق برنجی خارج می‌شود. نشان داده شده است که بار برشکاری نهایی با افزایش اندازه دانه کاهش می‌یابد که با کاهش اثر استحکام‌بخشی مرزهای دانه مرتبط است. در مرحله بعد، بار شکل‌دهی یک مرحله پایدار را نشان می‌دهد تا زمانی که سنبه اکستروژن با ماده تماس پیدا کند. بار در این مرحله عمدتاً ناشی از اصطکاک سطحی بین ابزار و ماده است. مرحله III روند عملیات اکستروژن را منعکس می‌کند، جایی که ماده برای تولید قطعه پیش‌ساخته با بخش‌های سر و شانه با اکستروژن مستقیم و بخش دم با اکستروژن معکوس اکستروژن می‌شود، همانطور که تصویر مرحله III در شکل نشان داده است. مطابق منحنی‌های بار-جابجایی، هیچ تفاوت آشکاری بین این دو سناریو وجود ندارد. حداکثر نیروی ماشین تست برای کنترل جابجایی قالب فوقانی در عملیات اکستروژن تعیین شد. هنگامی که بار از این مقدار بیشتر شود، جابجایی عمودی متوقف و یک فرآیند شکل‌دهی مرحله‌ای به پایان می‌رسد. مقادیر حدی بیشینه با شبیه‌سازی اجزای محدود محاسبه شد به طوری که حداکثر نیروی 8000 N به عنوان حد بالایی سناریوی طرح دم در نظر گرفته شد در حالی که بار 9500 N برای سناریوی طرح مسطح اعمال شد. نمودارها نشان می‌دهند که جابجایی بیشینه با اندازه دانه افزایش می‌یابد که به کاهش استحکام ماده مرتبط است. اثر اندازه دانه بر رفتارهای بار-جابجایی مربوط به مشخصه مرز دانه است که به عنوان مانعی برای انتقال لغزشی عمل می‌کند. بنابراین، هنگامی که اندازه نمونه ثابت می‌ماند و اندازه دانه افزایش می‌یابد، کسر مرز دانه کاهش می‌یابد که به معنی کاهش بار شکل‌دهی است.



شکل ۷. منحنی‌های بار-جابجایی با اندازه‌های مختلف دانه و ابزار طراحی دم.

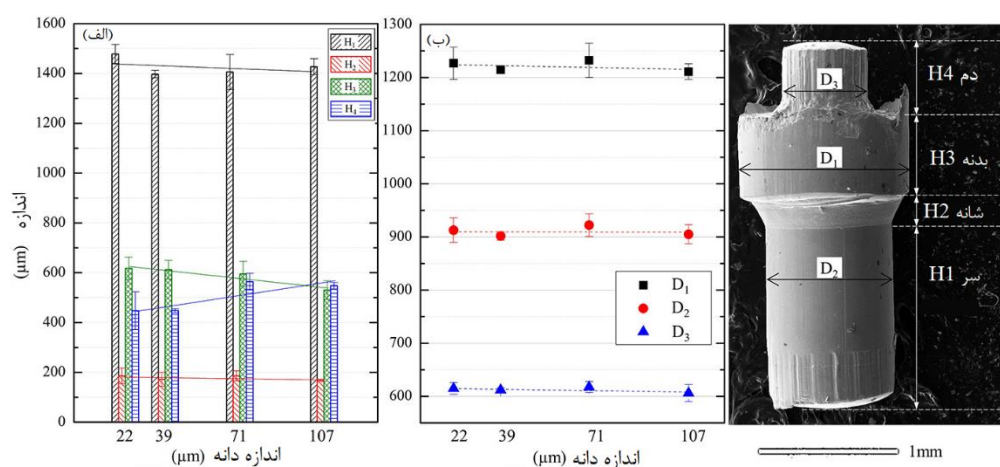


شکل ۸. منحنی‌های بار-جابجایی با اندازه‌های مختلف دانه و ابزار طراحی مسطح.

۲.۴. دقت ابعادی

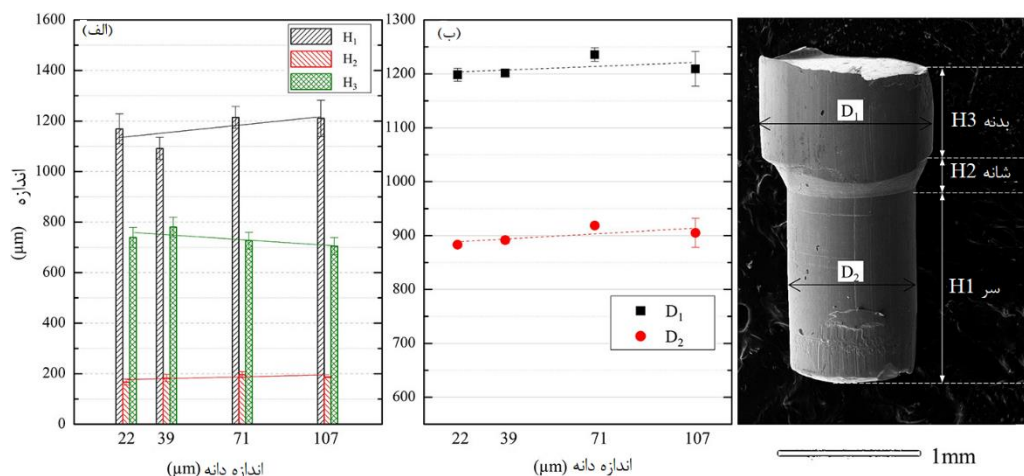
دقت ابعادی قطعات نهایی یکی از عوامل کلیدی است که در میکروفرمینگ چندمرحله‌ای باید در نظر گرفته شود زیرا می‌تواند به طور کامل نتیجه طراحی قطعه، توسعه ابزار و پیکربندی متنوع فرآیند را نشان دهد. از سوی دیگر، دقت ابعادی عموماً تحت تأثیر دقت ساخت ابزار، طراحی عملیات شکل‌دهی، خواص مواد و تغییرات متغیرهای فرآیند قرار می‌گیرد. در مقایسه با ماکروفرمینگ، میکروفرمینگ به دلیل مقیاس کوچک، شرایط اصطکاک شدیدتر و تغییر شکل ناهمگن، پدیده‌های نامطلوب بیشتری را نشان می‌دهد. برای تعیین تأثیر اندازه دانه بر دقت ابعادی قطعات میکروپین شکل، قسمت پیستون با چهار بخش متمایز مشخص می‌شود، یعنی سر، شانه، بدنه و دم، و طول آنها به ترتیب با پارامترهای H_1 تا H_4 نشان داده می‌شود تا به روشنی تغییر ابعاد هر بخش توضیح داده شود. قطر هر بخش نیز با D_1 در بدنه، D_2 در سر و D_3 در دم نشان داده می‌شود. طول و قطر هر بخش در قطعات با طرح دم و طرح مسطح تحت ریزساختارهای مختلف در شکل‌های ۹ و ۱۰ خلاصه شده است. مشاهده می‌شود که طول بخش سر در قطعات با طرح دم اندکی کاهش یافته و از $1/478 \text{ mm}$ تا $1/397 \text{ mm}$ متغیر است و تقریباً الزام تلورانس ($1/4 \pm 0/075 \text{ mm}$) را برآورده می‌کند. اما برای قطعات با طرح مسطح از حدود $1/4 \text{ mm}$ به $1/2 \text{ mm}$ کاهش یافته و با اندازه دانه کمی افزایش می‌یابد. این بدان معناست که قطعات با طرح مسطح به سختی این الزام را برآورده می‌کنند. بر خلاف طول، قطر هر بخش در دو طرح تغییر زیادی نمی‌کند و می‌تواند الزام تلورانس

را برآورده کند ($\pm 0.51 \text{ mm}$)، زیرا به خوبی توسط ابعاد ابزار مقید می‌شود. علاوه بر این، طول بخش بدنه به وضوح با افزایش اندازه دانه برای هر دو طرح کاهش می‌یابد که به افزایش سیلان جانبی مواد و کاهش طول محصول اکستروژن که ناشی از دانه درشت در شکل‌دهی ورق است نسبت داده می‌شود. طول بخش بدنه الزام ابعاد طراحی شده را آسانتر برآورده می‌کند زیرا مستقیماً با جابجایی سنبه مرتبط است. هنگامی که فقط چند دانه در جهت ضخامت در ورق وجود داشته باشد، ناهمگنی دانه‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه مواد بیشتری در جهت نامطلوب خارج از جهت سنبه‌زنی سیلان می‌یابد، به طوری که پس از عملیات اکستروژن، مواد کمتری در ورق فلزی اصلی باقی می‌ماند. به علاوه، طول بخش شانه تقریباً ثابت می‌ماند زیرا این بخش در ناحیه وسط شکل می‌گیرد و به طور کامل توسط قالب مقید می‌شود. برعکس، برای قطعات با طرح دم، طول بخش دم با رشد اندازه دانه افزایش می‌یابد که نتیجه کاهش اثر استحکام‌بخشی مرز دانه است. همانطور که در مطالعات قبلی [۱۶] نشان داده شد، مرز دانه مانع انتقال لغزشی می‌شود به طوری که مرز دانه چگالی نابجایی و سختی بالاتری دارد. بنابراین، مواد درشت‌دانه با مرز دانه‌های کمتر نرمتر است و راحت‌تر به عقب اکستروژن می‌شود. عامل دیگری که در نظر گرفته می‌شود اصطکاک سطحی است. گایگر و همکاران [۲] و انگل و همکاران [۳۱] گزارش دادند که در اکستروژن ترکیبی مستقیم-میله-معکوس^۱، نمونه درشت‌دانه با اندازه ماکرو در مقایسه با مواد ریزدانه به دلیل اصطکاک تمایل دارد که بیشتر به سمت عقب سیلان داشته باشد تا به سمت جلو، اما اثر اندازه دانه زمانی که مقیاس بیلت به اندازه میکرو کوچک شود ناپدید می‌گردد. زیرا هنگامی که لقی بین سنبه و قالب از مرتبه اندازه دانه باشد، سیلان رو به عقب محدود می‌شود. در این مطالعه، از روانکار استفاده شد و تأثیر اندازه دانه بر اصطکاک سطحی وجود دارد اما معنادار نیست زیرا قطر بخش دم $600 \mu\text{m}$ است که بسیار بزرگ‌تر از اندازه دانه درشت $107 \mu\text{m}$ است.



شکل ۹. طول و قطر بخش‌های مختلف پیستون با طرح دم با اندازه دانه‌های مختلف.

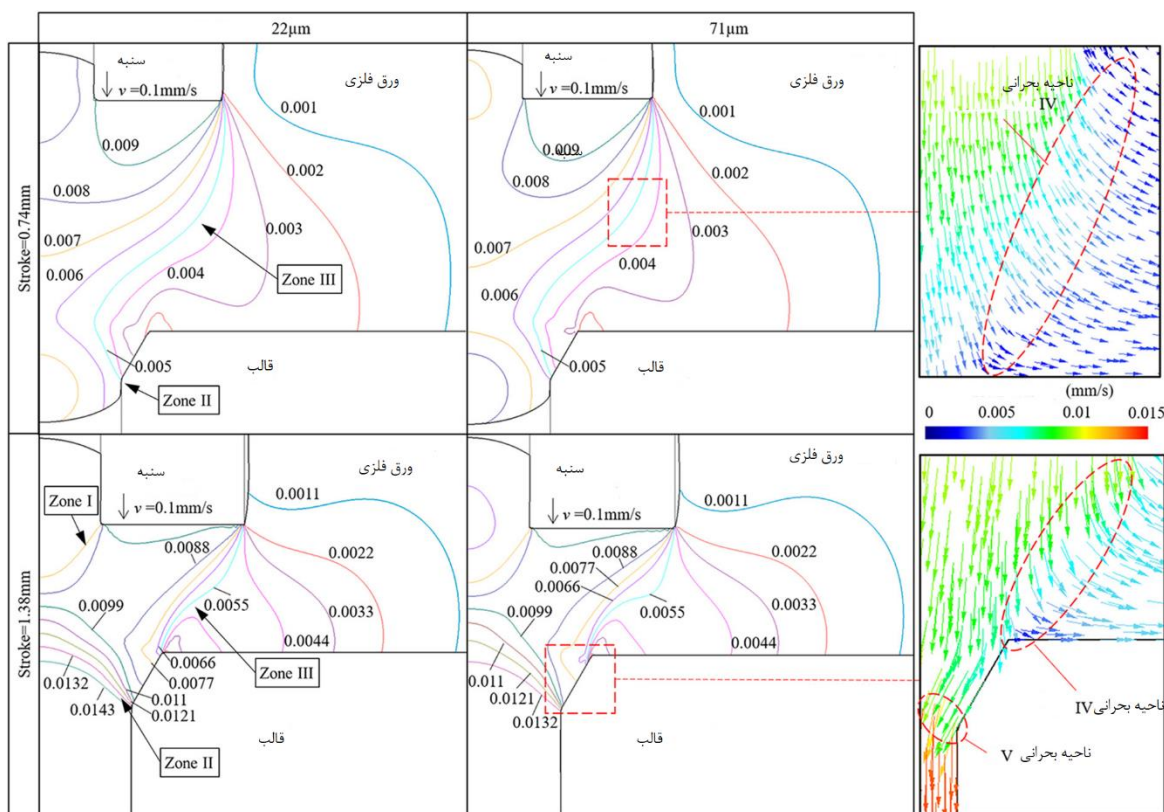
¹ forward-rod-backward



شکل ۱۰. طول و قطر بخش‌های مختلف پیستون با طرح مسطح با اندازه دانه‌های مختلف.

۳.۴. رفتارهای سیلان مواد

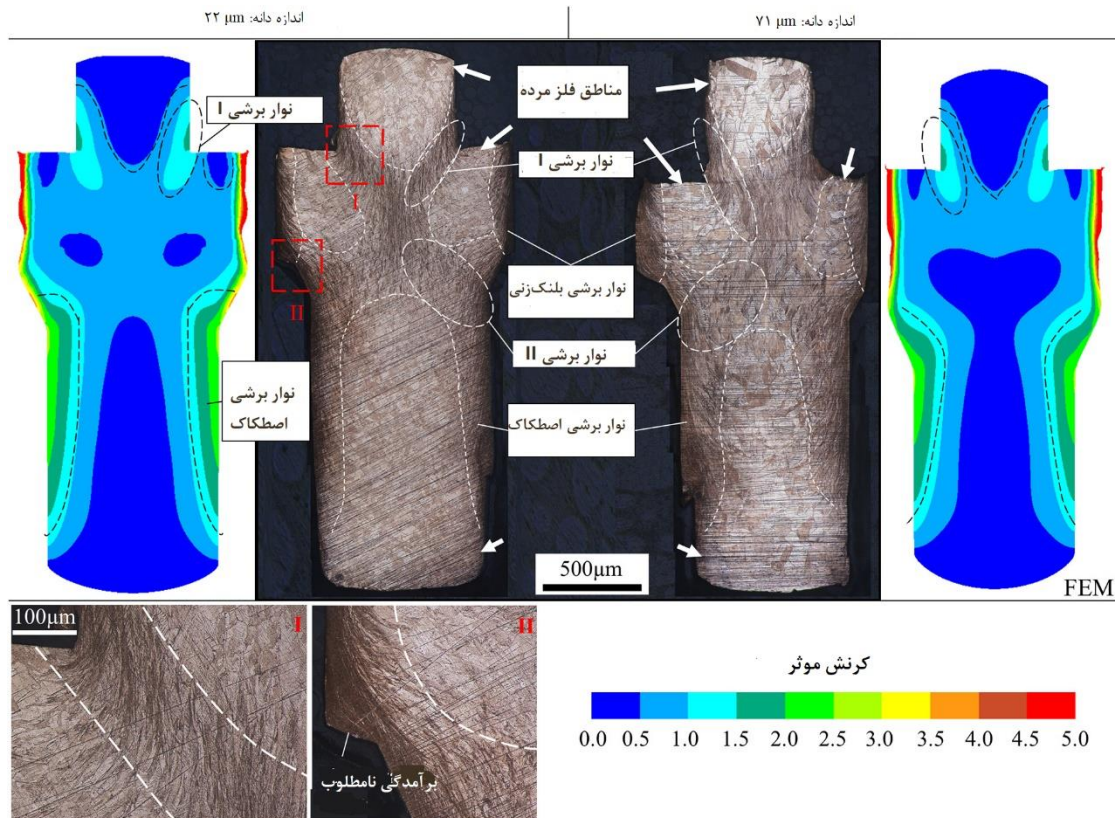
الگوی سیلان مواد در میکروفرمینگ چندمرحله ای مربوط به تشکیل مناطق مرده فلزی و نوارهای برشی است. درک رفتارهای سیلان مواد برای بهینه‌سازی فرآیند شکل‌دهی چندمرحله ای و خواص قطعات تولیدی از اهمیت بالایی برخوردار است. برای مطالعه مکانیسم تشکیل نوار برشی از شبیه‌سازی عددی به همراه آزمایش‌ها استفاده شد. برای بررسی مکانیسم تشکیل نوار برشی، نقشه کانتور و برداری سیلان مواد با اندازه دانه $22\ \mu\text{m}$ و $71\ \mu\text{m}$ در عملیات اکستروژن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. زمانی که جابجایی سنبه $1/38\ \text{mm}$ باشد، سه ناحیه در ورق فلزی بر اساس گرادیان سرعت وجود دارد که تغییر سرعت سیلان مواد را نشان می‌دهد. منطقه I در نزدیکی پروفیل سوراخ داخلی سنبه ظاهر می‌شود. منطقه II از لبه پایینی سطح مخروطی شکل قالب تا وسط است و Zone III در ناحیه ای که پروفیل بیرونی سنبه را به لبه بالایی سطح مخروطی قالب متصل می‌کند ظاهر می‌شود. گرادیان سرعت در ناحیه I کمتر از دو ناحیه دیگر است. با این حال، زمانی که میزان جابجایی $0/74\ \text{mm}$ است یعنی مرحله اولیه عملیات اکستروژن، مناطق II و III هنوز قابل مشاهده هستند اما منطقه I واضح نیست و حتی برای مواد ریزدانه ناپدید می‌شود. مشخص شد که نوار برشی روی ناحیه I دیرتر از ناحیه II و III در حین اکستروژن تشکیل می‌شود. با تمرکز بر بردارهای سیلان، یک منطقه بحرانی IV در منطقه III ظاهر می‌شود، جایی که جریان سیلان مواد به دو جهت طولی و جانبی تقسیم می‌شود. با حرکت سنبه، تغییرات جهت و مقدار سرعت سیلان در منطقه بحرانی IV قابل توجه است و یک منطقه بحرانی جدید V در نزدیکی منطقه II تشکیل می‌شود که سرعت در آن افزایش آشکاری را نشان می‌دهد و فقط سیلان طولی باقی می‌ماند که ناشی از کاهش قطر دهانه قالب است.



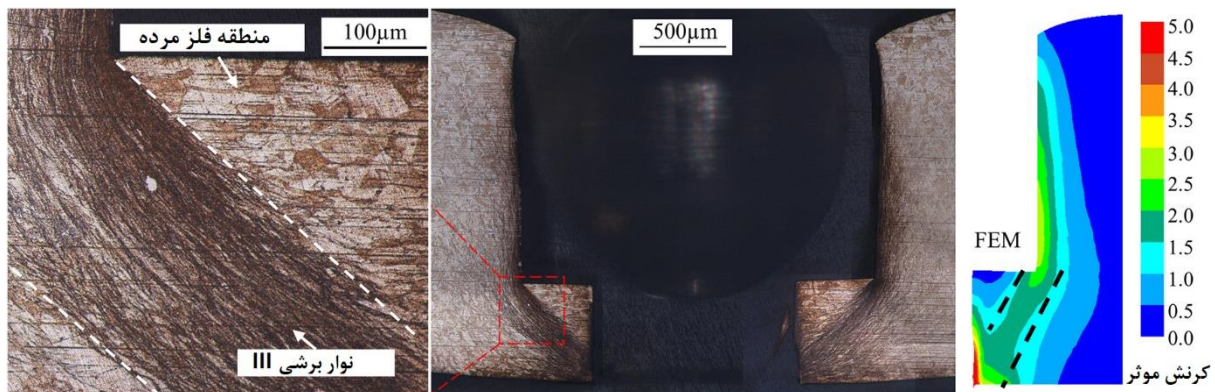
شکل ۱۱. جریان مواد (کانتور و بردار) تحت جابجایی و اندازه دانه‌های مختلف.

شکل ۱۲ ریزساختارها را در مقاطع عرضی در امتداد محور تقارن میکروقطعات نهایی با طرح دم با استفاده از مواد ریزدانه (اندازه دانه $22 \mu\text{m}$) و مواد درشت‌دانه (اندازه دانه $71 \mu\text{m}$) نشان می‌دهد. این ریزساختارها با استفاده از میکروسکوپ‌های متالوگرافی مشاهده شده است و مشخص است که نوارهای برشی در مناطق I و II قرار دارند. توزیع کرنش موثر به وضوح تشکیل نوار برشی I را نشان می‌دهد، اما در مورد نوار برشی II اینطور نیست. بر اساس شکل ۱۳، نوار برشی III ناشی از ناحیه III را می‌توان در امتداد گوشه‌های سنبه و قالب تشخیص داد که با توزیع کرنش موثر مطابقت دارد. می‌توان نتیجه گرفت که نوار برشی ترجیح می‌دهد در ناحیه ای با گرادیان سرعت سیلان زیاد و در ناحیه ای با انباشتگی کرنش موثر تشکیل شود. نوار برشی I در شکل ۱۲ نسبت به نوار برشی II عرض کمتری دارد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که گرادیان سرعت بالاتر منجر به افزایش عرض نوار برشی می‌شود. با این حال، این تغییر با توزیع کرنش موثر مطابقت ندارد. علاوه بر این، نوار برشی ناشی از اصطکاک در شکل ۱۲ با تغییر سرعت در شکل ۱۱ نشان داده نشده است، اما به طور دقیق بر اساس توزیع کرنش موثر محاسبه می‌شود. به علاوه، دو ناحیه برشی در دو طرف بخش بدنه به دلیل عملیات بلنک‌زنی تشکیل می‌شود که بیشترین انباشتگی کرنش را در نتایج عددی نشان می‌دهد. دانه‌ها در نوار برشی به طور قابل توجهی کشیده شده و در امتداد جهت سیلان مواد اعوجاج می‌یابند. از مقایسه مواد با اندازه دانه‌های مختلف می‌توان دریافت که عرض نوار

برشی با رشد اندازه دانه افزایش می‌یابد، زیرا تعداد زیادی دانه در تغییر شکل ماده دخیل هستند که در یک کرنش خاص چرخش و ازدیاد طول را با یکدیگر به اشتراک می‌گذارند، بنابراین دانه‌های بزرگتر به افزایش ناحیه نوار برشی کمک می‌کنند.



شکل ۱۲. ریزساختارهای سطح مقطع و نتایج FEM قطعه پیستون با طرح دم با اندازه دانه $22\text{ }\mu\text{m}$ و $71\text{ }\mu\text{m}$ (I) دانه ها در نوار برشی I و (II) برآمدگی نامطلوب.



شکل ۱۳. ریزساختارهای سطح مقطع ورق فلزی پس از شکل دهی چندمرحله‌ای و نتیجه FEM.

منطقه فلز مرده (DMZ) به عنوان مکانی است که به صورت کامل یا تقریبی بدون سیلان مواد تعریف می‌شود. مطالعات قبلی روی منطقه فلز مرده [۳۲-۳۵] بر اساس اندازه‌گیری سختی و توزیع خطوط جریان در میکروگراف‌های اچ‌شده نشان داد که مورفولوژی ناحیه تغییر شکل به هندسه قالب، اصطکاک، مواد قطعه کار، نسبت اکستروژن و نرخ بارگذاری بستگی دارد. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، سه منطقه فلز مرده با مرزهای واضح بر اساس درجه تغییر شکل دانه‌ها و خطوط جریان شناسایی می‌شوند. یک منطقه فلز مرده در قسمت بالای دم به شکل نیم‌دایره ظاهر می‌شود. دو منطقه فلز مرده دیگر در نزدیکی پروفیل بالایی بدنه قرار دارند و نسبت به خط مرکزی متقارن هستند. تشکیل منطقه فلز مرده با این واقعیت مطابقت دارد که این منطقه به راحتی در زیر فرورونده مسطح در سوراخ‌زنی تشکیل می‌شود و به وسیله اکستروژن معکوس و اصطکاک در این سناریو تحت تأثیر قرار می‌گیرد زیرا مواد نزدیک لبه سوراخ تا حد زیادی تغییر شکل می‌دهند و سپس نوارهای برشی در بین مناطق فلزی مرده تشکیل می‌شوند. علاوه بر این، یک ناحیه با تغییر شکل کمتر در بخش سر تشکیل می‌شود که شبیه به منطقه فلز مرده با کرنش ناچیز است. در ریزساختار ورق برنجی پس از بلنک‌زنی مطابق شکل ۱۳، دو منطقه فلز مرده در نزدیکی سطح عمودی سنبه و قالب نشان داده شده است. شکل ۱۴ تکامل ریزساختاری قسمت پیستون با طرح مسطح را نمایش می‌دهد. نوار برشی I ناپدید می‌شود و مناطق فلز مرده به هم متصل می‌شوند. برای مواد درشت‌دانه، نوارهای برشی تا ناحیه مرکزی کشیده می‌شوند. تأیید می‌شود که با اندازه دانه، مساحت نوار برشی افزایش می‌یابد. تشکیل نوار برشی با توزیع کرنش موثر همدوس^۱ است.

به طور خلاصه، نوار برشی ترجیح می‌دهد در ناحیه‌ای با گرادیان بالای سرعت سیلان مواد یا با انباشتگی کرنش مؤثر تشکیل شود. علاوه بر این، باند برشی وسیع‌تر توسط گرادیان بالاتر سرعت سیلان نشان داده می‌شود، اما توسط توزیع کرنش مؤثر به صورت چشمگیر منعکس نمی‌شود.

۴.۴. هندسه‌های نامطلوب

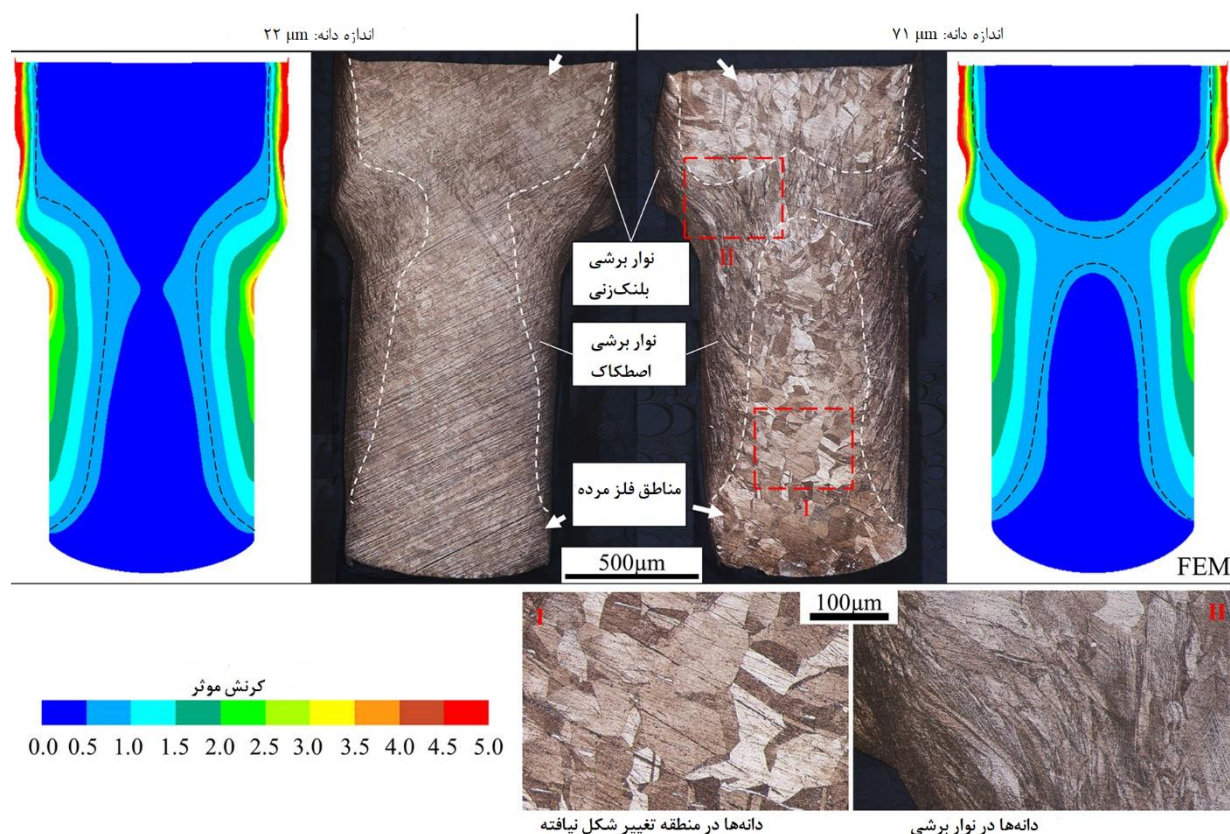
هندسه نامطلوب اصلی در این قطعات تولیدی به روش میکروفرمینگ چندمرحله‌ای، انحراف از حالت هم‌مرکز بودن بخش سر و بخش بدنه است. همانطور که تصاویر ریزساختاری در شکل ۱۲ و ۱۴ نشان داد، برآمدگی نامطلوب در پروفیل کناری به همین دلیل ظاهر می‌شود و طرف مقابل نازک‌تر است. عاملی که این هندسه‌های نامطلوب به آن نسبت داده می‌شود، دقت در مونتاژ ابزار، اصطکاک بین سطحی، پرنشیدن مواد^۲ و بازگشت فنری^۳ مواد پس از اکستروژن است. از جنبه طراحی، گوشه برای موقعیت‌یابی طراحی شده است، اما می‌تواند باعث انحراف

¹ coherent

² material unfill

³ springback

در عملیات بلنک‌زنی بعدی شود. در مقایسه با تحقیقات قبلی [۲۶]، روش موقعیت‌یابی مبتنی بر گوشه به دقت روش موقعیت‌یابی مبتنی بر سوراخ نیست. سطح استوانه‌ای بیرونی را می‌توان برای موقعیت‌یابی در مطالعه بعدی در نظر گرفت.



شکل ۱۴. ریزساختارهای سطح مقطع و نتایج FEM قطعه پیستون با طرح دم با اندازه دانه $22\text{ }\mu\text{m}$ و $71\text{ }\mu\text{m}$. دانه‌ها در (I) نوار برشی و (II) ناحیه تغییر شکل نیافته.

۵.۴. شکست سطح

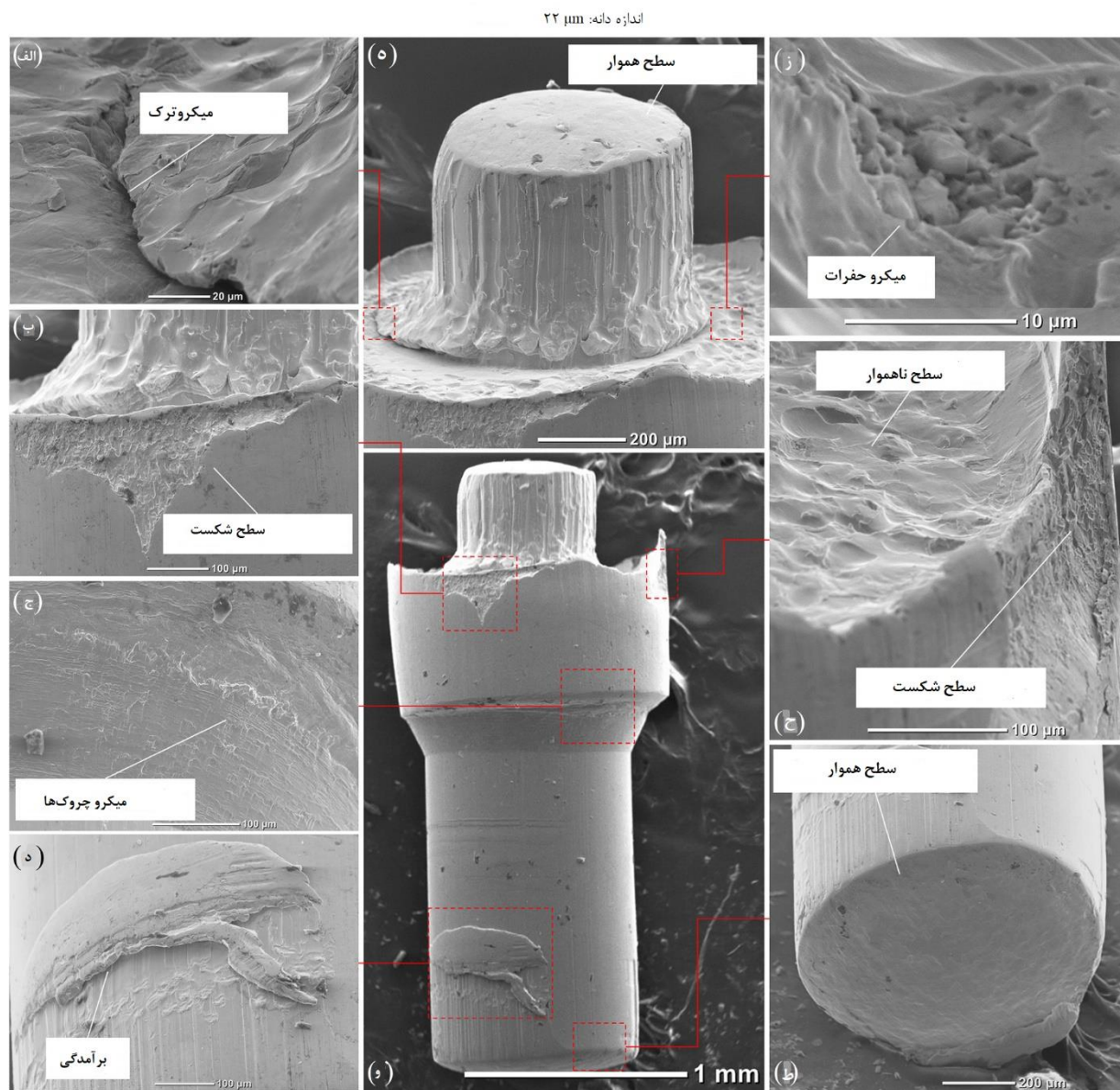
شکست نرم ناشی از تغییر شکل پلاستیک معین، در شکل‌دهی چندمرحله‌ای آسانتر اتفاق می‌افتد. مورفولوژی میکروقطععات پیستون در سناریوی با طرح دم با اندازه دانه‌های مختلف توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مشاهده شد و از لحاظ تقارن مورد مطالعه قرار گرفت. شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ شکل هندسی و عیوب میکروقطععات با اندازه دانه‌های مختلف مشاهده شده توسط SEM را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل‌های ۱۵(الف)، ۱۶(الف) و ۱۷(و) نشان داده شده است، ترک‌های ریز در لبه بین بخش دم و بخش بدنه در تمام اندازه دانه‌ها ظاهر می‌شوند که می‌تواند توسط زاویه تغییر شکل تیز و گوشه قالب ایجاد شود. همانطور که در مطالعات

قبلی نشان داده شد، گوشه تیز قالب به راحتی باعث انباشت آسیب می‌شود [۲۵]. همچنین، سطح بالایی بدنه یک مورفولوژی غیریکنواخت را نشان می‌دهد و برخی از میکرو حفرات در سطح بالایی در شکل‌های ۱۵ (ز، ح)، ۱۶ (ج) و ۱۷ (و) یافت می‌شوند که شبیه به پدیده‌های روی سطح مخروطی با تغییر شکل زیاد قطعه با میکروفرمینگ چندمرحله ای است [۲۶]. علاوه بر این، همانطور که در شکل ۱۵(ج) نشان داده شده است، چروک‌هایی روی سطح مخروطی شکل بخش شانه رخ می‌دهد، جایی که جهت سیلان مواد نسبت به جهت جابجایی زاویه 30° دارد. در مطالعه قبلی [۲۶]، میکرو حفرات روی سطح به شدت تغییر شکل یافته تشکیل شدند اما در این مطالعه بر روی سطح مناطق مرده فلزی تشکیل می‌شوند. بنابراین، مکانیسم تشکیل میکرو حفرات ممکن است ارتباط زیادی به کرنش ماده نداشته باشد، بلکه مربوط به جهت سیلان مواد در امتداد جابجایی سنبه باشد. هنگامی که سیلان مواد با جابجایی سنبه متفاوت باشد، تغییر شکل ناهمگن دور از جهت سیلان مطلوب مواد به راحتی رخ می‌دهد که منجر به تشکیل چروک‌ها، میکرو حفرات و سطح ناهموار می‌شود و مواد درشت‌دانه باعث ایجاد هندسه‌های نامطلوب می‌شوند. از طرف دیگر، سطح شکست در ناحیه نزدیک لبه بالایی بخش بدنه ظاهر می‌شود و تصادفی بودن را نشان می‌دهد، مطابق شکل‌های ۱۵ (ب، ح) و ۱۶ (ب)، و یک هندسه نامطلوب رایج است که پس از عملیات بلندک‌زنی ظاهر می‌شود [۲۴، ۲۶]. شروع، رشد و به هم پیوستگی میکروتخلخل‌ها منجر به سطح ناهموار و پرداخت بد سطح می‌شود. علاوه بر این، همانطور که در شکل‌های ۱۵(ه)، ۱۶ (ج) و ۱۷ (ج) نشان داده شده است سطح جانبی بخش دم، بافت سطحی طولی واضحی را نشان می‌دهد زیرا این سطح به سمت عقب خلاف جهت جابجایی اکستروژن شده است. در مقایسه با میکروقطع با دانه‌های ریز، بافت‌های طولی روی سطح اکستروژن کاهش جزئی نشان می‌دهند که می‌تواند به علت کاهش سختی ناشی از دانه‌های بزرگ‌تر باشد.

برعکس، همانطور که در شکل ۱۵(ح، و، ط) و ۱۶(ه، و) نشان داده شده است، یک سطح صاف بر روی پروفیل بخش سر ظاهر می‌شود زیرا این سطح به سمت جلو اکستروژن می‌شود تا به موازات جهت جابجایی سنبه تشکیل شود. سطح بخش بدنه نیز به جز سطح مربوط به شکست صاف است. سطح صاف مطلوب بخش سر، عمل تماس با محفظه پوگو پین را تسهیل می‌کند. علاوه بر این، سطح انتهایی بخش‌های دم و سر نیز صاف است زیرا هیچگونه سیلان جانبی مواد روی این دو سطح اتفاق نمی‌افتد. همانطور که در شکل‌های ۱۵(د) و ۱۷(ب) نشان داده شده است، در نزدیکی مرز دو قسمت قالب به دلیل تماس ناقص چروک یا برآمدگی پدیدار می‌شود.

از طرف دیگر، همانطور که در شکل ۱۷ (الف، ه) نشان داده شده است میکروتخلخل‌ها روی سطح بالایی بخش بدنه و سطح انتهایی بخش دم در مواد درشت‌دانه مشاهده می‌شوند، اما تخلخل‌های مشابه در مورد مواد ریزدانه مشاهده نمی‌شود. ایجاد تخلخل‌ها می‌تواند ناشی از افزایش تغییر شکل ناهمگن در دانه‌های با اندازه بزرگ‌تر باشد.

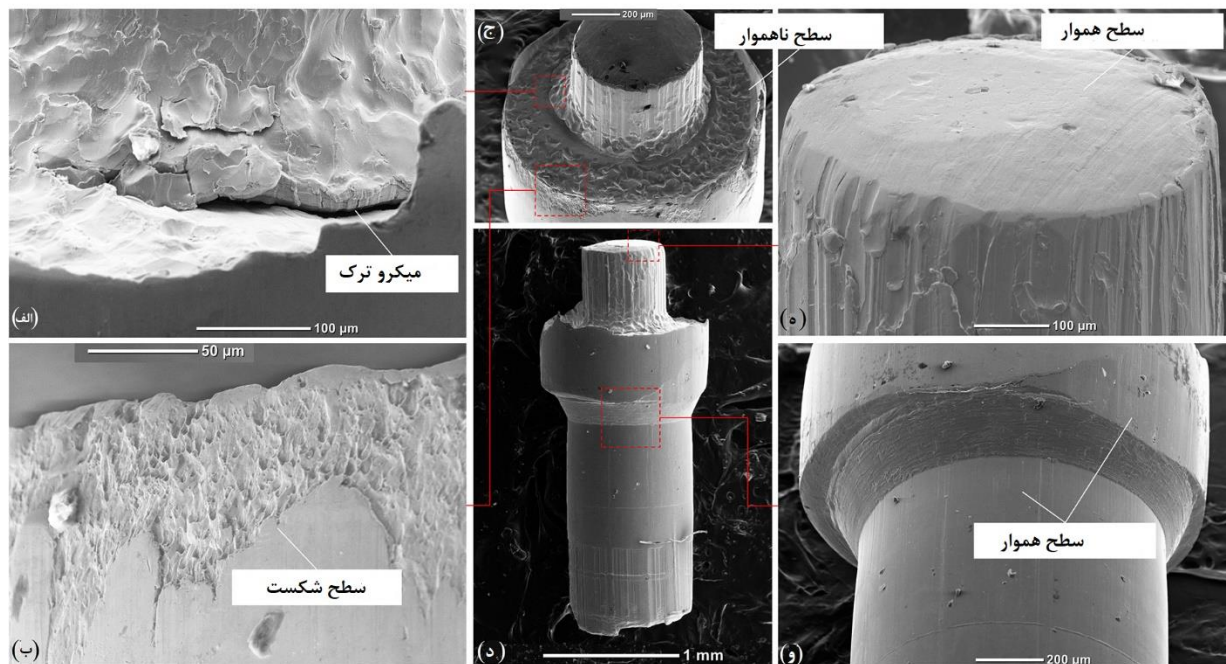
این عیب نامطلوب می‌تواند به طور چشمگیری عملکرد و دوام سطح تماس را بدتر کند. می‌توان پیش بینی کرد که مقدار بحرانی اندازه دانه ای که باعث ایجاد میکروتخلخل می‌شود بین $71\ \mu\text{m}$ و $107\ \mu\text{m}$ است.



شکل ۱۵. تصاویر SEM از پیستون با طرح دم با اندازه دانه $22\ \mu\text{m}$.

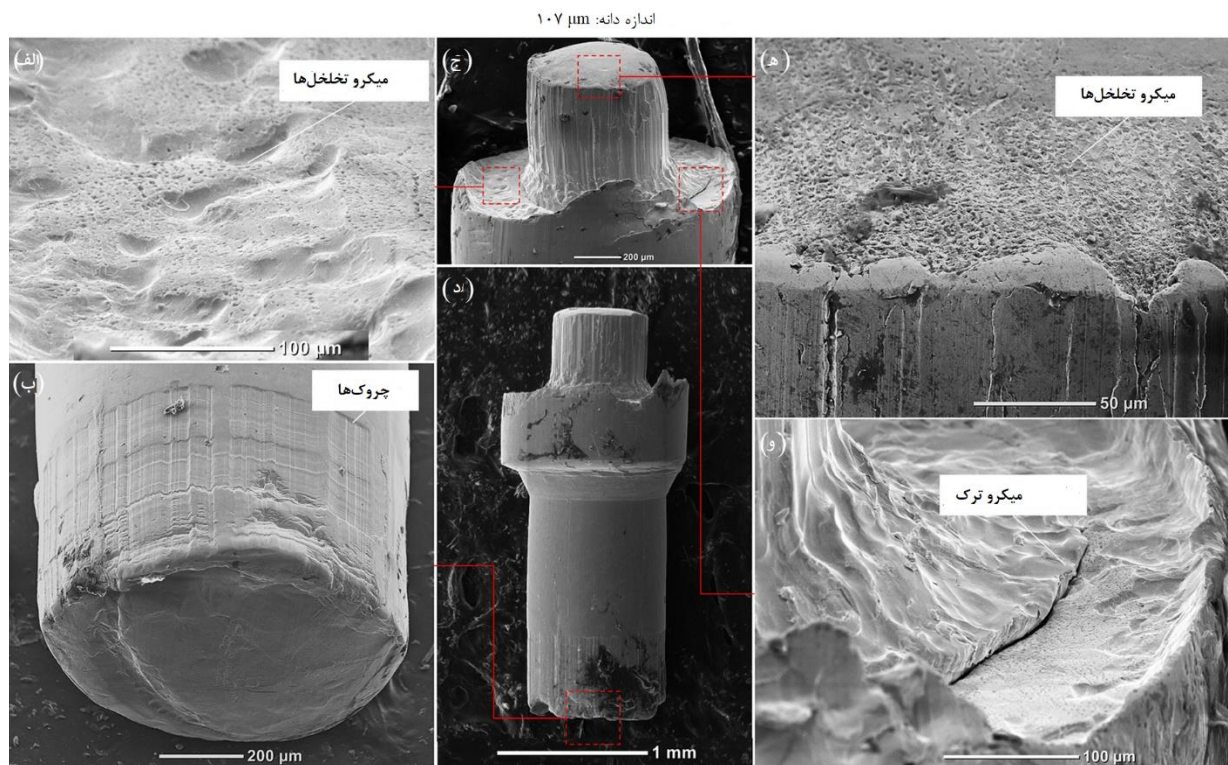
شکل ۱۸ تغییر کیفیت سطح بالای بدنه، بخش جانبی بدنه، شانه، بخش جانبی سر و انتهای سر را با اندازه دانه $22\ \mu\text{m}$ تا $107\ \mu\text{m}$ برای قطعات طرح مسطح نشان می‌دهد. سطوح جانبی بدنه، شانه و بخش جانبی سر کیفیت مطلوبی از خود نشان می‌دهند و با اندازه دانه تغییر چندانی نمی‌کنند، به خصوص برای سطح جانبی سر که برای

شارش جریان با محفظه در تماس قرار می‌گیرد و نیاز به مقاومت سایشی بالایی دارد. با این حال، سطح بالای بدنه و سطح انتهایی سر ناهموار هستند و با افزایش اندازه دانه میزان ناهمواری بیشتر می‌شود و با اندازه دانه $107\text{ }\mu\text{m}$ ، تخلخل‌ها و ترک مطابق شکل ۱۸ (الف، ح) ظاهر می‌شود. کیفیت این دو سطح، الزامات سطح را برآورده نمی‌کند و بنابراین عملیات اضافی مانند فرآیند سنگ‌زنی یا پولیش‌کاری جهت بهبود کیفیت سطح برای پوشش بعدی مورد نیاز است.

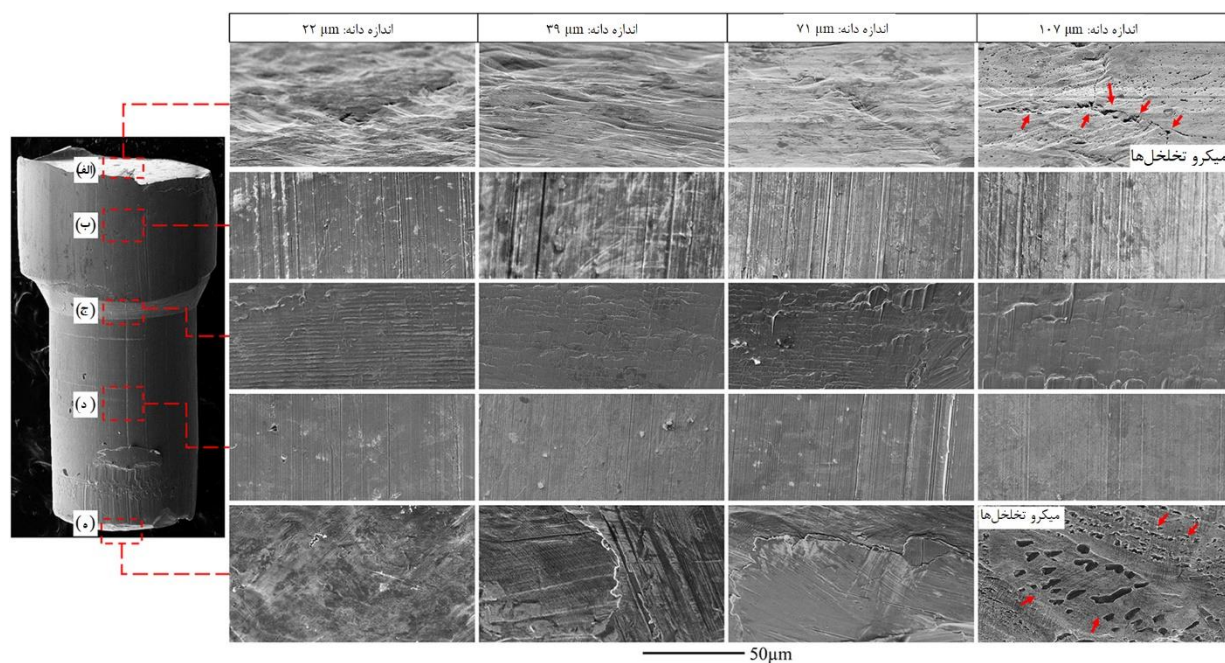


شکل ۱۶. تصاویر SEM از پیستون با طرح دم با اندازه دانه $71\text{ }\mu\text{m}$.

به طور خلاصه، برای هر دو طرح، سطح جانبی سر کیفیت سطح مطلوبی را نشان می‌دهد و می‌توان از تشکیل چروک و برآمدگی با استفاده از قالب اصلاح‌شده جلوگیری کرد. سطح انتهایی سر با برد مدارهای چاپی در محیط سرویس در تماس است، بنابراین بایستی به منظور اعمال پوشش برای مقاومت در برابر سایش از سطح همواری برخوردار باشد. بنابراین، مواد ریزدانه با عملیات سنگ‌زنی بعدی ترجیح داده می‌شود. سطح جانبی بدنه و شانه کیفیت قابل قبولی را نشان می‌دهند، اما باید از ایجاد سطح شکست ناشی از بلنک‌زنی اجتناب شود. اگرچه سطح جانبی دم، بالای دم و سطح بالای بدنه ناهمواری و بافت نامطلوب را نشان می‌دهند، اما این سطوح تماسی نیستند، بنابراین کیفیت شکل‌دهی مورد قبول است. ترک روی لبه بین دم و بدنه قطعات با طرح دم بایستی حذف گردد که ممکن است باعث شکستگی شود.

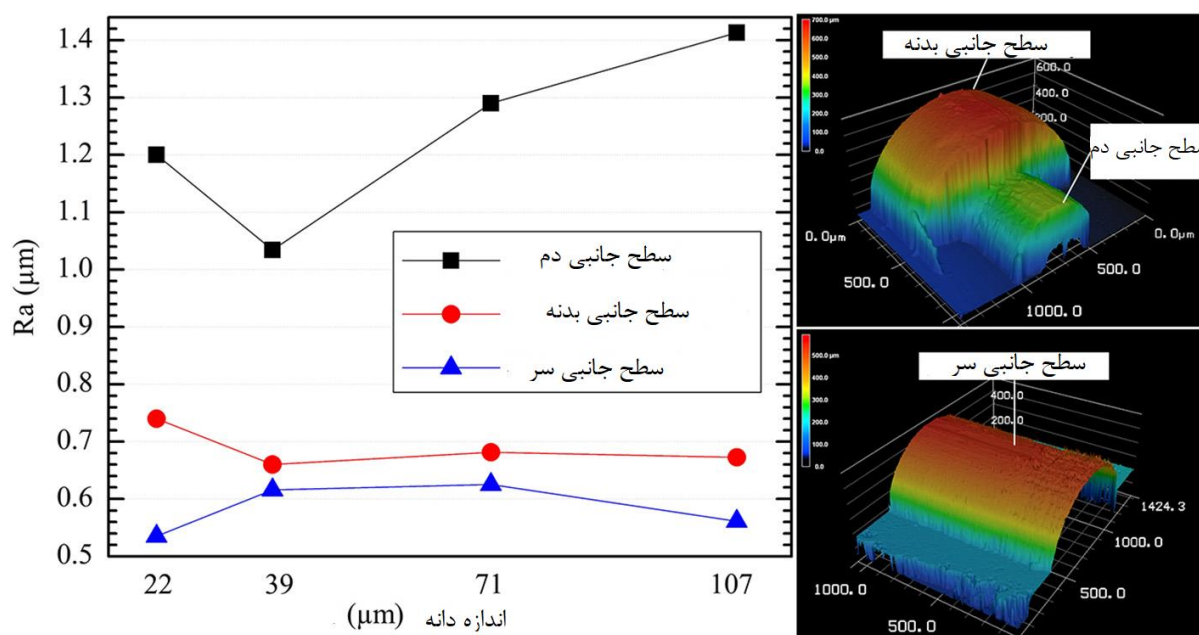


شکل ۱۷. تصاویر SEM از پیستون با طرح دم با اندازه دانه $107\ \mu\text{m}$.



شکل ۱۸. مورفولوژی سطوح با اندازه دانه های مختلف قطعه با طرح مسطح. (الف) بالای بدنه، (ب) بدنه جانبی، (ج) شانه، (د) سر جانبی و (ه) انتهای سطح سر.

زبری سطح Ra عامل مهمی است که می‌تواند بر فرآیند پوشش‌دهی بعدی برای الزامات الکترونیکی و مقاومت در برابر سایش قطعات پیستون تأثیر بگذارد. برای مطالعه کمی کیفیت سطوح جانبی، زبری سطح Ra در سطح جانبی دم، بدنه و سر قطعات پیستون با طرح دم که توسط میکروسکوپ روبشی لیزری سه بعدی (Keyence VK-X200) اندازه‌گیری شده است در شکل ۱۹ نشان داده شده است. طبق نمودار، زبری در سطح جانبی دم حدود $1/0$ تا $1/4$ است که بیشتر از زبری مورد نیاز است و با افزایش اندازه دانه روندی صعودی را نشان می‌دهد. از طرف دیگر، زبری در سطح جانبی سر و سطح جانبی بدنه به ترتیب حدود $0/58 \mu m$ و $0/7 \mu m$ است و این بخش‌ها سطح صاف‌تری را نشان می‌دهند و زبری با تغییر اندازه دانه ثابت می‌ماند. از آنجایی که سطح مشابه روی قطعات پیستون با طرح مسطح با فرآیند مشابه تشکیل می‌شود، زبری سطح همچنان برای طرح دیگر قابل ارجاع است. همانطور که در بخش بالا بحث شد، زبری سطح جانبی سر تقریباً به الزامات زبری می‌رسد ($Ra = 0.4 \mu m$). بنابراین، یک قالب بهبودیافته با کیفیت سطح بالا مورد نیاز است. علاوه بر این، زبری در سطح جانبی بدنه و دم قابل قبول است و باید مواد ریزدانه ترجیح داده شوند.



شکل ۱۹. زبری سطح در سطوح جانبی پیستون با طرح دم.

۵. نتیجه‌گیری

یک سیستم شکل‌دهی چندمرحله‌ای برای ساخت قطعه پیستونی پین‌شکل با دو سناریوی طراحی با استفاده مستقیم از ورق فلزی برای جایگزینی فرآیند میکروماشین‌کاری سنتی توسعه داده شد. قطعات تولیدشده به طور متقارن از جنبه‌های تکامل ریزساختاری، دقت ابعادی، شکست سطحی و بار تغییر شکل در فرآیند شکل‌دهی با در نظر گرفتن اثر اندازه دانه مورد بررسی قرار گرفتند. نتیجه‌گیری‌های زیر از این تحقیق به دست می‌آیند:

(۱) سیستم میکروفرمینگ چندمرحله‌ای مستقیماً با استفاده از ورق‌های فلزی با عملیات اکستروژن و بلنک‌زنی توسعه داده شد و دو نوع طرح سنبه برای طرح‌های مختلف پوگو پین به کار رفت. سیستم شکل‌دهی می‌تواند قطعه پیستون را با یک جابجایی سنبه تولید کند، که یک فرآیند کارآمد برای تولید میکروقطعات پیچیده پین‌شکل با پتانسیل تولید انبوه است.

(۲) با افزایش اندازه دانه، بار تغییر شکل کاهش می‌یابد و سنبه به جلو حرکت می‌کند. علاوه بر این، ارتفاع بخش بدنه کاهش می‌یابد، ارتفاع بخش سر برای قطعه طرح دم اندکی کاهش می‌یابد و برای قطعه با طرح مسطح افزایش می‌یابد، ارتفاع بخش دم افزایش می‌یابد و ارتفاع بخش شانه با افزایش اندازه دانه مواد ثابت می‌ماند. قطر هر بخش تغییر زیادی نکرده و به خوبی با طراحی مطابقت دارد. طول هر بخش در محدوده تلورانس مورد نظر است به جز طول سر قطعه پیستون با طرح مسطح.

(۳) نوار برشی ترجیح می‌دهد در ناحیه‌ای با گرادیان بالاتر سرعت سیلان مواد و انباشتگی کرنش موثر تشکیل شود. علاوه بر این، گرادیان بالاتر سرعت سیلان و دانه‌های درشت منجر به تشکیل نوار برشی پهن‌تر می‌شود. مناطق مرده فلزی در زیر سنبه تشکیل شده و در مواد درشت‌دانه کوچک می‌شوند.

(۴) میکروترک‌های ناشی از انباشتگی کرنش، ریزحفرات ناشی از تغییر شکل ناهمگن، سطح ناهموار و چروک‌های ریز، بافت سطحی طولی ناشی از سیلان مواد به سمت عقب و برآمدگی‌ها و چروک‌های ناشی از مونتاژ معیوب ابزار به عنوان عیوب نامطلوب در سطوح میکروقطعات مشاهده می‌شوند. برای اندازه دانه $107 \mu\text{m}$ ، میکروتخلخل‌ها در تمام سطوح صاف ظاهر می‌شوند. سطح جانبی بدنه، سطوح شانه و دم، کیفیت قابل قبولی را نشان می‌دهند. زبری سطح جانبی سر تقریباً الزام را برآورده می‌کند.

(۵) برای تحقق میکروفرمینگ چندمرحله‌ای مطلوب قطعه پیستون مربوط به پوگو پین، شعاع گوشه سنبه و مواد ریزدانه باید در نظر گرفته شود. بایستی توجه زیادی به دقت مونتاژ شود تا عیوب نامطلوب کاهش یابد.

ابعاد میکروقطعات پین‌شکل برنجی با طرح دم که به صورت مرحله‌ای تغییر شکل داده اند، دقت لازم را برآورده می‌کند. سطح جانبی سر نزدیک به زبری ایده آل است و زبری سطح را می‌توان با طرح اصلاح‌شده قالب بهبود

بخشید. کیفیت شکل‌دهی در سطوح دیگر قابل قبول است به جز سطح انتهایی بخش سر که نیاز به سنگ‌زنی یا پرداخت بعدی دارد. با این حال، طول سر میکروقطعات با طرح مسطح، الزامات تلورانس را برآورده نمی‌کند. بنابراین، میکروقطعه پیستون با طرح دم پیشنهاد می‌شود که با میکروفرمینگ چندمرحله‌ای با مواد ریزدانه تولید می‌شود.

مراجع

- [1] U. Engel, R. Eckstein, Microforming - from basic research to its realization, *J. Mater. Process. Technol.* 125 (2002) 35–44.
- [2] M. Geiger, M. Kleiner, R. Eckstein, N. Tiesler, U. Engel, Microforming, *Cirp AnnManuf Techn* 50 (2) (2001) 445–462.
- [3] A.R. Razali, Y. Qin, A review on micro-manufacturing, micro-forming and their key issues, *Procedia Engineering* 53 (2013) 665–672.
- [4] B. Boswell, M.N. Islam, I.J. Davies, A review of micro-mechanical cutting, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 94 (1–4) (2017) 789–806.
- [5] M.W. Fu, J.L. Wang, A.M. Korsunsky, A review of geometrical and microstructural size effects in micro-scale deformation processing of metallic alloy components, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 109 (2016) 94–125.
- [6] M.W. Fu, W.L. Chan, Micro-scaled products development via microforming, *Springer Series in Advanced Manufacturing*, 10, Springer, London, 2014 , (978-1).
- [7] M.W. Fu, W.L. Chan, Micro-scaled progressive forming of bulk micropart via directly using sheet metals, *Mater Design* 49 (2013) 774–783.
- [8] H.-J. Kwon, Y.-P. Jeon, C.-G. Kang, Effect of progressive forming process and processing variables on the formability of aluminium bipolar plate with microchannel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 64 (5–8) (2012) 681–694.
- [9] K. Hirota, Y. Watanabe, K. Kuriya, Y. Mori, Improvement of geometric accuracy in progressive slot piercing with small pitch, *Procedia Manufacturing* 15 (2018) 633–638.
- [10] C.J. Wang, L.D. Cheng, Y. Liu, H. Zhang, Y. Wang, D.B. Shan, B. Guo, Research on micro-deep drawing process of conical part with ultra-thin copper foil using multi-layered DLC film-coated die, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 100 (1–4) (2018) 569–575.
- [11] J. Cao, E. Brinksmeier, M. Fu, R.X. Gao, B. Liang, M. Merklein, M. Schmidt, J. Yanagimoto, Manufacturing of advanced smart tooling for metal forming, *CIRP Ann.* 68 (2) (2019) 605–628.

- [12] F. Vollertsen, D. Biermann, H.N. Hansen, I.S. Jawahir, K. Kuzman, Size effects in manufacturing of metallic components, *Cirp Ann-Manuf Techn* 58 (2) (2009) 566–587.
- [13] S. Nanthakumar, D. Rajenthirakumar, Influence of grain size on deformational behavior in microextrusion process, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 41 (3) (2019).
- [14] S.A. Parasız, B.L. Kinsey, N. Mahayatsanun, J. Cao, Effect of specimen size and grain size on deformation in microextrusion, *J. Manuf. Process.* 13 (2) (2011) 153–159.
- [15] C.C. Chang, C.H. Hsu, J.C. Lai, Effects of grain size and lubricating conditions on micro forward and backward hollow extrusion of Brass, *Appl. Mech. Mater.* 479–480 (2013) 8–12.
- [16] W.L. Chan, M.W. Fu, B. Yang, Study of size effect in micro-extrusion process of pure copper, *Mater Design* 32 (7) (2011) 3772–3782.
- [17] Z. Jiang, J. Zhao, H. Lu, D. Wei, K. Manabe, X. Zhao, X. Zhang, D. Wu, Influences of temperature and grain size on the material deformability in microforming process, *Int. J. Mater. Form.* 10 (5) (2016) 753–764.
- [18] Z. Fang, Z. Jiang, X. Wang, C. Zhou, D. Wei, X. Liu, Grain size effect of thickness/average grain size on mechanical behaviour, fracture mechanism and constitutive model for phosphor bronze foil, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 79 (9–12) (2015) 1905–1914.
- [19] D.-K. Leu, Distinguishing micro-scale from macro-scale tensile flow stress of sheet metals in microforming, *Mater Design* 87 (2015) 773–779.
- [20] R. Zhao, J.Q. Han, B.B. Liu, M. Wan, Interaction of forming temperature and grain size effect in micro/meso-scale plastic deformation of nickel-base superalloy, *Mater Design* 94 (2016) 195–206.
- [21] S.H. Park, J.H. Bae, S.-H. Kim, J. Yoon, B.S. You, Effect of initial grain size on microstructure and mechanical properties of extruded Mg-9Al-0.6Zn alloy, *Metall. Mater. Trans. A* 46 (12) (2015) 5482–5488.
- [22] R. Fan, J. Magargee, P. Hu, J. Cao, Influence of grain size and grain boundaries on the thermal and mechanical behavior of 70/30 brass under electrically-assisted deformation, *Mater. Sci. Eng. A* 574 (2013) 218–225.
- [23] B. Meng, W.H. Wang, Y.Y. Zhang, M. Wan, Size effect on plastic anisotropy in microscale deformation of metal foil, *J. Mater. Process. Technol.* 271 (2019) 46–61.
- [24] B. Meng, M.W. Fu, C.M. Fu, K.S. Chen, Ductile fracture and deformation behavior in progressive microforming, *Mater Design* 83 (2015) 14–25.
- [25] E. Ghassemali, A.E.W. Jarfors, M.J. Tan, S.C.V. Lim, On the microstructure of micropins manufactured by a novel progressive microforming process, *Int. J. Mater. Form.* 6 (1) (2013) 65–74.

- [26] J.Y. Zheng, H.P. Yang, M.W. Fu, C. Ng, Study on size effect affected progressive microforming of conical flanged parts directly using sheet metals, *J. Mater. Process. Technol.* 272 (2019) 72–86.
- [27] J.Q. Ran, L. Xu, J.L. Wang, T. Xu, F. Gong, Influence of dead metal zone on dislocation strengthening effect during micro-progressive forming, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2019) 1–13.
- [28] L. Peng, X. Lai, H.-J. Lee, J.-H. Song, J. Ni, Analysis of micro/mesoscale sheet forming process with uniform size dependent material constitutive model, *Mater. Sci. Eng. A* 526 (1–2) (2009) 93–99.
- [29] X. Lai, L. Peng, P. Hu, S. Lan, J. Ni, Material behavior modelling in micro/meso-scale forming process with considering size/scale effects, *Comput. Mater. Sci.* 43 (4) (2008) 1003–1009.
- [30] A.N.G. Kong, B.-K. Gong, G. Wang, H.-W. Cui, Influence of surface roughness of substrate on the properties of Ni–Co–Fe electrodeposition coating on copper, *Surf. Rev. Lett.* 25 (8) (2018).
- [31] U. Engel, Tribology in microforming, *Wear* 260 (3) (2006) 265–273. [32] T.G. Murthy, C. Saldana, M. Hudspeth, R. M'Saoubi, Deformation field heterogeneity in punch indentation, *Proc Math Phys Eng Sci* 470 (2166) (2014), 20130807.
- [33] S.Z. Qamar, Shape complexity, metal flow, and dead metal zone in cold extrusion, *Mater. Manuf. Process.* 25 (12) (2010) 1454–1461.
- [34] N.K. Sundaram, Deformation field in deep flat punch indentation and the persistence of dead-metal zones, *Philos. Mag.* 98 (25) (2018) 2326–2344.
- [35] W. Zhou, J. Lin, T.A. Dean, L. Wang, Analysis and modelling of a novel process for extruding curved metal alloy profiles, *Int. J. Mech. Sci.* 138–139 (2018) 524–536.