موقعیت تحقیقات جهانی در زمینهٔ شکل‌دهی مکانیکی فلزات

عبدالعلی فرزاد

عضو هیأت علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان

چکیده : شکل‌دهی فلزات یکی از کهن‌ترین روشهای تولید به‌شمار می‌رود. تحقیقات زیادی در زمینهٔ تکمیل نظریه‌ها و گردآوری اطلاعات تجربی شکل‌دهی به انجام رسیده است. با وجود این، هنوز هم طراحی ابزار شکل‌دهی و ارزیابی کیفیت محصول در گرو روشهای سعی و خطاست. در این مقاله روند پیشرفت تحقیقات از نظر برآورد انرژی لازم در تغییرشکل مکانیکی، افزایش عمر ابزار و کاهش عیوب محصولات مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: شکل‌دهی فلزات، طراحی قالب، نظریهٔ مومسانی، روشهای تولید، آموزش مهندسی.

۱. مقدمه

در فرایندهای شکل‌دهی فلزات، نیروی فوق‌العاده زیادی لازم است. گاهی درصد زیادی از این نیرو در مواردی مصرف می‌شود که برای شکل‌دهی یکنواخت فلز ضروری نیست. توزیع تنشهای ناهمگن و غیریکنواخت در محیط تغییرشکل از ویژگیهای شکل‌دهی در قالبهای متداول است. این تنشها علاوه بر مصرف انرژی غیرلازم، گاهی باعث ایجاد عیب در محصول و آسیب‌زدن به ابزار می‌شود. بدین منظور، پژوهشهای ارزشمندی صورت گرفته است. تحقیقات انجام شده در زمینهٔ شکل‌دهی فلزات بر روی سه محور زیر متمرکز است:

- کاهش مصرف انرژی؛
- علل کاهش عمر ابزار؛
- کاهش عیوب محصول و افزایش کیفیت آن.

۲. نظریه‌های شکل‌دهی

پس از پیدایش نظریهٔ مومسانی و تکامل و گسترش آن، این نظریه کاربردهای ارزشمندی در شکل‌دهی فلزات یافته است. نظریه های متعددی در این زمینه ارایه شده است که بسته به مورد کاربرد آنها دارای ارزشهای متفاوتند. تفاوت اصلی آنها در اعمال فرضهای ساده کننده‌ای است که در مدلهای فیزیکی آنها در نظر گرفته می‌شود. برتری یکی بر دیگری به اصول زیر بستگی دارد:

۱. توانایی روش در پیش‌بینی نیروهای شکل‌دهی؛

۲. توانایی روش در ارزیابی توزیع تنش؛

۳. توانایی روش در منظورکردن اصطکاک، کارسختی و دیگر عوامل شکل‌دهی؛

۴. توانایی روش در پیش‌بینی توزیع کرنش و تغییرشکل‌های زاید؛

۵. توانایی روش در پیش‌بینی عیبهای احتمالی محصول؛

۶. سهولت کاربرد روش ؛

۷. دستیابی به دقت بالاتر.

یک روش بخصوص ممکن است تمام خواسته‌های بالا را ارضا نکند. بنابراین، مقایسهٔ روشهای ارایه شده می‌تواند محقق را در انتخاب شیوهٔ تحلیل مناسب یاری دهد. این مقایسه توسط آلتان و لاهوتی [۱]، به‌صورت جدول (۱) ارایه شده است. این روش بیشتر روشهای شکل‌دهی

مکانیکی را در بر می‌گیرد. اینک به توضیح مختصر برخی از این روشها، که کاربرد بیشتری یافته‌اند، می‌پردازیم.

۱.۲. روش انرژی یکنواخت

این روش بر پایهٔ موازنهٔ انرژی استوار است. در این روش فرض می‌شود که کل انرژی مصرف شده در تغییرشکل یکنواخت و همگن، بدون اصطکاک و بدون تغییرشکل زاید، صرف شده باشد. کار انجام شدهٔ خارجی مساوی انرژی مصرفی شکل‌دهی قرار داده می‌شود. این مقدار انرژی بر واحد حجم ماده معادل مساحت زیر منحنی تنش -کرنش است. این روش محاسبات ساده‌ای لازم دارد و در طراحی صنعتی کاربرد وسیعی داشته است [۱].

۲.۲. روش تحلیل تختاری

در روش تختاری، تعادل پیکرهٔ آزاد یک تختار مجازی جدا شده از محیط تغییرشکل در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود که تنشها به‌طور یکنواخت به سطوح تختار وارد می‌آید. از تعادل نیروها بر روی تختار معادلهٔ دیفرانسیلی حاصل می‌شود که حل آن مقادیر بر تنش را روی سطوح تختار به‌دست می‌دهد. اگر تنش تسلیم به‌صورت تابعی از کرنش در نظر گرفته شود، می‌توان اثر کار سختی را نیز در این روش منظور کرد.

این روش بر ارزیابی نیروهای شکل‌دهی برای محاسبهٔ توزیع تنش [۲] و فشار در روی ابزار [۳] مناسب است. با وجود این، روش تحلیل تختاری بیشتر در مورد فرایندهای متقارن نظیر اکستروژن و کشش کاربرد دارد و در صورتی که زاویهٔ قالب زیاد و نسبت کاهش کم باشد، این روش نتایج قابل قبولی به‌دست نمی‌دهد [۴].

۳.۲. نظریهٔ میدان خط لغزش

نظریهٔ میدان خط لغزش بر این پایه استوار است که تغییرشکل در امتداد تنشهای برشی بیشینه در طول خطوط لغزش اتفاق می‌افتد. وجود خطوط لغزش در آزمایشهای زیادی نمایان شده و به اثبات رسیده است [۵ و ۶]. این روش در مورد مسائل کرنشهای صفحه‌ای و مواد ایده‌آلی به کار می‌رود که صلب -کاملاً مومسان - فرض می‌شود توضیح کاملی از نظریه و کاربردهای آن را در

مراجع [۷ و ۸] می‌توان یافت. با استفاده از روش نظریهٔ میدان خط لغزش می‌توان موارد زیر را پیش‌بینی کرد [۹]:

جدول ۱. خلاصهٔ روشهای مختلف محاسباتی در شکل‌دهی فلزات [۱]

روش	ورودی		خروجی				ملاحظات
	تنش جاری شدن	اصطکاک	میدان سرعت	میدان تنش	میدان دما	تنش در روی ابزار	
تختاری	متوسط	للفساحب	خیر	آری	خیر	آری	کار مازاد را در نظر نمی‌گیرد
انرژی یکنواخت	متوسط	ب	خیر	خیر	خیر	متوسط	کار مازاد را به‌طور تقریبی در نظر می‌گیرد
میدان خط لغزش	متوسط	الف و ب	آری	آری	خیر	آری	معتبر برای مسایل کرنش صفحه‌ای
حد بالا تر	توزیع	ب	آری	خیر	خیر	متوسط	حد بالاتر نیروها را می‌دهد؛ هرزهای آزاد را تعیین می‌کند
روش هیل	توزیع	الف و ب	آری	خیر	خیر	متوسط	مسایل سه‌بعدی را می‌توان تحلیل کند
اختلاف محدود	توزیع	الف و ب	آری	آری	آری	آری	وقت زیادی از رایانه می‌گیرد
المان محدود	توزیع	الف و ب	آری	آری	آری	آری	وقت زیادی از رایانه می‌گیرد
روش ماتریسی	توزیع	الف و ب	آری	آری	آری	آری	در مورد مواد صلب ـ کاملاً مومسان مناسب است
باقیماندهٔ وزنی	توزیع	الف و ب	آری	آری	آری	آری	روش بسیار عمومی است

الف) $\tau = \mu\sigma_{\text{ave}}$

ب) $\tau = \frac{\mu\sigma}{\sqrt{3}}$

۱. نیروهای شکل‌دهی

۲. توزیع تنش در قطعه کار و فشار در روی قالب؛
۳. حرکت واقعی ماده در قالب ضمن تغییرشکل؛
۴. الگوی جریان ماده قالب و ارزیابی کرنشهای زاید؛
۵. پیش‌بینی خواص مکانیکی و کیفیت محصول؛
۶. عیوب ممکن در محصول و دلایل ممکن برای بروز آنها.

این روش نیروهای شکل‌دهی را قدری بیشتر از حد لازم پیش‌بینی می‌کند، ولی در مقایسه با نتایج تجربی قابل قبول است [۱۰].

با وجود مزیتهای نظریه میدان خط لغزش، محدودیتهای چندی در کاربرد آن وجود دارد. برای تبیین آن فرضیات چندی باید در نظر گرفت که ممکن است با واقعیت فیزیکی خیلی تطبیق نداشته باشد. تصور یک ناحیهٔ کشسان و یک ناحیهٔ مومسان که با یک خط فرضی از هم جدا شده باشند، از این مقوله است. علاوه بر آن، این نظریه فقط در مورد مسایل دو بعدی و متقارن کاربرد دارد و با ابداع روشهای عددی سه‌بعدی جدید ارزش خود را تا حد زیادی از دست داده است [۱۱].

۴.۲. نظریهٔ حد بالاتر

این نظریه از اصول جنبش‌شناسی مبتنی بر مکانیک محیطهای پیوسته پیدایش یافته است. تشکیل معادلات و حل آنها شامل مراحل زیر است:

۱. فرض یک میدان سرعت قابل قبول از نظر جنبش‌شناسی که دارای شرایط زیر باشد:
- ماده تراکم‌ناپذیر باشد؛
- پیوستگی وجود داشته باشد؛
- شرایط مرزی سرعت را داشته باشد.

میدان سرعت ممکن است بر حسب یک یا چند متغیر تعریف شود که به‌عنوان مجهولهای مسئله ظاهر شوند [۱۲].

۲. حل معادله‌های به‌دست آمده و محاسبهٔ توان لازم برای شکل‌دهی خالص، کرنشهای مازاد و از بین بردن اصطکاک.

۳. محاسبهٔ انرژی کل و به حداقل رساندن آن نسبت به متغیرهای فرض شده در میدان سرعت.

این روش انرژی مصرفی را بالاتر از واقعیت نشان می‌دهد، بنابراین مقادیر پایین به‌دست آمده

از بهینه‌سازی آن پیش‌بینی‌های بهتری را ارایه می‌کند. عیب اصلی این روش آن است که میدان سرعت فرض شده منحصر به فرد نیست و میدان سرعتهای متعددی را می‌توان به یک فرایند به‌خصوص نسبت داد [۱۳].

در ابتدای پیدایش فرضیهٔ حد بالاتر، ماده به صورت صلب -کاملاً مومسان منظور می‌گردید و یک میدان سرعت ثابت فرض می‌شد [۱۰]. امروزه، در نتیجهٔ پیشرفتهای حاصل شده در این زمینه اثر کارسختی و همچنین دیگر متغیرهای مؤثر در شکل‌دهی مانند شکل قالب را می‌توان در نظر گرفت [۱۲]. به‌علاوه استفاده از یک میدان سرعت با متغیرهای زیاد، که با بهره گیری از روشهای عددی بهینه‌سازی متوالی را امکان‌پذیر می‌سازد، متداول شده است.

این روش برای پیش‌بینی نیروهای اکستروژن، الگوی جریان و توزیع کرنش نهایی، در حضور متغیرهای شکل‌دهی به کار برده شده و همخوانی بسیار رضایت‌بخشی با نتایج آزمایشها و نتیجه‌های حاصل شده از روش المانهای محدود گزارش شده است [۱۲].

با وجود محاسبات طولانی آن، این روش به‌عنوان بهترین روش عملی برای شبیه‌سازی جریان ماده در فرایندهای ساده شناخته می‌شود [۲].

۵.۲. روش المانهای محدود و شبیه‌سازیهای رایانه‌ای

با پیشرفت حاصل شده در روشهای عددی و بهره گیری از رایانه، المانهای محدود کاربرد وسیعی در حل مسایل شکل‌دهی فلزات یافته است. سیر تحول این روش در شکل‌دهی فلزات توسط کوبایاشی [۱۴] و راو [۱۵] توضیح داده شده است. کاربردهای دیگری از المانهای محدود در خصوص پیش‌بینی انرژی شکل‌دهی، طراحی ابزار و پیش‌بینی تغییرشکلهای زاید در مراجع [۱۶ و ۱۷] داده شده است.

اگرچه مسایل متعددی با بهره گیری از روشهای المانهای محدود حل شده و جوابهای قابل قبولی به‌دست آمده است، برای عمومیت دادن آن هنوز قدمهای بیشتری باید برداشته شود تا مسایلی نظیر اثر اصطکاک، کار مازاد و پیش‌بینی تنشهای پس‌ماند در محصول حل شود.

شبیه‌سازی رایانه‌ای در حل مسایل مهندسی روش متداولی شده است. در شکل‌دهی فلزات نیز از شبیه‌سازی استفادهٔ زیادی به‌عمل آمده است. شبیه‌سازی رایانه‌ای نه تنها در مورد قطعات با شکل هندسی ساده، بلکه در تجزیه و تحلیل محصولاتی با شکل هندسی پیچیده‌تر مانند I و T شکل

نیز به سهولت انجام‌پذیر است [۱۸]. روشهای شبیه‌سازی ارزان، سریع و فراگیر هستند. با وجود این، متغیرهای شکل‌دهی باید کاملاً شناخته شده باشند، و میزان اثر هر یک به‌طور مناسب منظور شود. در غیر این صورت، ممکن است نتایج قابل قبولی حاصل نشود. به‌علاوه، پس از شبیه‌سازی نیز رفتار واقعی مواد با الگوی شبیه‌سازی شده باید با آزمایش تأیید شود.

۳. روشهای تجربی شکل‌دهی فلزات

۱.۳. استفاده از مواد الگو

استفاده از مواد الگو در شکل‌دهی فلزات جایگاه ویژه‌ای دارد. موادی به‌عنوان الگو مورد استفاده قرار می‌گیرند که نقطهٔ ذوب پایین داشته باشند و ماشینکاری، علامت‌گذاری و شکل‌دهی در آنها به سهولت امکان‌پذیر باشد. بهره‌گیری از مواد الگو دارای مزایای چندی است از جمله:

۱. ماشین‌آلات و تجهیزات آزمایشگاهی کمتر و ارزانتری مورد نیاز است.

۲. مواد مصرفی کمتری مورد نیاز است، زیرا می‌توان برخی از مواد الگو را بارها ارزیابی کرد و دوباره مورد استفاده قرار داد.

۳. نتایج را می‌توان سریع و واضح به‌دست آورد.

با وجود این، استفاده از مواد الگو معایبی نیز دارد، از جمله:

۱. شبیه‌سازی کامل دستگاههای الگو همانند دستگاههای واقعی صنعتی تقریباً غیرممکن است.

۲. شباهت کامل بین مواد الگو و مواد واقعی وجود ندارد.

۳. برخی متغیرهای ناشناخته یا کمتر اهمیت داده شده ممکن است وجود داشته باشد که باعث تفاوت زیاد در نتایج مواد الگو با مواد واقعی بشود.

هدف اصلی تحقیقات آزمایشی در شکل‌دهی فلزات را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد:

- پژوهش کیفی؛
- تحلیل کمی.

پیدایش و گسترش روشهای آزمایشی در اکستروژن در کتابی توسط پیرسون و پارکینز [۱۹] توضیح داده شده است. در پژوهشهای کیفی از یخ [۲۰]، خاکهٔ نقره [۲۱] و نظایر آن استفاده شده است. لیکن، در تحقیقات کمّی نیاز به اندازه‌گیری پدیده‌ها پیش می‌آید. در صورتی که یافتن ارتباط بین مادهٔ الگو با مادهٔ واقعی در نظر باشد، مشکل پیچیده‌تر می‌شود. در اکثر تحقیقات

می‌توان پژوهش کیفی و کمی را توأماً انجام داد.

علامت‌گذاری در داخل جسم مورد آزمایش و اندازه‌گیریهای روی آن پس از تغییرشکل، اساس کار پژوهشهای تجربی را تشکیل می‌دهد. روشهای علامت‌گذاری متفاوتی در شکل‌دهی فلزات متداول شده است. مثلاً، یوئن و همکارانش [۲۲] از شمشهای سرب که در داخل آنها میله‌های نازک آلومینیومی گذاشته بودند استفاده کردند. بلازینسکی [۲۳] از موم صنعتی ریخته شده به‌صورت لایه‌های رنگین بهره گیری کرد. موم صنعتی با لایه‌های رنگین در پژوهشهای متنوعی مانند آهنگری [۲۴]، لوله‌سازی به روش اسل [۲۵] و اکستروژن [۵] به کار رفته است. از پلاستیسین نیز همانند موم صنعتی در پژوهشهای شکل‌دهی استفادهٔ وسیعی به‌عمل آمده است [۲۶ و ۲۷]. یک روش بسیار متداول برای مطالعهٔ جریان ماده در درون قالب، شبکه‌ای کردن یک رویهٔ نصف شدهٔ قطعه کار است که به نام ویژیوپلاستیسیته معروف است و به ویژه برای فرایندهای متقارن مفید است [۳ و ۲۸].

۲.۳. روش ویژیوپلاستیسیته

در هر دو نظریهٔ میدان خط لغزش و حد بالاتر، بردارهای سرعت طوری فرض می‌شود که تعدادی از شرایط و خواسته‌های مرزی معادلات را ارضا کند. درستی فرض این بردارهای سرعت را می‌توان با آزمایش به روش ویژیوپلاستیسیته بررسی کرد. همچنین، نتایج اندازه‌گیری شده با این روش را می‌توان مستقیماً در حل مسایل مومسانی به کار برد.

در این روش، قطعه کار از وسط نصف می‌شود و در روی یک نیمهٔ آن یک شبکهٔ مربعی یا دایره‌ای حک یا چاپ می‌شود. دو نیمه بر روی هم گذاشته می‌شود و شکل‌دهی انجام می‌گیرد. سپس، دو نیمه از هم جدا می‌شود و تغییرات شبکه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. اندازه‌گیری تغییرات حاصل شده توزیع کرنش را ممکن می‌سازد [۲۹]. با داشتن توزیع کرنش می‌توان توزیع تنش را در ناحیهٔ تغییرشکل به‌دست آورد.

۴. تحقیقات طراحی ابزار در شکل‌دهی فلزات

علی‌رغم پیشرفتهای شایان ذکری که در نظریه‌های مومسانی و شکل‌دهی فلزات حاصل شده است، طراحی ابزار هنوز هم به‌طریق سعی و خطا انجام می‌شود و طراحی صحیح هنوز یک هنر

محسوب می‌شود.

تحقیق در طراحی ابزار علاوه بر به‌دست آوردن دقت ابعاد محصول، شامل ارزیابی نیروهای شکل‌دهی، پیش‌بینی محل و نوع عیوب در محصول و تخمین عمر ابزار تحت شرایط شکل‌دهی نیز می‌شود. اغلب پژوهشهای انجام یافته تاکنون در مورد نیروهای شکل‌دهی و مطالعهٔ الگوی جریان صورت پذیرفته است. روش اصلی تحقیقات در این زمینه را به مقوله‌های زیر می‌توان تقسیم کرد:

۱. انتخاب یک دستهٔ معین از شکلهای قالب و تعیین نیروهای کلی یا مطالعهٔ الگوی جریان به‌صورت تجربی، یا پژوهش در خصوص شرایط اصطکاک و روانکاری در محل تماس قطعه‌کار و قالب.

۲. انتخاب شکل معینی از قالب شکل‌دهی و کاربرد نظریه‌های مومسانی بر روی آن برای محاسبهٔ نیروها و پیش‌بینی الگوی جریان. پس از آن، تعیین توزیع کرنش و تنش در ناحیهٔ شکل‌دهی نیز امکان‌پذیر می‌شود.

۳. کاربرد نظریه‌های مومسانی به همراه ایده‌ها و روشهای جدید به اضافهٔ تجربه‌ها و مهارتهای ویژه، برای یافتن شکل مناسبی برای قالب که خواسته‌های ویژه یا اصلاحات معینی را نتیجه دهد.

مقولهٔ نخست مطالعهٔ اساسی رفتار فلز در ناحیهٔ شکل‌دهی را در بر می‌گیرد. تحقیقات نخستین در این زمینه توسط پیرسون و پارکینز به اختصار شرح داده شده است [۱۹]. تحقیقات اساسی ویستریچ [۳۰]، تیلور و کوینی [۳۱]، هوندی و سینگر [۳۲] و اخیراً فرزین [۳۳] از جملهٔ این کارهاست.

استفاده از مواد الگو و روش ویژیوپلاستیسیته رفتار واقعی جریان فلز را در ناحیهٔ تغییرشکل به نمایش می‌گذارد و پیشرفت تحقیقات کیفی و کمی فرایندهای شکل‌دهی را میسر می‌سازد. ویژیوپلاستیسیته که توسط تامسن و همکارانش [۳۴] به‌طور گسترده‌ای بیان شده است، کاربرد شایانی یافته است. این روش نشان داده است که توقف شکل‌دهی و شروع دوبارهٔ آن ضمن عمل شکل‌دهی تأثیری در الگوی جریان ندارد. بدین طریق، می‌توان برای حالت غیرپایدار جریان در ناحیهٔ شکل‌دهی نیز میدان جریان مناسبی تعریف کرد [۲۹ و ۳۵].

برای مطالعهٔ اصطکاک در فرایندهای شکل‌دهی کوشش فراوانی به‌عمل آمده است. پژوهش شبیک و همکارانش با استفاده از ویژیوپلاستیسیته [۳۶] و بسیلی و سنسام [۳۷] از جملهٔ فعالیتهای انجام یافته در این زمینه است.

نتیجه کارهای انجام شده به‌دست آوردن تعدادی فرمول تجربی و مهارتهای مناسب [۱۹، ۲۹ و ۳۸] برای تخمین نیروهای شکل‌دهی و ضرایب تغییرشکل‌های زاید [۹ و ۳۰] بوده است.

متا - پیرتی و فریش [۳۹] نیروهای شکل‌دهی و تغییرات شبکهٔ حک شده را در قالبهایی با نیمرخ کسینوسی، بیضوی، هیپربولیک، محدب و مخروطی مطالعه کـــردند. نـتیجهٔ کـــار آنـها آشـکار ساخت که نیروی شکل‌دهی خیلی به شکل نیمرخ قالب و شـــرایط روانکاری وابسته است.

کاربرد میدان خط لغزش و روش حد بالاتر برای محاسبهٔ نیروهای شکل‌دهی و نمایش الگوی جریان در مقولهٔ دوم دسته‌بندی فوق قرار دارد. تحقیقات در این زمینه شامل مطالعهٔ قالب تخت [۷]، قالبهای مخروطی [۳]، قالبهای منحنی [۴۰ و ۴۱]، اکستروژن محصولات غیرمتقارن [۴۲ و ۴۳] و پروفیلهای مختلف [۴۴] بوده است. ماحصل این تحقیقات علاوه بر موارد ذکر شده، منظور کردن کار مازاد، اصطکاک و کار سختی در شکل‌دهی نیز می‌باشد [۳].

ناگپال [۴۵] با فرض یک تنش اصطکاکی یکنواخت، رابطه‌ای یافت که برای هر نوع نیمرخ قالب کاربرد دارد. در این روش باید نوع نیمرخ از ابتدای کار معلوم باشد. او با آزمایش قالبهای مخروطی، کسینوسی، بیضوی و هیپربولیک، نیمرخ بهینهٔ مربوط به شرایط اصطکاکی متفاوت را پیدا کرد.

مقولهٔ سوم بر اساس استفاده از مطالعات نظری به همراه معرفی ویژگیهای خاص قالب است. این روش پایهٔ منطقی کردن طراحی قالب در شکل‌دهی فلزات است.

با استفاده از نظریهٔ میدان خط لغزش، ریچموند و دونپک [۴۶] نیمرخی یافتند که بردار سرعت در هر نقطه بر امتداد تنش اصلی بزرگتر منطبق بود و آنها ثابت کردند که شکل‌دهی حاصل از این قالب با کرنش یکنواخت است. این تحقیق توسط هیل [۴۷] مورد تأیید قرار گرفت و صحت آن با نتایج تجربی بیشتری به اثبات رسید [۴۸]. سورتیاس و کوباياشی [۴۹] و دیگر محققان [۴۱ و ۵۰] برتری قالبهای منحنی را بر قالبهای مخروطی در اکستروژن به اثبات رساندند.

بلازینسکی [۵۱] نظریه‌ای پیشنهاد کرده است که در آن خارج قسمت افزایش کرنشهای متوالی (C.R.H.S.) ضمن تغییر شکل در درون قـالب ثابت بمـــاند. این نـظـــریه در چند فـرایـند شکل‌دهی از جمله اکستروژن [۵، ۵۲ و ۵۳] و دیگر فرایندها [۲۵ و ۵۴] با موفقیت انجام یافته است.

۵. آموزش در فرایندهای تغییرشکل فلزات

اگرچه ادعا می‌شود که یک استادکار ماهر فقط با داشتن یک عدد سوهان قادر است پیچیده‌ترین قطعات مهندسی را تولید کند، اقتصاد تولید کنونی جهانی اجازهٔ تولید را، تنها به روش سوهان کاری، به استادکار نمی‌دهد. روزی آهنگر پیری گفته بود که "اگر من می‌توانستم یک سوزن بسازم، کمتر از صدتومان نمی‌فروختمش" (در آن روزگار صدتومان، خرج سفر رفت و برگشت دو نفر از خراسان به مکه بوده که یکسال به‌طول می‌انجامیده است). آهنگر پیر شاید تصور می‌کرد که برای ساختن سوزن هم حتماً باید از همان وسایل ابتدایی آهنگری خود استفاده کند. او احتمالاً نمی‌دانست که برای ساخت هر قطعه‌ای فرایند ویژه و یا تلفیقی از فرایندها به کار گرفته می‌شود و با به‌کارگیری شیوه‌های صحیح تولید می‌توان قطعات را دقیقتر، سریعتر، ارزانتر و فراوانتر به‌دست آورد.

امروزه، تولید انبوه قطعات به استادکارهای ماهر فراوان و ماشین‌آلات سنگین و گران نیازمند است. افزایش مهارت متخصصان و تولید قطعات به‌طور دقیق و ارزان مستلزم آموزشهای مناسب است. آموزش روشهای تولید را می‌توان به سه مقولهٔ متفاوت تقسیم‌بندی کرد:

الف. آموزشهای ویژه

آموزش کار با دستگاهها و کسب مهارتهای خاص که کارخانه‌ها و مؤسسات بر حسب نیاز و ضرورت به آن می‌پردازند.

ب. آموزش عمومی روشهای تولید

در اکثر کشورها مراکز آموزش فنی و حرفه‌ای در سطح افزایش مهارتهای کارگری، هنرستانها و دبیرستانهای فنی در سطح تربیت کاردانها و دانشگاهها در سطح تربیت مهندسان، طراحان و برنامه‌ریزان به آموزش متخصصان می‌پردازند.

آموزش روشهای تغییرشکل فلزات، بر خلاف برخی از روشهای تولید دیگر مانند جوشکاری و تراشکاری که با دستگاههای ارزانتر امکان‌پذیر است، تأسیسات و دستگاههای سنگین را طلب می‌کند. در نتیجه، آموزش این روشها عموماً به صورت نظری و در کلاسهای درس صورت می‌گیرد. با وجود این، در بعضی از دانشگاهها از دستگاههای کوچکتر آزمایشگاهی و از مواد الگو برای

آموزش شیوه‌های تغییرشکل استفاده می‌شود. کتابهای مفیدی در زمینه‌های روشهای تولید به‌طور عام [۵۵ و ۵۶] و در تغییرشکل فلزات به‌طور خاص [۲، ۳، ۴، ۶، ۳۴] انتشار یافته است.

ج. آموزش مدیریت تولید

در این برنامه انتخاب روشهای تولید مناسب برای قطعات مختلف آموزش داده می‌شود. این نوع آموزش برنامه‌ای کوتاه‌مدت در قالب سمینارها، کارگاهها، نمایشگاهها و کلاسهای خصوصی گران‌قیمت است.

علی‌رغم پیشرفتهای شایان ذکری که در زمینه‌های مختلف تولید به‌دست آمده است، هنوز هم انتقادهایی در مورد بعضی از مقوله‌های یادشدهٔ فوق وجود دارد. در یکی از نمایشگاههای بین‌المللی تهران اتومبیلی به معرض تماشا گذاشته شده بود که بدنهٔ آن را یک استادکار ماهر با صافکاری از ورقهای صاف ساخته بود. او مدت دو سال برای تولید آن کار کرده و از روشهای مختلف تولید استفاده کرده بود. در مهارت فنی او شکی نبود و کارش با تحسین روبه‌رو شده بود. ولی برای ساخت اتومبیل دیگری نظیر آن نیاز به دو سال وقت داشت! اگر او توان خود را در ساختن قالب یا پرسهایی صرف می‌کرد که در هر چند دقیقه یک بدنهٔ اتومبیل را تولید می‌کرد بهتر نبود؟ راهنمایی صنعتگران توانمند و به‌کارگیری صحیح ایده‌ها، توان و نوآوری آنها در گرو آموزشهای صحیح درازمدت و کوتاه مدت است.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با وجود پیشرفتهای خوبی که در نظریه‌های شکل‌دهی حاصل شده است، بهبود در طراحی قالبها هنوز بر اساس سعی و خطا انجام می‌شود. شاید دلیل این موضوع درکمبود اطلاعات لازم از رفتار مواد در داخل قالبهای شکل‌دهی باشد. با وجود این، در زمینهٔ سعی و خطا نیز پیشرفتهای زیادی انجام گرفته است که به کارگیری تجربهٔ دیگران باعث جلوگیری از تکرار سعی و خطا و صرفه‌جویی در وقت و هزینه خواهد شد. علی‌رغم اینکه کاربرد رایانه در صنعت شکل‌دهی و طراحی قالب روش انقلاب گونه‌ای را به‌وجود آورده است [۵۷، ۵۸ و ۵۹]، هنوز کافی نیست. از طرف دیگر به‌نظر می‌رسد که آموزش در این زمینه از فناوریهای جدید کمتر سود جسته است و با دستاوردهای تحقیقات همگام نیست.

برای پیگیری تحقیقات و آموزش در شکل‌دهی فلزات، چه به طور نظری و چه به صورت تجربی و کاربردی، زمینه‌های چندی وجود دارد که فهرست وار بیان می‌کنیم:

- تحلیل و فرمولبندی عمر قالب و ارتباط آن با شکل هندسی.
- شبیه‌سازی روانکاری و اصطکاک مابین قالب و قطعه کار.
- مطالعهٔ ساختمان مولکولی محصول و ارتباط آن با شکل قالب.
- مطالعهٔ خواص مکانیکی محصول و ارتباط آن با شکل قالب.
- توسعهٔ تحلیل و فرمولبندی شکل‌دهی در مسائل سه‌بعدی.
- گسترش استفاده از فناوریهای نوین آموزشی، نظیر تهیه و توزیع اسلاید، فیلم و برنامه‌های رایانه‌ای شبیه‌سازی شدهٔ فرایندهای شکل‌دهی فلزات.
- همگام کردن آموزش با تحقیقات در روشهای تولید.
- گسترش و افزایش آموزش مدیریت تولید.

مراجع

1. T. Altan and G.D. Lahoti, Limitations, applicability and usefulness of different methods in analysis forming problems, *Annals ot the C.I.R.P., Vol. 28, pp. 473-485*, 1979.
2. T. Altan, S. Oh and G.D. Gegel, Metal forming, fundamentals and applications, *A.S.M.*, 1983.
3. G.W. Rowe, Principles of industrial metalworking processes, Edward Arnold, London, 1977.
4. W.F. Hosford and R.M. Caddell, Metal forming, mechanics and metallurgy, Printice-Hall, 1983.
5. A. Farzad, Ph.D. thesis, University of Leeds, 1988.
6. G.W. Rowe, Elements of metalworking theory, *Edward Arnold Ltd, 45-61*, 1979.
7. R. Hill, The mathematical theory of plasticity, Oxford University Press, 1985.
8. W. Johnson, R. Sowerby and R.D. Venter, Plane strain slip line fields for metal

deformation processes, Pergamon Press, 1982.

9. R.W. Johnson and G.W. Rowe, Redundant work in drawing cylindrical stock, *J. Inst. Met., Vol. 96, pp. 97-105*, 1968.

10. W. Johnson, Estimation of upper bound loads for extrusion and coining operations, *Proc. Inst. Mech. Engrs. pp. 61-72*, 1959.

11. K.(ed) Lange, Hand book of metal forming, McGraw-Hill, 1985.

12. D.Y. Yang and C.H. Han, A new formulation of generalized velocity field for axisymmetric forward extrusion through arbitrarily curved dies, *J. Eng. Ind., Vol. 109, No. 2, pp. 161-168*, 1987.

13. W. Johnson and P.B. Mellor, Engineering plasticity, Ellis Horwood Ltd., 1983.

14. S. Kobayashi, A review on the finite element method metal forming process modeling, *J. Appl. Metalworking, Vol. 2, p. 163*, 1982.

15. G.W. Rowe, Problems involved in the numerical analysis of plastic working processes for new materials, *Advd. Tech. Plas. pp. 27-38*, 1984.

16. Pei Chi Chou and Wu Longwu, A dynamic relaxation finite element method for metal forming processes, *Int. J. Mech. Sci., Vol. 28, No. 4, pp. 231-250*, 1986.

17. C.R. Boer and F. Jovane, Computer aided design in metal forming systems, *Annals of the C.I.R.P., Vol. 33/2*, 1984.

۱۸. کارن، ابری‌نیا، اکستروژن مقاطع پیچیده از قبیل I و T شکل، چهارمین کنفرانس سالانهٔ مهندسی مکانیک انجمن مهندسان مکانیک ایران و دومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، ۱۳۷۵.

19. C.E. Pearson and R.N. Parkins, The extrusion of metals, Chapman and Hall, London, 1960.

20. T. Chandra and J.J. Jonas, The extrusion force and the mean strain rate during the extrusion of strain rate sensitive materials, *Met. Trans. Vol. 1, pp. 2079-2082*, 1970.

21. C. Smith and N. Swindells, Some factors affecting the quality of extrusion, *J. Int. Metals., Vol. 82, pp. 1953-1954*, 1953.

22. D.P. Yuen, S. Kobayashi and J. Frisch, Metal flow in extrusion of shapes, *Proc. N.A.M.R. Conf., Vol. 4, pp. 188-192*, 1976.

23. T.Z. Blazynski, Optimization of die design and tube making, *The engineer, Vol. 223, No. 5797, pp. 627-630*, 1967.

24. H.F. Massey, The flow of metal during forging, Trans. Manchester Asso. Engrs, pp. 21-66, 1921, 1922.

25. J.H. Mohamed, Ph.D. thesis, University of Leeds, 1986.

26. P.M. Cook, Forging research, used of plasticine models, *Metal treatment and drop forging, Vol. 20, pp. 540-548*, 1953.

27. N. Inoue and M(ed.) Nishihama, Hydrostatic extusion, theory and applications, Elsevir, 1985.

28. S. Dinda, S.P. Keeler, K.F. James and P.A. Stine, How to use circle grid analysis for die tryout, A.S.M., 1981.

29. E.G. Thomsen, C.T. Yang and J.B. Bierbower, An experimental investigation of the mechanics of plastic deformation of metals, *University of California Publications in engineering, Vol. 5, No. 4, pp. 89-144*, 1945.

30. J.G. Wistrich, The fundamentals of wire drawing, Metal. Rev., Vol. 3, No. 10, pp. 79-142, 1958.

31. G.I. Taylor and H. Quinney, The distortion of wore on passing through a draw plate, *J. Inst. Met., Vol. 49, pp. 187-202*, 1932.

32. B.B. Hundy and A.R.E. Singer, Inhomogeneous deformation in rolling and wore drawing, *J. Inst. Met., Vol. 83, pp. 401-407*, 1954-1955.

33. M Farzin, Sheet metal forming by a pressure medium, *Int. Conf. Engg., Sharif University, Iran, pp. 514-521*, 1992.

34. E.G. Thomsen, G.T. Yang and S. Kobayashi, Mechanics of plastic deformaiton in metal processing, Macmillan, N. Y., London, 1965.

35. J. Halling and L.A. Mitchle, Experimental study of symmetrical extrusion using parafin wax as model material, *Proc. 5th Conf. M.T.D.R., pp. 353-390*, 1964.

36. A.H. Shabaik, Metal forming, inter relation between theory and practice, (ed. Hoffmanner), pp. 63-83, 1971.

37. B.B. Basily and D.H. Sansom, Determination of the mean coefficient of friction in the direct drawing of section rods form round bars, 17th Int. M.T.D.R. Conf., pp. 475-486, 1976.

38. I.S.M.E., Cold forging data sheet No. 69002, Determination of extrusion pressure, *Metal forming, Vol. 36, No. 5, pp. 134-147*, 1969.

39. Mata-Pietri and F. Frisch, Metal flow through various mathematically countoured extrusion dies, *Proc. 5th N.A.M.R. Conf., pp. 99-113*, 1977.

40. C.T. Chen and F.F. Ling, Upper bound solution to axisymmetric extrusion problems, *Int. J. Mech. Sci., Vol. 10, pp. 863-879*, 1968.

41. S.K. Samanta, A new die profile with high process efficiency, *Appl. Sci. Res., Vol. 25, pp. 54-64*, 1971.

42. A.P. Green, On unsymmetrical extrusion in plane strain, *J. Mech. Phys. Solids, Vol. 3, pp. 189-196*, 1955.

43. W. Johnson and H. Kudo, The mechanics of metal extusion, Manchester University Press, 1962.

44. C.B. Boer, W.R. Schneider, B. Eliasson and B. Avitzur, An upper bound approach for the direct drawing of square section rod from round bar, *Proc. 20th Int. M.T.D.R. Conf., pp. 149-156*, 1979.

45. N. Nagpal, Analysis of plane strain extrusion through arbitrarily shaped dies using flow function, *J. Eng. Ind., Vol. 99, No. 3, pp. 754-759*, 1977.

46. O. Richmond and M.L. Devenpeck, A die profile for maximum efficiency in strip drawing, Proc. 4th US National Congress of applied mechanics, Vol. 2, pp.

1053-1057, 1962.

47. R. Hill, A remark on diagonal streaming in plane plastic strain, *J. Mech. Phys. Solids, Vol. 14, pp. 245-248*, 1966.

48. M.L. Devenpeck and O. Richmond, Strip drawing expriments with a sigmoidal die profile, *J. Eng. Ind., Vol. 87, No. 4, pp. 425-428*, 1965.

49. H.C. Sortias and S. Kobayashi, An optimum die profile for axisymmetric extrusion, *Int. J. M.T.D.R., Vol. 8, pp. 61-72*, 1968.

50. J.S. Gunasekera, S. Hoshino and R.H. Brown, Extusion of non-circular section through shaped dies, *Annals of the C.I.R.P., Vol. 29, pp. 141-145*, 1980.

51. T.Z. Blazynski, Theoretical method of designing tools for metal forming processes, *Metal forming, Vol. 34, No. 5, pp. 143-150*, 1967.

52. T.Z. Blazynski, Optimization of die design in the extrusion of rod using model materials, *J. Mech. Sci., Vol. 13, No. 2, pp. 113-131*, 1971.

53. P.V. Vaidyanathan, Ph.D. thesis, University of Leeds, 1972.

۵۴. عبدالعلی، فرزاد، طراحی قالب در شکل دادن فلزات، پنجمین کنفرانس سالانهٔ مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه تبریز، صفحات ۱۴۵۹ الی ۱۴۶۷، ۱۳۷۶.

55. E.P. Degarmo, J.T. Black and R.A. Kohser, Materials and processess in manufacturing, (6th ed.) Macmilian Pub., 1984.

56. S. Kalpakjian, Manufacturing processess for engineering materials, Addison-Wesley, 1983.

57. D.Y. Yang and T. Altan, Analytical and experimental investigation into lubricated three dimentional extrusion of general helical sections, *Annals of the C.I.R.P., Vol. 35, pp. 169-172*, 1986.

58. J.S. Gunasekara, H.L. Gegel, J.C. Malas, S.M. Doreivelu, J.T. Morgan and T. Altan, Computer aided process modelling of hot forging and extrusion of aluminum alloys, *Annals of the C.I.R.P., Vol. 31, pp. 131-135*, 1982.

59. L.E. Farmer and P.L.B. Oxley, A computer aided method for calculating the distribution of strain rate and strain from and experimental flow field, *J. Strain Analysis, Vol. 11, No. 1, pp. 26-32*, 1976.

(تاریخ دریافت مقاله: ۷۸/۷/۱۰)