بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید

بررسی تأثیر روش ساخت قالب بر تریبولوژی فرایند آهنگری

نگارنده: غلامرضاحسین‌پور

اساتید راهنما

دکتر مهدی گردویی

دکتر ولی علی‌میرزالو

تیر ۱۳۹۶

شماره:
تاریخ:

باسمه‌تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای **غلامرضا حسین پور** با شماره دانشجویی **۹۳۰۶۲۰۴** رشته **مکانیک** گرایش ساخت و تولید تحت عنوان **بررسی تأثیر روش ساخت قالب بر تریبولوژی فرآیند آهنگری** که در تاریخ **۹۶/۰۴/۲۷** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با امتیاز ...۱۷/۴۸... درجه ...خوب.....) ☑ **مردود** ☐

نوع تحقیق: نظری ☐ **عملی** ☑

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استادراهنمای اول	دکتر مهدی گردویی	استادیار	
۲- استادراهنمای دوم	دکتر ولی علی‌میرزالو	استادیار	
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی وحدتی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر سیدهادی قادری	استادیار	
۶-ـ استاد ممتحن دوم	دکتر سید وحید حسینی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محسن شاه‌مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم‌نامه

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم ...

موهایشان سپید شد تا ما روسفید شویم ...

سپاس‌گزاری

تشکر و سپاس از اساتید دانشمندم جناب آقایان دکتر مهدی گردویی و دکتر ولی علی‌میرزالو که از محضر پر فیض تدریس ایشان، بهره‌ها برده‌ام. با تقدیر و درود فراوان خدمت پدر و مادر بسیار عزیز، دلسوز و فداکارم که پیوسته جرعه نوش جام فضیلت و انسانیت آن‌ها بوده‌ام و همواره چراغ وجودشان روشنگر راه من در سختی‌ها و مشکلات بوده است. با سپاس بی‌دریغ خدمت مدیریت و پرسنل شرکت متالورژی پودر مادصنعت ارومیه، مهندس سهرابی و مهندس محمدی که مرا صمیمانه یاری داده‌اند، و با تشکر خالصانه خدمت همه اساتید و کارکنان دانشگاه‌های ارومیه و صنعتی شاهرود و کسانی که به نوعی مرا در به انجام رساندن این مهم یاری نموده‌اند.

خداوندا به ما توفیق تلاش در شکست، صبر در نومیدی، رفتن بی همراه، جهاد بی سلاح، فداکاری در سکوت، دین بی‌دنیا، مذهب بی‌عوام، عظمت بی‌نام، خدمت بی‌نان، ایمان بی‌ریا، خوبی بی‌نمود، گستاخی بی‌خامی، مناعت بی‌غرور، عشق بی‌هوس، تنهایی در انبوه جمعیت و دوست داشتن بی آنکه دوستت بدارند، را عنایت فرما.

چکیده

در فرآیند آهنگری، بافت سطح قالب که متأثر از فرایند تولید آن می باشد، نقش به‌سزایی در تریبولوژی فرایند ایفا می‌کند. لغزش قطعه بر روی سطح قالب به زبری سطح و جهت‌گیری آن وابسته است، لذا ضریب اصطکاک و نیروهای تماسی مستقیماً از بافت سطح تأثیر می‌پذیرد. در پژوهش حاضر تأثیر روش‌های مختلف ساخت قالب بر تریبولوژی فرایند آهنگری فولاد ck45 در دوحالت بدون روانکار و با روانکار، به کمک آزمون فشار حلقه بررسی شده‌است. قالب آهنگری با شش روش ماشین‌کاری شامل فرزکاری افقی و عمودی، تخلیه الکتریکی، سنگ‌زنی، سنگ‌زنی به همراه پرداخت‌کاری و تراش‌کاری تولید و سپس نمونه‌های حلقه‌ای شکل با نسبت ۶:۳:۲ به وسیله این قالب‌ها تحت آزمون فشار قرار گرفت. نمونه‌های حلقوی با ماشین تراش به قطر۱۲میلیمتر روتراشی و سپس با ماشین دریل سوراخکاری و به قطر داخلی۶ میلیمتر رسیدند. بعد از برش، دو سطح رینگ سنگ زده شد تا به ارتفاع ۴ میلیمتر برسد. در این تحقیق تأثیر دو پارامتر روش ماشین‌کاری و مکانیزم روانکاری بر روی ضریب اصطکاک و زبری سطح بررسی شد. برای بررسی تأثیر پارامترها و بهینه‌سازی آنها آزمایش‌های لازم به روش طرح عاملی کامل طراحی شد، با انجام آزمون‌ها مطابق طرح، مقادیر توابع پاسخ ضریب اصطکاک و زبری سطح استخراج شد. نتایج نشان داد بافت سطح، تأثیر به سزایی بر ضریب اصطکاک و زبری سطح محصول خواهد داشت. در چهارحالت ماشین‌کاری فرزکاری افقی و عمودی، تخلیه الکتریکی و تراش‌کاری با زبری سطح نزدیک به هم اینسرت‌ها به علت خواب متفاوت سطح، ضریب اصطکاک متفاوت حاصل شد. در استفاده از قالب‌هایی با سطح کاملا پرداخت استفاده از روانکار مورد بررسی تأثیر چندانی بر زبری سطح محصول آهنگری ندارد. همچنین

افزایش کرنش که از افزایش درصد کارسرد در آزمون حلقه ناشی می‌شود موجب افزایش زبری سطح در هردو حالت خشک و روانکاری خواهد شد.

واژگان کلیدی: تریبولوژی- قالب آهنگری- ماشین‌کاری-آزمون فشار حلقه

فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه ۱

۱-۱- روش‌های شکلدهی فلزات ۱

۱-۲- آهنگری ۳

۱-۳- اصطکاک در شکل‌دهی فلزات ۶

۱-۳-۱ مدل‌های اصطکاکی مورد استفاده در تحلیل شکل‌دهی فلزات ۷

۱-۳-۲ آزمون فشار حلقه ۱۱

۱-۴- تریبولوژی در فرآیند شکل‌دهی فلزات ۱۴

۱-۴-۱ بافت سطح ۱۵

۱-۴-۲ خواب ۱۶

۱-۴-۳ زبری سطح و معیارهای آن ۱۷

۱-۴-۴ تأثیر اصطکاک و بافت سطح در شکل‌دهی فلزات ۱۹

۱-۵- تریبولوژی در آهنگری ۲۰

۱-۵-۱ انواع بارهای وارد شده بر ابزارهای آهنگری ۲۲

۱-۵-۲ بار حرارتی ۲۲

۱-۵-۳ بارهای مکانیکی ۲۳

۱-۵-۴ بار شیمیایی ۲۴

۱-۵-۵ بار تریبولوژیکی ۲۴

۱-۶- روانکارها در شکل‌دهی ۲۵

۱-۶-۱ مکانیزم‌های روانکاری ۲۶

۱-۶-۲ روانکارهای مورد استفاده در آهنگری سرد ۲۹
۱-۶-۳ روانکارهای مورد استفاده در آهنگری گرم ۳۱
۱-۷- پیشینه تحقیق ۳۱
۱-۸- ضرورت تحقیق ۳۶

فصل ۲ مواد و روش تحقیق ۳۹

۲-۱- مواد و روش تحقیق تجربی ۴۰
۲-۱-۱ مواد اولیه ۴۰
۲-۱-۲ روانکار ۴۱
۲-۲- قالب آهنگری ۴۲
۲-۳ تجهیزات و دستگاه‌ها ۴۶
۲-۴- روش تحقیق تجربی ۵۵
۲-۴-۱ مبانی نظری طراحی آزمایش‌ها ۵۵
۲-۴-۲ طراحی آزمایش‌ها ۶۲
۲-۴-۳ رویه های انجام آزمایش ها ۶۴
۲-۵- معرفی روش عددی ۶۵
۲-۵-۱ روش المان محدود و معرفی نرم‌افزار شبیه‌سازی ۶۶
۲-۵-۲ شبیه‌سازی فرایند تست حلقه ۶۷
۲-۵-۳ مدل هندسی ۶۸
۲-۵-۴ تعیین خصوصیات ماده ۶۸
۲-۵-۵ تعیین تعداد گام و نوع حل مسئله ۶۹
۲-۵-۶ تعیین نوع تماس سطوح ۶۹

۲-۵-۷ شرایط مرزی و بارگذاری ۶۹
۲-۵-۸ مش‌بندی ۷۰

فصل ۳ نتایج و بحث ۷۱

۳-۱ اثر روش ساخت اینسرت بر بافت سطح ۷۲
۳-۲- نتایج آزمون حلقه ۷۴
۳-۲-۱ نمونه‌های تغییرشکل یافته ۷۴
۳-۲-۲ منحنی کالیبراسیون اصطکاک به کمک روش عددی ۷۹
۳-۲-۳ استقلال نتایج از اندازه‌ی المان ۸۰
۳-۲-۴ مقایسه نتایج تجربی و عددی ۸۱
۳-۳- تحلیل آماری نتایج ضریب اصطکاک ۸۳
۳-۴- تحلیل آماری نتایج زبری سطح ۸۸

فصل ۴ نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۹۳

۴-۱- نتیجه‌گیری ۹۴
۴-۲ پیشنهادها ۹۶
منابع ۹۷

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱ انواع فرآیندهای شکل‌دهی[۱] ۲

شکل ۱-۲شماتیک اجزای تأثیرگذار در یک فرآیند شکل‌دهی فلزات[۱] ۳

شکل ۱-۳ طرح‌واره آهنگری باز و بسته، الف: آهنگری باز، ب: آهنگری بسته[۱] ۵

شکل ۱-۴ جهت‌گیری دانه‌های تولیدشده در محصولات (الف) آهنگری ، (ب) ماشین‌کاری[۱] ۵

شکل ۱-۵ طرح‌واره پارامترهای موثر بر اصطکاک (الف) ماکروسکوپی، (ب) میکروسکوپی[۲] ۶

شکل ۱-۶ نمودار مدل اصطکاکی کلمب[۳] ۸

شکل ۱-۷ نمودار مدل اصطکاکی برشی[۳] ۹

شکل ۱-۸ نمودار مدل اصطکاکی ترکیبی[۳] ۱۰

شکل ۱-۹ شماتیک آزمون فشار حلقه، (الف) قطعه اولیه، (ب) اصطکاک کم، (ج) اصطکاک زیاد[۸] ۱۲

شکل ۱-۱۰ منحنی کالیبراسیون ضریب اصطکاک μ برای نسبت ۶:۳:۲ [۹] ۱۴

شکل ۱-۱۱ انواع جهت خواب سطح[۱۱] ۱۷

شکل ۱-۱۲ نمودار اندازه‌گیری Ra ۱۸

شکل ۱-۱۳ نمودار برای اندازه گیری Rz ۱۹

شکل ۱-۱۴ تغییرات اصطکاک و زبری سطح با بافت سطح با دو مکانیزم خشک و روانکاری[۱۰] ۲۰

شکل ۱-۱۵ عوامل موثر بر عمرقالب در شکل‌دهی حجمی[۱] ۲۱

شکل ۱-۱۶ تنشهای مکانیکی و حرارتی در سطح قالب[۱] ۲۴

شکل ۱-۱۷ منحنی استریبک، انواع سازوکارهای روانکاری[۵] ۲۷

شکل ۱-۱۸ تداخل فیلم جامد[۲] ۲۸

شکل ۱-۱۹ انتخاب روانکار بر مبنای شدت سختی تغییر شکل[۴] ۳۰

شکل ۱-۲۰ ضریب اصطکاک برشی m برای روانکارهای مختلف..... ۳۲

شکل ۱-۲۱ تنوع ضریب اصطکاک متوسط با زبری سطح Ra و بافت سطح برای آلیاژ AL-4Mg[۱۰]

شکل ۱-۲۲ شکل اولیه و نهایی قطعات در آزمایش فشار حلقه[۱۵]..... ۳۵

شکل ۱-۲۳منحنی کالیبراسیون بدست آمده از تجربی و FEM برای (الف) آلومینیوم، (ب) مس[۹]..... ۳۶

شکل ۲-۱ نمونه اولیه تست فشار؛ (الف) نقشه، (ب) قطعه آماده شده..... ۴۱

شکل ۲-۲ روغن مورد استفاده در روانکاری قالب..... ۴۲

شکل ۲-۳ قالب آزمون فشار حلقه، (الف)کفشک و اینسرت (ب) نقشه قالب (ابعاد برحسب میلی‌متر)..... ۴۳

شکل ۲-۴ اینسرت‌های تولیدشده با فرآیندهای (۱) فرزکاری افقی با تیغه مارپیچ HM، (۲) فرزکاری عمودی با تیغه فرز کف تراش VM Tmax، (۳) ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی(EDM) (۴) سنگ زنی GR (۵) سنگ زنی و پرداخت کاری (GF) (۶) پیشانی تراشی به کمک دستگاه تراش (TN)..... ۴۵

شکل ۲-۵ دستگاه تراش استفاده شده برای ماشین‌کاری حلقه‌ها و اینسرت‌ها..... ۴۷

شکل ۲-۶ دستگاه فرز استفاده شده در این تحقیق..... ۴۰

شکل ۲-۷ کوره عملیات حرارتی مورد استفاده برای سخت‌کاری نمونه‌های اینسرت قالب‌ها..... ۴۸

شکل ۲-۸ پرس هیدرولیکی رایکو تکنیک استفاده‌شده برای فشار حلقه ۴۹

شکل ۲-۹ دستگاه سنگ مغناطیس استفاده شده..... ۵۰

شکل ۲-۱۰ اسپارک ۶۸ آمپری پیشرانه..... ۵۱

شکل ۲-۱۱ زبری سنج برای سنجش زبری اینسرت‌ها و حلقه‌ها ۵۲

شکل ۲-۱۲ماشین اندازه‌گیری اتوماتیک تصویری EASSON..... ۵۳

شکل ۲-۱۳ دستگاه کوانتومتری برای آنالیز ترکیب شیمیایی قطعات ۵۳

شکل ۲-۱۴ تصویر قطعه آنالیز کوانتومتری شده..... ۵۴

شکل ۲-۱۵ دستگاه سختی‌سنج ۵۵

شکل ۲-۱۶ آزمون فشار حلقه در دو میزان کارسرد ۲۵٪ =r و ۵۰٪= r ۶۵

شکل ۲-۱۷ شماتیک آزمون حلقه ۶۸

شکل ۲-۱۸ نمودار تنش-کرنش حقیقی ck۴۵[۲۱] ۶۹

شکل ۳-۱ بافت سطح اینسرت قالب بدست آمده از روشهای الف)فرزکاری افقی، ب)فرزکاری عمودی، ج)ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی، د)سنگ‌زنی ه)سنگ‌زنی و پرداخت، و)پیشانی‌تراشی با دستگاه تراش. (x100) ۷۳

شکل ۳-۲ حلقه‌های شکل داده‌شده در حالت بدون روانکار با اینسرت‌های مختلف ۷۵

شکل ۳-۳ حلقه‌های شکل داده‌شده با استفاده از روانکار پارافین با اینسرت‌های مختلف ۷۶

شکل ۳-۴ بافت سطح نمونه‌های شکل داده‌شده با اینسرت‌های تولید شده به روش الف)فرزکاری افقی، ب)فرزکاری عمودی، ج)ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی، د)سنگ‌زنی ه)سنگ‌زنی و پرداخت، و)پیشانی‌تراشی با دستگاه تراش.(x100) ۷۸

شکل ۳-۵ منحنی کالیبراسیون ضریب اصطکاک به دست آمده از آزمون فشار حلقه با نسبت ۶:۳:۲ ..... ۷۹

شکل ۳-۶ بررسی اثر اندازه المان ۷۰

شکل ۳-۷ تغییرات کرنش بیشینه به ازای تعداد المان ۷۱

شکل ۳-۸ تطبیق نتایج تجربی فشار حلقه درحالت خشک با منحنی کالیبراسیون اصطکاک به دست آمده از شبیه‌سازی عددی ۸۲

شکل ۳-۹ تطبیق نتایج تجربی فشار حلقه درحالت روانکاری‌شده با منحنی کالیبراسیون اصطکاک به دست آمده از شبیه‌سازی عددی ۸۳

شکل ۳-۹ منحنی توزیع نرمال ضریب اصطکاک ۸۵

شکل ۳-۱۰ اثرات اصلی حالت‌های مختلف ماشین‌کاری و روانکاری بر ضریب اصطکاک ۸۷

شکل ۳-۱۲ اثر متقابل پارامترها بر ضریب اصطکاک ۸۸

شکل ۳-۱۳ نمودار توزیع نرمال داده‌های زبری سطح ۹۰

شکل ۳-۱۴ اثرات اصلی حالت‌های مختلف ماشین‌کاری و روانکاری بر زبری سطح ۹۱
شکل ۳-۱۵ اثر متقابل پارامترها برروی زبری سطح ۹۲

فهرست نشانه‌ها

میانگین بلندترین ارتفاع زبری	R_z
سختی راکول C	HRC
درصد کارسرد	r
ضریب پواسون	ν
طراحی آزمایش‌ها	DOE
آماره	R^2
آماره تعدیل شده	$R_{Adj}{}^2$
سطح اطمینان	$P\text{-}Value$
ضریب اصطکاک	μ
ضریب اصطکاک برشی	m
استحکام برشی	k
تنش برشی اصطکاکی	τ_f
فشار	p
قطرداخلی	D
ارتفاع	H
میانگین زبری سطح	R_a

فصل ۱ مقدمه روش‌های شکل‌دهی فلزات

از زمان کشف شکل‌دهی فلزات، صدها فرآیند برای فلزکاری توسعه یافته‌اند. با این‌حال، این فرآیندها به چند گروه براساس نوع نیروهای اعمال شده به قطعه‌کار تقسیم‌بندی می‌شود:

۱-فرآیندهای فشرده‌سازی نوع مستقیم

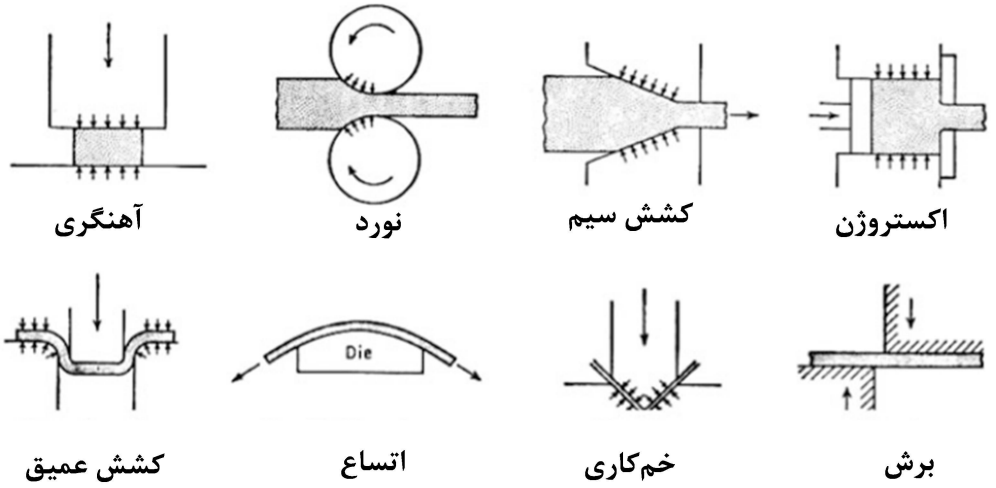
۲-فرآیندهای فشرده‌سازی نوع غیرمستقیم

۳-فرآیندهای تنشی

۴-فرآیندهای خم

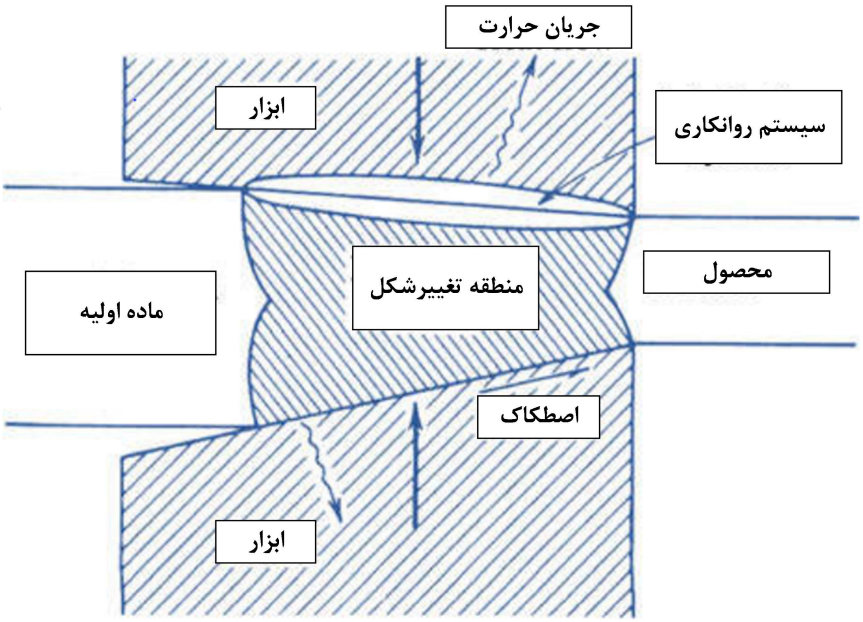
۵-فرآیندهای برش

مهمترین فرآیندهای شکل‌دهی در شکل ۱-۱ نمایش داده‌شده‌است.



شکل ۱-۱ انواع فرآیندهای شکل‌دهی[۱]

در شکل ۱-۲ طرح واره یک سیستم شکل‌دهی فلزات نمایش داده‌شده‌است.



شکل ۱-۲طرح‌واره اجزای تأثیرگذار در یک فرآیند شکل‌دهی فلزات[۱]

منطقه تغییر شکل را می‌توان با توزیع تنش، کرنش، سرعت ذرات، و فشار کلی مورد نیاز برای انجام عملیات، تجزیه و تحلیل کرد. قبل از هرچیز، نیروهای اعمال شده باید تا تسلیم مواد قطعه‌کار، افزایش یابند. اما تنش نباید به‌صورت موضعی هیچ‌گونه شکستگی ایجاد کند. در طول این فرآیند، پدیده‌های متالورژی، مانند کرنش سختی، تبلور مجدد، و شکست، مهم هستند. در طول فرایند، قطعه‌کار با ابزار صلب یا قالب‌ها تماس دارد. اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار و انتقال حرارت از قطعه‌کار به ابزار، به این دلیل که سایش ابزار و تغییر در سطح پایانی قطعه‌کار در طول فرآیند رخ می‌دهد مهم است[۱].

۱-۱- آهنگری[۱]

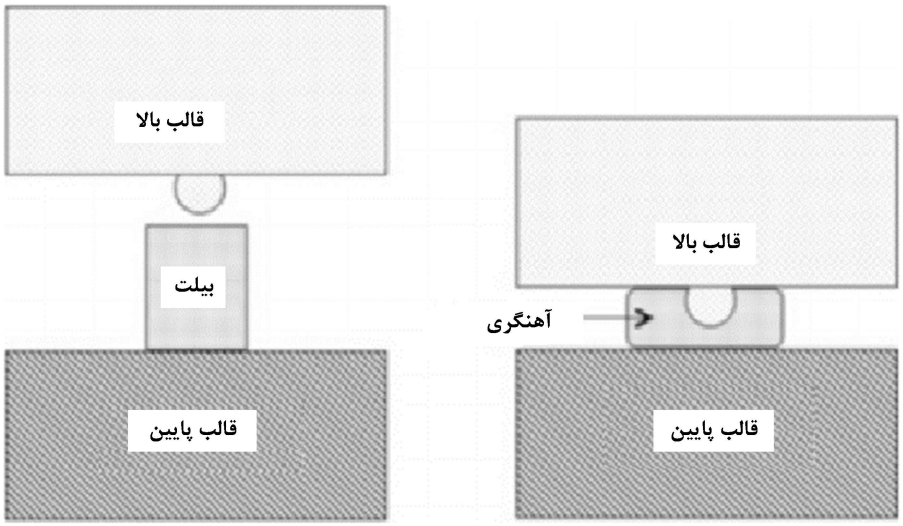
آهنگری یکی از قدیمی‌ترین فرآیندهای فلزکاری است که قدمت آن به قرنها پیش به دوران باستان، هنگامی که ابزار فلزی توسط آهنگران از فلزات گرم روی سندان چکش‌کاری و به اشکال مختلف ساخته‌می‌شد، برمی‌گردد. آهنگری روند چکش‌کاری و یا فشاردادن مواد بین دو قالب برای رسیدن به

2 Forging

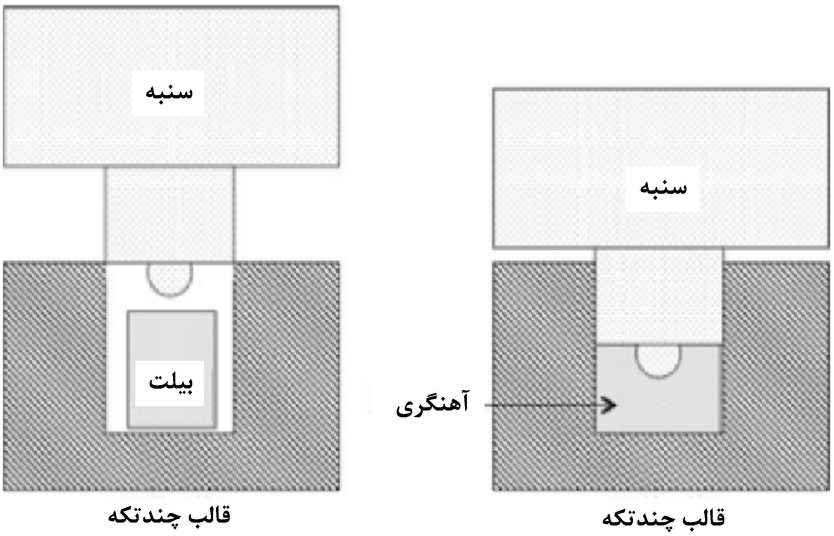
شکل و ساختار مورد نظر ازطریق تغییرشکل پلاستیک است. از زمان انقلاب صنعتی توسعه ماشین‌آلات جایگزین آهنگری سنتی با انواع ماشین‌آلات فیزیکی شد که قادر به شکل‌دهی هرچیزی از یک پیچ تا روتور یک توربین هواپیما بود. عملیات آهنگری به‌صورت گرم انجام می‌شود اگرچه برخی فلزات و آلیاژهای فلزی به‌صورت سرد آهنگری می‌شوند. بسته به پیچیدگی قطعه، آهنگری با قالب باز[1] یا بسته[2] انجام می‌گیرد. آهنگری با قالب باز در شکل ۱-۳ الف نشان داده‌شده‌است. قالب آهنگری باز نام خود را از این واقعیت گرفته‌است که، سطوحی که در تماس قطعه‌کار هستند قطعه‌کار را به‌صورت کامل محصور نکرده‌اند و اجازه می‌دهند فلز جریان یابد. آهنگری بسته فرآیندی است که قطعه بین چکش و قالب که فلز جریان می‌یابد فشرده‌می‌شود تا حفره قالب را پر بکند شکل ۱-۳ ب.

2 Open die

3 Close die



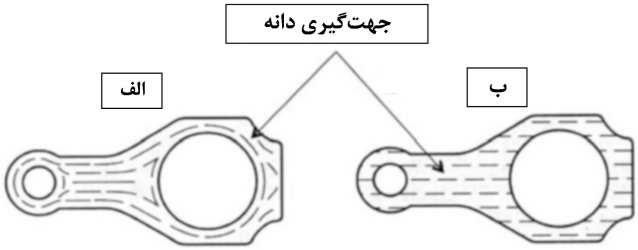
(الف)



(ب)

شکل ۱-۳ طرح‌واره آهنگری باز و بسته، الف: آهنگری باز، ب: آهنگری بسته[۱]

شکل ۱-۴ جهت‌گیری دانه‌های تولیدشده در محصولات آهنگری با ماشین‌کاری را مقایسه می کند.

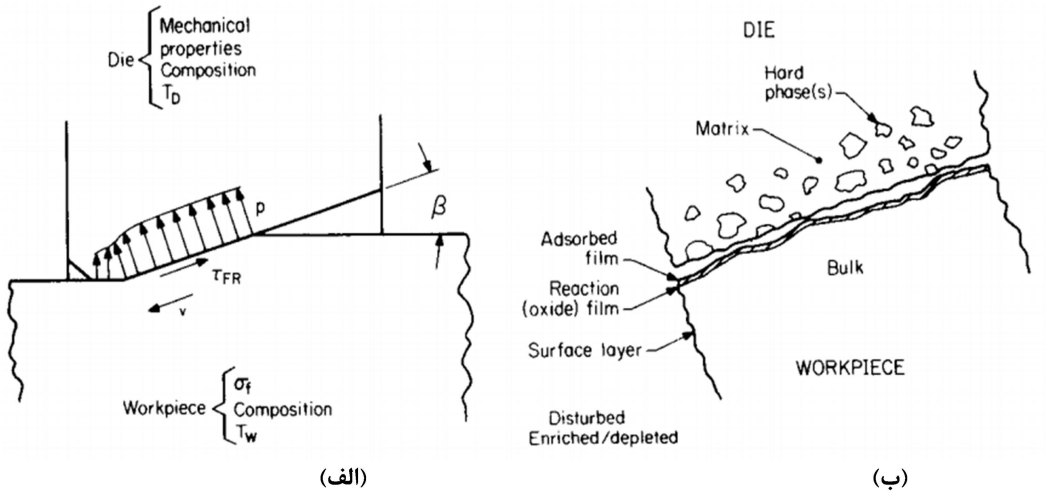


شکل ۱-۴ جهت‌گیری دانه‌های تولیدشده در محصولات (الف) آهنگری ، (ب) ماشین‌کاری[۱]

۱-۲- اصطکاک در شکل‌دهی فلزات

سطوح جامد تماسی در مقیاس میکروسکوپی صاف نیستند بلکه دارای پستی و بلندی‌هایی هستند که اغلب از فرآیند تولید آنها باقی مانده‌است. هنگام لغزش، این ناهمواری‌های سطحی به‌هم گیرمی‌کنند و باعث ایجاد پدیده اصطکاک می‌شوند، به عبارت دیگر اصطکاک مقاومت درمقابل حرکت دو جسم روی‌هم است.

شکل ۱-۵ پارامترهای میکروسکوپی و ماکروسکوپی موثر بر پدیده اصطکاک را بیان‌می‌کند.



شکل ۱-۵ طرح‌واره پارامترهای موثر بر اصطکاک (الف) ماکروسکوپی، (ب) میکروسکوپی[۲]

پارامترهای موثر بر اصطکاک قالب و قطعه‌کار

۱-نگاه ماکروسکوپی

با توجه به شکل ۱-۵:

-دمای فرآیند: در کارسرد، دمای قالب(T_D)و دمای قطعه‌کار(T_W) هم‌دمای محیط هستند، اگرچه تغییرشکل و اصطکاک باعث افزایش دمای چندصد درجه‌ی سانتیگرادی می‌شوند.

در کار گرم، T_W در دمای زیر نقطه ذوب[1] (T_M) آلیاژ است. در فرآیند ایزوترمال $T_D = T_W > ۰/۵T_M$ است. مثلاً آلیاژ تیتانیوم-نیکل $T_D << T_W$ غالباً گرم‌کار است . مثلاً در آهنگری گرم فولاد T_W=۱۱۰۰°C و T_D=۲۵۰°C.

-فشارفرآیند: فشار(P) روی سطح قالب ممکن است کمتر از تنش سیلان(δ_f)در شکل‌دهی ورق باشد اما غالباً به δ_f فرآیند شکل‌دهی حجمی می‌رسد.

-سرعت بین قطعه و قالب: این سرعت می تواند عمدی و کنترل شده باشد مانند کشش‌سیم، یا می‌تواند ناشی از طبیعت تغییرشکل (متغیر و غیرقابل کنترل) باشد مانند آهنگری یا فشرده‌سازی[2] و یا ترکیب هردوتا یعنی متغیر و قابل کنترل باشد مانند نورد. رابطه سرعت و اصطکاک متضاد است[۲].

۲- نگاه میکرو

در نگاه میکرو قله‌ها و دره‌های قطعه و قالب نشان داده می‌شوند. هردوی اندازه و جهت زبری نقش مهمی در تعیین اصطکاک و همچنین در حفظ فیلم روانکاری برای کاهش اصطکاک دارند. فاکتورهای متالوژیکی، یعنی نوع وتوزیع فازهای ترکیب قطعه و قالب هم مهم هستند.[۲]

۱-۲-۱ مدل‌های اصطکاکی مورد استفاده در تحلیل شکل‌دهی فلزات

مدل‌های اصطکاکی معمولاً برای توصیف شرایط اصطکاکی در فرایندهای شکل‌دهی فلزات به کار برده می‌شوند. تاکنون مدل‌های مختلفی برای شرایط اصطکاکی ارائه شده‌است، در این قسمت به سه نوع مدل معروف که در شکل‌دهی فلزات کاربرد دارد اشاره‌می‌شود.

[1] Melt point

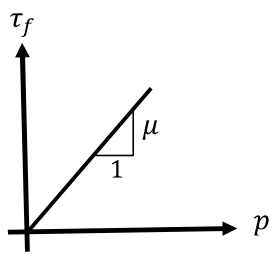
[2] Upsetting

- **مدل اصطکاک کولمب**

مدل اصطکاکی کلمب بر پایه قانون آمونتون یکی از مدل‌های اصطکاکی است که معمولا در برنامه‌های کامپیوتری المان محدود استفاده می‌شود و به‌صورت رابطه ۱-۱ بیان می‌شود و نمودار آن در شکل ۱-۶ نشان داده‌شده‌است.

که τ_f تنش برشی اصطکاکی، μ ضریب اصطکاک در سطح مشترک قطعه و قالب و p فشار می‌باشد. مدل خطی آمونتون-کلمب در فرایندهایی که فشار تماس بالاست معتبر نیست زیرا تنش برشی نمی‌تواند از استحکام برشی k، بیشتر شود. بنابراین ضریب اصطکاک عملاً در شرایطی که μp از τ_f بیشتر است، بی‌معنی است. این قانون برای حالت الاستیک و نیز برای فرایندهای شکل‌دهی با فشار کم معتبر است.

$$\tau_f = \mu p \qquad (۱-۱)$$



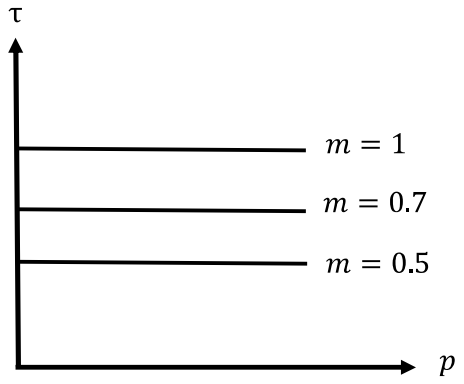
شکل ۱-۶ نمودار مدل اصطکاکی کلمب[۳]

- **مدل اصطکاک برشی**

در فرایندهای شکل‌دهی فلزات میزان فشار عمودی ممکن است به چند برابر تنش تسلیم قطعه برسد. برای رفع این محدودیت مدل آمونتون-کلمب، اوروان در سال ۱۹۴۳ مدل اصطکاک برشی را معرفی کرد در این مدل، همانند مدل آمونتون، در فشارهای پایین، تنش برشی با فشار عمودی متناسب است و در فشارهای بالا با استحکام برشیk، برابر می‌شود در معادله ۱-۲ در شرایط بدون اصطکاک m برابر

صفر و در شرایط چسبندگی برابر یک خواهدبود. و نمودار آن در شکل ۱-۷ نشان داده شده است. این مدل برای حالت‌هایی که فشار زیادی در سطح مشترک قطعه و قالب وجود دارد استفاده می‌شود.

$$\tau_f = f\bar{\sigma} = m\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} = mk \qquad (0 \le m \le 1) \tag{۱-۲}$$



شکل ۱-۷ نمودار مدل اصطکاکی برشی[۳]

در این رابطه f فاکتور اصطکاکی، m فاکتور برشی و $\bar{\sigma}$ تنش سیلان است.

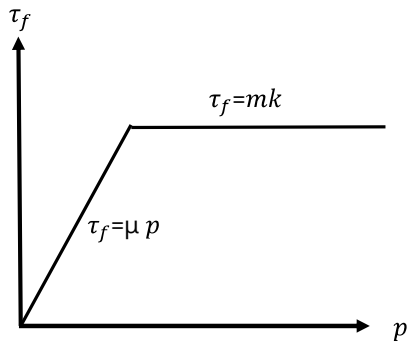
- **مدل اصطکاک ترکیبی**

برای بررسی اثر نسبت واقعی سطح تماس، وانهیم و بای[1] ، مدل اصلاح شده اصطکاک برشی را پیشنهاد کردند که به مدل ترکیبی یا هیبریدی اصطکاک (معادله ۱-۳) که در شکل ۱-۸ نشان داده شده‌است معروف می‌باشد. در این مدل تنش برشی اصطکاکی تابعی از نسبت سطح واقعی تماس α است. وقتی دو سطح صاف نسبت به هم حرکت داده می‌شوند، زبری‌های روی سطوح تماس باعث ایجاد تماس‌های نقطه‌ای می‌شود. سطح کل این تماس‌های نقطه‌ای سطح حقیقی تماس نامیده می‌شود که در اکثر موارد، جزئی از سطح ظاهری تماس است. نسبت سطح حقیقی تماس به سطح ظاهری تماس، نسبت سطح حقیقی تماس α، نامیده می‌شود.

1 Wanheim and Bay

$$\tau_f = \dot{F}\alpha k = mk \qquad (۳-۱)$$

$$k = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}$$



شکل ۱-۸ نمودار مدل اصطکاکی ترکیبی[۳]

در این رابطه فاکتور اصلاح شده اصطکاک، m فاکتور اصلاح شده برش بعنوان تابعی از سطح حقیقی تماس، $\bar{\sigma}$ تنش سیلان و α نسبت واقعی تماس می‌باشد.

مدل وانهیم اثر رفتار روانکار را نادیده گرفته است. برای رفع این کاستی مدلی پیچیده برای روانکاری مرزی و لایه ترکیبی توسط باودن و تبور[1] برای ناحیه تماس ابزار و قطعه‌کار ارائه شد. این مدل در معادله ۱-۴ ارائه شده‌است.

$$\tau_f = \alpha\,\tau_a + (1 - \alpha)\tau_b \qquad (۴-۱)$$

در این رابطه τ_a تنش برشی میانگین در قله ناهمواری‌های سطح و τ_b تنش برشی میانگین در ناحیه روانکاری است. این مدل بطور واضحی متغیرهای مهم را فرمول‌بندی می‌کند. نسبت سطح واقعی تماس وابسته به τ_a و رفتار روانکار وابسته به τ_b است که این فاکتورها به عواملی مانند: ویسکوزیته، فشار، سرعت لغزش و ضخامت لایه روانکار وابسته هستند. اگر فرایند بدون روانکار انجام شود، در

[1] Baovdom and tabur

اینصورت τ_b صفر خواهد بود در نتیجه مقدار τ_f از معادله ۱-۴ محاسبه می‌شود. برای بررسی اثر روانکار بر رفتار اصطکاکی فرض می‌شود که یک لایه روانکار در ناحیه ابزار-قطعه وجود دارد. سپس برای ضخامت‌های مختلف لایه روانکار تغییرات اصطکاک با استفاده از معادله رینولدز[1] محاسبه می‌شود. اگر چه این مدل ملاحظات زیادی از بررسی رفتار روانکار درنظر گرفته اما برای شبیه سازی فرایندهای شکل‌دهی فلزات دشواری‌های زیادی دارد[۳].

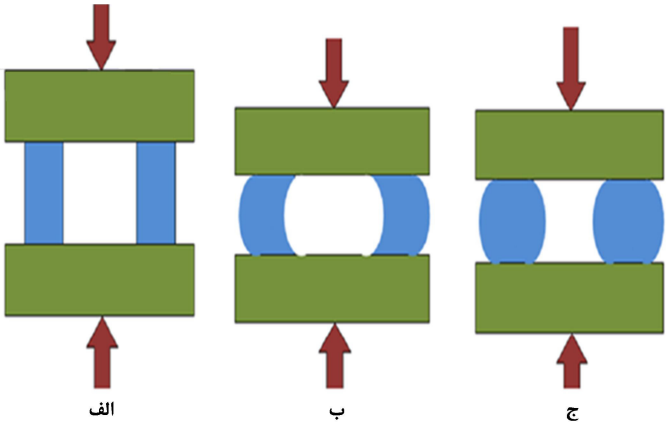
۱-۲-۲ آزمون فشار حلقه[2]

آزمون فشار حلقه در مقایسه با آزمون‌های دیگر اصطکاکی، نیاز به ابزار ارزان‌تری دارد و ساده‌تر انجام می‌شود. به همین دلیل در این پژوهش از آزمون فشار حلقه جهت ارزیابی زبری سطوح ماشینکاری شده استفاده شده است[۴]. در یک آزمایش خوب باید دمای نمونه و قالب، مدت زمان تماس و سرعت نسبی بین نمونه و ابزار و همچنین انبساط سطحی نمونه تقریبا مشابه شرایط واقعی باشند[۵]. آزمون فشار حلقه بهترین شبیه‌سازی از کاربردهای آهنگری با میزان متوسطی از تغییرشکل است[۶]. آزمون فشار حلقه، برای مطالعه‌ی تحلیلی، تجربی و عددی اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی حجمی مورد استفاده قرار می‌گیرد[۷]. در آزمون فشار حلقه، یک نمونه‌ی حلقه‌ای شکل تخت، مطابق شکل ۱-۹ الف تا مقدار مشخصی از کاهش ارتفاع فشرده می‌شود. تغییر در قطرهای داخلی و خارجی حلقه‌ی آهنگری شده به میزان بسیار زیادی به اصطکاک در سطح تماس قالب-حلقه بستگی دارد. اگر اصطکاک مساوی صفر باشد، حلقه مانند یک دیسک توپر تغییرشکل می‌یابد، که در آن هر جز با نرخی متناسب با فاصله‌اش از مرکز بطور شعاعی سیلان می‌کند. اصطکاک؛ این سیلان شعاعی را محدود می‌کند. اگر اصطکاک از یک مقدار بحرانی تجاوز کند، مقاومت اصطکاکی در جهت بیرونی از مقاومت اصطکاکی در جهت سیلان‌های درونی مواد حلقه به سمت مرکز بزرگتر می‌شود. با افزایش

[1] Reynolds

[2] Ring compression test

تغییر شکل، اگر اصطکاک کم باشد، قطر داخلی افزایش یافته، شکل ۱-۹ ب، و اگر زیاد باشد، قطر داخلی کاهش می‌یابد شکل ۱-۹ ج. بنابراین، تغییر در قطر داخلی، یک روش ارزیابی اصطکاک سطح تماس را ارائه می‌کند[۸].



شکل ۱-۹ شماتیک آزمون فشار حلقه، (الف) قطعه اولیه، (ب) اصطکاک کم، (ج) اصطکاک زیاد[۸]

در این روش دو پارامتر درصد کاهش قطر داخلی (٪ΔD) و درصد کاهش ارتفاع (٪ΔH) توسط روابط ۱-۵ محاسبه می‌شود.

$$\%\Delta D = 100 \times \frac{D_0 - D}{D_0} \quad \text{درصد کاهش قطر داخلی}$$

(۱-۵)

$$\%\Delta H = 100 \times \frac{H_0 - H}{H_0} \quad \text{درصد کاهش ارتفاع}$$

که D_0 قطر داخلی اولیه، D قطر داخلی نهایی بعد از آزمون، H_0 ارتفاع اولیه و H ارتفاع نهایی نمونه می‌باشد[۵]. در آزمون فشار حلقه، استخراج ضریب اصطکاک از طریق مقایسه نتایج آزمون با منحنی‌های کالیبراسیون بدست می‌آید.

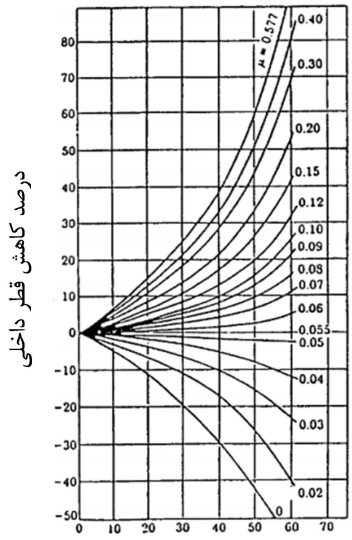
- **استخراج منحنی‌های کالیبراسیون**

منحنی‌های کالیبراسیون روشی مناسب برای بدست آوردن ضریب اصطکاک نمونه‌های تحت آزمون فشار حلقه می‌باشد. جهت استخراج این منحنی‌ها می‌توان از روش‌های تحلیلی و عددی استفاده نمود. از جمله روش‌های مناسب بدین منظور تحلیل اجزای محدود می‌باشد. روش اجزای محدود یک روش عددی بوده که توانایی حل مسائل متنوع مهندسی در حالت‌های پایدار، گذرا، خطی و یا غیرخطی مانند تحلیل تنش، نیرو، انتقال حرارت، ریزساختار و غیره را دارد روش اجزای محدود در تحلیل فرایندهای شکل‌دهی به خاطر قابلیت‌هایی که دارد بیشتر استفاده می‌شود.

جهت استخراج این منحنی‌ها باید ابتدا آزمون فشار حلقه برای هر ضریب اصطکاک جداگانه شبیه سازی شود.

پس از شبیه‌سازی برای هر ضریب اصطکاک، مقادیر کاهش قطر داخلی و کاهش ارتفاع‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شود. سپس طبق روابط ۱-۵ درصد کاهش قطر داخلی و درصد کاهش ارتفاع بدست می‌آید.

این مراحل برای هر ضریب اصطکاک بطور جداگانه تکرار می‌شود و منحنی‌هایی که ارتباط بین درصد کاهش قطر داخلی نمونه‌ها با کاهش ارتفاع‌شان را برای مقادیر مختلف اصطکاک نشان می‌دهند، رسم می‌شود. منحنی‌های کالیبراسیون در کتب مرجع و مقالات برای نسبت‌های مختلف $D_o:D_i:H$ ارائه می‌شود. به عنوان نمونه در شکل ۱-۱۰ برای نسبت ۶:۳:۲ منحنی کالیبراسیون ارائه شده‌است.



شکل ۱-۱۰ منحنی کالیبراسیون ضریب اصطکاک μ برای نسبت ۶:۳:۲ [۹]

تحقیقات نشان می‌دهد تحت شرایط آهنگری سرد، این منحنی‌ها را می‌توان به عنوان همگانی در نظر گرفت، زیرا خواص ماده (یعنی کرنش سختی) تأثیر کمی بر منحنی دارد [۵] [۷].

۱-۳- تریبولوژی در فرآیند شکل‌دهی فلزات

توانایی تولید انواع شکل‌ها از یک بلوک فلز در نرخ تولید بالا، یکی از پیشرفت‌های فن‌آوری قرن جاری است. تبدیل عملیات دستی به مکانیزاسیون که یک عامل مهم در بهبود استاندارد زندگی است در طول این دوره اتفاق افتاده‌است. استفاده از فرآیندهای شکل‌دهی فلزات به طور گسترده‌ای بیش از بسیاری از صنایع مختلف گسترش یافته‌است. در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، نیروهای اصطکاک بین فلز و ابزار و دستگاه‌ها نقش مهمی، به دلیل تأثیر آنها بر عملکرد فرآیند و خواص محصول نهایی، بازی می‌کند. در بسیاری از موارد، رفتار اصطکاکی با استفاده از یک ضریب ثابت اصطکاک در شبیه‌سازی فرآیندهای شکل‌دهی فلزات درنظر گرفته‌می‌شود. انواع مختلفی از ابزار برای اندازه گیری ضریب

اصطکاک مواد مختلف ساخته شده است. در این فصل به مفهوم اساسی فرآیندهای شکل‌دهی و تأثیر اصطکاک در شکل‌دهی فلزات پرداخته شده‌است. مطالعه موردی تأثیر اصطکاک براساس بافت سطح در طول شکل‌دهی فلز نیز ارائه شده‌است[۱۰]. مطالعه عمومی از اصطکاک لغزشی در تماس خشک، از کار اولیه کولن در قرن هفدهم و هجدهم آغاز شد. اصطکاک توسط برش پستی و بلندی های بین دو سطح بهم پیوسته و تغییرشکل پلاستیک سطوح نرم توسط پستی بلندی های سخت ایجاد می‌شود[۲].

اصطکاک نقش مهمی در عملیات شکل‌دهی فلزات دارد که در طول لغزش قطعه‌کار روی ابزار ایجاد می‌شود. و دارای اثر قابل توجهی بر تغییرشکل مواد، تشکیل بار، پرداخت سطح اجزا و سایش قالب دارد این نیز یک پارامتر ورودی ضروری برای استفاده روز افزون از المان محدود (FE) برای شبیه سازی شکل‌دهی فلزات است. شرایط اصطکاکی بین ابزار و قطعه‌کار تا حد زیادی بر توزیع تنش و در نتیجه جریان مواد تأثیر می‌گذارد. اگر چه از کار و بحث بسیار زیادی بر روی این موضوع می‌گذرد ، اصطکاک در شکل‌دهی فلزات هنوز به طور کامل درک نشده‌است[۱۰].

۱-۳-۱ بافت سطح[1]

بافت سطح یا توپوگرافی[2] سطح ماهیت یک سطح را توسط سه پارامتر خواب، زبری سطح[3]، و تموجی[4] تعریف می کند. این تعریف شامل انحرافات کوچک محلی از یک سطح ایده‌آل کاملاً صاف است. بافت سطح یکی از عوامل مهم در کنترل اصطکاک و انتقال لایه‌ی تغییرشکل در طول لغزش است. به منظور بررسی تأثیر بافت سطح در اصطکاک و سایش قالب در شرایط لغزش تلاش‌های گسترده‌ای

---

[1] Surface texture

[2] Topography

[3] Surface roughness

[4] Waveness

شده‌است. بافت سطح می‌توان همسانگرد[1] یا ناهمسانگرد[2] باشد. گاهی اوقات، آثار اصطکاک لغزنده و یا چسبنده در طول شکل‌دهی، وابسته به بافت سطح است. هر فرآیند تولید (مانند بسیاری از انواع روش‌های ماشین‌کاری) یک بافت سطح تولید می‌کنند که این فرآیندها معمولاً برای اطمینان از بافت سطح قابل استفاده بهینه‌سازی می‌شوند؛ اگر لازم باشد، یک فرایند اضافی برای ایجاد تغییر در بافت اولیه‌ی افزوده می‌شود. این فرآیند دومی ممکن است سنگ زنی، پرداخت(پولیش‌کاری)، لیپینگ[3]، هونینگ، ماشینکاری با تخلیه الکتریکی (EDM)، فرز، لیتوگرافی و یا فرآیندهای دیگر باشد. همچنین روانکار عامل مهمی در تعیین مدت زمان شکل‌دهی و زبری سطح قطعه‌کار است.[۲]

۱-۳-۲ خواب[4]

خواب، جهت پستی و بلندی‌های سطح است که معمولاً با توجه به روش تولید تعیین می‌شود. شکل ۱-۱۱ انواع جهت خواب را نشان می‌دهد. برخی خواب یکسویه دارند مانند محصولاتی که با سنگ زنی و صفحه تراشی تولید می شوند؛ برخی ممکن است جهت خواب دوسویه داشته باشند مانند محصولات تولید شده به روش تراش‌کاری یا فرزکاری سطح. برخی هم جهت نامنظم یا تصادفی دارند مانند لپینگ، پولیش‌کاری و EDM معمولاً رندوم هستند[۱۱].

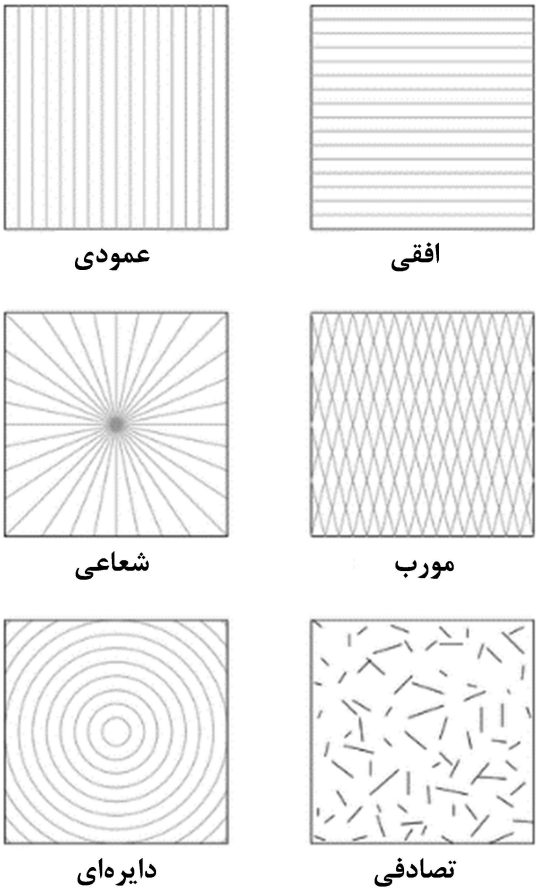
---

[1] Isotropic

[2] Anisotropic

[3] Lapping

[4] Lay



شکل ۱-۱۱ انواع جهت خواب سطح[۱۱]

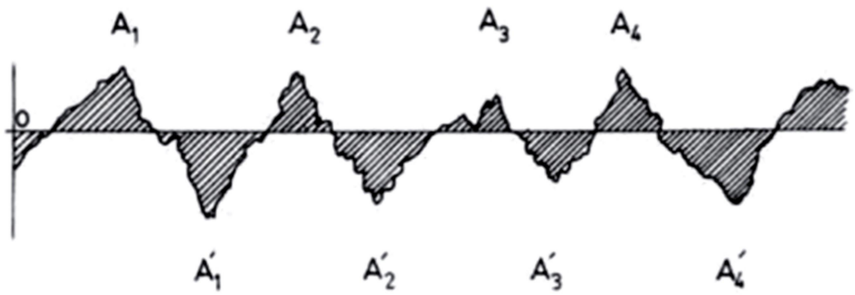
۱-۳-۳ زبری سطح و معیارهای آن

زبری میزانی برای تعیین بافت سطح است که با توپوگرافی ناهموار آن در مقایسه با یک سطح صاف ایده‌آل شناسایی می‌شود. یک سطح زبر حاوی ناهمواری، برآمدگی و فرورفتگی‌هایی است که به فاصله بسیار کم از یکدیگر قرار گرفته‌اند. این کمیت نقش مهمی در تعیین اثر متقابل قطعه و قالب بر هم داشته و با دانستن آن بسیاری از رفتارهای اجزاء مکانیکی قابل پیش‌بینی خواهد بود. برای مثال اشیاء زبر بیشتر در معرض خوردگی و ترک‌دار شدن هستند. برای اندازه‌گیری زبری از روش‌های تماسی و غیرتماسی مختلفی استفاده می‌کنند. معیارهای زبری سطح گوناگون هستند که به دو مورد از آن‌ها اشاره می‌شود:

- **میانگین زبری سطح (R_a)**

این پارامتر با R_a نشان داده‌می‌شود که عبارت است از میانگین ارتفاعات زبری سطح، در این روش مساحت قله‌های بالای خط محور و پایین محور را بدون در نظر گرفتن علامت جبری آن‌ها، با هم جمع می‌شود و در نهایت بر طول قسمت اندازگیری شده تقسیم می‌شود. این‌گونه اندازه‌گیری دارای پایین‌ترین حساسیت می‌باشد. با توجه به شکل ۱-۱۲ نمودار اندازه‌گیری R_a مقدار این پارامتر طبق رابطه ۱-۶ خواهد بود با:

$$R_a = \frac{A_1+A_2+\cdots.+A_n+A'_1+A'_2+\cdots.+A'_n}{L} \qquad (۱-۶)$$

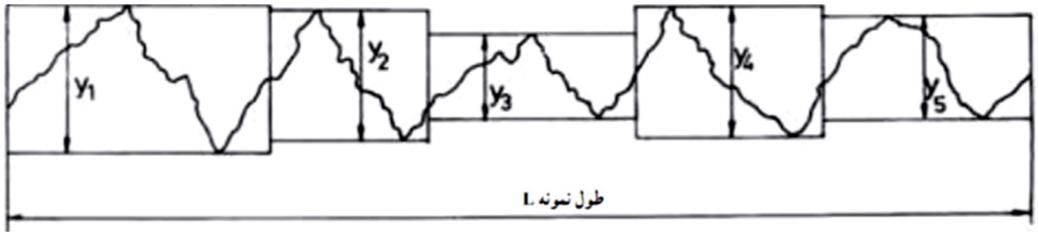


شکل ۱-۱۲ نمودار اندازه‌گیری R_a[۱۲]

- **میانگین بلندترین ارتفاع‌های زبری (R_z)**

این پارامتر با نماد R_z نشان داده می‌شود. در این روش فاصله بین ۵ قله و ۵ دره متوالی را دو به دو اندازه گرفته و با هم جمع می‌کنند سپس مجموع به دست آمده را بر ۵ تقسیم می‌کنند. رابطه ۱-۷ با توجه به شکل شکل ۱-۱۳ برای یافتن Rz به کار می رود.

$$R_z = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5}{5} \qquad (۱-۷)$$

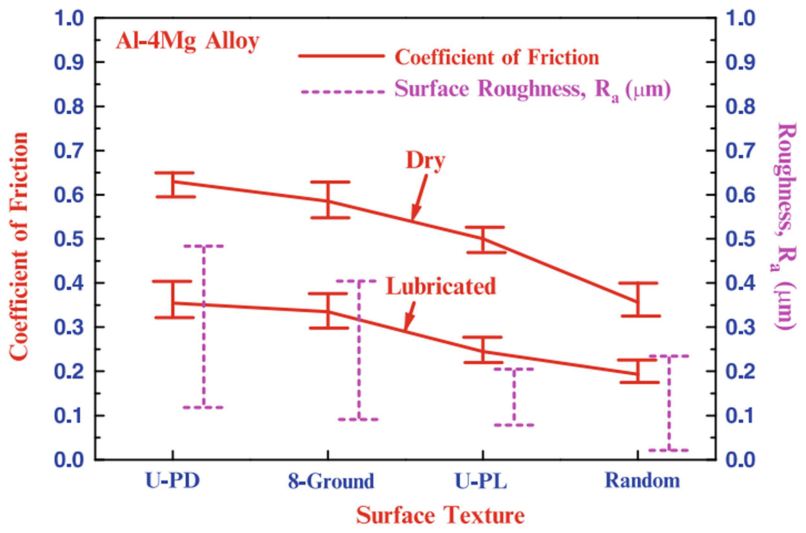


شکل ۱-۱۳ نمودار برای اندازه گیری Rz[۱۱]

۱-۳-۴ تأثیر اصطکاک و بافت سطح در شکل‌دهی فلزات

از نظر تریبولوژی[1] پر بودن[2] سطح و جهت زبری سطح مهم است[۲]. برای مطالعه حالت‌های مختلف ضریب اصطکاک در مکان‌های مختلف بین قالب و قطعه‌کار در طول شکل‌دهی فلزات از روش المان محدود استفاده می‌شود. در شبیه‌سازی بجای ایجاد انواع بافت سطوح قالب، ضریب اصطکاک تولیدشده برای انواع مختلف بافت سطوح به طور مستقیم در تماس قالب و قطعه‌کار برای مطالعه تنش قطعه‌کار و میزان تغییرشکل قرار داده می‌شود. تأثیر اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار برروی رفتار جریان فلز توسط شبیه‌سازی آزمون فشرده‌سازی در استوانه آلیاژ Al-Mg و با استفاده از روش المان محدود FEM توسط منزس مورد مطالعه قرار گرفته‌است[۱۰]. در شکل ۱-۱۴ مشاهده می‌شود که تغییرات اصطکاک و زبری سطح با بافت سطح تحت هردو شرایط خشک و روانکاری شده از یک الگو پیروی می‌کنند که با کنترل بافت سطح و اصطکاک در قالب، جریان مواد و نرخ تنش و کرنش را می‌توان کنترل کرد. نرخ کرنش یکی از فاکتورهایی است که تکامل ساختار تغییرشکل مواد را کنترل می کند. بنابراین ریز ساختار مورد نظر را با کنترل مقدار اصطکاک در تداخل قالب و قطعه می توان بدست آورد.

1 Tribology
2 Fullness



شکل ۱-۱۴ تغییرات اصطکاک و زبری سطح با بافت سطح با دو مکانیزم خشک و روانکاری[۱۰]

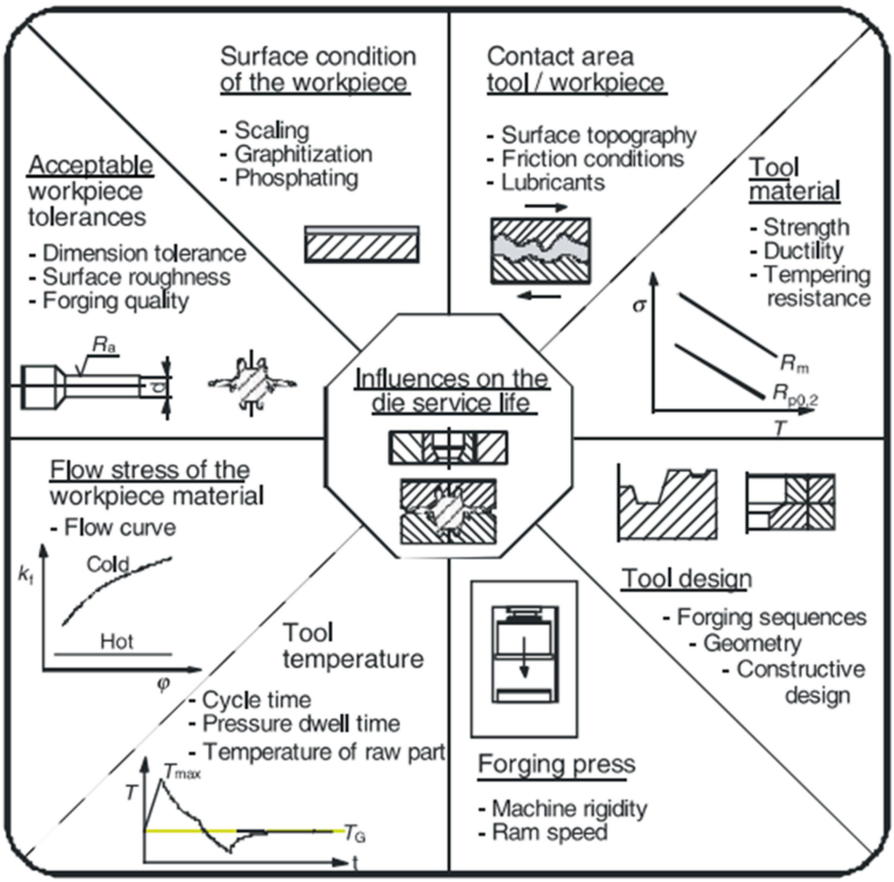
۱-۴- تریبولوژی در آهنگری

بر اساس استاندارد DIN ۵۰۳۲۳-۱ تریبولوژی به عنوان علم و مهندسی تعامل سطوح در حرکت نسبی تعریف شده‌است[۱]. تریبولوژی اهمیت عمده‌ای در طول فرآیند آهنگری با توجه به عمر ابزار و تقاضا برای انرژی دارد، همچنین شکل‌دهی در درجه حرارت بالایی حدود ۱۰۰۰°C انجام می‌گیرد که عامل اصلی اصطکاک است. در طول فرایند آهنگری گرم[1] به منظور کاهش نیروی تغییرشکل و افزایش تغییرشکل درجه حرارت بالا مورد نیازاست. با این حال ، افزایش زیاد دما باعث افزایش شدید اصطکاک تا ۳۰۰٪ می‌شود. در نتیجه، انرژی مورد نیاز برای تغییرشکل و فرایند تغییرشکل را افزایش می‌دهد. همین اصطکاک و انرژی زیاد باعث افزایش فشار و تخریب ابزار و اجزای غیر عامل می‌شود. این در درجه اول شامل فرایند چسبندگی و سایش است. علاوه بر این، شروع ترک های حرارتی و مکانیکی منجر به نقص ابزار می‌شود. تأثیر بسیاری از فاکتورها در رابطه بین ماشین ابزار و قطعه‌کار در

[1] Hot forging

شکل ۱-۱۵ عوامل موثر بر عمر قالب در شکل‌دهی حجمی نشان داده شده‌است که فاکتور عمر ابزار در ناحیه آهنگری را تعیین می‌کنند.آهنگری گرم معمولا شامل مواد فولادی با درجه حرارت بین ۹۰۰ تا۱۳۰۰ درجه سانتیگراد و فرآیند نیمه گرم[1] شامل ۶۵۰ تا۹۰۰ درجه است[۱].

روش المان محدود (FEM) به عنوان یک روش مبتنی بر شبیه سازی، شرح واقعی از مکانیسم های پیچیده در تعامل بین ابزار و قطعه‌کار است. نتیجه محاسبات شبیه سازی تا حد زیادی بستگی دارد به تولید مجدد و



شکل ۱-۱۵ عوامل موثر بر عمرقالب در شکل‌دهی حجمی[۱]

[1] Semihot forging

دقیق عواملی که در روند تغییرشکل تأثیرگذارند، به عنوان مثال، وابسته به اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار است. برای توصیف واقعی اصطکاک، پارامترهای محلی مانند حرکت نسبی، درجه حرارت و تنش در سطح تماس بین ابزار و قطعه‌کار در برنامه های المان محدود (FE) باید ثبت شود(از حالت پیش فرض به شرایط شبیه سازی تغییر یابد).

۱-۴-۱ انواع بارهای وارد شده بر ابزارهای آهنگری

انواع بارهای واردشده بر ابزار آهنگری را می توان به موارد زیر تقسیم کرد: حرارتی، مکانیکی، شیمیایی، و بارهای تریبولوژیکی. که اغلب ترکیب آنها رخ می‌دهد و معمولاً منجر به شکست ابزار می‌شود. علل شکست را همچنین می توان به چهار دسته تقسیم کرد:مکانیکی ، حرارتی ، تغییرشکل پلاستیک و سایش که اصلی ترین عامل سایش است[۱].

۱-۴-۲ بار حرارتی

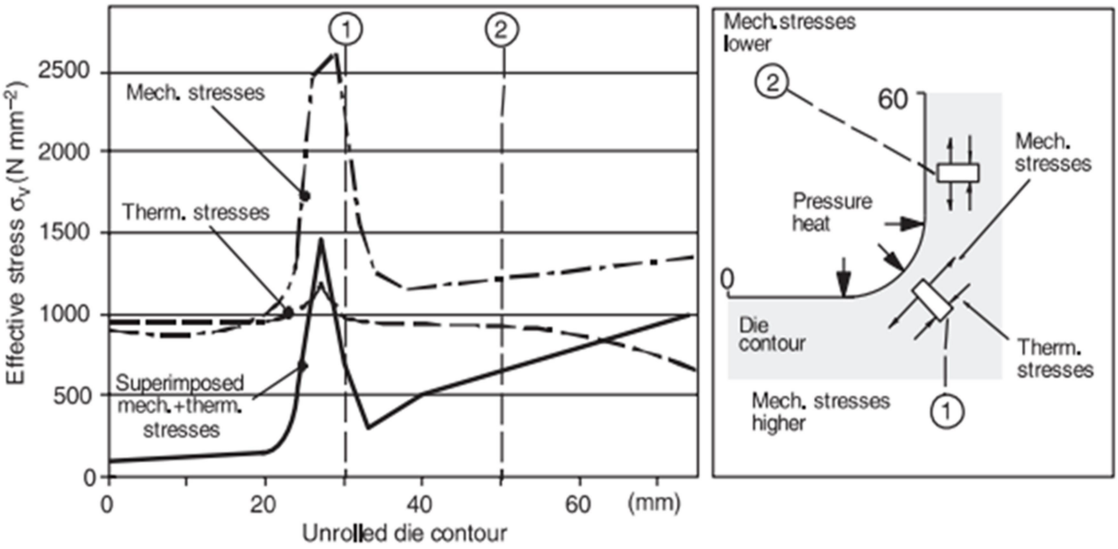
در طی فرایند آهنگری نیمه گرم و گرم، یک میدان دمایی بسیار متغیر زمانی و محلی بر روی ابزار آهنگری ایجاد می‌شود. مخصوصاً در طول فشار ایستایی، دما به بیش از ۷۰۰°C در منطقه نزدیک به سطح قالب افزایش می‌یابد. دمای بازپخت در این منطقه از قالب فراتر رفته و از استحکام مواد کاهش می‌یابد. علاوه بر فشار بار ایستایی، دیگرعوامل شامل درجه حرارت قطعه‌کار، هدایت حرارتی ابزار، و نیز هر لایه میانی اضافی، تعیین کننده تنش حرارتی است. با کمک ماده خنک‌کننده و گریس، ابزار در یک زمان بسیار کوتاه خنک می‌شود.

خنک‌کاری مانع از کاهش خواص مکانیکی و نیز موجب افزایش مقاومت در برابر سایش ابزار می‌شود. در نتیجه تنش های حرارتی دوره‌ای ابزار منجر به فشار مکانیکی در ابزار می‌شود، که این نوسانات حرارتی بعدها می تواند باعث ترک بشود. دمای پایه، که آن هم میانگین دمای قالب است، تعادل در

انرژی ابزارعملیات آهنگری با انتقال حرارت و خنک‌کننده است. علاوه بر مقدار انرژی که به ابزار به خصوص در طول فشار بارایستا وارد می‌شود، دمای اولیه نیز به طور قابل توجهی زمان را تحت تأثیر قرار می‌دهد.دمای ناحیه ی نزدیک به سطح در طول تماس توسط فاکتورهای زیادی تعیین می‌شود، مانند مواد ابزار، دمای اولیه‌ی ابزار، مواد قطعه‌کار، درجه حرارت قطعه‌کار، روان کننده، تنش تماس، فشار ایستایی بار و حرکت نسبی بین قطعه آهنگری و ابزار.

۱-۴-۳ بارهای مکانیکی

در طی فرآیند شکل‌دهی، تجهیرات شکل‌دهی بر روی قطعه‌کار به شکل انرژی کار انجام می دهند. این انرژی برای غلبه بر مقاومت در برابر تغییرشکل مواد و برای شروع و ادامه شکل‌دهی قطعه‌کار است. این امر موجب فشار یا تنش مکانیکی بالا بر روی ابزار شکل‌دهی می‌شود. زمینه تنش تولید شده در قالب متفاوت است. تنش بالا در سطح ابزار بستگی به هندسه ابزار دارد. این تنش منجر به کرنش غیر الاستیک و احتمالاً پلاستیک در ابزار می‌شود. بالاترین تنش ها و کرنش ها در اطراف فیلت‌ها رخ می‌دهد، که نتیجه شکل ابزار است. علاوه بر تنش مکانیکی، تنش های حرارتی نیز رخ می‌دهد، که نتیجه گسترش متفاوت مواد در سطوح مختلف قالب است که می‌تواند در نهایت به آسیب مکانیکی به قالب منجر شود. به منظور کاهش تنش مکانیکی و حرارتی، هندسه ابزار و خواص مواد مانند انبساط حرارتی و هدایت حرارتی در ساختار قالب باید در نظرگرفته شود. پارامترهای وابسته به زمان و مکان باعث می‌شود که نیروهای تغییرشکل تنش های مکانیکی بالا تولید بکند. این تنش‌ها در آهنگری با رفتن به سمت پایان مراحل شکل‌دهی با توجه به فشار دینامیکی در قالب افزایش می یابد. تنش نهایی در ابزار همان‌طور که در شکل ۱-۱۶ نشان داده شده است نتیجه باهم تداخل تنش مکانیکی و حرارتی است.



شکل ۱-۱۶ تنشهای مکانیکی و حرارتی در سطح قالب[۱]

در نتیجه تنش وابسته به هندسه قالب است. مقدار بار مکانیکی در قسمت‌های مختلف قالب متفاوت است. با این حال برای بار حرارتی، این تفاوت نسبتاً کوچک است. علاوه بر این، تنش مکانیکی متأثر از هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی، و انبساط حرارتی قالب مورد استفاده است. تفاوت این متغیرها برای فولادهای گرم‌کار مختلف کم هست، به طوری که تأثیرشان کم اهمیت می‌شود.

۱-۴-۴ بار شیمیایی

دمای بالای آهنگری باعث افزایش واکنش شیمیایی سطوح ابزار و قطعه‌کار می‌شود. تنش های شیمیایی بوسیله مواد افزودنی و همچنین واکنش های شیمیایی در سطح ابزار بوجود می آید.

۱-۴-۵ بار تریبولوژیکی

بار تریبولوژیکی اصطلاحاً به باری که در جسم جامد در تماس و حرکت نسبی با جامد، مایع، گاز ایجاد می‌شود گفته می‌شود. تماس و حرکت نسبی که بین سطح ابزار و بخش‌های داغ در طول آهنگری رخ

می‌دهد عامل بار تریبولوژیکی می‌باشد. در سطح تماس مکانیزم های اساسی سایش، که شامل ساییدگی، چسبندگی، پوسته پوسته شدن سطح و خوردگی فرسایش است، باعث حذف تکه‌های کوچک مواد از سطح ابزار و در نتیجه سایش می‌شود. یک سیستم نامطلوب تریبولوژیکی در طول آهنگری داغ در مقایسه با دیگر روش‌های شکل‌دهی فلزات عبارتند از:

۱- فشار تماسی که در طول آهنگری رخ می‌دهد بسیار بالا است چون باید به تنش تسلیم مواد برسد. علاوه بر این، تنش هیدرواستاتیک اضافی با توجه به هندسه در ابزار رخ می‌دهد.

۲- سطح قطعه‌کار خام که در حد مورد نیاز برای آهنگری گرم حرارت داده‌می‌شود بین ۱۰۰۰-۱۲۵۰ درجه سانتیگراد است. این دما بسیار شکننده و سخت است و این منجر به سایش سطح ابزار به علت حرکت نسبی در طول شکل‌دهی قطعه‌کار می‌شود.

۳- دما در سطح تماس بین ابزار و قطعه‌کار بین ۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد است، در نتیجه مقاومت سایشی ابزار کاهش و چسبندگی افزایش می‌یابد. بار حرارتی ابزار به طور قابل توجهی بوسیله مواد داغی که در طول فرایند قالب‌گیری از داخل قطعه‌کار تا سطح ظاهر می‌شود افزایش می‌یابد.

۱-۵- روانکارها در شکل‌دهی

خنک‌کاری و روانکاری سهم عمده‌ای در کاهش سایش قالب آهنگری دارد. هدف این است که علاوه بر اطمینان از حذف گرما از نقاط آسیب‌پذیر و حرارتی خواص اصطکاکی سطح بهبود یابد، هدف کاهش تنش تریبولوژیکی و حرارتی در قطعه‌کار برای قالب آهنگری و سطحش است. پارامترهای اصلی یک روان‌کننده و خنک‌کننده شامل

۱- اثر جداسازی مکانیکی و حرارتی بالا،

۲- کاهش اصطکاک

۳- اثر خنک‌کننده،

۴- کاهش انتقال حرارت(عایق حرارت)

۵- واکنش‌پذیری کم

می باشد[۱].

علاوه بر الزامات زیست محیطی و اقتصادی، باید برای روان‌کننده و خنک‌کننده خواصی مانند ترشوندگی خوب و چسبندگی[1] و افشانش[2] خوب را در نظر داشت. اغلب در آهنگری داغ خنک‌کننده مایع مانند محلول گرافیت با آب یا آب نمک‌های فلزات محلول استفاده می‌شود(تریبولوژی در آهنگری گرم). روانکاری به دلیل هزینه کم در مقایسه با کاهش هزینه‌ای که این عملیات در فرایند تولید دارد یک اصل مهم در فرایند شکل‌دهی جهت کاهش اصطکاک و سایش محسوب می‌شود. عمل روانکاری با قرار دادن یک لایه که استحکام برشی آن از دو لایه در حال تماس کمتر است، انجام می‌شود.

۱-۵-۱ مکانیزم‌های روانکاری

- **الف) مکانیزم‌های اولیه**

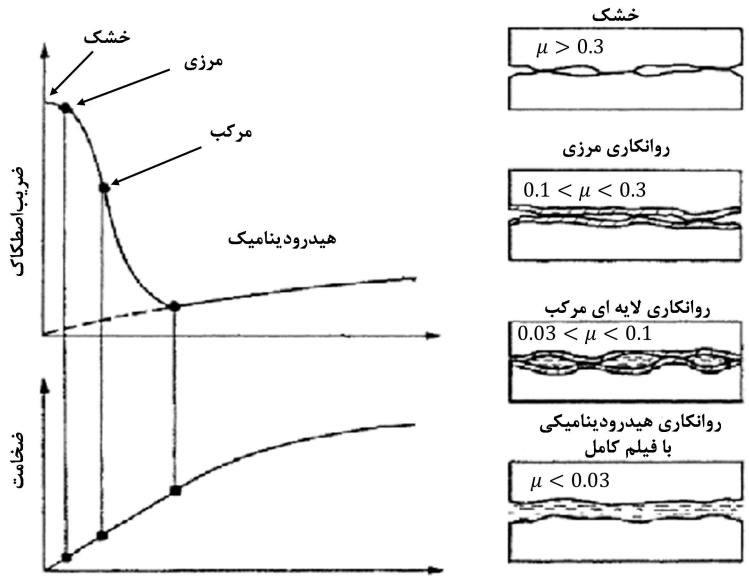
پنج مکانیزم اولیه روانکاری برای فرایندهای شکل‌دهی فلزات وجود دارد، همانطور که در شکل ۱-۱۷ نشان داده شده‌است، منحنی استریبک[3] مکانیزم‌های مختلف روانکاری را بعنوان تابعی از ویسکوزیته روانکار η، سرعت لغزش V، و فشار عمودی P نشان می‌دهد [۵].

---

[1] Adhesion

[2] sprayability

[3] Stribeck



شکل ۱-۱۷ منحنی استریبک[1]، انواع سازوکارهای روانکاری[۵]

۱-تحت شرایط خشک، روانکاری در سطح تماس وجود ندارد و فقط لایه‌های اکسیدی موجود روی ماده قالب و قطعه‌کار ممکن است بعنوان لایه "جداکننده" عمل کند. در این حالت، اصطکاک زیاد است و چنین موقعیتی فقط در تعدادی از عملیات شکل‌دهی مانند نورد داغ صفحات و تختال‌ها حدیده‌کاری و اکستروژن خشک آلیاژهای آلومینیوم مطلوب است[۵].

۲- روانکاری مرزی، به شرایطی گفته می‌شود که در آن دو سطح جامد فقط به اندازه چند مولکول روانکار از هم فاصله دارند. این مکانیزم بیشترین کاربرد را در فرآیندهای کشش عمیق و هیدروفرمینگ دارد[۵].

وقتی هندسه فرآیند تغییرشکل مطلوب است و سرعت لغزش به قدر کافی بالا است فیلم پیوسته روانکار می‌تواند تشکیل شود که قالب و قطعه‌کار را حتی در نقاط پستی و بلندی جدا می کند[۲].

۳- روانکاری فیلم جامد مخلوط (ترکیبی)، این شرایط در برجستگی‌های سطحی روانکاری مرزی اتفاق می‌افتد در حالی که گودی‌های سطح از روانکار پر می‌شوند، این مکانیزم به وفور در فرآیندهای

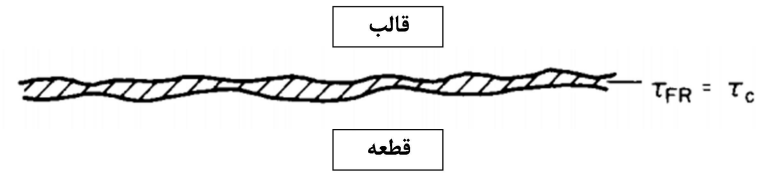
[1] Stribeck

شکل‌دهی ورق بکار برده می‌شود[۵]. بیشتر این روانکارها در فلزکاری مایع نامحلول یا پراکنده در مایع هستند[۲].

۴- روانکاری هیدرودینامیک، هنگامی وجود دارد که یک لایه ضخیم از روانکار مایع بین قالب‌ها و قطعه‌کار موجود باشد. در این حالت، شرایط اصطکاکی با گرانروی روانکار و با سرعت نسبی بین قالب و قطعه‌کار تعیین می‌شود. گرانروی بیشتر روانکارها با افزایش درجه حرارت به سرعت کاهش می‌یابد در نتیجه، در بیشتر عملیات شکل‌دهی سرعت بالا، مانند نورد نوار و کشش سیم، شرایط هیدرودینامیکی فقط در رژیم مشخصی از سرعت‌ها وجود خواهد داشت که در آن دمای سطح تماس نسبتاً پایین است. همانطور که منحنی استریبک نشان می‌دهد اصطکاک نسبتاً کم است.

۵- فیلم جامد روانکار :همانطور که در شکل ۱-۱۸ نشان داده شده است یک لایه اکسید به عنوان روانکار نرم‌تر از فلز و مستعد کشیدگی، بدون پارگی، دو فلز را از هم جدا می‌کند. اگر هیچ اکسیدی این شرایط را ارضا نکند، اگر اکسیدی بتواند تغییر متوالی در بین قالب و قطعه بدهد به عنوان روانکار در نظر گرفته می‌شود. بنابراین روانکار فقط به جنس روانکار وابسته نیست بلکه به فرآیند روانکاری هم وابسته است.

برای مثال فولاد در نورد گرم با اکسیدش محافظت می‌شود اما در اکستروژن نیاز به روانکار اضافه دارد.مس و برنج در نورد گرم شرایط مرزی را دارند در حالی که آلومینیوم با اکسید سخت و ترد نیاز به محافظ های دیگری در همه فرآیندهای شکل‌دهی دارد.



شکل ۱-۱۸ تداخل فیلم جامد[۲]

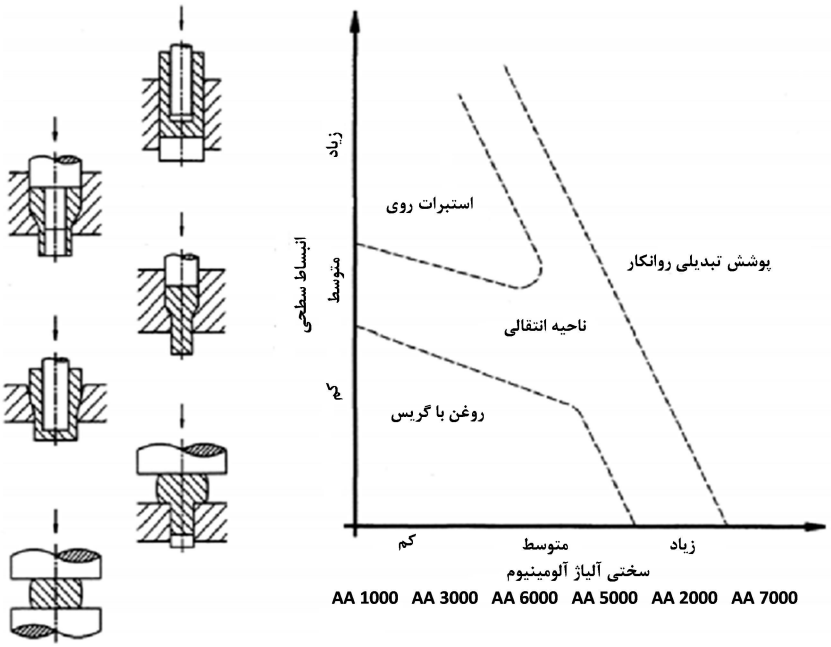
به جای فیلم فلز نرم یک لایه پلیمر می تواند به عنوان جداکننده قالب و قطعه‌کار قرار بگیرد. لایه شبکه ای مرکبی شامل گرافیت و mos_2 میتواند روانکار مؤثری باشد که به شکل پیوسته است.

- **ب) مکانیزم‌های ثانویه**

علاوه بر مکانیزم‌های اولیه روانکاری ذکر شده، وقتی روانکار بین دو سطح تماس محبوس می‌شود دو مکانیزم روانکاری ثانویه ممکن است اتفاق بی‌افتد: روانکاری میکرو-پلاستو-هیدرو-استاتیک (MPHSL) و میکرو-پلاستو-هیدرو-دینامیک (MPHSD) . در شرایط روانکاری ترکیبی، روانکار محبوس تحت فشار ممکن است از گودی‌های سطحی خارج شود، روانکار خارج شده از گودی‌ها، لایه نازکی روی سطح بین ناهمواری‌ها و قالب، که قبلا توسط روانکار مرزی جدا شده بود، تشکیل می‌دهد و به این صورت تنش اصطکاکی بیشتر کاهش می‌یابد.

۱-۵-۲ روانکارهای مورد استفاده در آهنگری سرد

انتخاب این که کدام روانکار در یک فرآیند آهنگری سرد استفاده شود به شدت به نوع عملیات (یعنی پارامترهای فرایندی مانند فشار سطح تماس و انبساط سطحی) و پارامترهای مربوط به خود شمشال (مثلاًسختی) بستگی دارد [۵]. علاوه بر آن، سیستم‌های روانکاری استفاده شده برای فولاد، ممکن است از آنچه برای آلومینیوم یا تیتانیوم، استفاده می شود خیلی متفاوت باشد (شی ۱۹۸۳) شکل ۱-۱۹ مثالی از فرایند انتخاب روانکار برای آهنگری سرد آلیاژهای آلومینیوم را نشان می دهد.



شکل ۱-۱۹ انتخاب روانکار بر مبنای میزان تغییر شکل[۴] .

روانکارها در آهنگری سرد معمولاً شامل ترکیب روغن و نیمه جامدی مانند چربی ها ، صابونها و واکس ها هستند و در شرایط تماس فشار بالا MoS2 به عنوان یک افزودنی فشار بالا استفاده می‌شود[۲]. جدول ۱-۱ روانکارهای معمول مورد استفاده در آهنگری سرد و گرم را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱ روانکارهای معمول مورد استفاده در آهنگری سرد و گرم [۱۰]

Material	Hot forging—lubricant	Hot forging—COF	Cold forging—lubricant	Cold forging—COF
Cu and Cu alloys	Graphite in water	0.15	Fat: wax (lanolin),	0.07
			zinc stearate (soap),	0.05
			graphite or MoS_2 in grease	0.07
Refractory metals	Glass and graphite	0.05	N/A	N/A
Steel	Soap	0.3	Lime and oil	0.1
	Graphite in water	0.2	Copper and oil	0.1
	Salt solution	0.2	Phosphate and soap	0.05
Ti alloys	MoS_2	0.2	Zinc fluoride phosphate	0.1
			and soap	0.05
Al and Mg alloys	Graphite in water	0.3	Lanolin	0.07
			Phosphate and soap	0.05

۱-۵-۳ روانکارهای مورد استفاده در آهنگری گرم

تفاوت اصلی در شرایط روانکاری بین آهنگری سرد[۱] و گرم[۲] یا داغ[۳] در محدوده درجه حرارتی است که روانکار باید در آن عمل نماید. دماهای خیلی بالای قالب که با تنش‌های زیاد قالب ناشی از انتقال حرارت از شمشال به قالب‌ها و نیز تنش‌های تغییر شکل توام می شود، باعث افزایش سایش، تغییر شکل مومسان و ترک‌های سطحی حرارتی در قالب‌ها می‌شود[۱۲]. بنابراین برای افزایش عمر ابزارو کیفیت قطعه، یک سیستم روانکاری خوب باید بتواند هم انتقال حرارت به قالب‌ها و هم تنش‌های برشی در سطح تماس ابزار/ قطعه کار را کمینه نماید. دمای آهنگری گرم و داغ، استفاده از سیستم‌های روانکاری با پایه آلی (یعنی روغن‌های معدنی) یا صابون‌ها را محدود می‌کند. بنابراین انتخاب سیستم‌های روانکاری بدلیل سوختن یا ذوب شدن روانکارها بسیار محدود است.در آهنگری گرم روانکارها ترکیب روغن با گرافیت محلول یا نامحلول هستند [۲].

۱-۶- پیشینه تحقیق

تعیین صحیح ضریب اصطکاک و انتخاب روش آزمایش مناسب برای درک پدیده اصطکاک در سطح تماس قطعه و قالب تحت شرایط روانکاری مختلف مهم می‌باشد. تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه اصطکاک در فرایندهای شکل‌دهی فلزات و ارزیابی تأثیر روانکارها در اصطکاک با روش آزمون فشار حلقه انجام شده‌است. نمونه‌هایی از تحقیقات انجام شده در این موضوع در ذیل اشاره شده‌است.

شهریاری و همکاران در سال ۲۰۰۹ با استفاده از آزمون فشار حلقه و شبیه‌سازی ۳D المان محدود، تأثیر روانکارهایی مثل میکا، پودر شیشه، پودر گرافیت و شرایط خشک (بدون روانکاری) را در فرایند آهنگری داغ سوپرآلیاژ نامونیک۱۱۵، مورد مطالعه قرار دادند و به بررسی پارامتر اصطکاک

---

[1] Cold forging

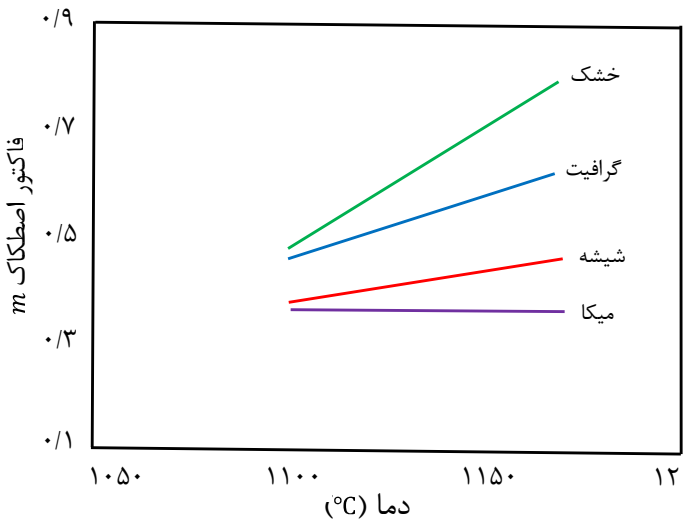
[2] Warm forging

[3] Hot forging

پرداختند[۱۳]. در این تحقیق نمونه‌های سوپرآلیاژ نامونیک۱۱۵، با نسبت اندازه استاندارد ۶:۳:۲ تهیه و در ۲ گستره‌ی دمایی□۱۱۰۰ و □۱۱۷۵ بطور جداگانه در ۳ کاهش ارتفاع مختلف ۵۵٪ و ۴۰٪ و ۲۵٪ فشرده‌سازی شدند. جهت اندازه‌گیری دقیق قطر نمونه‌ها از پروفایل پروژکتور استفاده کردند. برای ترسیم منحنی‌های کالیبراسیون از شبیه‌سازی المان محدود ۳D استفاده شد. جدول ۱-۲ و شکل ۱-۲۰ خلاصه نتایج این تحقیق را ارائه می کند. بر طبق این تحقیق بهترین روانکار میکا با ضریب اصطکاک ۰/۳ می باشد.

جدول ۱-۲ ضریب اصطکاکμ و ضریب اصطکاک برشی m برای روانکارهای مختلف

	خشک	گرافیت	شیشه	میکا
M	۰/۶۹	۰/۵۵	۰/۳۵	۰/۳
μ	۰/۳۴	۰/۲۸	۰/۱۸	۰/۱۶



شکل ۱-۲۰ ضریب اصطکاک برشی m برای روانکارهای مختلف

راجش و همکاران در سال ۲۰۱۳ با استفاده از آزمون حلقه تأثیر روانکاری استئارات روی[1]، دی سولفات مولیبدن، پودر گرافیت و حالت خشک را برای نمونه‌های آلومینیومی مورد مطالعه قراردادند، خلاصه نتایج این تحقیق در جدول ۱-۳ آورده شده‌است[۱۴].

جدول ۱-۳ ضریب اصطکاک برای روانکارهای مختلف [۱۴]

روانکار	ضریب اصطکاک
شرایط خشک	۰/۵۲
گرافیت	۰/۱۶
دی سولفات مولیبدن	۰/۱۴
استئارات روی	۰/۱۴

باروقی و همکاران در سال ۲۰۱۳ بااستفاده از آزمون فشار حلقه تأثیر روانکاری گرافیت، تفلون، ورقه های میکا و حالت خشک را در فرآیند شکل‌دهی گرم آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ مورد مطالعه قراردادند و به بررسی پارامتر اصطکاک پرداختند و همچنین توسط شبیه‌سازی المان محدود منحنی کالیبراسیون را ترسیم کردند[۱۵]. نمونه‌ها با نسبت های ۶:۳:۲ و در اندازه‌های حقیقی ۱۸:۹:۶ تهیه شده و آزمون فشار حلقه در دماهای ۴۵۰°C انجام گرفت. همچنین شبیه‌سازی اجزای محدود با ۹ فاکتور برشی از m=۰ تا m=۱ انجام گرفته و با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاکی ترسیم شد. سپس با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی، ضریب اصطکاک برشی برای هریک از روانکارها محاسبه شد. خلاصه نتایج در جدول ۱-۴ ارائه شده‌است که نشان می‌دهد تفلون و گرافیت به ترتیب با ضریب اصطکاک ۰/۳۲ و ۰/۴۸ بهترین و بدترین روانکار در این شرایط می باشند و در شرایط خشک ضریب اصطکاک ۰/۶۹ بدست آمد.

[1] Zinc stearate

جدول ۱-۴ نتایج میانگین ضریب اصطکاک برشی برای روانکارهای مختلف[۱۵]

تفلون	ورقه میکا	گرافیت	خشک
۰/۳۲	۰/۴۰	۰/۴۸	۰/۶۹

منزس و همکاران در سال ۲۰۱۳ در مورد اثر بافت سطح بر روی اصطکاک سطح تماس ابزار در دو شرایط خشک و روانکار مطالعه کردند[۱۰]. در این تحقیق انواع مختلفی از بافت سطح، لغزش عمود بر جهت سنگ زنی[1] (U-PD) و لغزش موازی با جهت سنگ زنی[2] (U-PL) و سنگ زنی در مسیر 8-شکل[3] و تصادفی[4] را مطالعه کردند. تأثیر اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار برروی رفتار جریان فلز توسط شبیه‌سازی آزمون حلقه در استوانه آلیاژ Al-Mg و با استفاده از روش المان محدود FEM مورد مطالعه قرار گرفت.

دهقان و همکاران آزمون فشار حلقه را به منظور اندازه‌گیری اصطکاک در فرآیند آهنگری داغ، این فرآیند را شبیه‌سازی و بررسی کردند[۱۶]. مطابق شکل ۱-۲۱ که شکل اولیه و نهایی قطعات در آزمایش فشار حلقه و همچنین قطعات شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد آنها به این نتیجه رسیدند که قطر داخلی قطعات آزمایش شده بدون روانکار کوچکتر از قطر اولیه‌ی قطعات و قطر داخلی قطعات تست شده با روانکار مخلوط گرافیت در آب است؛ که نشان دهنده‌ی اصطکاک شدید بین قطعه و قالب در طی انجام فرآیند در شرایط بدون روانکار است. همچنین در شرایط تست یکسان هر چه ضخامت حلقه‌ی اولیه کمتر باشد، پس از انجام تست تغییرات قطر داخلی آن بیشتر خواهد بود. با دقت در شکل ۱-۲۱ به وضوح می‌توان دریافت که کاهش قطر داخلی در قطعات با نسبت ابعاد ۶:۳:۲

---

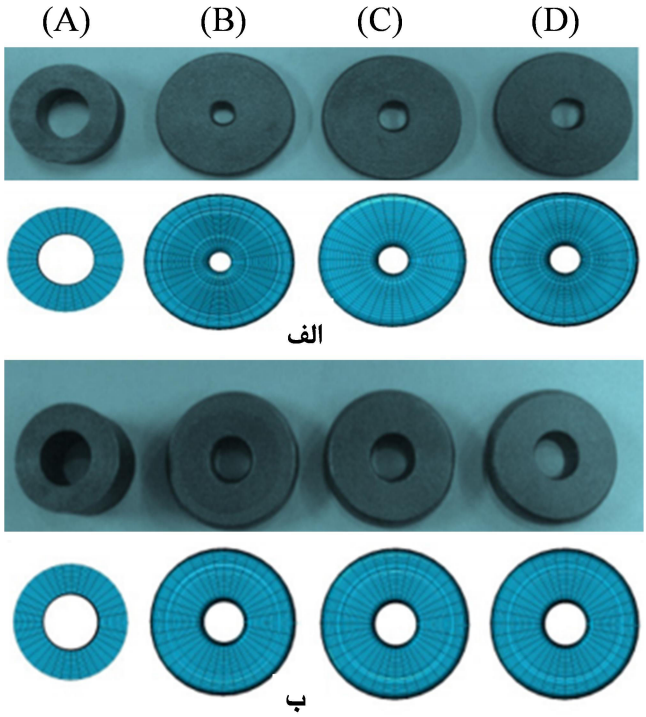
[1] Unidirectional grinding marks

[2] Sliding parallel to the unidirectional grinding marks

[3] 8-ground

[4] Random

بیشتر از کاهش قطر داخلی در قطعات با نسبت ابعاد ۶:۳:۴ می باشد؛ توجه به این نکته ضروری است، که میزان کاهش ارتفاع برای هر دو نوع قطعه ٪۵۰ بوده است. و نیز این موضوع در مورد قطعات با ابعاد اولیه‌ی یکسان صدق می کند.



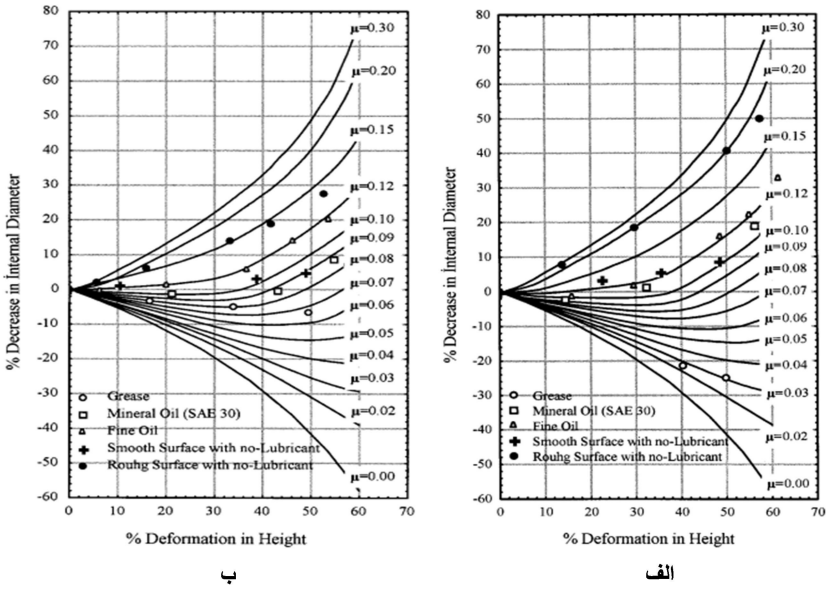
شکل ۱-۲۱ شکل اولیه و نهایی قطعات در آزمایش فشار حلقه[۱۶]

(الف) نسبت ابعاد ۶:۳:۲ (ب) نسبت ابعاد ۶:۳:۴

(A) قطعه‌ی اولیه، (B) بدون روانکار، (C) روانکار ٪۵گرافیت در آب، (D) روانکار ٪۱۰گرافیت در آب

گدیکلی و راستی با شبیه‌سازی تست فشار و استخراج نمودارهای کالیبراسیون نتایج تجربی تست فشار را با این نمودارها مقایسه کردند[۹]. شکل ۱-۲۲ الف و ب نمودارهای کالیبراسیون شبیه سازی و تجربی آلومینیوم و مس را نشان می‌دهد. این نمودارها نشان می دهند که خواص مواد نقش مهمی در رفتار اصطکاک بازی می کند. در این تحقیق از پنج نوع سیستم روانکاری مختلف بر مسیر بارگذاری و ضریب اصطکاک بررسی شد. همچنین به‌صورت جداگانه اثر سرعت بارگذاری و نرخ کرنش بر ضریب

اصطکاک مورد ارزیابی قرار گرفت. به عنوان نمونه در شکل زیر اثر نرخ کرنش بر مسیر بارگذاری در سیستم های مختلف روانکاری گزارش شده‌است.



شکل ۱-۲۲منحنی کالیبراسیون به دست آمده از تجربی و FEM برای (الف) آلومینیوم، (ب) مس[۹]

در میان همه روش‌های مشترک برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک، آزمایش فشار حلقه بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. این روش ابتدا توسط کونگوی [۱۷] و بعدها به عنوان روش قابل استفاده به وسیله میل و کوکوکرافت توسعه و ارائه شد[۱۸]. میل در سال ۱۹۶۵نشان داد که ضریب اصطکاک μ باتغییرات دما تغییر می‌کند[۱۹]. سوفوقلو منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاکی را با کمک شبیه‌سازی المان محدود و مدلسازی فیزیکی بدست آوردند و نشان دادند که پارامترهای مواد و شرایط آزمایش اثرات مهمی روی شکل منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاکی برای هر دو حالت شبیه‌سازی و مدلسازی فیزیکی دارد[۲۰].

۱-۷- ضرورت تحقیق

باتوجه به اینکه در فرآیندهای شکل دهی اصطکاک نقش بسیار مهمی را ایفا می کند، پس مطالعه تریبولوژی جهت کاهش اصطکاک، امری ضروری به نظر می رسد. چنان‌چه بهبود آن موجب کاهش نیروهای شکل دهی، کاهش توان مصرفی که این امر باعث کاهش هزینه های تولیدی نیز می شود.

تاکنون سابقه ای از تحقیق بر روی بررسی اثر روش ساخت قالب بر تریبولوژی سطح تماس در فرایند آهنگری مشاهده نشده است. با توجه به اهمیت مؤلفه های تریبولوژی سطح مانند اصطکاک، زبری سطح در فرایندهای شکل‌دهی فلزات، نتایج حاصل از این تحقیق می تواند در انتخاب روش مناسب‌تر برای ساخت قالب آهنگری بکار گرفته شود.

فصل ۲ مواد و روش تحقیق

در این فصل به تشریح مواد، دستگاه‌ها، ابزارها و روش‌های تجربی و عددی به کار گرفته شده در پژوهش حاضر پرداخته می‌شود. مشخصات مواد و دستگاه‌ها و شیوه‌های به کار رفته به منظور تولید نمونه‌های ck45 و تست‌های مکانیکی و ساختاری استفاده شده و همچنین طراحی آزمایش‌ها از جمله موارد مهم گنجانده شده در فصل جاری است.

۲-۱- مواد و روش تحقیق تجربی

در این تحقیق با هدف بررسی اثر فرآیندهای تولید قالب آهنگری، بر تریبولوژی فرآیند، آزمون‌های تجربی فشار حلقه طراحی و اجرا می شوند. در سیستم روانکاری و شش نوع فرآیند تولید قالب مورد بررسی قرار می گیرد. در ادامه شرح کامل مواد مورد استفاده در روش تحقیق تجربی ذکر می‌شود.
در این تحقیق از فولاد ck45 جهت تهیه نمونه‌ها، از فولاد۱/۲۷۱۳ جهت تهیه قالب و از روغن پارافین روان‌کننده استفاده شده‌است.

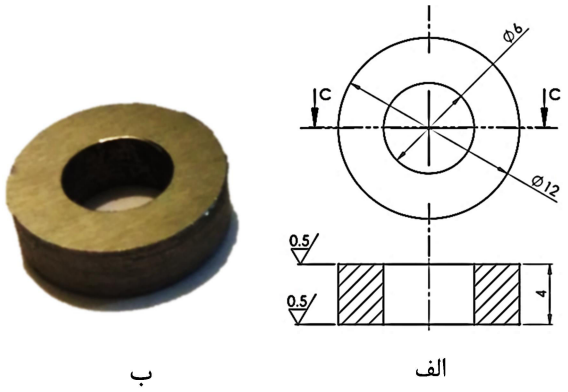
۲-۱-۱ مواد اولیه

ماده‌ی مورد استفاده در این تحقیق فولاد آلیاژی ck۴۵ می‌باشد که از فلزات پرکاربرد در صنایع خودروسازی و هوافضا است. این آلیاژ، فولادی با کربن متوسط که به‌صورت‌های نورد گرم، کوئینچ و تمپرشده با آب یا روغن مورد استفاده قرار می‌گیرد ck۴۵ یک فولاد بهسازی با استحکام و چقرمگی متوسط، قیمت پایین و مقاومت به ضربه و قابلیت ماشینکاری خوب است؛برای همین است که اغلب برای قطعات سخت شونده با شعله و سختکاری القایی استفاده می‌شود. فولادهای بهسازی برای ساخت قطعاتی به کار می رود که درمعرض ضربه و برخورد قراردارند. مانند میل لنگ ها، محورلنگ پرس های ضربه‌ای و محور وسایل نقلیه. ترکیب شیمیایی نمونه‌ها ck۴۵ استفاده شده در این تحقیق به روش آنالیز اسپکترومتری نشری بدست آمده که در جدول ۲-۱ نشان داده شده‌است.

جدول ۲-۱ ترکیب شیمیایی نمونه اولیه ی ck۴۵

عنصر	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
درصد وزنی	۹۸/۱	۰/۴۴۸	۰/۲۵۶	۰/۶۶۲	۰/۰۱۸۵	۰/۰۳۳	۰/۰۸۰	۰/۰۲۵۷	۰/۰۴۳۱	۰/۱۴۵

از میلگرد اولیه به کمک فرآیند تراش‌کاری و سپس سنگ‌زنی مغناطیسی نمونه‌های تست فشار حلقه با نسبت ۶:۳:۲ مطابق شکل ۲-۱ تهیه شد. سطح پیشانی قطعات که با قالب در تماس خواهد بود از طرفین به کمک روش سنگ زنی تا رسیدن به زبری سطح ۰/۵μm پرداخت شد.



شکل ۲-۱ نمونه اولیه تست فشار؛ (الف) نقشه، (ب) قطعه آماده شده

سختی نمونه اولیه توسط سختی‌سنج اونیورسال UV1 در پنج نقطه محاسبه و سختی متوسط برابر ۱۷/۵HRC اندازه گیری شد.

۲-۱-۲ روانکار

آزمون فشار حلقه در دو حالت خشک و روانکاری مورد بررسی قرار گرفت. به منظور کاهش اصطکاک در عملیات آهنگری از روغن روانکاری پایه (روغن پارافین) که در شکل ۲-۲ نشان داده شده‌است استفاده شده‌است. جدول ۲-۲ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی روانکارهای پایه را نشان می‌دهد.

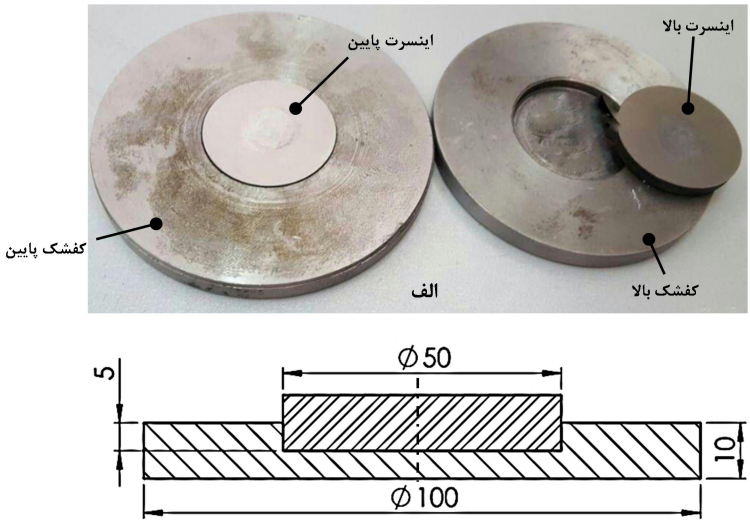
شکل ۲-۲ روغن مورد استفاده در روانکاری قالب

جدول ۲-۲ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی روغن پارافین مورد استفاده ب رای روانکاری قالب

پارامتر	مقدار
چگالی در 20 °C ($kg\ m^{-3}$)	۹۹۶
گرانروی سینماتیکی در40 °C (cSt)	۳
نقطه اشتعال (°C)	۸۵-۸۰

۲-۲- قالب آهنگری

قالب فرآیند آهنگری حلقه شامل یک کفشک از جنس فولاد ریختگری و تعداد ۶ اینسرت قابل تعویض از جنس ۱/۲۷۱۳ می باشد. در شکل ۲-۳ قالب نمایش داده شده‌است. کفشک قالب از جنس فولاد ریخته گری به کمک روش تراش‌کاری به‌صورت دقیق ماشین‌کاری شده‌است.



ب

شکل ۲-۳ قالب آزمون فشار حلقه، (الف)کفشک و اینسرت (ب) نقشه قالب (ابعاد برحسب میلی‌متر)

ترکیب شیمیایی اینسرت قالب به کمک روش آنالیز اسپکترومتری نشری بدست آمد که نتیجه در جدول ۲-۳ ارائه شده‌است.

جدول ۲-۳ ترکیب شیمیایی فولاد ۱/۲۷۱۳ مورد استفاده برای اینسرت قالب

عنصر	Fe	C	Mn	Cr	Ni	Cu	V	Si	Mo	P
درصد وزنی	۹۵	۰/۶۲۴	۰/۶۸۶	۰/۶۷۶	۱/۷۷	۰/۱۰۴	۰/۱۴۴	۰/۴۹	۰/۲۹۱	۰/۰۲۵

اینسرت قالب ابتدا برش، سپس سخت‌کاری و تمپر و درنهایت ماشین‌کاری شده‌است. شکل ۲-۴ نمونه‌های اینسرت تولید شده به روش‌های شش‌گانه به همراه زبری سطح بدست آمده نمایش داده شده‌است.

برای سخت‌کاری اینسرت قالب، نمونه ها به مدت۲ساعت در دمای ۸۵۰°C توسط کوره حرارت‌دهی و سپس در محیط روغن کوئینچ شد که سختی میانگین HRC ۶۳ بدست داد. سپس برای کاهش

سختی و افزایش چقرمگی عملیات بازپخت[1] انجام شد. دمای تمپر قالب برابر ۶۵۰°C بوده که در نهایت سختی قالب به HRC ۵۴ رسید. فرآیندهای مورد استفاده برای تولید سطح پیشانی اینسرت قالب شامل روش‌های شش‌گانه زیر می باشد:

۱- فرزکاری افقی با تیغه مارپیچ (HM)

۲- فرزکاری عمودی با تیغه فرز کف‌تراش Tmax (VM)

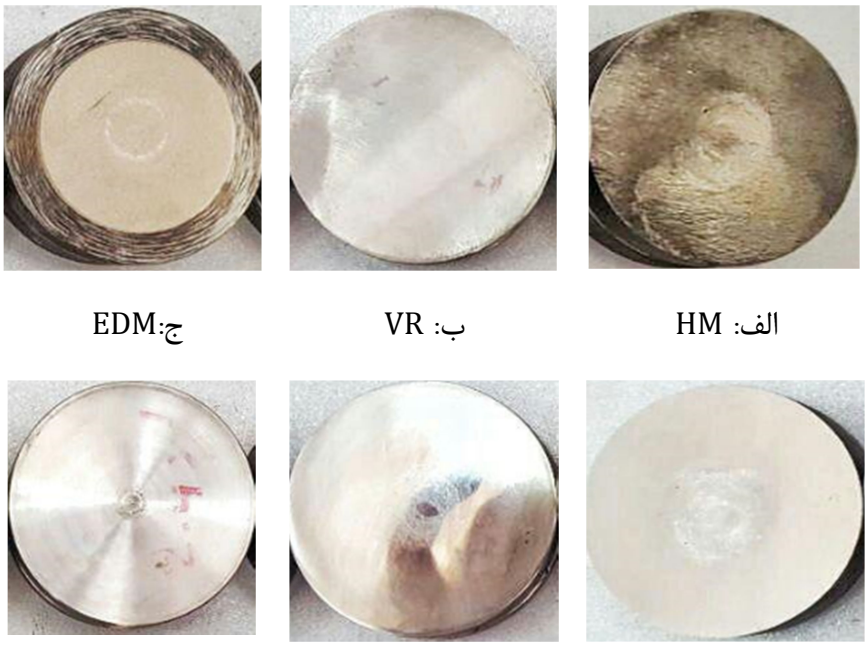
۳- ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی (EDM)

۴- سنگ‌زنی GR

۵- سنگ‌زنی و پرداخت‌کاری (GF)

۶- پیشانی تراشی به کمک دستگاه تراش (TN)

[1] Tempering



الف: HM ب: VR ج:EDM

د: GR ه: GF و: TR

شکل ۲-۴ اینسرت‌های تولیدشده با فرآیندهای (۱) فرزکاری افقی با تیغه مارپیچ HM، (۲) فرزکاری عمودی با تیغه فرز کف تراش VM Tmax، (۳) ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی(EDM) (۴) سنگ زنی GR (۵) سنگ زنی و پرداخت کاری (GF) (۶) پیشانی تراشی به کمک دستگاه تراش (TN)

فولادهای ابزار گرم‌کار: این گروه فولادهایی هستند که دردماهای بالاترازدمای محیط، مقاومت به سایش ومقاومت به ضربه خود را حفظ می‌کنند. کربن دراین فولادها ۰/۷ درصد می باشد. عنصر آلیاژی اصلی آن کروم است ودرکنارعناصر دیگری همچون مولیبدن، نیکل، وانادیم وتنگستن می‌توانند خواص مکانیکی خوبی ایجادکنند. این فولادها را بهتراست قبل از عملیات حرارتی پیشگرم کرد تابه دلیل بالا بودن نرخ گرمای عملیات احتمال ایجادترک درآنها ازبین برود.کاربرداین فولادها در ساخت انواع قالب های آهنگری فرم دهی گرم ریخته گری گریز ازمرکز صنایع شیشه ولوله سازی است. ازمهمترین آنها میتوان به ۱/۲۷۱۳ و ۱/۲۷۱۴ اشاره کرد که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته شده اند. از کاربردهای این فولادها می توان به ساخت قالب‌های آهنگری گرم چکشی و هیدرولیک - اکستروژن فلزات و ابزارهای اکستروژن لوله نام برد. ابزار آهنگری که در معرض کار در دمای بالا و

تحت بارهای مکانیکی قرار دارند، برای جلوگیری از شکست ناشی از تنشهای مکانیکی و حرارتی از فولادهای گرمکار ساخته می شود[۱۸].

۲-۳- تجهیزات و دستگاه‌ها

دقت در اندازه‌گیری ابعاد نمونه ها قبل و بعد از انجام آزمایش تأثیر زیادی روی نتایج آزمایش دارد. از تهیه نمونه‌ها تا انجام آزمایش‌ها، از تجهیزات متعددی استفاده شد که در این بخش به آنها اشاره می‌شود.

- **دستگاه تراش**

در شکل ۲-۵ دستگاه تراش مدل TN50 استفاده شده برای تهیه نمونه‌های آزمون فشار حلقه و تراشکاری اینسرت قالب نشان داده شده‌است. برای بدست آوردن زبری سطح ۳میکرومتر اینسرت‌هایی که با این دستگاه ماشینکاری شده‌اند، سرعت دورانی ۵۰۰ دوربردقیقه و میزان پیشروی ۰/۱۶میلی‌متربردور تنظیم شده است.

این دستگاه ساخت شرکت ماشین سازی تبریز می‌باشد. ازجمله مشخصات این دستگاه توان ۵/۵ kw، قطر کارگیر تا ساپورت ۲۷۰mm و طول تراش‌کاری ۱۰۰۰mm می‌باشد.

شکل ۲-۵ دستگاه تراش استفاده شده برای ماشین‌کاری حلقه‌ها و اینسرت‌ها

- **دستگاه فرز**

برای فرزکاری قطعات از ماشین FP4M تبریز که در شکل ۲-۶ آمده استفاده شده است.

برای فرزکاری افقی قطعات عده‌ی دوران ۵۴۰ دوربردقیقه و میزان پیشروی ۱۶میلی‌متر تنظیم شد تا زبری سطح ۲میکرومتر بدست بدهد. همچنین برای فرزکاری عمودی عده‌ی دوران ۷۱۰دوربردقیقه و میزان پیشروی ۲۲میلی‌متربردقیقه تنظیم شد تا زبری سطح ۳میکرومتر بدست بدهد.

شکل ۲-۶ دستگاه فرز استفاده شده در این تحقیق

- **کوره الکتریکی عملیات حرارتی**

شکل ۲-۷ کوره عملیات حرارتی مورد استفاده برای سخت‌کاری نمونه‌های اینسرت قالب‌ها را نشان می‌دهد.

شکل ۲-۷ کوره عملیات حرارتی مورد استفاده برای سخت‌کاری نمونه‌های اینسرت قالب‌ها

- **پرس هیدرولیکی**

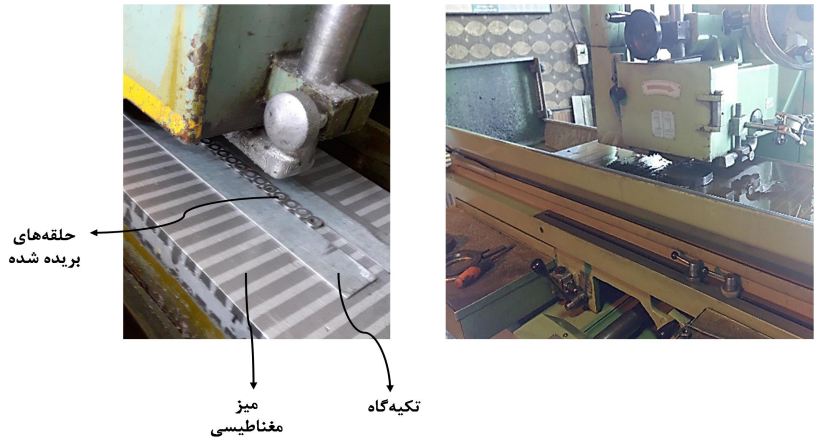
برای فشرده سازی نمونه‌ها در آزمون فشار حلقه از پرس هیدرولیکی ۲۵ ton رایکوتکنیک[1] با قدرت موتور ۷/۵ kw و طول کورس ۲۰۰mm استفاده گردید که تصویر آن در شکل ۲-۸ نشان داده شده‌است. در این آزمایش به‌صورت قالب باز انجام شده‌است که رم بالا با سرعت ثابت ۱۰mm/s قطعات را فشار می‌دهد. آزمایش‌ها در دمای ثابت محیط انجام گرفته است.

[1] Rayco Technic

شکل ۲-۸ پرس هیدرولیکی رایکو تکنیک استفاده‌شده برای فشار حلقه

- **سنگ مغناطیس**

جهت سنگ‌زنی صفحات قالب (اینسرت‌ها) از دستگاه سنگ مغناطیس طوس در ابعاد ۶۰ ×۲۰ مگنت برقی استفاده گردید. شکل ۲-۹ تصویر این دستگاه را نشان می‌دهد. برای سنگ‌زنی قطعات ماشین با سنگ به قطر ۳۰۰میلی‌متر سرعت دورانی ۱۴۰۰دوربردقیقه داشت.



شکل ۲-۹ دستگاه سنگ مغناطیس استفاده شده

- **پولیش**

برای پولیش‌کاری ابتدا قطعات را سنگ‌زنی کرده و پس از آن تا سنباده ۲۰۰۰ مرحله به مرحله پولیش کاری کرده و در مرحله آخر با با ژله جلاسنج براق کردیم.

- **دستگاه تخلیه ی الکتریکی**

دستگاه مورد استفاده برای اسپارک قالب‌ها در این تحقیق، اسپارک ۶۸ آمپری پیشرانه، شکل ۲-۱۰ است.

شکل ۲-۱۰ اسپارک ۶۸ آمپری پیشرانه

برای بدست آوردن زبری سطح ۳میکرومتر با این دستگاه، تنظیم جریان روی ۲ آمپر و ولتاژ در سطح متوسط و زمان روشنی پالس ۶ و زمان خاموشی پالس بر روی ۴میکروثانیه تنظیم شده است.

جدول ۲-۴ مشخصات دستگاه تخلیه‌ی الکتریکی استفاده شده در این تحقیق

کورس حرکت میز mm		کورس حرکت محور Z به mm	ابعاد تانک کار mm			ابعاد بدنه mm			حجم تانک دی الکتریک lit	حداکثر وزن الکترود kg	وزن دستگاه با ژنراتور kg
طول	عرض		طول	عرض	ارتفاع	طول	عرض	ارتفاع			
460	260	270	1050	500	300	1550	950	2100	130	40 (130 *)	1000

•دستگاه زبری سنج

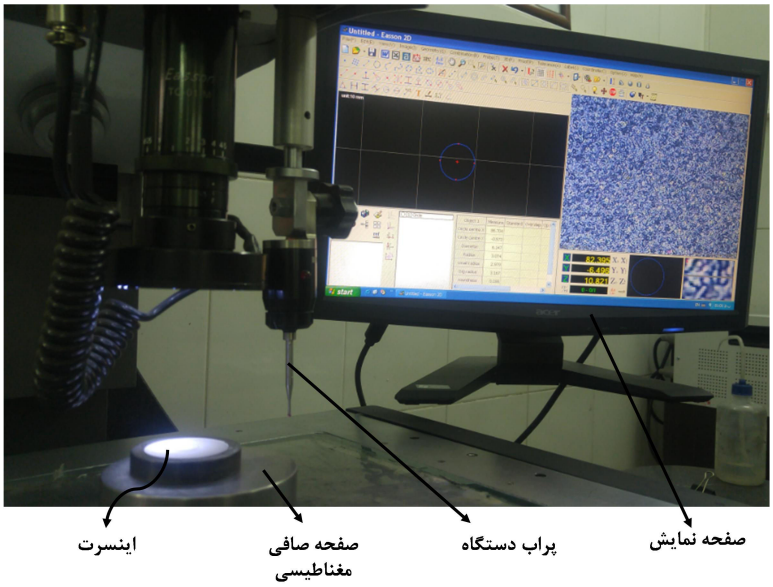
برای سنجش کیفیت سطوح نمونه‌ها از دستگاه زبری سنج گوآلی تست[1] تی‌آر۲۰۰ استفاده شد که قابلیت اندازه گیری ۱۳ نوع پارامتر زبری را دارد. ازجمله شامل R_a با محدوده‌ی μm ۴۰-۰/۰۱ و R_z با محدوده‌ی ۱۶۰µm-۰/۰۲ . دقت اندازه گیری دستگاه: μm ۰/۰۰۱ است. شکل ۲-۱۱زبری سنج استفاده شده را نشان می‌دهد.

شکل ۲-۱۱ زبری سنج برای سنجش زبری اینسرت‌ها و حلقه‌ها

- **ماشین اندازه‌گیری اتوماتیک تصویری EASSON**

شکل ۲-۱۲ ، مدل SPARTAN C20 با ریزنگری µm ۰/۱ و تکرارپذیریµm ۲ است . برای نشان دادن بافت سطح و همچنین اندازه گیری قطر داخلی حلقه ها از این دستگاه استفاده شد.به دلیل وجود اصطکاک که باعث حالت بشکه ای شدن و لبه‌های ناهموار در نمونه ها، برای محاسبه قطر داخلی نمونه ها، ابتدا با ماشین اندازه‌گیری اتوماتیک و سپس برای کنترل با کولیس دیجیتال اندازه گیری شد.

[1] Qualitest



شکل ۲-۱۲ماشین اندازه‌گیری اتوماتیک تصویری EASSON

- **دستگاه آنالیز کووانتومتری**

در تحقیق حاضر به منظور تعیین ترکیب شیمیایی نمونه‌های ck45 و فولاد ۱/۲۷۱۳، از روش کوانتومتری با دستگاه ساخت میرا، شکل ۲-۱۳، استفاده شده‌است. نمونه قطعه آنالیز شده در شکل ۲-۱۴ ارائه شده‌است.

شکل ۲-۱۳ دستگاه کوانتومتری برای آنالیز ترکیب شیمیایی قطعات

شکل ۲-۱۴ تصویر قطعه آنالیز کوانتومتری شده

- **دستگاه سختی سنجی**

دستگاه سختی سنج یونیورسال UV1 دارای سیستم کنترل دیجیتال با حساسیت بالا و کاربری آسان می باشد.

سختی سنج یونیورسالUV1 قابلیت انجام کلیه مراحل سختی سنجی را به‌صورت خودکار دارد. اعمال نیرو در این دستگاه توسط سیستم کنترل دیجیتال بوده که با یک لودسل بسیار دقیق اندازه گیری و کنترل می‌شود. هم چنین عمق نفوذ با دقت ۰/۱۱ میکرون توسط حسگر مغناطیسی اندازه گیری شده و روی نمایشگر گرافیکی نمایش داده می‌شود. سختی سنج یونیورسال UV1 به دلیل دقت بالای تولید، کالیبراسیون دقیق (HRC ۰/۱)، عملکرد خودکار و دقت زیاد در اندازه گیری نیرو و جابجایی به عنوان اولین انتخاب صنایع مختلف و مراکز پژوهشی و دانشگاهی در زمینه سختی سنجی قرار گرفته‌است، شکل ۲-۱۵. از ویژگی های دستگاه ، اندازه گیری جابه جایی فرورونده[1] با دقت ۰/۱میکرون و اندازه گیری سختی با دقت HRC ۰/۱ و نمایش دیجیتال قطر اثر و عمق نفوذ فرورونده است.

1 Indentur

شکل ۲-۱۵ دستگاه سختی‌سنج

۲-۴- روش تحقیق تجربی

۲-۴-۱ مبانی نظری طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌ها[1] (DOE)یکی از ابزارهای مهم آماری است که بطور گسترده برای بالا بردن کیفیت محصول به کار می‌رود. با این روش می‌توان منابعی که روی کیفیت محصول تأثیرگذار هستند را شناسایی کرده و با تغییر دادن اندازه عامل‌ها در یک محیط کنترل شده، با بررسی پاسخ‌های متفاوت، بهترین پاسخ را انتخاب نمود. طراحی آزمایشات مثل طراحی محصول است، بنابراین هدف باید کاملاً تعریف شده و مشخص باشد[۱۹].

اولین بهبود بوسیله طراحی آزمایش ها توسط فیشر در انگلستان و از سال ۱۹۳۰ ثبت شده‌است. فیشر نشان داد که آرایه کامل می‌تواند به تعداد کمتری تقلیل یابد که بر این اساس او مجموعه‌ای به نام طرح‌های عاملی کسری را بنا نهاد. از آن پس این مورد توجه بسیاری از محققان نظیر تاگوچی را به خود جلب کرد. آنان ایده‌های فیشر در مورد تکنیک‌های تجربی و سنتی ساخت مدل را با استفاده از طرح‌های

[1] Design Of Experiments

عاملی و طرح‌های عاملی کسری توسعه دادند. در دهه‌های ۱۹۵۰ در آمریکا از طراحی آزمایش ها (DOE) بمنظور بهبود محصول و فرآیند استفاده گردید. کاربرد این روش در صنایع شیمیایی بود. میزان استفاده از این روش در ابتدا تا اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل ۱۹۸۰زمانیکه شرکت‌های غربی متوجه شدند که شرکت های ژاپنی طراحی آزمایش‌ها را از دهه ۱۹۶۰ بطور سیستماتیک در فرآیند حل مسائل و مشکلات، توسعه فرآیندهای جدید، ارزیابی محصولات طراحی شده جدید، بهبود قابلیت اطمینان و عملکرد محصولات و انتخاب قطعات و تلرانس‌های سیستم بکار می‌بردند خیلی کم بود. این موضوع باعث گردید تا علاقه نسبت به آزمایش‌های طراحی شده از طریق آماری افزایش یابد و در نتیجه کمک کرد تا فعالیت‌های زیادی در راستای معرفی این روش در سازمان‌های مهندسی و توسعه‌ای در صنعت و رشته‌های مهندسی در دانشگاه‌ها آغاز گردد. طبق استاندارد10017 ISO، طراحی آزمایش‌ها اینگونه تعریف می‌شود:

"طراحی آزمایش به بررسی‌هایی اطلاق می‌شود که بصورت برنامه‌ریزی شده انجام پذیرفته و بر پایه ارزیابی آماری نتایج، برای رسیدن به جواب‌هایی در یک سطح اطمینان مشخص قرار دارد."

در این روش متغیرهای کلیدی که بر مشخصه کیفی مورد نظر فرآیند اثر می‌گذارند مشخص شده و می‌توان عامل‌های ورودی قابل کنترل را به طور سیستماتیک تغییر داد و اثرات آنها را بر روی پارامترهای محصول خروجی ارزیابی نمود. آزمایش‌هایی که بصورت آماری مطرح می‌گردند می‌توانند به مقدار قابل توجهی از میزان تغییرات در مشخصات کیفی بکاهند و همچنین سطوح متغیرهای قابل کنترل که باعث بهینه کردن عملکرد فرآیند می‌گردند را تعیین نمایند.

آزمایش‌های عاملی[1]

در اغلب آزمایش‌هایی که بمنظور شناسایی عیوب و بهبود فرآیند، طراحی می‌گردند، معمولاً تعدادی از متغیرها دخیل هستند. در چنین مواقعی می‌توان از طرح‌های آزمایشی عاملی و گونه‌های مختلف آنها استفاده کرد. یک طرح عاملی زمانی که ارزیابی اثرات چندین عامل مورد نظر باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بعضی از طرح‌ها، عامل‌های مورد مطالعه همگی با همدیگر تغییر می‌کنند. در حقیقت، منظور از آزمایش عاملی، آزمایشی است که در هر تکرار کامل آن کلیه ترکیبات سطوح عامل‌های مورد نظر بررسی می‌گردند. بنابراین، اگر دو عامل A و B را در نظر بگیریم بطوری که عامل A دارای a سطح و عامل B دارای b سطح باشد آنگاه هر تکرار این آزمایش دارای ab ترکیب مختلف خواهد بود.

در طرح‌های عاملی، اثر یک عامل بعنوان میزان تغییر در پاسخ مشاهده شده وقتی که سطح عامل مورد نظر تغییر داده شود تعریف می‌گردد. این اثر را به علت مرتبط بودن با عامل‌های اصلی مورد مطالعه، اثر اصلی می‌نامند.

- **تجزیه و تحلیل واریانس**

با فرض دو عامل A و B بطوری که عامل A دارای a سطح و عامل B دارای b سطح می‌باشد و اگر آزمایش n مرتبه تکرار گردد آنگاه داده‌های حاصل را می‌توان بصورت داده‌های ارائه شده در جدول ۲-۵ نشان داد. بطور کلی، مشاهده‌ای که در مرتبه k ام آزمایش در خانه ij قرار می‌گیرد را با y_{ijk} نشان می‌دهیم. ترتیب انجام آزمایش برای abn مشاهده حاصل بصورت تصادفی می‌باشد.

[1] Factorial Experiments

جدول ۲-۵ داده های یک طرح عاملی با دو عامل

		Factor B			
		1	2	…	B
Factor A	1	$y_{111}, y_{112}, \ldots, y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \ldots, y_{12n}$		$y_{1b1}, y_{1b2}, \ldots, y_{1bn}$
	2	$y_{211}, y_{212}, \ldots, y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \ldots, y_{22n}$		$y_{2b1}, y_{2b2}, \ldots, y_{2bn}$
	. . .				
	A	$y_{a11}, y_{a12}, \ldots, y_{a1n}$	$y_{a21}, y_{a22}, \ldots, y_{a2n}$		$y_{ab1}, y_{ab2}, \ldots, y_{abn}$

در این طرح مشاهدات بوسیله مدل زیر توصیف می‌گردند:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \in_{ijk} \begin{cases} i = 1,2,\ldots,a \\ j = 1,2,\ldots,b \\ k = 1,2,\ldots,n \end{cases} \qquad (۱-۲)$$

در مدل فوق μ اثر میانگین کل ، τ_i اثر عامل A در سطح i ، β_j اثر عامل B در سطح j و $(\tau\beta)_{ij}$ اثر متقابل بینA و B را نشان می دهند. $\in_{ijk}$ خطای تصادفی است که دارای توزیع نرمال مستقل با میانگین صفر و واریانس σ^2 می‌باشد. هدف اصلی چنین آزمایشهایی بررسی فرضیه‌های ذیل است:

۱- اثر عامل A معنی‌دار نیست، ۲- اثر عامل B معنی دار نیست و ۳- اثر متقابل AB معنی‌دار نیست.

بمنظور سهولت در محاسبات، مجموع مشاهدات در سطح i عامل A را با $y_{i..}$ ، مجموع مشاهدات در سطح j عامل B را با $y_{.j.}$ ، مجموع مشاهدات در خانه ij را با $y_{ij.}$ و مجموع کل مشاهدات را با $y_{...}$ نشان می‌دهیم. در این صورت میانگین سطر i ، میانگین ستون j ، میانگین خانه ij و میانگین کل به ترتیب برابر خواهند بود با $\bar{y}_{i..}$ ، $\bar{y}_{.j.}$ ، $\bar{y}_{ij.}$ ، $\bar{y}_{...}$ به عبارت دیگر:

$$y_{i\bullet\bullet} = \sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} y_{ijk} \qquad \bar{y}_{i\bullet\bullet} = \frac{y_{i\bullet\bullet}}{bn} \qquad i = 1,2,\ldots, a$$ (۲-۲)

$$y_{\bullet j\bullet} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{k=1}^{n} y_{ijk} \qquad \bar{y}_{\bullet j\bullet} = \frac{y_{\bullet j\bullet}}{an} \qquad j = 1,2,\ldots, b$$ (۳-۲)

$$y_{ij\bullet} = \sum_{k=1}^{n} y_{ijk} \qquad \bar{y}_{ij\bullet} = \frac{y_{ij\bullet}}{n} \qquad i = 1,2,\ldots, a \quad , \quad j = 1,2,\ldots, b$$ (۴-۲)

$$y_{\bullet\bullet\bullet} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} y_{ijk} \qquad \bar{y}_{\bullet\bullet\bullet} = \frac{y_{\bullet\bullet\bullet}}{abn}$$ (۵-۲)

در تجزیه و تحلیل واریانس مجموع مربعات تصحیح شده داریم:

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} (y_{ijk} - \bar{y}_{\bullet\bullet\bullet})^2$$ (۶-۲)

که بصورت زیر تفکیک می‌گردد:

$$\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} (y_{ijk} - \bar{y}_{\bullet\bullet\bullet})^2 = bn\sum_{i=1}^{a} (y_{i\bullet\bullet} - \bar{y}_{\bullet\bullet\bullet})^2 + an\sum_{j=1}^{b} (\bar{y}_{\bullet j\bullet} - \bar{y}_{\bullet\bullet\bullet})^2$$
$$+ \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} (\bar{y}_{ij\bullet} - \bar{y}_{i\bullet\bullet} - \bar{y}_{\bullet j\bullet} + \bar{y}_{\bullet\bullet\bullet})^2 + \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} (y_{ijk} - \bar{y}_{ij\bullet})^2$$ (۷-۲)

و یا:

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E$$ (۸-۲)

درجه آزادی متناظر با هر یک از مولفه‌های این رابطه از قرار زیر می‌باشد:

$$abn - 1 = (a-1) + (b-1) + (a-1)(b-1) + ab(n-1) \qquad (۲-۹)$$

معمولاً در تجزیه تحلیل واریانس، محاسبات بصورت خلاصه شده در جدولی نظیر جدول ۲-۶ ارائه می‌گردد. بمنظور پی بردن به وجود و یا عدم وجود اثرات عاملهای سطری و ستونی و همچنین اثرات متقابل، میانگین مربعات متناظر با هر اثر بر میانگین مربع خطا تقسیم می‌شود. هر یک از این نسبتها دارای توزیع F با درجه آزادی صورت برابر با درجه آزادی میانگین مربعات صورت و درجه آزادی مخرج برابر $ab(n-1)$ خواهد بود. اگر مقدار F محاسبه شده از مقدار F حاصل از جدول توزیع F (ضمیمه پایان‌نامه) بیشتر باشد، فرضیه مورد نظر، رد می‌شود.

جدول ۲-۶ تجزیه تحلیل واریانس برای یک آزمایش دو عاملی

Source	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
A	SS_A	$a-1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	$b-1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interaction	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	$ab(n-1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
Total	SS_T	$abn-1$		

گرچه در اغلب مواقع این محاسبات را با برنامه کامپیوتر انجام می‌شود ولی رابطه‌های ساده نیز برای جمع مربعات وجود دارد که در صورت نیاز می‌توان از آنها استفاده کرد. مجموع مربعات کل از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} y^2{}_{ijk} - \frac{y^2{}_{\bullet\bullet\bullet}}{abn} \qquad (۱۰-۲)$$

مجموع مربعات اثرات اصلی را می‌توان با استفاده از رابطه‌های زیر تعریف کرد:

$$SS_A = \sum_{i=1}^{a} \frac{y^2{}_{i\bullet\bullet}}{bn} - \frac{y^2{}_{\bullet\bullet\bullet}}{abn} \qquad (۱۱-۲)$$

و

$$SS_B = \sum_{j=1}^{b} \frac{y^2{}_{\bullet j\bullet}}{an} - \frac{y^2{}_{\bullet\bullet\bullet}}{abn} \qquad (۱۲-۲)$$

مجموع مربعات مربوط به اثرات متقابل معمولاً در دو مرحله محاسبه می‌شود. ابتدا جمع مربعات بین مقادیر کل حاصل از ab خانه که از آن بعنوان جمع مربعات جزء کل نامبرده (Subtotal) می‌شود، بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$SS_{subtotal} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} \frac{y^2{}_{ij\bullet}}{n} - \frac{y^2{}_{\bullet\bullet\bullet}}{abn} \qquad (۱۳-۲)$$

جمع مربعات فوق شامل SS_A و SS_B است. بنابراین ، در مرحله دوم SS_{AB} به‌صورت محاسبه می‌گردد:

$$SS_{AB} = SS_{Subtotals} - SS_A - SS_B$$ (۱۴-۲)

جمع مربعات خطا را می‌توان از طریق هر یک از رابطه‌های زیر محاسبه نمود:

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B$$ (۱۵-۲)

یا

$$SS_E = SS_T - SS_{subtotal.}$$ (۱۶-۲)

کمیت "R- squred" که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\boldsymbol{R^2 = \frac{SS_{Model}}{SS_{Total}}}$$ (۱۷-۲)

را می توان به عنوان میزان تغییرات توضیح داده شده توسط مدل تحلیل واریانس در نظر گرفت. بدیهی است که مقدار R^2 باید بین صفر و یک باشد($0 \leq R^2 \leq 1$) و مقادیر بزرگتر رضایت بخش تر است. در این خروجی، آماره های R^2 دیگری نیز نشان داده شده‌است. R^2 تعدیل شده[1] گونه دیگری از آماره R^2 متداول است که تعداد عامل های موجود در مدل در آن لحاظ شده‌است[۲۱].

۲-۴-۲ طراحی آزمایش‌ها

یک آزمایش خوب طراحی شده از اهمیت زیادی برخوردار است چرا که نتایج و نتیجه‌گیری های حاصل از آن به میزان قابل توجهی بستگی به نحوه ی جمع‌آوری داده ها دارد. به طور کلی آزمایش‌ها با هدف مطالعه‌ی عملکرد فرآیندها و سیستم‌ها استفاده می شوند. برای هر مساله‌ی آزمایشی دو جنبه وجود دارد:۱- طراحی آزمایش و ۲- تجزیه و تحلیل داده ها.

---

[1] Adjuared R^2

در جدول ۲-۷ عوامل و سطوح مورد بررسی در این تحقیق ارائه شده‌است در این تحقیق پارامترهای مهمی که تحت بررسی قرار گرفته اند، به عنوان سطوح پاسخ ،تعریف شده اند. زبری سطح قطعات آهنگری شده و ضریب اصطکاک سطوح ماشین‌کاری شده به عنوان سطوح پاسخ تعریف شده اند و پارامترهای روش‌های ماشینکاری و مکانیزم روانکاری جهت بررسی در این تحقیق انتخاب شده اند. برای بررسی تأثیر این عوامل بر روی هر یک از رویه‌های پاسخ بایستی محدوده مناسبی را برای هر عامل در نظر گرفت. این محدوده برای روش‌های ماشینکاری شش روش و برای مکانیزم روانکاری دو مکانیزم است. با طراحی آزمایش‌ها به روش طرح عاملی با دو عامل [۲۱] تعداد کل آزمایش‌ها برای این فرآیند ۱۲ آزمایش توسط نرم افزار مینی‌تب بدست آمد، جدول ۲-۸ .

جدول ۲-۷ عوامل و سطوح آن در طراحی آزمایش‌ها

عامل	عنوان	تعدادسطح	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴	سطح ۵	سطح ۶
عامل ۱	روش تولید اینسرت	۶	فرزکاری افقی HM	فرزکاری عمودی VM	EDM	سنگ‌زنی GR	سنگ‌زنی و پرداخت‌کاری GF	پیشانی تراشی TN
عامل ۲	سیستم روانکاری	۲	خشک	روانکاری با پارافین	-	-	-	-

جدول ۲-۸ طرح آزمایش ها

Run	M.P	L.S
1	HM	Dry
2	HM	Lubricated
3	VM	Dry
4	VM	Lubricated
5	EDM	Dry
6	EDM	Lubricated
7	GR	Dry
8	GR	Lubricated
9	GF	Dry
10	GF	Lubricated
11	TN	Dry
12	TN	Lubricated

۲-۴-۳ رویه های انجام آزمایش ها

در این تحقیق با هدف بررسی اثر مولفه‌های ساخت قالب بر تریبولوژی سطح تماس در عملیات آهنگری، نخست نمونه‌های قالب با روش‌های مختلف از جمله فرزکاری، تراشکاری، تخلیه الکتریکی و سنگ زنی ساخته شد. این فرایندها منجر به سطوحی با بافت سطحی و جهت‌گیری زبری سطح متفاوت شد. از سوی دیگر زبری‌های سطوح مختلف با کنترل متغیرهای فرآیند ساخت قابل دستیابی است. بررسی اثر عوامل فوق بر نحوه جریان پلاستیک و ضریب اصطکاک با اجرای آزمون فشار حلقه

مورد ارزشیابی قرار می گیرد. برای بررسی اثر متقابل بافت سطح، زبری سطح و شرایط روانکاری، در اجرای آزمون حلقه، از دو نوع سیستم روانکاری بین سطح قالب و قطعه استفاده می شود. تاکنون سابقه‌ای از تحقیق بر روی بررسی اثر روش ساخت قالب بر تریبولوژی سطح تماس در فرآیند آهنگری مشاهده نشده‌است. با توجه به اهمیت مؤلفه‌های تریبولوژی سطح مانند اصطکاک، زبری سطح و سایش در فرایندهای شکل‌دهی فلزات، نتایج حاصل از این تحقیق می تواند در انتخاب روش مناسب‌تر برای ساخت قالب آهنگری بکار گرفته شود. هدف از انجام این تحقیق و بررسی تریبولوژی سطوح قالب های آهنگری با بدست آوردن ضریب اصطکاک و زبری سطح در فرآیند های مختلف ماشین کاری است. به منظور کاهش ضریب خطا هر آزمایش روی دو نمونه ی یکسان انجام شده‌است. آزمون فشار حلقه در دو میزان کارسرد r=٪۲۵ و r=٪۵۰ انجام شده‌است، شکل ۲-۱۶، از طرفی هر آزمایش در دو حالت بدون استفاده از روانکار (تحت شرایط خشک) و همچنین با استفاده از روانکار(روغن پارافین) انجام شد.

شکل ۲-۱۶ آزمون فشار حلقه در دو میزان کارسرد r= ٪۲۵ و r =٪۵۰

r = 0% r = 25% r = 50%

۲-۵- معرفی روش عددی

۲-۵-۱ روش المان محدود و معرفی نرم‌افزار شبیه‌سازی

در سال‌های اخیر روش اجزای محدود[1] به یک ابزار بسیار قدرتمند برای شبیه‌سازی فرایندهای تولید تبدیل گردیده است. هنگام تدوین و توسعه یک فرایند جدید، شبیه‌سازی صحیح فرایند و آزمایش پارامترهای مختلف آن در ابتدای امر بسیار موثر بوده و به این ترتیب طراحی ساختار صحیح و انتخاب پارامترهای صحیح فرایند قبل از آزمایش عملی ممکن خواهد بود. در نتیجه زمان صرف شده و تعداد آزمایش و خطا کاهش یافته و منجر به کاهش هزینه‌های تولید خواهد گردید. از جمله برنامه‌های متداول صریح المان محدود، می‌توان به LS-DYNA3D، ANSYS و ABAQUS، اشاره کرد.

به علت قابلیت‌های بالای نرم‌افزار آباکوس در تحلیل تغییر شکل وسیع فلزات نسبت به سایر نرم-افزارهای اجزای محدود، در این پژوهش از نرم‌افزار فوق استفاده گردید. از جمله خصوصیات بارز این نرم‌افزار که آن را نسبت به سایر نرم‌افزارهای مشابه متمایز کرده، راحتی استفاده، دقت و سرعت بالای محاسبات است. از این‌رو شرکت‌های بزرگ اتومبیل‌سازی برای طراحی‌های پیشرفته خود به استفاده از این نرم‌افزار روی آورده‌اند. امروزه آباکوس به عنوان یک نرم‌افزار انعطاف‌پذیر در حل مسائل به روش اجزای محدود در پژوهشکده‌های مهندسی دنیا جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده و به عنوان نرم‌افزار قدرتمند مهندسی در مراکز تحقیقات اغلب صنایع استفاده می‌شود. یک بسته نرم‌افزاری آباکوس دارای سه محصول اصلی است که شامل موارد زیر است:

۱- ABAQUS/Standard: محصول اصلی شرکت آباکوس است که با استفاده از آن می‌توان گستره وسیعی از مسائل خطی و غیرخطی شامل مسائل استاتیکی، دینامیکی، انتقال حرارت و الکترونیک را تحلیل کرد. این محصول دستگاه معادلات حاکم را در هر نمو[2] به‌صورت ضمنی تحلیل می‌کند. در این

---

[1] Finite element (FE)

[2] Increment

روش، کاربر می‌تواند میزان نمو در هر مرحله[1] را تعیین کند یا از روش نیوتن-رافسون اصلاح شده‌استفاده نماید.

۲- ABAQUS/Explicit: محصولی با اهداف ویژه است که برای مدل‌سازی مسائل دینامیکی گذرا مانند برخورد و ضربه‌ی انفجار، آزمایش ضربه، مچالگی و همچنین مسائل شبه استاتیکی یا مسائل غیرخطی که در آنها شرایط تماس تغییر می‌کند (مانند شکل‌دهی) مناسب است. این محصول، دستگاه معادلات حاکم را بر پایه قانون انتگرال‌گیری صریح به همراه استفاده از ماتریس جرم قطری المان، تحلیل می‌کند. در این روش تعیین اندازه‌ی نمو در مسائل غیرخطی توسط کاربر ممکن نبوده و نرم-افزار بر اساس شرایط پایداری، میزان نمو در هر مرحله را به‌صورت اتوماتیک محاسبه می‌کند.

۳- ABAQUS/CAE: به عنوان یک رابط گرافیکی کاربر در بسته نرم‌افزاری آباکوس گنجانده شده‌است. این محصول به کاربر کمک می‌کند که یک مدل هندسی را سریعاً و به‌سادگی بسازد یا از یک نرم‌افزار مدل‌سازی دیگر وارد کند. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان مدل هندسی قطعه را گسسته‌سازی و خواص مواد آن را تعیین و شرایط مرزی و بار اعمالی را مشخص کرد.

در این پژوهش از نرم‌افزار ABAQUS-6.13 برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده‌است.

۲-۵-۲ شبیه‌سازی فرایند تست حلقه

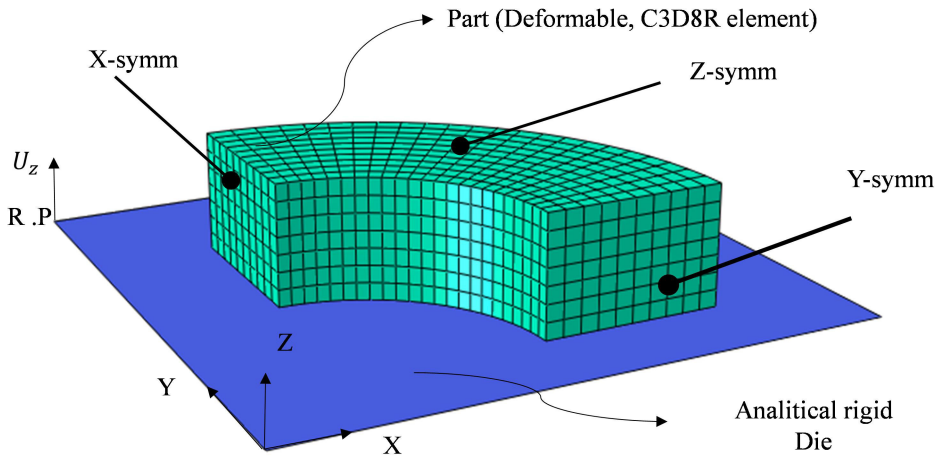
یکی از بخش‌های مهم پژوهش صورت گرفته، شبیه‌سازی فرایند تست حلقه است. در انجام مراحل شبیه‌سازی، سعی شد تا مدل عددی مشابه آزمایش تجربی تست حلقه، باشد. در زیر شرح مختصری از مراحل شبیه‌سازی این فرایند آمده است.

[1] Step

۲-۵-۳ مدل هندسی

در این تحلیل قالب‌ها به صورت صلب تحلیلی[1] مدل شدند. به دلیل تقارن صفحه‌ای استوانه‌ی اولیه، یک‌هشتم استوانه‌ی همسانگرد مدل شد و بر روی لبه‌های تقارن، شرایط تقارن صفحه‌ای اعمال شد. این استوانه به‌صورت

جامد تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته شد. در شکل ۲-۱۷، شماتیک قالب و قطعه ارائه شده‌است.



شکل ۲-۱۷ شماتیک آزمون حلقه

۲-۵-۴ تعیین خصوصیات ماده

خصوصیات مکانیکی قطعه، شامل منحنی تنش-کرنش مومسان حقیقی، شکل ۲-۱۸، نسبت پواسون، مدول یانگ و چگالی مطابق و برای آلیاژ ck۴۵ استفاده شد. این قطعه‌کار، همگن و همسانگرد است.

جدول ۲-۱۰ خواص مکانیکی قطعات ck۴۵[۲۱]

چگالی (kg/m^3)	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم در (MPa)	نسبت پواسون

[1] Analytical rigid

۰/۳	۴۵۰	۲۰۰	۷۸۵۰

1

شکل ۲-۱۸ نمودار تنش-کرنش حقیقی ck۴۵ در کشش[۱۲]

۲-۵-۵ تعیین تعداد گام و نوع حل مسئله

در شبیه‌سازی فرایند تست حلقه، تحلیل‌ها دریک مرحله انجام شد. با توجه به نوع زیربرنامه، از حل‌گر استاتیکی استاندارد استفاده شد. زمان تحلیل فرآیند یک ثانیه و تنظیمات نمو زمانی اتوماتیک تنظیم شده‌است.

۲-۵-۶ تعیین نوع تماس سطوح

در تعیین شرایط تماسی بین سطوح، ابتدا مشخصات فیزیکی تماس و سپس نوع تماس تعریف می‌شود. مشخصات فیزیکی تماس از نوع رفتار مماسی تعریف شد. سپس، برای تعیین ضریب اصطکاک کولمبی، از گزینه‌ی پنالتی با قابلیت ناهمسانگرد استفاده شد. ضریب اصطکاک تماسی متناسب با نوع فرآیند متفاوت می باشد. نوع تماس‌ها، سطح به سطح در نظر گرفته شد.

۲-۵-۷ شرایط مرزی و بارگذاری

شرایط مرزی استفاده شده به دو دسته قیود تقسیم می‌شوند. نوع اول، قید مربوط به تقارن صفحه‌ای است که به صفحات برش شده اعمال گردید (شکل ۲-۱۶) و یک‌هشتم قطعه شبیه سازی شده‌است.

نوع دوم، قید جابجایی است که برای محدودکردن درجه‌های آزادی قالب و همچنین جابه‌جایی قالب بالا، داده شد. مقدار جابه‌جایی ۱/۲ mm برای قالب بالا در نظر گرفته شد. نحوه‌ی اعمال جابه‌جایی در قسمت دامنه[1] به‌صورت گام نرم[2] تعیین شد.

۲-۵-۸ مش‌بندی

برای انجام تحلیل، از تکنیک المان‌بندی سازه‌ای(structured) و المان ۶وجهی HEX با شماره استاندارد المان(C3D8R) المان پیوسته‌ی سه‌بعدی انتگرال کاهش یافته نوع کنترل ساعت شنی(Hourglass) برای قطعه استفاده شد. قالب‌ها که به صورت صلب تحلیلی تعریف شده‌اند نیاز به شبکه‌بندی ندارد. تعداد المان‌ها ۱۶۱۰ المان است.

[1] Amplitude

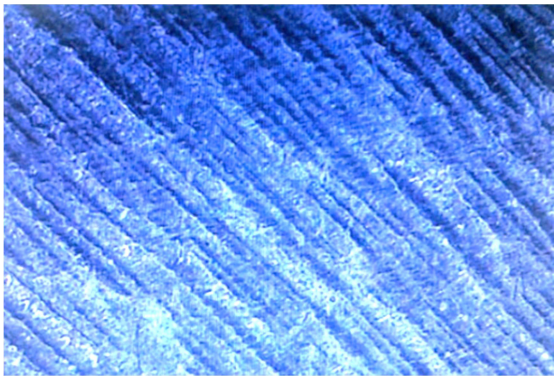
[2] Smooth step

فصل ۳ نتایج و بحث

در این فصل نتایج تجربی و عددی بدست آمده از تحقیق به شرح زیر ارائه خواهدشد. ابتدا بافت سطح ایجادشده از روش‌های مختلف ساخت اینسرت و سپس نتایج آزمون حلقه ارائه می‌شود. در ادامه منحنی کالیبراسیون بدست‌آمده از روش عددی به همراه نتایج تجربی هندسه تغییرشکل نمونه‌ها در تست حلقه بیان می‌شود. همچنین تحلیل آماری نتایج ضریب اصطکاک و زبری سطح بدست‌آمده از روش تجربی ارائه خواهدشد.

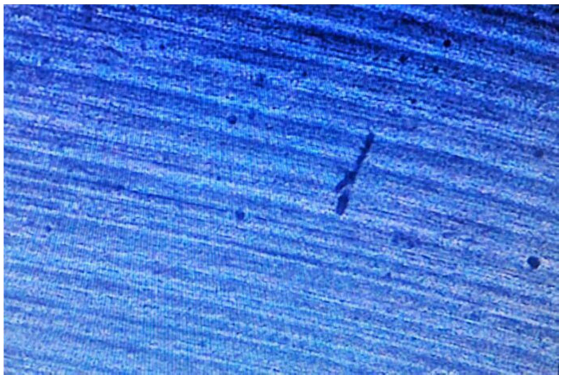
۳-۱- اثر روش ساخت اینسرت بر بافت سطح

در شکل ۳-۱ بافت سطح بدست آمده برای اینسرت قالب که به وسیله روش‌های مختلف تولید ماشین‌کاری شده، نمایش داده شده‌است.



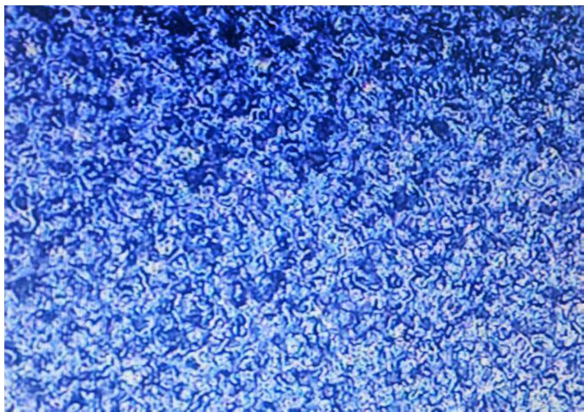
الف: HM

$R_a = 2\ \mu m$



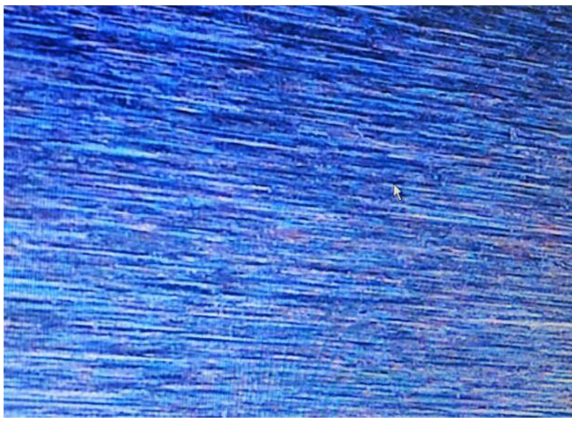
ب: VM

$R_a = 3\ \mu m$



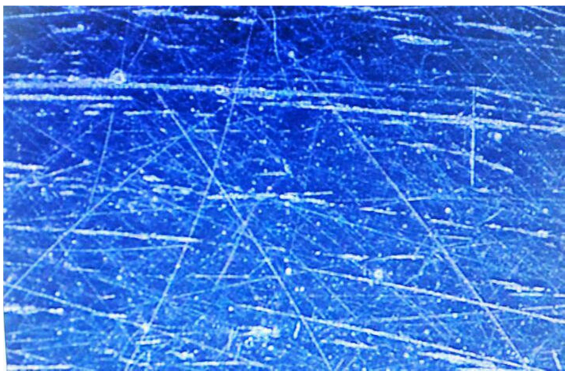
ج: EDM

$R_a = 3\ \mu m$



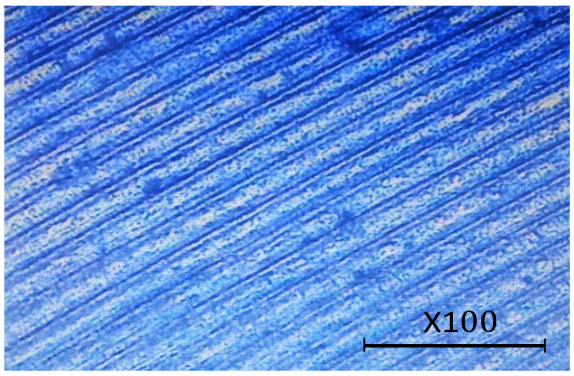
د: GR

$R_a = 0.35\ \mu m$



ه: GF

$R_a = 0.025\ \mu m$



و: TN

$R_a = 3\ \mu m$

شکل ۳-۱ بافت سطح اینسرت قالب بدست آمده از روشهای الف)فرزکاری افقی، ب)فرزکاری عمودی،

ج)ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی، د)سنگ‌زنی ه)سنگ‌زنی و پرداخت، و)پیشانی‌تراشی با دستگاه تراش. (x100)

مطابق شکل فرآیندهای EDM و GF منجربه بافت سطح تصادفی، فرآیندهای HM و GR بافت سطح یکسویه و VR بافت سطح یکسویه‌ی انحنادار و TN بافت سطح دوسویه‌ی (دوایرهم‌مرکز) تولید خواهدکرد.

۳-۲- نتایج آزمون حلقه

۳-۲-۱ نمونه‌های تغییرشکل یافته

حلقه های فشرده شده با ۵۰٪ کار سرد در شکل ۳-۲ بدون روانکار و شکل ۳-۳ با روانکار نشان داده شده‌است. شکل‌دهی با اینسرت ماشین‌کاری شده با روش VM منجر به نمونه‌هایی کاملاً غیرمتقارن شده‌است، که از ناهمسانگردی آشکار رفتار اصطکاکی سطح حکایت می کند. در بقیه‌ی موارد تغییر شکل نسبتاً همسانگرد ایجاد شده‌است.

الف: HM

ب: VM

ج: EDM

د: GR

ه: GF

و: TN

شکل ۳-۲ حلقه‌های شکل داده‌شده در حالت بدون روانکار با اینسرت‌های مختلف

نتایج مشابه مربوط به حلقه‌های شکل داده شده با روانکاری پارافین در شکل ۳-۳ نمایش داده‌شده‌است.

غیریکنواختی تغییرشکل در نمونه HM و VM همچنان مشابه حالت خشک وجود دارد.

الف: HM

ب: VM

ج: EDM

د: GR

ه: GF

و: TN

شکل ۳-۳ حلقه‌های شکل داده‌شده با استفاده از روانکار پارافین با اینسرت‌های مختلف

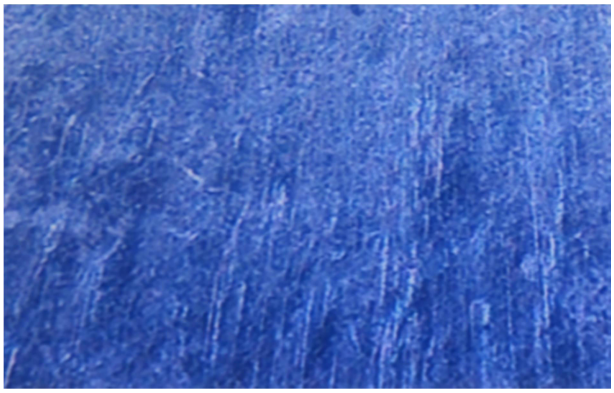
به منظور بررسی میزان غیریکنواختی شرایط اصطکاکی، پس از اندازه‌گیری بزرگترین و کوچکترین قطر داخلی و خارجی، اختلاف قطر بزرگ و کوچک به صورت درصد محاسبه، برای نمونه‌های فشرده شده با اینسرت‌های مختلف در جدول ۳-۱ گزارش شده‌است.

جدول ۳-۱غیر یکنواختی تغییر قطر در آزمون‌های مختلف فشار حلقه

فرآیند	خشک			روانکاری		
	غیریکنواختی قطر داخلی (٪)	غیریکنواختی قطر خارجی (٪)	متوسط غیریکنواختی قطر (٪)	غیریکنواختی قطر داخلی (٪)	غیریکنواختی قطر خارجی (٪)	متوسط غیریکنواختی قطر (٪)
HM	۲/۸	۱/۶	۲/۲	۱/۸	۲/۵	۲/۱۵
VM	۷/۸	۷/۸	۷/۸	۸/۶	۷/۵	۸/۰۵
EDM	۱/۱	۱/۶	۱/۳۵	۱/۵	۰/۶	۱/۰۵
GR	۱/۶	۰/۷	۱/۱۵	۲/۵	۱/۱	۱/۸
GF	۲/۱	۰/۶	۱/۳۵	۳/۳	½	۲/۲۵
TN	۱/۳	۰/۹	۱/۱	۲/۲	۱	۱/۶
Min	۱/۱	۰/۶	۱/۱	۱/۵	۰/۶	۱/۰۵
Max	۷/۸	۷/۸	۷/۸	۸/۶	۷/۵	۸/۰۵

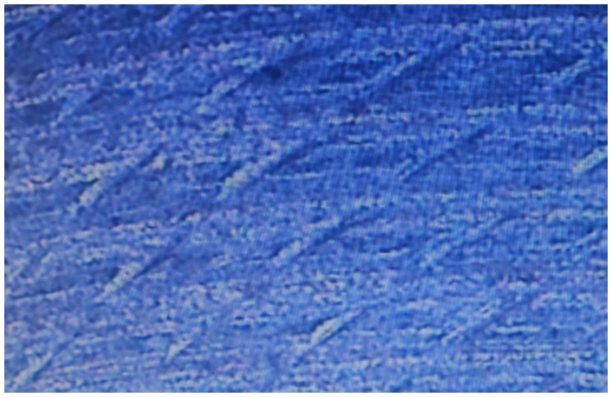
نتایج جدول فوق نشان می‌دهد اولاً در شرایط روانکاری به صورت متوسط غیریکنواختی بیشتری نسبت به حالت خشک ایجاد خواهدشد. ثانیاً بیشترین غیریکنواختی در هردوحالت خشک و روانکاری مربوط به اینسرت VM می‌باشد. ثالثاً فرآیندهای EDM و TN کمترین غیریکنواختی تغییرشکل را نشان می‌دهد.

در شکل ۳-۴ بافت سطح نمونه‌های شکل داده‌شده با اینسرتهای مختلف نمایش داده‌شده‌است. مطابق شکل بافت سطح قطعات تا حد زیادی متأثر از سطح اینسرت خواهد بود. با توجه به زبری اولیه‌ی قطعه که برابر ۰/۵ µm می باشد، اینسرت‌های GF و GR منجر به کاهش زبری سطح و اینسرت‌های دیگر به مقتضی زبری سطح خود باعث افزایش زبری قطعه شده‌است. همچنین خواب سطح قطعه نیز متأثر از قالب است، به عنوان مثال اینسرت EDM خواب سطح تصادفی و اینسرت TN خواب سطح دوسویه‌ی (دوایرهم‌مرکز) ایجاد خواهد کرد. حلقه‌های فشرده شده با اینسرت VM، زبری سطح بالایی را ایجاد کرده است که از زبری اولیه بالا با جهت یکسویه اینسرت ناشی شده‌است.



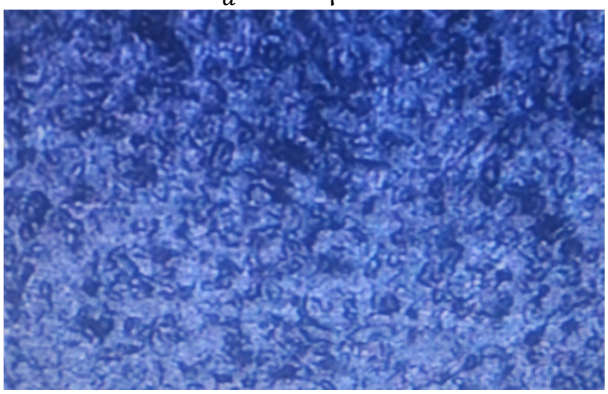
الف: HM

$R_a = 2.2\ \mu m$



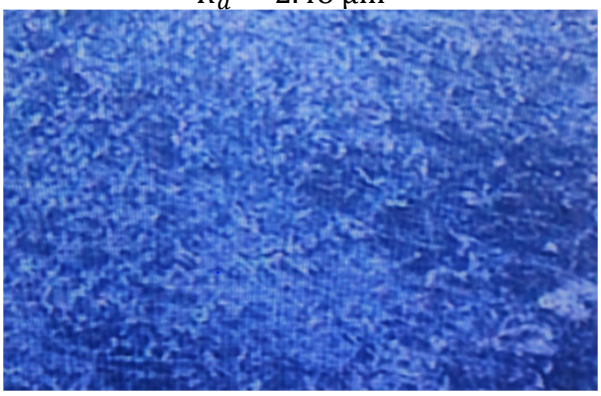
ب: VM

$R_a = 2.48\ \mu m$



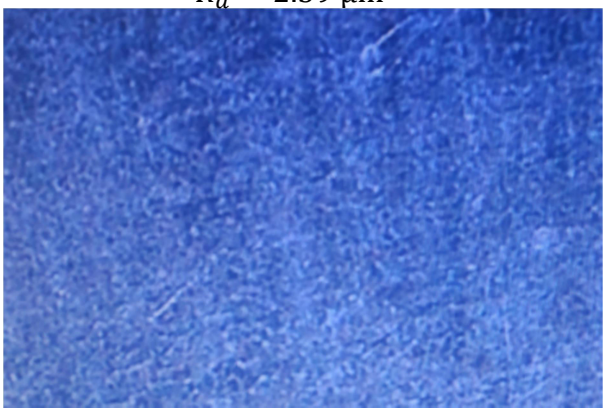
ج: EDM

$R_a = 2.39\ \mu m$



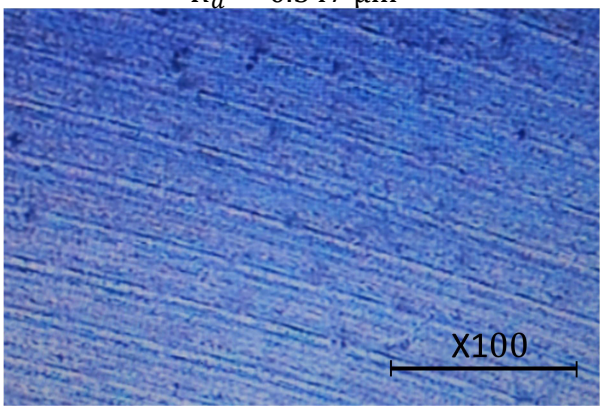
د: GR

$R_a = 0.347\ \mu m$



ه: GF

$R_a = 0.307\ \mu m$



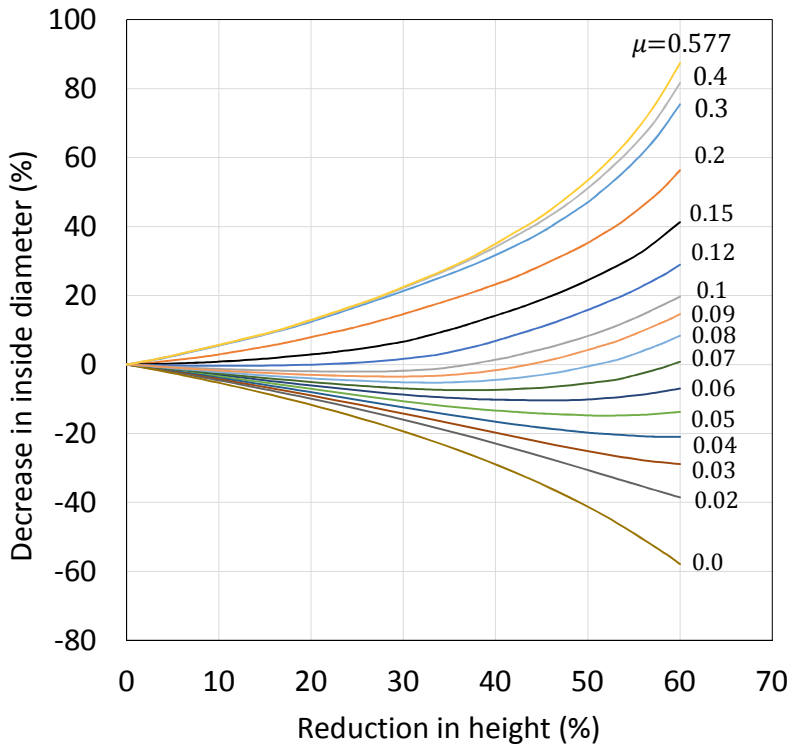
و: TN

$R_a = 1.98\ \mu m$

شکل ۳-۴ بافت سطح نمونه‌های شکل داده‌شده با اینسرت‌های تولید شده به روش الف)فرزکاری افقی، ب)فرزکاری عمودی، ج)ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی، د)سنگ‌زنی ه)سنگ‌زنی و پرداخت، و)پیشانی‌تراشی با دستگاه تراش.(x100)

۳-۲-۲ منحنی کالیبراسیون اصطکاک به کمک روش عددی

در آزمون فشار حلقه برای آهنگری سرد به منظور اندازه‌گیری اصطکاک نیازی به دانستن مقدار نیروی لازم برای تغییر شکل دادن نمونه و میزان تنش سیلان نیست. بدین طریق ارزیابی نتایج آزمایش به شدت ساده می‌شود.پس از انجام چندین تست فشار حلقه برای شرایط تماسی خاص، با اندازه‌گیری تغییرات قطر داخلی و ارتفاع, درصد تغییرات طبق روابط ۱-۴ محاسبه می‌شود. شکل ۳-۵ منحنی های کالیبراسیون اصطکاکی شبیه سازی شده برای حلقه ای با نسبت ۶:۳:۲ را نشان می‌دهد. این تحلیل برای اندازه‌گیری تغییرات ابعادی قطر داخلی حلقه به نسبت با کاهش ارتفاع تحت شرایط اصطکاکی مختلف، انجام می شود. با استفاده از شبیه سازی المان محدود، مطالعه‌ای مقایسه‌ای بین شبیه سازی المان محدود و آزمایش تجربی درباره آزمایش فشار حلقه امکان پذیر می باشد. شبیه‌سازی با ۱۶ ضریب اصطکاک از μ=۰/۰ تا μ= ۰/۵۷۷ انجام شد.وبا تغییرات ابعاد بدست آمده از نتایج شبیه سازی منحنی های کالیبراسیون اصطکاکی رسم شد.

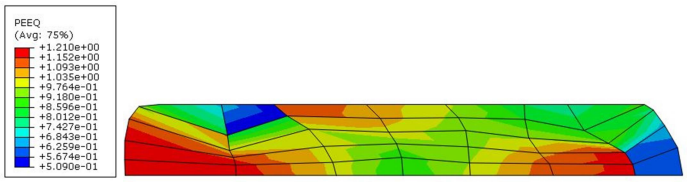


شکل ۳-۵ منحنی کالیبراسیون ضریب اصطکاک به دست آمده از آزمون فشار حلقه با نسبت ۶:۳:۲

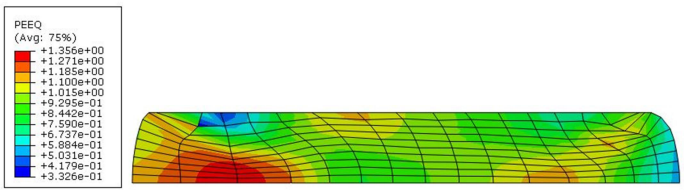
منحنیهای کالیبراسیون اصطکاکی باید برای هر جنس خاص حلقه تحت دماهای خاص قالب و حلقه و شرایط خاص سرعت کوبه تولید شوند. ولی تحقیقات نشان میدهد که تحت شرایط آهنگری سرد، این منحنیها را میتوان به عنوان همگانی درنظر گرفت، زیرا خواص ماده (یعنی کرنش سختی) تأثیر کمی بر منحنی دارد[۲۰].

۳-۲-۳ استقلال نتایج از اندازه‌ی المان

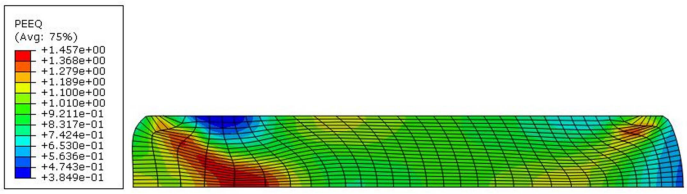
مطابق شکل ۳-۶ با تحلیل انجام گرفته برای ضریب اصطکاک خاص در چهار اندازه مش مختلف به این نتیجه رسیدیم که ریز شدن مش، موجب همگرایی توزیع کرنش مؤثر مومسان می‌شود .



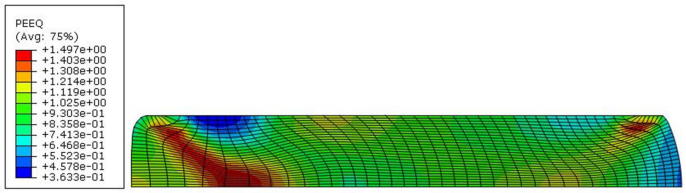
(الف)



(ب)



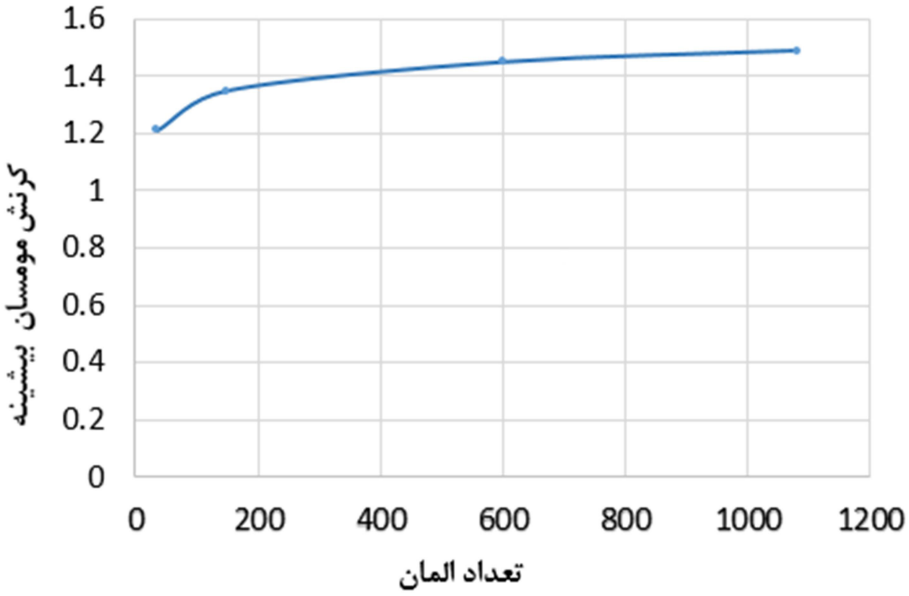
(ج)



(د)

شکل ۳-۶ اثر تعداد المان بر توزیع کرنش مؤثر مومسان. الف: ۳۵ المان. ب: ۱۵۰ المان، ج: ۶۰۰ المان، د: ۱۰۸۰ المان

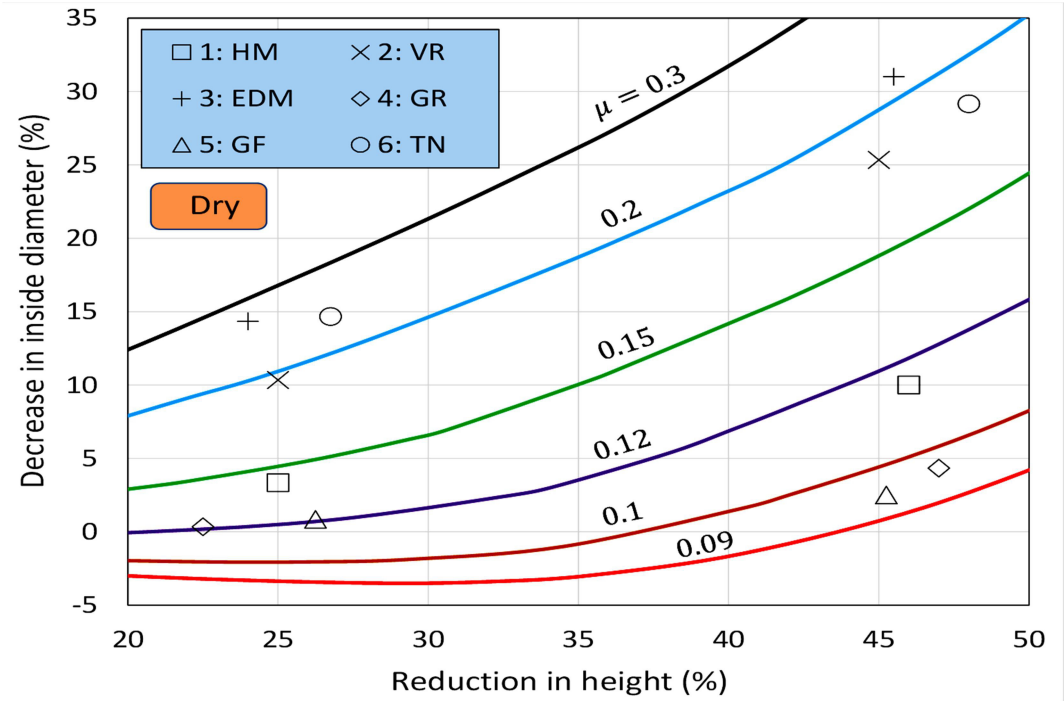
مطابق شکل ۳-۷، با افزایش تعداد المان و ریز شدن مش کرنش بیشینه به سمت همگرایی میل کرده است. به نظر استفاده از تعداد المان ۶۰۰ مطلوب می‌باشد. و ریز شدن بیشتر تأثیر قابل توجهی در دقت نتایج نخواهد داشت. تغییرات کرنش بیشینه به ازای تعداد المان در شکل ۳-۷ نمایش داده شده است.



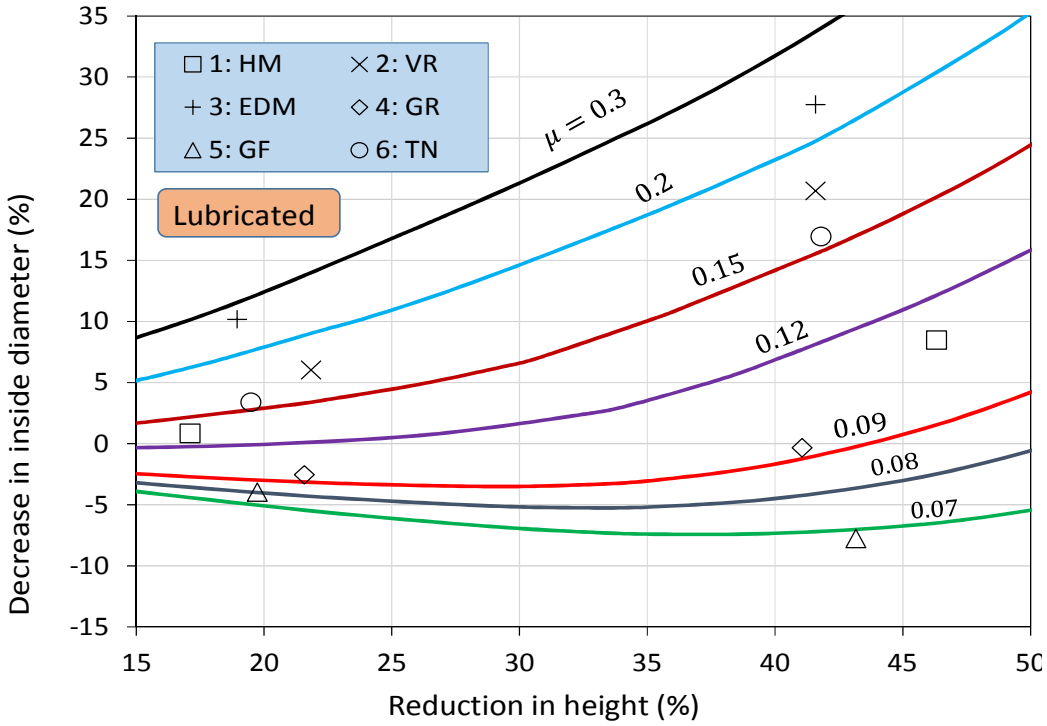
شکل ۳-۷ تغییرات کرنش بیشینه به ازای تعداد المان

۳-۲-۴ مقایسه نتایج تجربی و عددی

در شکل ۳-۸ و شکل ۳-۹ نتایج تجربی حاصل از آزمایش‌های تجربی با نمودارهای شبیه‌سازی عددی مقایسه و نشان داده شده‌است.



شکل ۳-۸ تطبیق نتایج تجربی فشار حلقه درحالت خشک با منحنی کالیبراسیون اصطکاک به دست آمده از شبیه‌سازی عددی



شکل ۳-۹ تطبیق نتایج تجربی فشار حلقه درحالت روانکاری‌شده با منحنی کالیبراسیون اصطکاک به دست آمده از شبیه‌سازی عددی

۳-۳- تحلیل آماری نتایج ضریب اصطکاک

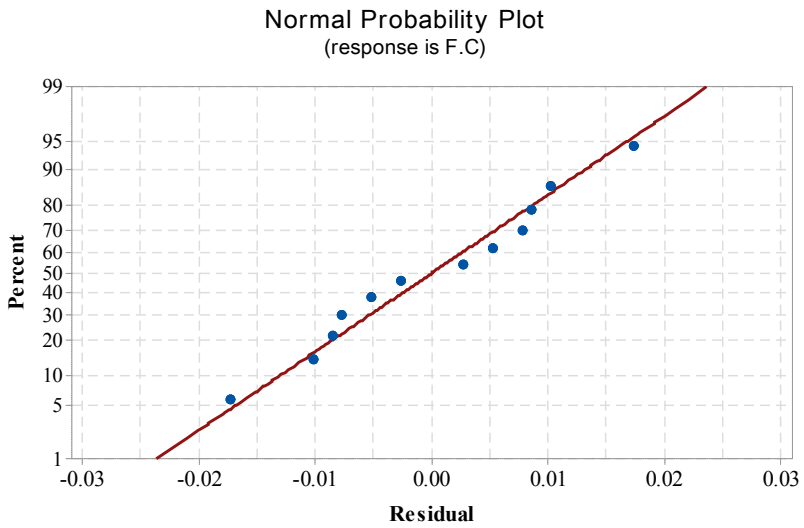
ضرایب اصطکاک بدست‌آمده برای سطوح مختلف ماشین‌کاری شده در جدول ۳-۲ ارائه شده‌است. در این جدول ضریب اصطکاک و تغییرات آن در شکل‌دهی با استفاده از اینسرت‌های ماشین‌کاری شده به روش‌های مختلف ارائه شده‌است. نتایج برای درصد کاهش ارتفاع ۲۵٪ و ۵۰٪ به صورت مجزا اندازه‌گیری و مقدار متوسط و اختلاف این دو نیز در دو سطر بعد ذکر شده‌است. به صورت مشابه این نتایج برای حالت روانکاری نیز در ستون‌های بعدی مشخص و در نهایت در ستون آخر اثر متوسط استفاده از روانکار بر ضریب اصطکاک بیان شده‌است. کاهش ضریب اصطکاک در اثر استفاده از روانکار در مقایسه با حالت خشک در اغلب روش‌ها قابل مشاهده است.

جدول ۳-۲ ضریب اصطکاک و تغییرات آن در فرآیند آهنگری فشار حلقه، در دوحالت خشک و روانکاری، با استفاده از اینسرت‌های ماشینکاری شده به روش‌های مختلف

	کاهش ارتفاع	HM	VM	EDM	GR	GF	TN
ضریب اصطکاک خشک	٪۲۵	۰/۱۴	۰/۲	۰/۲۸	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۲۵
	٪۵۰	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۲۲	۰/۱	۰/۰۹۵	۰/۱۸
	متوسط	۰/۱۳	۰/۱۹	۰/۲۵	۰/۱۱	۰/۱۰۷۵	۰/۲۱۵
	اختلاف	-۰/۰۲	-۰/۰۲	-۰/۰۶	-۰/۰۲	-۰/۰۲۵	-۰/۰۷
ضریب اصطکاک روانکاری	٪۲۵	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۲۸	۰/۱	۰/۰۸	۰/۱۶
	٪۵۰	۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۲۲	۰/۱	۰/۰۶	۰/۱۶
	متوسط	۰/۱۲۵	۰/۱۷۵	۰/۲۵	۰/۱	۰/۰۷	۰/۱۶
	اختلاف	-۰/۰۳	۰/۰۱	-۰/۰۶	۰	-۰/۰۲	۰
تغییر ضریب اصطکاک		۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۶

از آنالیز واریانس با پارامتر آماری P-Value برای بررسی تاثیر فاکتورها بر روی توابع پاسخ و نیز برای دستیابی به اهمیت نسبی پارامترها بر هر یک از توابع پاسخ، استفاده شده‌است. برای اینکه بتوان تأثیر پارامترها را با روش آنالیز واریانس تحلیل و بررسی کرد لازم است توزیع داده ها نرمال باشد. شکل ۳-۱۰ نرمال بودن توزیع مقادیر باقیمانده ها را برای ضریب اصطکاک نشان می دهد. مشاهده می‌شود که با توجه به توزیع نقاط، هیچ نقطه دور افتاده ای از خط مورب مشاهده نمی‌شود بنابراین می توان گفت که داده ها توزیع نرمالی دارند. جدول ۳-۳ نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل واریانس تابع پاسخ ضریب اصطکاک را نشان می‌دهد پارامترهایی که سطح اطمینان (P-value) کمتر از ۰/۰۵ دارند از لحاظ تأثیرگذاری بر تابع پاسخ معنی دار هستند یا به اصطلاح مؤثر و بقیه غیر مؤثر هستند. مشاهده می‌شود که نوع فرایند ساخت بر ضریب اصطکاک مؤثر بوده و شرایط روانکاری بر ضریب اصطکاک

تأثیر زیاد معنی داری ندارد. آماره (R^2) به عنوان نسبت تغییرات توصیف شده توسط مدل به تغییرات کل بیان می شود که معیاری از درجه ی تناسب برازش یا کفایت مدل می باشد. هرچه مقدار این آماره به یک نزدیک‌تر شود، نشان از کفایت بالای مدل دارد. آماره (R^2) بدست آمده در این تحقیق ۹۷/۱۰ $R^2=\%$ و همچنین آماره تعدیل شده (${R_{adj}}^2$) برابر ۹۳/۶۲٪ بدست آمده است که بیانگر کفایت خوب مدل است.



شکل ۳-۱۰ منحنی توزیع نرمال ضریب اصطکاک

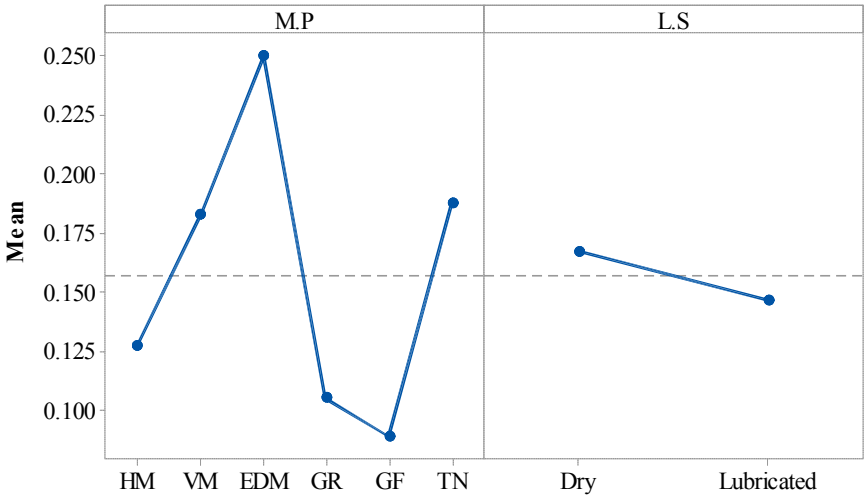
جدول ۳-۵ نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل واریانس متغیر پاسخ ضریب اصطکاک را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۳ جدول آنالیز واریانس ضریب اصطکاک

منبع	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
مدل	۶	۰/۰۳۸۱۷۴	۰/۰۰۶۳۶۲	۲۷/۹۰	۰/۰۰۱
خطی	۶	۰/۰۳۸۱۷۴	۰/۰۰۶۳۶۲	۲۷/۹۰	۰/۰۰۱
M.P	۵	۰/۰۳۶۹۲۳	۰/۰۰۷۳۸۵	۳۲/۳۹	۰/۰۰۱
L.S	۱	۰/۰۰۱۲۵۱	۰/۰۰۱۲۵۱	۵/۴۸	۰/۰۶۶
خطا	۵	۰/۰۰۱۱۴۰	۰/۰۰۰۲۲۸		
جمع کل	۱۱	۰/۰۳۹۳۱۴			
	R-sq(adj)= ۹۳/۶۲ ٪		R-sq= ۹۷/۱۰ ٪		

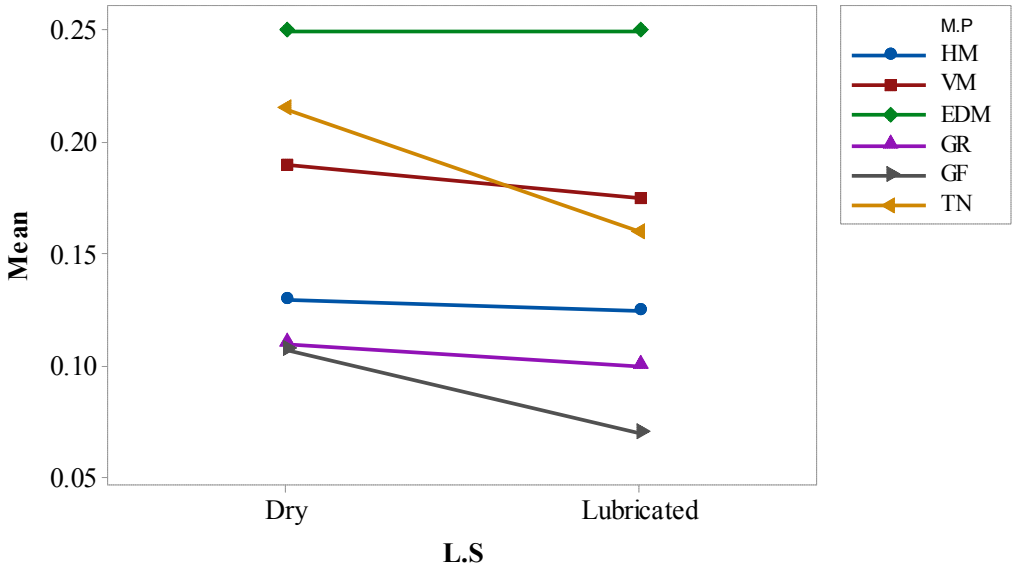
در شکل ۳-۱۱ اثرات اصلی حالت‌های مختلف ماشینکاری و روانکاری بر ضریب اصطکاک نشان داده‌شده‌است. از این شکل می توان بیان داشت که اولاً تأثیر روانکار مورد استفاده در کاهش ضریب اصطکاک کم است. ثانیاً اینسرت‌های سنگ زنی شده (GR) و سنگ زنی و پولیش شده (GF) که دارای زبری سطح صیقلی هستند، ضریب اصطکاک کمتری را دارند. ثالثاً با وجود آنکه اینسرتهای ماشینکاری شده با روشهای تراشکاری(TN) و فرزکاری افقی (HM) و فرز کاری عمودی(VM) و اسپارک شده(EDM) دارای زبری سطح نزدیک به هم (۲-۳μm) بودند اما ضریب اصطکاک حاصل از این سطوح متفاوت می باشد. بهترین شرایط مربوط به اینسرت HM با ضریب اصطکاک متوسط ۰/۱۲۵ و بدترین شرایط مربوط به اینسرت EDM با ضریب اصطکاک متوسط ۰/۲۴ می‌باشد. می توان گفت در اینجا دو عامل جهت خواب سطح و تیزی پستی و بلندی ها تأثیر گذار می باشد باوجود آنکه که در حالت تراشکاری و فرزکاری پستی بلندی های سطح تیزی بیشتری نسبت به EDM دارند و انتظار می رود که در حالت EDM ضریب اصطکاک کمتر شود اما به دلیل جهت خواب سطح و محبوس شدن بیشتر روانکار در سطح حاصل از فرزکاری و تراشکاری،عامل دوم بر عامل اول غلبه کرده و باعث بیشتر شدن ضریب اصطکاک در حالت EDM می‌شود. دو حالت TN و VM ضریب

اصطکاک یکسانی می دهند که باتوجه به جهت‌گیری یکسان شیارها در دوحالت قابل توجیه می باشند.



شکل ۳-۱۱ اثرات اصلی حالت‌های مختلف ماشین‌کاری و روانکاری بر ضریب اصطکاک

در شکل ۳-۱۲ اثرمتقابل پارامترها بر روی ضریب اصطکاک نمایش داده شده‌است. استفاده از روانکار پارافین در کاهش ضریب اصطکاک فرآیند آهنگری تأثیر بسزایی ندارد. برطبق نتایج شکل می توان قضاوت نمود که سیستم روانکاری مورد استفاده بیشترین تأثیر را بر اینسرت تراشکاری و کمترین تأثیر را بر اینسرت EDM داشته است.



شکل ۳-۱۲ اثر متقابل پارامترها بر ضریب اصطکاک

۳-۴- تحلیل آماری نتایج زبری سطح

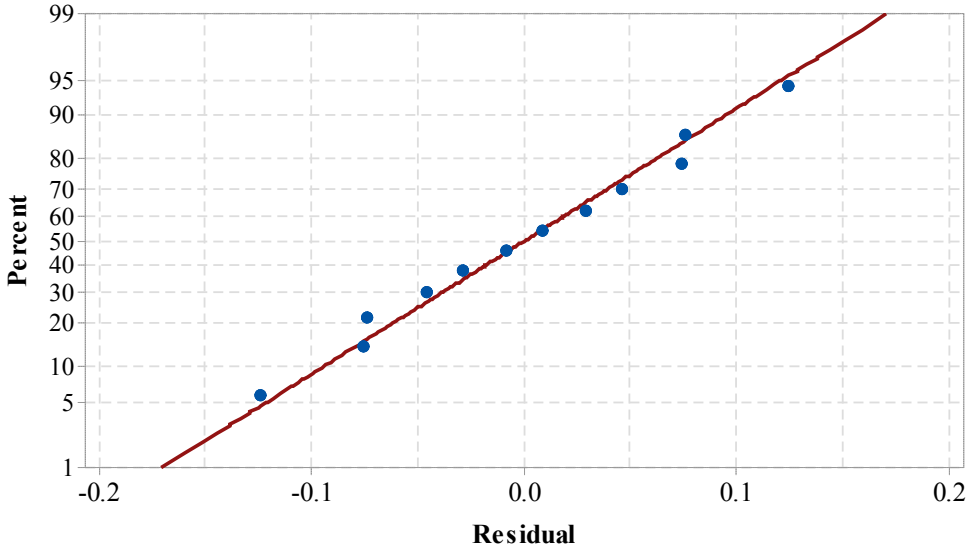
در جدول ۳-۴ زبری سطح حلقه و تغییرات آن در شکل دهی با استفاده از اینسرت‌های ماشین‌کاری شده به روش‌های مختلف ارائه شده‌است. نتایج برای درصد کاهش ارتفاع ۲۵٪ و ۵۰٪ به صورت مجزا اندازه‌گیری و مقدار متوسط و اختلاف این دو نیز ذکر شده‌است. به صورت مشابه این نتایج برای حالت روانکاری نیز در ستون‌های بعدی مشخص و در نهایت در ستون آخر اثر متوسط استفاده از روانکار بر زبری بیان شده‌است. کاهش زبری سطح حلقه در اثر استفاده از روانکار در مقایسه با حالت خشک در اغلب روش‌ها قابل مشاهده است.

جدول ۳-۴ زبری سطح و تغییرات آن در فرآیند آهنگری فشار حلقه، در دوحالت خشک و روانکاری، با استفاده از اینسرت‌های ماشینکاری شده به روش‌های مختلف

کاهش ارتفاع		HM	VM	EDM	GR	GF	TN
زبری سطح خشک (μm)	۲۵٪	۱/۷۷	۲/۱۴۶	۱/۹۵	۰/۳۱	۰/۱۹۸	۱/۶۷
	۵۰٪	۲/۲۲	۲/۴۸	۲/۳۹	۰/۳۴۷	۰/۳۰۷	۱/۹۸
	متوسط	۱/۹۹۵	۲/۳۱۳	۲/۱۷	۰/۳۲۸۵	۰/۲۵۲۵	۱/۸۲۵
	اختلاف (در اثر افزایش کرنش)	۰/۴۵	۰/۳۳۴	۰/۴۴	۰/۰۳۷	۰/۱۰۹	۰/۳۱
زبری سطح روانکاری (μm)	۲۵٪	۱/۷۹	۱/۸۴۴	۱/۷۳	۰/۳۲۶	۰/۲۶	۱/۶
	۵۰٪	۲/۱	۲/۰۷	۲/۲۲	۰/۴۲	۰/۳۲۴	۱/۸
	متوسط	۱/۹۴۵	۱/۹۵۷	۱/۹۷۵	۰/۳۷۳	۰/۲۹۲	۱/۷
	اختلاف (در اثر افزایش کرنش)	۰/۳۱	۰/۲۲۶	۰/۴۹	۰/۰۹۴	۰/۰۶۴	۰/۲
تغییر زبری سطح متوسط در اثر روانکاری		-۰/۰۵	-۰/۳۶	-۰/۲۰	۰/۰۴	۰/۰۴	-۰/۱۳

در بررسی زبری سطح نیز از آنالیز واریانس با پارامتر آماری P-Value برای بررسی تاثیر فاکتورها بر روی این تابع پاسخ و نیز برای دستیابی به اهمیت نسبی پارامترها استفاده شده‌است. برای اینکه بتوان تأثیر پارامترها را با روش آنالیز واریانس تحلیل و بررسی کرد لازم است توزیع داده ها نرمال باشد. شکل ۳-۱۳ نرمال بودن توزیع مقادیر باقیمانده ها را برای زبری سطح نشان می دهد. مشاهده می‌شود که با توجه به توزیع نقاط، هیچ نقطه دور افتاده ای از خط مورب مشاهده نمی‌شود بنابراین می توان گفت که داده ها توزیع نرمالی دارند. جدول ۳-۵ آنالیز واریانس زبری سطحنتایج به‌دست‌آمده از تحلیل واریانس تابع پاسخ زبری سطح را نشان می‌دهد پارامترهایی که سطح اطمینان (P-value) کمتر از ۰/۰۵ دارند از لحاظ تأثیرگذاری بر تابع پاسخ معنی دار هستند یا به اصطلاح مؤثر و بقیه غیر مؤثر هستند. مشاهده می‌شود که نوع فرایند ساخت بر ضریب اصطکاک مؤثر بوده و شرایط روانکاری تأثیر معنی داری بر زبری سطح ندارد. آماره (R^2) بدست آمده در این حالت ۹۹/۲۳ %R^2= و

همچنین آماره تعدیل شده ($R_{adj}{}^2$) برابر ۹۸/۳۱٪ بدست آمده است که بیانگر کفایت خوب مدل است.



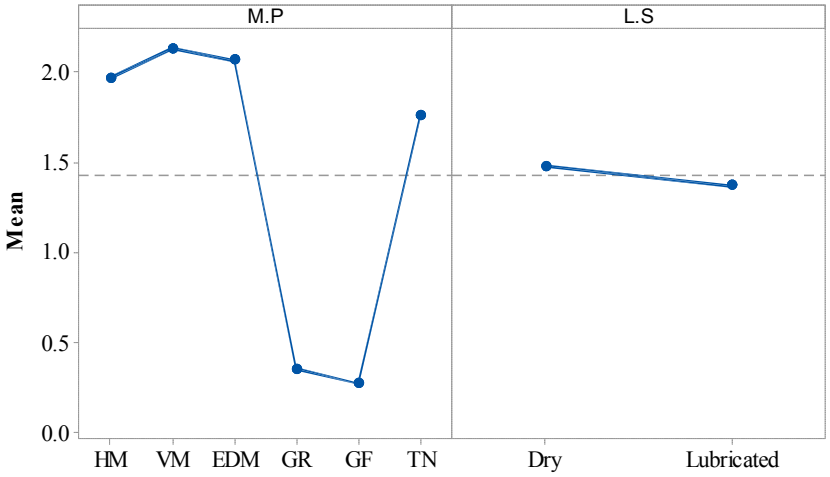
شکل ۳-۱۳ نمودار توزیع نرمال داده‌های زبری سطح

جدول ۳-۵ نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل واریانس متغیر پاسخ زبری سطح را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۵ آنالیز واریانس زبری سطح

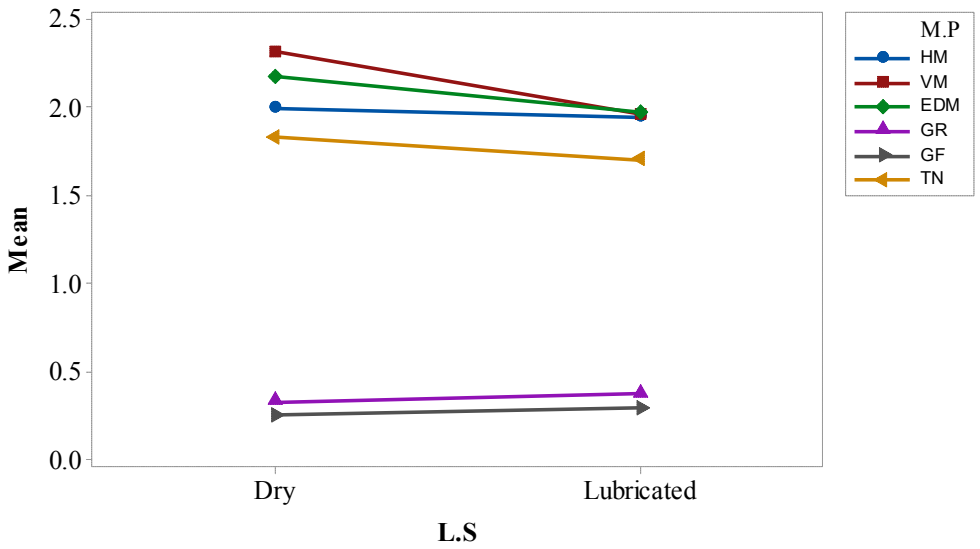
منبع	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
مدل	۶	۷/۶۶۲۶۵	۱/۲۷۷۱۱	۱۰۷/۶۵	۰/۰۰۰
خطی	۶	۷/۶۶۲۶۵	۱/۲۷۷۱۱	۱۰۷/۶۵	۰/۰۰۰
M.P	۵	۷/۶۲۷۷۷	۱/۵۲۵۵۵	۱۲۸/۵۹	۰/۰۰۰
L.S	۱	۰/۰۳۴۸۸	۰/۰۳۴۸۸	۲/۹۴	۰/۱۴۷
خطا	۵	۰/۰۵۹۳۲	۰/۰۱۱۸۶		
جمع کل	۱۱	۷/۷۲۱۹۷			
	R-sq(adj)= ۹۸/۳۱ ٪		R-sq= ۹۹/۲۳ ٪		

در شکل ۳-۱۴ اثرات اصلی حالت‌های مختلف ماشینکاری و روانکاری بر زبری سطح نمونه حلقه شکل داده شده نشان داده‌شده‌است. از این شکل می توان بیان داشت که روانکار مورد استفاده از تأثیر اندکی در کاهش زبری سطح دارد. ثانیاً اینسرت‌های سنگ زنی شده (GR) و سنگ زنی و پولیش شده (GF) که دارای سطح صیقلی هستند، منجر به زبری سطح کمتری در نمونه ها میشوند. ثالثاً همانطور که اینسرتهای ماشینکاری شده با روشهای تراشکاری(TN) و فرزکاری افقی (HM) و فرز کاری عمودی(VM) و اسپارک شده(EDM) دارای زبری سطح نزدیک به هم (۲-۳μm) بودند سطح حاصل از این سطوح در نمونه های حلقه زبریسطح نزدیک به هم ایجاد می کنند.



شکل ۳-۱۴ اثرات اصلی حالت‌های مختلف ماشین‌کاری و روانکاری بر زبری سطح

در شکل ۳-۱۵ اثرمتقابل پارامترها بر روی زبری سطح نمایش داده شده‌است. استفاده از روانکار در کاهش زبری سطح فرآیند آهنگری در حالت کلی تأثیر قابل توجه ندارد. مطابق شکل در حالت استفاده از اینسرت VM استفاده از روانکار باعث کاهش زبری سطح بیشتری می‌شود.



شکل ۳-۱۵ اثر متقابل پارامترها برروی زبری سطح

فصل ۴ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۴-۱- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر روش ساخت قالب بر تریبولوژی سطح تماس در فرآیند آهنگری مورد بررسی قرار گرفت.

با تهیه‌ی قالب به روش‌های فرزکاری افقی و عمودی، EDM، سنگ‌زنی، سنگ‌زنی و پرداخت‌کاری و تراشکاری، با استفاده از آزمون فشار حلقه تأثیر نوع فرآیند و حالت روانکار بر ضریب اصطکاک و زبری سطح مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج حاصل از این تحقیق به صورت زیر جمع‌بندی می‌شود:

۱- بررسی بافت سطح حاصل از فرآیندها نشان می‌دهد که فرآیندهای EDM و GF منجربه بافت سطح تصادفی، فرآیندهای HM و GR بافت سطح یکسویه و VR بافت سطح یکسویه‌ی انحنادار و TN بافت سطح دوسویه‌ی (دوایرهم‌مرکز) تولید می‌کنند.

۲- بررسی نمونه حلقه های شکل داده شده به روش تجربی نشان می‌دهد بیشترین غیریکنواختی در هر دو حالت خشک و روانکاری مربوط به اینسرت VM می‌باشد. فرآیندهای EDM و TN کمترین غیریکنواختی تغییرشکل را نشان می‌دهد. همچنین بافت سطح قطعات آهنگری شده کاملاً متأثر از بافت سطح اینسرت‌ها می‌باشد.

۳- تحلیل آماری آزمایش‌های انجام شده در خصوص ضریب اصطکاک نشان می‌دهد که:

الف- کاهش ضریب اصطکاک در اثر استفاده از روانکار در مقایسه با حالت خشک در فرآیندهای مختلف کم بوده که احتمالاً ناشی از نوع روانکار می‌باشد. روانکار مورد استفاده بیشترین و کمترین تأثیر را به ترتیب در حالت استفاده از اینسرت تراشکاری و اینسرت EDM دارد.

ب- نوع فرآیند بر روی ضریب اصطکاک تأثیر قابل توجهی دارد. در چهارحالت ماشین‌کاری HM ، VM، EDM و TN با وجود آنکه اینسرت‌ها زبری سطح نزدیک به هم داشتند اما ضریب اصطکاک حاصل از این سطوح متفاوت بود. که این امر ناشی از بافت متفاوت سطوح می‌باشد. بهترین شرایط

مربوط به اینسرت HM با ضریب اصطکاک متوسط ۰/۱۲۵ و بدترین شرایط مربوط به اینسرت EDM با ضریب اصطکاک متوسط ۰/۲۴ می‌باشد.

۴- تحلیل آماری آزمایش‌های انجام شده در خصوص زبری سطح نشان می‌دهد که:

الف- کاهش زبری سطح حلقه در اثر استفاده از روانکار در مقایسه با حالت خشک در اغلب روش‌ها کم بوده که احتمالاً ناشی از نوع روانکار می باشد. روانکار مورد استفاده بیشترین تأثیر رادر حالت استفاده از اینسرت فرزکاری عمودیVM در کاهش زبری سطح دارد.

ب- زبری سطح نمونه‌های آهنگری شده متأثر از زبری سطح سطوح اینسرت‌ها می باشد. در چهارحالت ماشین‌کاری HM، VM، EDM و TN همانطور که اینسرت‌ها باوجود بافت سطح متفاوت، زبری سطح نزدیک به هم داشتند زبری سطح حاصل از این سطوح هم تفاوت اندکی با هم داشتند.

۵- زبری سطح محصول آهنگری در همه شرایط از سطح اینسرت قالب تبعیت نموده است یعنی مثلاً سطوح صیقلی اینسرت سنگ‌زنی(GR) و پولیش‌شده(GF) زبری سطح متوسط به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۲۷ را به دست داده است. در حالی که سطوح زبری مانند EDM زبری سطح متوسط ۲/۰۷۲۵ را منجر شده‌است.

۶- استفاده از روانکار بر روی اینسرت‌هایی که به کمک روش GR وGF تولید و در نتیجه سطح کاملاً صیقلی بر روی قالب ایجاد شده، تأثیر قابل ذکری بر زبری سطح محصول نداشته است. این در حالی است که در بقیه‌ی موارد (با زبری اولیه‌ی نسبیتاً بالا) روانکار موجب کاهش زبری سطح اندکی می‌شود. توجیه این علمی این پدیده را می توان به محبوس شدن مایع روانکار در گودی‌های زبری سطح و بالا رفتن فشار هیدرواستاتیکی آن در حین شکل‌دهی دانست.

۷- سطح اینسرت VM دارای بیشترین زبری برابر ۳ µm می‌باشد. در اثر استفاده از روانکار بیشترین کاهش زبری سطح محصول در مورد این قالب اتفاق افتاده است. از آن سو سطح اینسرت GF کمترین زبری برابر ۰/۰۲۵ µm را داراست که در اثر استفاده از روانکار کمترین کاهش زبری سطح در این

حالت رخ داده است. از این نتیجه می توان استنباط کرد که روانکار در شرایطی بر زبری سطح تأثیر می گذارد که در حین فرآیند بین سطوح مقید و محصور شود و این در سطوح صیقلی اتفاق نمی‌افتد.

۸- افزایش کرنش که از افزایش درصد کارسرد در آزمون حلقه ناشی می‌شود موجب افزایش زبری سطح در هردو حالت خشک و روانکاری خواهد شد.

۴-۲- پیشنهادها

از جمله تحقیقاتی که در ادامه پژوهش حاضر می‌تواند انجام گیرد، می‌توان به کارهای زیر اشاره کرد:

۱- بررسی تأثیر روش‌های ساخت قالب بر تریبولوژی سطح تماس در فرآیندهای شکل‌دهی گرم و سرد فلزات دیگر مانند آلیاژهای تیتانیوم و آلومینیوم

۲- بررسی مکانیزم‌های روانکاری دیگر بر روی ضریب اصطکاک و زبری سطح در این تحقیق

۳- بررسی تأثیر روش‌های دیگر ساخت قالب مانند روش ماشینکاری الکتروشیمیایی بر تریبولوژی سطح تماس در فرایندهای شکل‌دهی

۴- بررسی تأثیر همزمان سایر روانکارها و روش ساخت قالب بر تریبولوژی سطح تماس

منابع

[1] B. Behrens, A. Bouguecha, I. Lueken, J. Mielke, and M. Bistron, "Tribology in hot forging" Comprehensive materials processing, vol. 5, pp. 211-234, 2014.

[2] K. Lange, "Handbook of metal forming" McGraw-Hill Book Company, 1985, p. 1216, 1985.

[3] I. M. Hutchings, "Tribology: friction and wear of engineering materials," Edward Arnold, London, vol. 175, 1992.

[4] F. Fereshteh-Saniee, I. Pillinger, and P. Hartley, "Friction modelling for the physical simulation of the bulk metal forming processes" Journal of Materials Processing Technology, vol. 153, pp. 151-156, 2004.

[5] T. Altan, S.-l. Oh, and G. Gegel, "Metal forming fundamentals and applications" American Society for Metals, pp. 353, 1983.

[6] Y. Zhu, W. Zeng, X. Ma, Q. Tai, Z. Li, and X. Li, "Determination of the friction factor of Ti-6Al-4V titanium alloy in hot forging by means of ring-compression test using FEM" Tribology International, vol. 44, pp. 2074-2080, 2011.

[7] K. Manisekar, R. Narayanasamy, and S. Malayappan, "Effect of friction on barrelling in square billets of aluminium during cold upset forging" Materials & design, vol. 27, pp. 147-155, 2006.

[8] R. Hartley, T. Cloete, and G. Nurick, "An experimental assessment of friction effects in the split Hopkinson pressure bar using the ring compression test" International Journal of Impact Engineering, vol. 34, pp. 1705-1728, 2007.

[9] H. Gedikli and J. Rasty, "Determination of friction coefficient by employing the ring compression test". Journal of engineering eaterials and eechnology, transactions of the ASME ·Vol. 123. July 2001.

[10] P. L. Menezes, C. J. Reeves, S. V. Kailas, and M. R. Lovell, "Tribology in metal forming" in Tribology for Scientists and Engineers, ed: Springer, pp. 783-818, 2013.

[11] https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_finish.

[12] و. علی‌میرزالو، س. شیدایی، "بررسی تأثیر استفاده از نانوروانکارها در شکل‌دهی آلیاژ آلومینیوم توسط آزمون فشار حلقه" سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، شماره ۹۸، سال ۱۳۹۴ .

[13] D. Shahriari, A. Amiri, and M. Sadeghi, "Study on hot ring compression test of Nimonic 115 superalloy using experimental observations and 3D FEM simulation," Journal of Materials Engineering and Performance" vol. 19, pp. 633-642, 2010.

[14] E. Rajesh and M. SivaPrakash, "Analysis of friction factor by employing the ring compression test under different lubricants," International Journal of Scientific and Engineering Research" vol. 4, pp. 1163-1171, 2013.

[15] B. Barooghi, A. Amiri, and M. Sadeghi, "Study on hot ring compression test of Al 6082 alloy using experimental observations and fem simulation" ISSN 1333-1124, 2015.

[16] م. دهقانی، ف.ا. قدس، ج. دعایی، "شبیه سازی و بررسی آزمون فشار حلقه به منظور اندازه گیری اصطکاک در فرآیند فورج داغ" مجله مدل سازی در مهندسی، سال دهم، شماره ۳۱، زمستان ۱۳۹۱.

[17] M. Kunogi, "A new method of cold extrusion," Journal of the Scientific Research Institute" vol. 50, pp. 215-246, 1956.

[18] A.T.Male, M.G. cockcroft , "A method for the determination of the coefficient of friction of metals under condition of bulk plastic deformation ",Vol. 93, pp. 38-46, 1964.

[19] G. H. Sofuoglu H. Rasty , "Determination of friction coefficient by employing the ring
compression test " Journal of Engineering Materials and Technology, pp. 338, 2001.

[20] م. س. داگلاس، کنترل کیفیت آماری. انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران, تهران ۱۳۸۹.

[21] M. Shariati and H. Mehrabi, "Energy-based prediction of low-cycle fatigue life of CK45 steel and SS316 stainless steel" Journal of Solid Mechanics, vol. 6, 2014.

Abstract

In the forging process, the texture of the die surfaces, affected by die making method, plays a significant role in the contact surface tribology. The slip on the surface of the mold depends on the surface roughness and its orientation. Therefore, the coefficient of friction and contact forces directly affects the surface texture. In the present study, the effect of different methods of forging die manufacturing, in two dry and lubricated conditions has been investigated for ck45 steel by ring compression test. For this purpose, the forging die was made by six machining methods i.e. horizontal and vertical milling, EDM, grinding, grinding as along with polishing and turning and then the ring-shaped specimens ratio 6: 3: 2 were subjected to the compression test by these molds. Circular samples were rotated by a 12 mm machine and then drilled with a 6 mm internal diameter. After cutting, two flat surfaces of the ring were stamped to reach 4 mm. In this research, the effect of two parameters of machining method and lubrication mechanism on the coefficient of friction and surface roughness were investigated. To investigate the effect of parameters and optimize them, the necessary experiments were designed using a full-factorial design scheme. By performing the tests according to the design, the values of the functions of the coefficient of friction coefficient and surface roughness were extracted. The results show that machining is the most effective parameter affecting the coefficient of friction and surface roughness. Using die insert made by four machining methods of horizontal and vertical milling, EDM and turning, although the inserts had the same roughness, the different coefficient of friction was obtained. This is due to the different forms of surface texture. In the forging by completely smooth die surface i.e. ground and polished die, the lubrication has no meaningful effect on surface roughness of forged specimens. Increasing the strain caused by an increase of height reduction percent in the ring compression test results in an increase in surface roughness in both dry and lubrication conditions.

Keywords: Tribology - Die forging - Machining –Ring compression test

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Manufacturing and Production Engineering

Investigation of the effect of die manufacturing operation on the forging process tribology

by: Gholamreza Hosseinpour

Supervisors:

Dr. Mahdi Gerdooei

Dr. Vali Alimirzaloo

July 2017