

# بررسی تأثیر روش ماشین کاری قالب بر زبری و سختی سطح قطعه در فرایند آهنگری فلزات

غلامرضا حسین پور<sup>۱</sup>، ولی علی میرزالو<sup>۲\*</sup>، مهدی گردویی<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲. گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰ - پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۳/۲۱)

## چکیده

در فرایندهای شکل دهی فلزات، از جمله پارامترهای موثر بر اصطکاک، زبری و بافت سطح قالب و قطعه است که ناشی از فرایند ساخت می باشد. در این پژوهش تأثیر روش های مختلف ساخت قالب بر زبری و سختی سطح قطعه شکل دهی شده بررسی شده است. اینسرت قالب ها با شش روش ماشین کاری ساخته شد و تأثیر روش ماشین کاری، روانکاری و درصد تغییر شکل بر زبری و سختی سطح قطعه با انجام عملیات کله زنی روی قطعه حلقوی شکل بررسی شده است. نتایج نشان می دهد بافت سطح قطعات متأثر از بافت سطح اینسرت ها و زبری سطح قطعات متناسب با زبری سطح اینسرت ها می باشد. با افزایش میزان کار سرد، زبری سطح قطعات افزایش قابل ملاحظه ای داشته است. استفاده از روانکار در حالت های تراشکاری، فرزکاری عمودی و تخلیه الکتریکی باعث کاهش زبری سطح می شود، اما در بقیه اینسرت ها تأثیر چندانی ندارد. در حالت استفاده از روانکار، سختی سطح قطعات بطور میانگین حدود ۵ درصد کاهش می یابد. با افزایش کار سرد از ۲۵٪ به ۵۰٪ سختی سطح قطعات به طور میانگین حدود ۲۵ درصد افزایش می یابد. شکل دهی با قالب ماشینکاری شده با روش تخلیه الکتریکی باعث کمترین سختی سطح قطعه شده و بیشترین سختی سطح قطعه مربوط به سنگ زنی با پرداخت کاری است. بافت سطح قطعات متأثر از بافت سطح اینسرت ها و زبری و سختی سطح قطعات متأثر از روش ماشینکاری اینسرت ها می باشد.

واژه های کلیدی: آهنگری؛ ماشین کاری؛ زبری؛ بافت سطح؛ قالب؛ ماشینکاری تخلیه الکتریکی

## Effect of die machining method on the surface roughness and hardness of the workpiece in the forging process

### Abstract

In metal forming processes, surface roughness and hardness of the die and workpiece are effective parameters in friction, which is caused by the manufacturing process of the die and workpiece. In this research, effect of die manufacturing processes on the surface roughness and hardness of the deformed parts has been investigated. The inserts of the dies are made with six machining methods, and the effect of the machining method, lubrication, and percentage of deformation on the surface roughness and hardness of the part has been investigated by performing the heading operation on a ring-shap part. The results show that the surface texture of the parts is affected by the surface texture of the inserts and the surface roughness of the parts is proportional to the surface roughness of the inserts. The surface roughness of the parts increases significantly by increasing the amount of cold work, and the use of lubricant reduces slightly the surface roughness in turning, vertical milling and electric discharge machined inserts but it does not have considerable effect in the rest of the inserts. In the case of using lubricant, the surface hardness of the parts decreases by about 5% on average. With the increase of cold work from 25% to 50%, the surface hardness of the parts increases by about 25% on average. Forming with the electrical discharge machined insert causes the lowest surface hardness of the parts, and the highest surface hardness of the parts is related to the grinded and polished inserts. The texture of the surface of the parts is affected by the texture of the surface of the inserts and the roughness and hardness of the surface of the parts is affected by the machining method of the inserts

**Keywords:** forging; machining; roughness; surface texture; die; electrical discharge machining.

**E-mail of Corresponding author:** valimirzaloo@gmail.com

## ۱- مقدمه

همچنین بافت سطح نامطلوب منجر به افزایش تنش‌های برشی تماسی و افزایش نرخ سایش قالب و در نتیجه کاهش عمر آن خواهد شد [۲]. یکی از روش‌های ساده برای بررسی شرایط اصطکاکی در فرایندهای شکل‌دهی فلزات، آزمون فشار حلقه است. این آزمون در مقایسه با آزمون‌های دیگر، نیاز به ابزار ارزان‌تری دارد و ساده‌تر انجام می‌شود [۴-۳]. در یک آزمون خوب باید شرایط فرایند مانند دمای نمونه و قالب، مدت زمان تماس و سرعت نسبی بین نمونه و ابزار و همچنین انبساط سطحی نمونه تقریباً مشابه شرایط واقعی عملیات باشند [۵].

تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه تریبولوژی در شکل‌دهی فلزات انجام شده است که اغلب آنها به بررسی اصطکاک در شکل‌دهی فلزات پرداخته‌اند. مطالعات Alves و همکارانش نشان می‌دهد که استفاده از یک نمونه حلقه با قطر داخلی بزرگ و ضخامت شعاعی کوچک، مزایایی در مقایسه با نمونه حلقه مرسوم (مطابق اندازه‌های تعریف شده در استانداردها) ارائه می‌دهد. به طور خلاصه، افزایش قطر داخلی و کاهش ضخامت شعاعی می‌تواند قابلیت اطمینان نتایج آزمون حلقه برای مواد انعطاف‌پذیر را بهبود بخشد [۶]. Forcellese و همکارانش نشان دادند که میزان کرنش، صرف نظر

شرایط سطوح تماس به ویژه اصطکاک یکی از عوامل تأثیر گذار در فرایندهای شکل‌دهی فلزات محسوب می‌شود. اصطکاک در ناحیه تماس متأثر از زبری، سختی و بافت سطوح قالب و قطعه و نوع روانکار مورد استفاده می‌باشد و زبری و بافت سطح قالب ناشی از فرایند ساخت قالب و قطعه اولیه است. هر فرایند تولید (مانند بسیاری از انواع روش‌های ماشین‌کاری) یک بافت سطح تولید می‌کند و اگر لازم باشد، بعد از فرایند اصلی ساخت قالب، فرایند اضافی مانند سنگ‌زنی و پولیش‌کاری برای ایجاد تغییر در بافت اولیه انجام می‌شود. اصطکاک بین سطوح تماس تا حد زیادی بستگی به بافت سطح (زبری سطح و جهت‌گیری آن) و شرایط روانکاری دارد. ضریب اصطکاک و نیروهای تماسی مستقیماً از بافت سطح تأثیر می‌پذیرد و همچنین امکان ایجاد یک لایه روانکار پایدار در حین فرایند آهنگری که نقش مهمی در سهولت جریان مومسان ماده دارد، از بافت سطح قالب و قطعه تأثیر می‌پذیرد [۱]. بافت سطح قالب از یک سو در شکل محصول (از منظر ماکرو) و بافت سطح محصول (از منظر میکرو) و از سوی دیگر در نیرو و انرژی آهنگری تأثیر می‌گذارد.

و زبری سطح (Ra) با رسیدن به کاهش ۴۵ درصدی در ارتفاع حلقه به طور قابل توجهی تغییر می‌کند. برای مثال، Ra نمونه‌های حلقه فشرده بلافاصله قبل و بعد از رسیدن به این آستانه تقریباً ۰.۵۵٪ افزایش یافت [۹]. حسین‌پور و همکارانش با بررسی تأثیر روش ساخت قالب بر ضریب اصطکاک و مقایسه روش‌های مختلف ماشین کاری در ساخت قالب‌های آهنگری به این نتیجه رسیدند که تأثیر نوع فرایند ساخت بر ضریب اصطکاک بیشتر از میزان فشردگی و نوع روانکار استفاده شده در آهنگری سرد است. در این مطالعه با وجود آنکه اینسرت‌های تولید شده با روش‌های مختلف، زبری سطح نزدیک به هم داشتند اما ضریب اصطکاک حاصل از این سطوح متفاوت بود، که این امر ناشی از بافت متفاوت سطوح بود [۱۰]. Menezes و همکارانش در مورد اثر بافت سطح بر اصطکاک سطح تماس ابزار در دو شرایط خشک و روانکار مطالعه کردند. در این تحقیق انواع مختلفی از بافت سطح را مطالعه کردند و مشاهده شد که تغییرات اصطکاک و زبری سطح با بافت سطح تحت هر دو 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 می‌کند [۱۱].

از کاهش ارتفاع و شرایط اصطکاک بر تغییر قطر داخلی حلقه تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق آزمون‌های محوری و فشرده سازی حلقه نیز تحت شرایط بارگذاری شبه استاتیک انجام شد و نتایج تجربی هیچ اثر قابل ملاحظه‌ای از سرعت کرنش روی منحنی‌های جریان و رفتار اصطکاک نشان نداد. سرانجام رفتار اصطکاک مختلف در هر دو شرایط بارگذاری شبه استاتیک و دینامیک به کاهش ضخامت فیلم روان‌کننده و تغییر در عملکرد چسبندگی قطعه-قالب نسبت داده شد [۹]. Hu و همکارانش مدل متفاوتی از تست فشار حلقه معمولی RCT در آهنگری سرد، با تست فشار حلقه با یک برجستگی روی قطر بیرونی RCT-B، مطالعاتی را انجام دادند که مشکل اندازه‌گیری قطر داخلی برای محاسبه ضریب اصطکاک را حل کرد و نتایج اندازه‌گیری RCT-B با انجام آزمایش‌های تجربی با استفاده از روش RCT معمولی تأیید شد. نتایج آزمایش از هر دو روش RCT-B و RCT معمولی از نظر فاکتورهای اصطکاک اندازه‌گیری شده با حداکثر خطای کمتر از ۱۵٪ مطابقت خوبی داشتند [۸]. Zhang و همکارانش نشان دادند که شرایط روانکاری و اصطکاک با تغییر شکل در طی فرایندهای شکل‌دهی فلز متفاوت است. این مطالعه نشان می‌دهد که در طول فرایند فشرده‌سازی سرد حلقه‌های فولادی (AISI 1045)، میزان اصطکاک

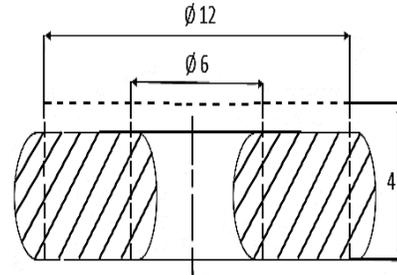
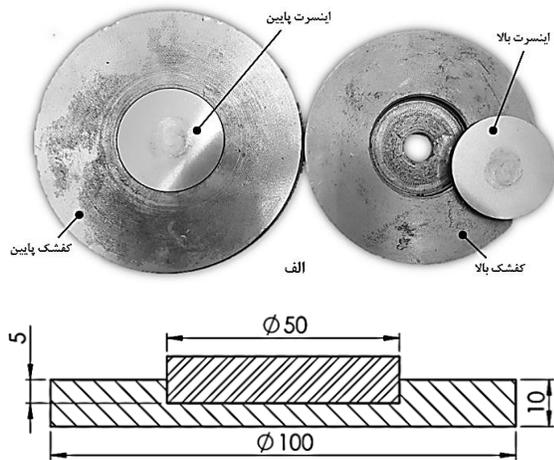
Groche و همکارانش اثرات هیدرودینامیکی سطح ساختار یافته را بر فرایند فورج بررسی کردند و نشان دادند که با استفاده از سطوح ساختار یافته، ضریب اصطکاک در مقایسه با یک نمونه مرجع تا ۴۰٪ کاهش می یابد [۱۲]. Han و همکارانش تأثیر پارامترهای شکل دهی را بر روی زبری سطح قطعه به روش عددی و تجربی بررسی کردند و توانستند یک مدل برای زبری سطح قطعه استخراج کنند [۱۳]. Stahlmann و همکارانش توانستند متغیرهای حالت تریبولوژیکی و زبری سطح را در شکل دهی حجمی با روش اجزا محدود شبیه سازی کنند [۱۴]. Zabala و همکارانش با استفاده از شبیه سازی عددی و لحاظ کردن تأثیر زبری سطح موضعی، مدل اصطکاک جدیدی را برای تحلیل دقیق تر فرایندهای شکل دهی ورق ارائه کرده اند [۱۵].

بررسی ها نشان می دهد که در تحقیقات قبلی تأثیر روش ساخت قالب بر بافت و زبری سطح قطعه در فرایندهای شکل دهی فلزات گزارش نشده است. در این تحقیق، تأثیر روش ساخت قالب بر بافت و زبری سطح و سختی سطح قطعه در آهنگری سرد فلزات با استفاده از آزمون فشار حلقه در شرایط خشک و روانکاری بررسی شده است.

## ۲- مواد و روش ها

برای بررسی تأثیر روش ساخت قالب بر زبری سطح از آزمون فشار حلقه استفاده شد که در آن یک نمونه حلقه ای شکل بین دو قالب تخت بصورت عملیات کله زنی فشرده می شود. این آزمون بدلیل سادگی و نیاز به تجهیزات ارزانتر نسبت به سایر آزمون ها بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد [۱۶]. از این آزمون معمولاً برای استخراج ضریب اصطکاک استفاده می شود اما در این تحقیق جهت بررسی زبری سطح استفاده شده است. نمونه های حلقه ای شکل از جنس فولاد Ck۴۵ با قطر خارجی، قطر داخلی و ارتفاع به ترتیب ۱۲ و ۶ و ۴ میلی متر (مطابق نسبت استاندارد ۲:۳:۶) به کمک عملیات تراش کاری و سوراخ کاری مطابق شکل ۱ تهیه شدند. سطوح تخت نمونه ها با عملیات سنگ زنی مغناطیسی تا رسیدن به زبری سطح  $0.5\mu\text{m}$  پرداختکاری شدند. در آزمون فشار حلقه اگر اصطکاک زیاد باشد، قطر داخلی کاهش یافته و اگر کم باشد قطر داخلی به مقدار کم کاهش و حتی می تواند افزایش یابد (شکل ۱). با طراحی و انجام آزمون ها، سختی و زبری سطح نمونه ها اندازه گیری شد. برای سنجش زبری سطوح نمونه ها از دستگاه TR200 و برای سنجش سختی از سختی سنج اونیورسال UV1 استفاده شده است سختی نمونه

اولیه در شش نقطه اندازه گیری شد و سختی متوسط حدود  $HRC 19$  بدست آمد.



شکل ۱- شماتیک فرایند فشردن حلقه و ابعاد اولیه آن (ابعاد برحسب میلی متر).

شکل ۲- قالب عملیات فشار حلقه، (الف) کفشک و اینسرت، (ب) ابعاد قالب (ابعاد برحسب میلی متر).

استراتژی ماشین کاری در زمان ماشین کاری بر سطح نهایی محصول تاثیر دارد [۱۸] سطح تخت اینسرت ها با روش های زیر ماشین کاری شد.

۱- فرزکاری افقی با تیغه ماریچ (HM)

۲- فرزکاری عمودی با تیغه فرز کف تراش  $T_{max}$  (VM)

۳- ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM)

۴- سنگ زنی (GR)

۵- سنگ زنی و پرداخت کاری (GF)

۶- پیشانی تراشی به کمک دستگاه تراش (TN).

قالب ها شامل یک کفشک از جنس فولاد ریختگی و تعداد ۶ اینسرت قابل تعویض از جنس فولاد گرمکار  $1/2713$  می باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است. قالب های آهنگری که در معرض کار در دمای بالا و تحت بارهای مکانیکی است، برای جلوگیری از شکست ناشی از تنش های مکانیکی و حرارتی از فولاد گرمکار ساخته می شوند [۱۷]. اینسرت های قالب ابتدا سخت کاری و بازپخت شدند و بعد هرکدام با یک روش ماشین کاری شدند. برای سخت کاری اینسرت قالب، نمونه ها به مدت ۲ ساعت در دمای  $850^{\circ}C$  توسط کوره حرارت دهی و بعد در محیط روغن سرد شد که سختی میانگین  $HRC 63$  بدست داد. سپس برای افزایش چقرمگی، عملیات بازپخت در دمای  $650^{\circ}C$  انجام شد. که در نهایت سختی قالب ها به  $HRC 54$  رسید.

دارد. ارتفاع نمونه‌ها با میکرومتر دیجیتال و قطر داخلی با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه گرفته شد.

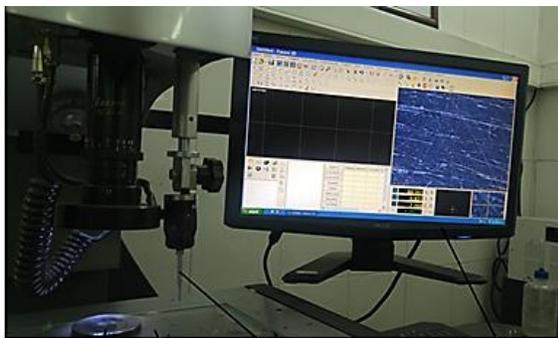


شکل ۴- حلقه‌های فشرده شده با ۲۵٪ و ۵۰٪ کار سرد.

نمونه‌های اینسرت تولید شده با روش‌های فوق در شکل ۳ نشان داده شده‌است.



شکل ۳- اینسرت‌های تولید شده با روش‌های شش‌گانه.



شکل ۵ ماشین اندازه‌گیری اتوماتیک تصویری. براب دستگاه، صفحه نمایش مغناطیسی، اینسرت، صفحه نمایش

آزمون فشار حلقه با استفاده از پرس هیدرولیکی ۲۵ تنی Rayco Technic با سرعت ثابت ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه در دمای ثابت محیط انجام شد. به منظور کاهش خطا هر آزمایش روی دو نمونه‌ی یکسان انجام شده‌است. آزمون فشار حلقه در دو میزان کار سرد  $r=25\%$  و  $r=50\%$  مطابق شکل ۴ انجام شده‌است. برای بررسی بافت سطح نمونه‌ها از پروفایل پروژکتور Easson با ریزنگری ۰/۱ میکرومتر و تکرارپذیری ۲ میکرون استفاده شد (شکل ۵). دقت در اندازه‌گیری ابعاد نمونه‌ها قبل و بعد از انجام آزمایش تأثیر زیادی روی نتایج آزمایش

در جدول ۱ طرح آزمایش‌ها شامل عوامل، سطوح عوامل و تعداد آزمایش‌ها ارائه شده است. در این تحقیق پارامترهایی که مورد بررسی قرار گرفته اند عبارت از روش ماشینکاری قالب شامل شش روش ساخت قالب (M.P)، حالت روانکاری (L.S) شامل خشک و استفاده از روانکار پارافین و درصد تغییر

شکل (D.R) شامل دو حالت ۲۵ و ۵۰ درصد تغییر شکل می باشد. زبری سطح قطعات فورج شده به عنوان تابع پاسخ تعریف شد. با طراحی آزمایش ها به روش طرح عاملی کامل [۱۹] تعداد کل ۲۴ آزمایش انجام شد. برای طراحی و تحلیل آزمایش ها از نرم افزار مینی تب استفاده شده است.

جدول ۱- طرح آزمایش ها

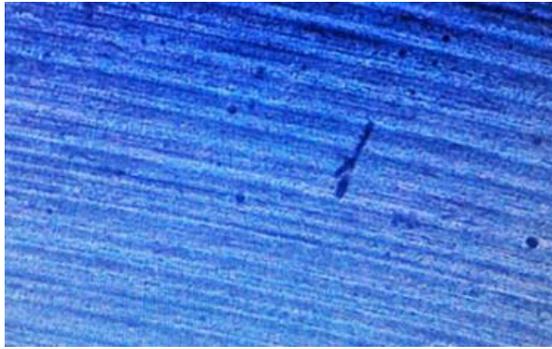
Run Order	M.P	D.R	L.S	Ra (μm)	Hardness (HRC)
1	HM	25	Dry	1.77	20.07
2	HM	25	Lubricated	1.79	16.26
3	HM	50	Dry	2.22	23.65
4	HM	50	Lubricated	2.1	22.11
5	VM	25	Dry	2.15	21.71
6	VM	25	Lubricated	1.84	18.15
7	VM	50	Dry	2.48	25.31
8	VM	50	Lubricated	2.07	24.32
9	EDM	25	Dry	1.95	15.63
10	EDM	25	Lubricated	1.73	17.11
11	EDM	50	Dry	2.39	22.42
12	EDM	50	Lubricated	2.22	20.21
13	GR	25	Dry	0.31	19.79
14	GR	25	Lubricated	0.33	19.66
15	GR	50	Dry	0.35	25.16
16	GR	50	Lubricated	0.42	25.92
17	GF	25	Dry	0.2	21.56
18	GF	25	Lubricated	0.26	21.63
19	GF	50	Dry	0.31	25.35
20	GF	50	Lubricated	0.32	23.12
21	TN	25	Dry	1.67	19.97
22	TN	25	Lubricated	1.6	20.17
23	TN	50	Dry	1.98	24.76
24	TN	50	Lubricated	1.8	21.76

### ۳- نتایج و بحث

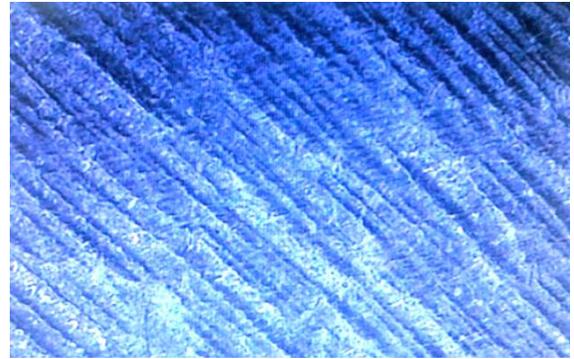
#### ۳-۱- اثر روش ساخت قالب بر بافت، زبری و

#### سختی سطح قالب

در شکل ۶ بافت و میزان زبری سطح بدست آمده برای اینسرت قالب ها که به وسیله روش های مختلف تولید، ماشین کاری شده نمایش داده شده است. مشاهده می شود که فرایندهای EDM و GF منجر به بافت سطح تصادفی، فرایندهای HM و GR بافت سطح یک سوپیه و VM بافت سطح یک سوپیه انحادار و TN بافت سطح دو سوپیه (دو ایرهم مرکز) شده است. مقدار زبری سطح برای همه فرایندها غیر از سنگ زنی و پرداختکاری ۲ تا ۳ میکرون است. جهت مقایسه تاثیر فرایند ساخت قالب بر نمونه ها سعی شده است که تا حد ممکن زبری سطح قالب ها نزدیک هم باشد.



$R_a = 3 \mu m$  VM:ب



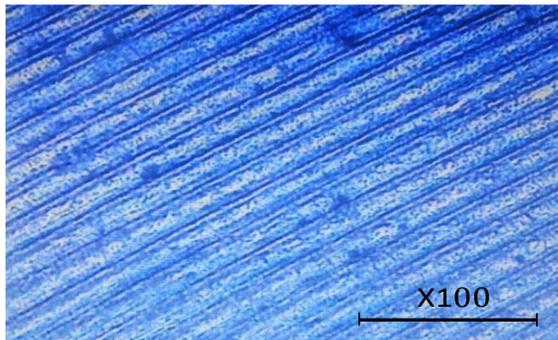
$R_a = 2 \mu m$  HM:الف



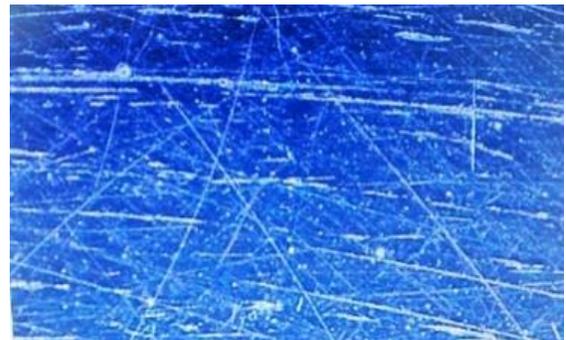
$R_a = 0.35 \mu m$  GR:د



$R_a = 3 \mu m$  EDM:ج



$R_a = 3 \mu m$  TN:و



$R_a = 0.025 \mu m$  GF:ه

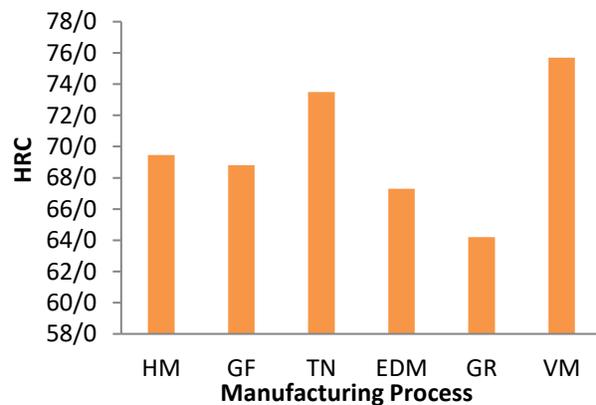
شکل ۶- بافت سطح اینسرت قالب بدست آمده از روش های الف) فرزکاری افقی، ب) فرزکاری عمودی، ج) ماشین کاری تخلیه الکتریکی، د) سنگ زنی ه) سنگ زنی و پرداخت، و) پیشانی تراشی با دستگاه تراش.

## ۲-۳- اثر روش ساخت قالب بر بافت سطح

### قطعه

در شکل ۸ بافت و زبری سطح نمونه‌های شکل داده شده با اینسرت‌های مختلف در حالت خشک با ۵۰ درصد فشردگی نمایش داده شده است. مطابق شکل، بافت سطح قطعات تا حد زیادی متأثر از سطح اینسرت است. با توجه به زبری اولیه قطعه که برابر  $0.5\mu\text{m}$  می‌باشد، اینسرت‌های GF و GR منجر به کاهش زبری سطح و اینسرت‌های دیگر به مقتضی زبری سطح خود باعث افزایش زبری قطعه شده است. همچنین راستای خواب سطح قطعه نیز متأثر از قالب است، به عنوان مثال اینسرت EDM خواب سطح تصادفی و اینسرت TN خواب سطح دوسویه ایجاد کرده است. حلقه‌های فشرده شده با اینسرت VM، زبری سطح بالایی را ایجاد کرده که از زبری اولیه بالا با جهت یک‌سویه اینسرت ناشی شده است. شکل دهی با اینسرت ماشین کاری شده با روش VM منجر به نمونه‌هایی کاملاً غیرمتمقارن شد که از ناهمسانگردی آشکار رفتار اصطکاکی سطح حکایت می‌کند. در بقیه‌ی موارد تغییر شکل نسبتاً همسانگرد ایجاد شد.

طبق شکل ۷، اینسرت‌های تولید شده به روش VM و TN بیشترین سختی را در بین اینسرت‌های دیگر دارند، که احتمالاً متأثر از بیشترین کار سرد انجام شده روی آنهاست. اینسرت تولید شده به روش EDM با داشتن زبری سطح نزدیک به VM و TN، سختی کمتری نسبت به آنها دارد که به نظر متأثر از عملیات ماشین کاری با تخلیه الکتریکی، بدون هیچگونه کار سرد است و شاید بتوان نتیجه گرفت سختی حاصل از تنش‌های مکانیکی بیشتر از سختی حاصل از تنش‌های حرارتی است. راجع به GR به نظر می‌رسد با سنگ‌زنی، لایه‌ی سخت شده در عملیات کونچ برداشته شده است و سطح زیرین سختی کمتری دارد.



شکل ۷- تأثیر فرایند ساخت بر سختی سطح

اینسرت‌ها.



ب: VM  $R_a = 2.48 \mu\text{m}$



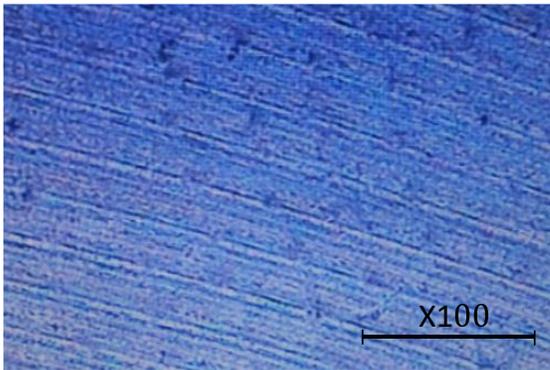
الف: HM  $R_a = 2.2 \mu\text{m}$



د: GR  $R_a = 0.347 \mu\text{m}$



ج: EDM  $R_a = 2.39 \mu\text{m}$



و: TN  $R_a = 1.98 \mu\text{m}$



ه: GF  $R_a = 0.307 \mu\text{m}$

شکل ۸ بافت سطح نمونه‌های شکل داده شده با اینسرت‌های تولید شده به روش الف) فرزکاری افقی، ب) فرزکاری عمودی، ج) ماشین کاری تخلیه الکتریکی، د) سنگزنی ه) سنگزنی و پرداخت و) پیشانی تراشی با دستگاه تراش.

### ۳-۳- عوامل موثر بر زبری سطح

فرایند بین ناهمواری های سطوح محصور شود و این مسئله در سطوح صیقلی اتفاق نمی افتد.

در شکل ۱۱ اثر متقابل فاکتورهای نوع فرایند ساخت اینسرت و حالت روانکاری و میزان کار سرد انجام شده در تأثیر روی زبری سطح نمونه ها نشان داده شده است. مشاهده می شود که در حالت های HM، GF و GR استفاده از روانکار در مقدار زبری سطح نمونه ها تأثیر چندانی ندارد اما در بقیه حالت ها در حالت روانکاری زبری سطح کاهش می یابد. این کاهش در حالت های VM، TN، و EDM قابل توجه است. کاهش بیشتر زبری سطح در این دو حالت می تواند ناشی از محبوس ماندن بهتر روانکار در ناهمواری های سطوح در این دو حالت باشد که باعث جلوگیری از انتقال کامل ناهمواری سطح از اینسرت به سطح نمونه می شود. همچنین مشاهده می شود که سطوح حاصل از اینسرت های HM، VM و EDM در حالت خشک دارای زبری سطح متفاوتی هستند اما در حالت روانکاری دارای زبری سطح یکسانی می شوند. به غیر از GF و GR در بقیه فرایندها با افزایش کار سرد زبری سطح افزایش قابل ملاحظه ای داشته است و در مجموع با استفاده از روانکار در هر دو حالت ۲۵٪ و ۵۰٪ زبری سطح اندکی کمتر شده است.

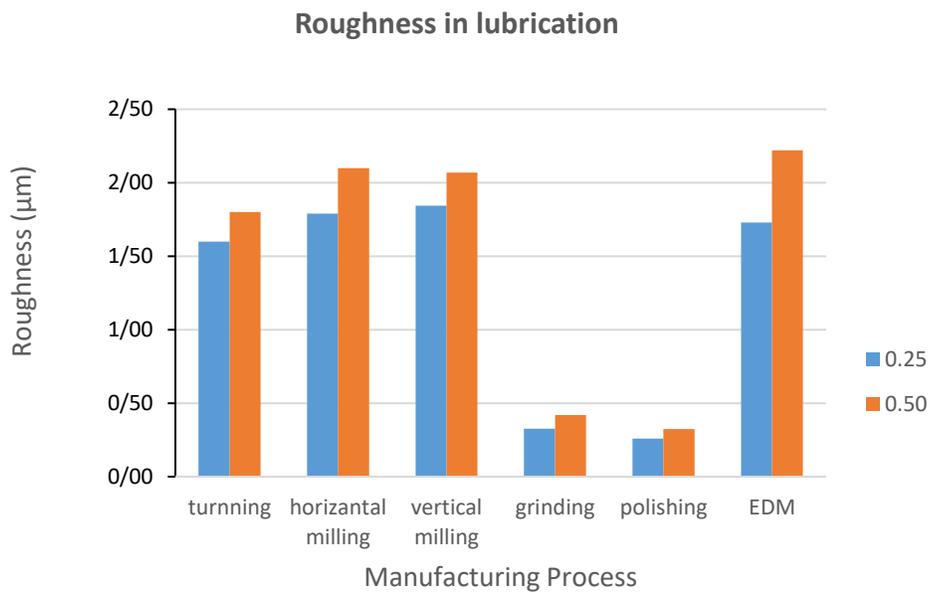
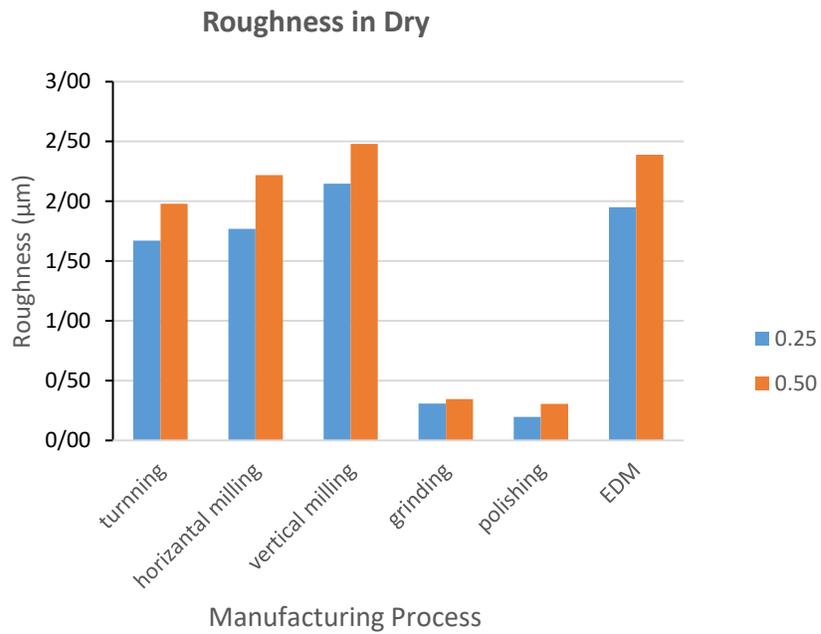
در **Error! Reference source not found.** ۳ زبری سطح حلقه و تغییرات آن در شکل دهی با استفاده از اینسرت های ماشین کاری شده به روش های مختلف ارائه شده است. نتایج برای درصد کاهش ارتفاع ۲۵٪ و ۵۰٪ به صورت مجزا اندازه گیری و مقدار متوسط و اختلاف این دو نیز ذکر شده است. به صورت مشابه، این نتایج برای حالت روانکاری نیز در ستون های بعدی مشخص و در ستون آخر اثر متوسط استفاده از روانکار بر زبری سطح بیان شده است (شکل ۹). کاهش زبری سطح حلقه در اثر استفاده از روانکار در مقایسه با حالت خشک در اغلب روش ها قابل مشاهده است که نشان می دهد اعمال روانکار مانع انتقال ناهمواری های سطح قالب به قطعه می شود.

سطح اینسرت VM دارای بیشترین زبری سطح ( $3 \mu m$ ) می باشد. در اثر استفاده از روانکار بیشترین کاهش زبری سطح محصول در مورد این قالب اتفاق افتاده است. از آن سو سطح حاصل از اینسرت های GR و GF کمترین زبری (حدود  $0.25 \mu m$ ) را داراست که در اثر استفاده از روانکار کمترین کاهش زبری سطح در این حالت رخ داده است. می توان استنباط کرد که روانکار در شرایطی بر زبری سطح تأثیر می گذارد که در حین

TN	GF	GR	EDM	VM	HM	کاهش ارتفاع
1.67	0.198	0.31	1.95	2.146	1.77	25%
1.98	0.307	0.347	2.39	2.48	2.22	50% زبری سطح
1.825	0.2525	0.3285	2.17	2.313	1.995	متوسط حالت خشک
0.31	0.109	0.037	0.44	3.334	0.45	( $\mu\text{m}$ ) اختلاف (در اثر افزایش کرنش)
1.6	0.26	0.326	1.73	1.844	1.79	25%
1.8	0.324	0.42	2.22	2.07	2.1	50% زبری سطح
1.7	0.292	0.375	1.975	1.95	1.945	متوسط حالت روانکاری
0.2	0.064	0.094	0.49	0.955	0.31	( $\mu\text{m}$ ) اختلاف (در اثر افزایش کرنش)
-0.13	0.04	0.04	-0.20	-0.36	-0.05	تغییر زبری سطح متوسط در اثر روانکاری

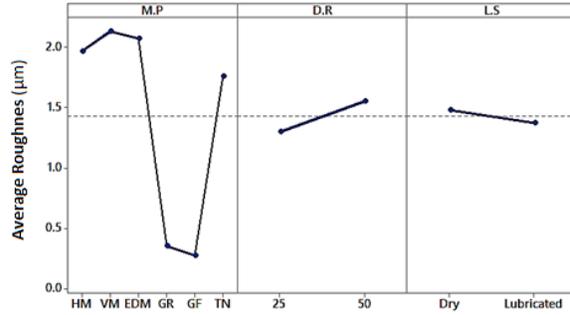
دارای زبری سطح نزدیک به هم ( $2-3\mu\text{m}$ ) بودند، سطح حاصل از این آنها در نمونه‌های حلقه، زبری سطح نزدیک به هم ایجاد می‌کند. همچنین در حالت کلی با افزایش میزان کار سرد، زبری سطح افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته و استفاده از روانکار تأثیر اندکی در کاهش زبری سطح دارد.

شکل ۱۰ اثرات اصلی حالت‌های مختلف ماشینکاری و روانکاری و میزان کار سرد بر زبری سطح نمونه آهنگری شده را نشان می‌دهد. اینسرت‌های سنگ‌زنی شده (GR) و سنگ‌زنی و پولیش شده (GF) که دارای سطح صیقلی هستند، منجر به زبری سطح کمتری در نمونه‌ها می‌شوند. همانطور که اینسرت‌های ماشینکاری شده با روش‌های تراشکاری (TN) و فرزکاری افقی (HM) و فرزکاری عمودی (VM) و اسپارک شده (EDM)

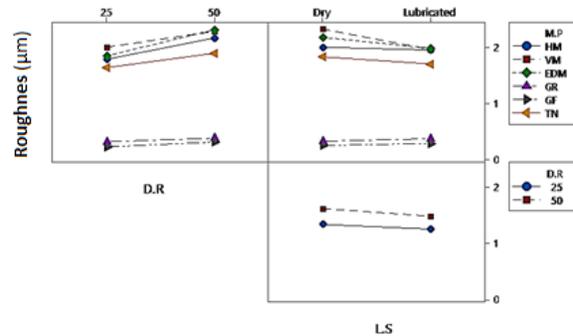
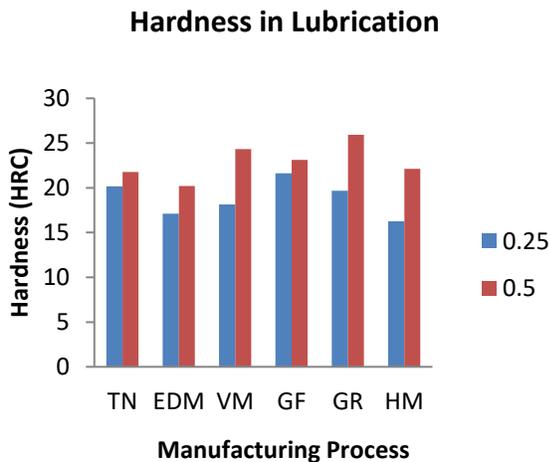
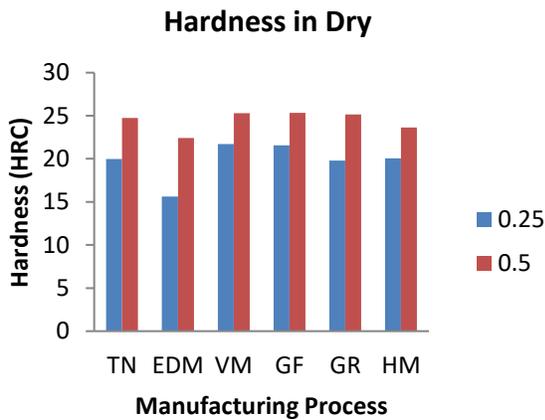


شکل ۹- تأثیر مقدار کارسرد، روانکار و روش ساخت قالب بر زبری سطح قطعه.

سختی بیشتری نسبت به قطعات با کار سرد ۲۵٪ دارند، که این نتیجه با توجه به میزان بالای کار سرد انجام شده طبیعی به نظر می‌رسد. برای بررسی تأثیر دو عامل روانکار و روش ساخت قالب، تفسیر نتایج با استفاده از این شکل مشکل است.



شکل ۱۰ - اثر فاکتورهای اصلی بر زبری سطح قطعه.



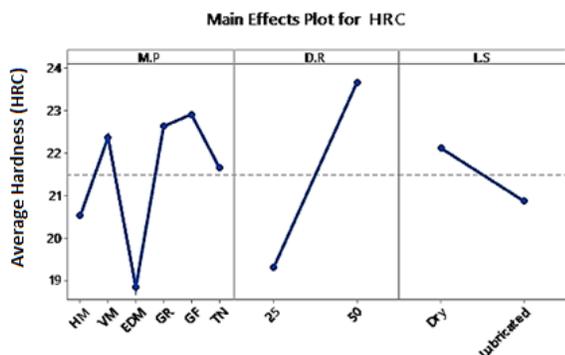
شکل ۱۱ - اثرات متقابل فاکتورها بر زبری سطح قطعه.

### ۴-۳ عوامل موثر بر سختی سطح نمونه‌ها

شکل ۱۲ - تأثیر مقدار کار سرد، روانکار و روش ساخت قالب بر سختی سطح قطعه.

در شکل ۱۲ تأثیر مقدار کار سرد، روانکار و روش ساخت قالب بر سختی سطح قطعات نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در همه روش‌های ساخت قالب و شرایط روانکاری، قطعات با کار سرد ۵۰٪،

و در نتیجه تأثیرات کارسختی بیشتری قالب بر قطعه بجا گذاشته است.



شکل ۱۳- اثر فاکتورهای اصلی بر سختی سطح قطعه.

شکل ۱۴ اثرات متقابل فاکتورها را روی سختی سطح قطعه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در همه فرایندهای ساخت قالب با افزایش مقدار کارسرد، سختی سطح قطعه افزایش می‌یابد و میزان افزایش سختی در حالت GR بیشتر است. تأثیر روانکار بر سختی سطح قطعه در حالت‌های مختلف روش ساخت قالب متفاوت می‌باشد. مشاهده می‌شود که در حالت‌های GR و GF و EDM استفاده از روانکار بر سختی سطح قطعه تأثیر چندانی ندارد اما در بقیه حالت‌ها استفاده از روانکار باعث کاهش سختی سطح قطعه شده است. علت این تأثیرات را اینگونه می‌توان توجیه کرد که در حالت‌های GR و

مطابق شکل ۱۳ با افزایش کار سرد از ۲۵٪ به ۵۰٪ سختی سطح قطعات به طور میانگین حدود ۲۵ درصد افزایش می‌یابد که تأثیر قابل توجه کارسختی را در افزایش سختی سطح قطعات نشان می‌دهد. از سوی دیگر مشاهده می‌شود که در حالت استفاده از روانکار سختی سطح قطعات بطور میانگین حدود ۵ درصد کاهش می‌یابد؛ این کاهش می‌تواند ناشی از ممانعت روانکار از تأثیر کامل ناهمواری‌های سطح قالب بر سطح قطعه باشد. البته این تأثیر بستگی به بافت سطح قالب در هر یک از روش‌های ساخت قالب متفاوت است که در شکل ۱۳ توضیح داده خواهد شد. تأثیر روش ساخت قالب بر سختی سطح قطعه نیز نشان داده شده است مشاهده می‌شود که شکل‌دهی با قالب ماشینکاری شده با روش EDM باعث کمترین سختی سطح قطعه می‌شود. علت این پدیده می‌تواند بافت سطح ناشی از این فرایند باشد که در این حالت با وجود زبری بالای سطح قالب به دلیل هموار بودن و تیزی کمتر لبه‌های حفره‌های ناشی از فرایند EDM، تأثیر کار سختی کمتری بر قطعه دارد. بیشترین سختی مربوط به روش‌های GF و GR است علت این امر مربوط به زبری کم سطح و نزدیک قالب حاصل از این دو فرایند به زبری سطح قطعه (۰/۵μm) است که در این حالت دو سطح قالب و قطعه اندرکنش بیشتری روی هم داشته

#### ۴- نتیجه گیری

با تهیهی قالب به روش‌های فرزکاری افقی و عمودی، تراشکاری، EDM، سنگزنی و پرداختکاری و با استفاده از آزمون فشار حلقه تأثیر نوع فرایند و میزان کار سرد و حالت روانکار بر زبری سطح و سختی قطعات آهنگری شده مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق به صورت زیر جمع‌بندی می‌شود.

۱- بافت سطح قطعات آهنگری شده متأثر از بافت سطح اینسرت‌ها و زبری سطح قطعات متناسب با زبری سطح اینسرت‌ها می‌باشد.

۲- با افزایش میزان کار سرد، زبری سطح قطعات افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته و استفاده از روانکار تأثیر اندکی در کاهش زبری سطح دارد.

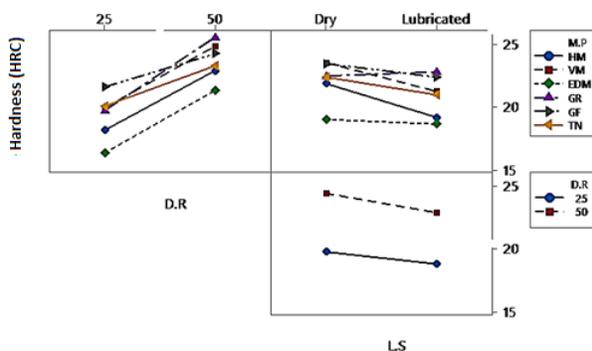
۳- استفاده از روانکار در حالت های VM و EDM باعث کاهش زبری سطح می شود اما در بقیه اینسرت‌ها تأثیر چندانی ندارد.

۴- در حالت استفاده از روانکار سختی سطح قطعات بطور میانگین حدود ۵ درصد کاهش می یابد.

۵- با افزایش کار سرد از ۲۵٪ به ۵۰٪ سختی سطح قطعات به طور میانگین حدود ۲۵ درصد افزایش می یابد.

۶- شکل‌دهی با قالب ماشینکاری شده با روش EDM باعث کمترین سختی سطح قطعه شده و بیشترین سختی سطح قطعه مربوط به

GF به علت زبری کمتر سطح قالب در هنگام عملیات شکل‌دهی، رونکار از سطح تماس زودتر خارج می‌شود و بنابراین تأثیر قابل توجهی ندارد، اما در بقیه حالت‌ها غیر از روش EDM با توجه به زبری سطح قابل توجه و بافت سطح، روانکار در سطح تماس تا حدودی محبوس شده و در نتیجه مانع تأثیر بیشتر ناهمواری‌های سطح قالب بر سطح قطعه کار شده بنابراین سختی سطح قطعه کمتر می‌شود. در مورد EDM همانطور که قبلاً توضیح داده شد با توجه به بافت سطح خاص که دارای حفره‌هایی با لبه‌های هموار است، با وجود زبری قابل توجه سطح حاصل از این فرایند، سختی سطح قطعه در هنگام استفاده از روانکار تغییر قابل توجهی نمی‌کند.



شکل ۱۴ - اثرات متقابل فاکتورها بر سختی سطح.

friction condition in cold forging by ring with boss compression test, *Journal of Materials Processing Technology* 224 (2015) 18–25.

[9] Dawei ZHANG, Bingkun LIU, Jingxiang LI, Minchao CUI, Shengdun ZHAO, 2018, Variation of the friction conditions in cold ring compression tests of medium carbon steel

[10] Gholamreza Hosseinpour, Mahdi Gerdooei & Vali Alimirzaloo, Influence of Die Machining Operation on the Friction Condition in the Cold Forming Process

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

[12] Groche P, Stahlmann J, Hartel J, Köhler M, 2009. Hydrodynamic effects of macroscopic deterministic surface structures in cold forging processes, *Tribology International* 42(8), pp.1173–S1179.

[13] Hana J, Zhua J, Zheng W, Wanga G, 2019, Influence of metal forming parameters on surface roughness and establishment of surface roughness prediction model, *International Journal of Mechanical Sciences*, 163, 105093.

[14] J. Stahlmann J, Nicodemus E.R, Sharma S.C, Groche P, 2012. Surface roughness evolution in FEA simulations of bulk metal forming process, *Wear* 288, 78-87.

[15] Zabala A, Argandona E.S.d, Canizares D, Llavori I, Otegi N, Mendiguren J, 2022, Numerical study of advanced friction modelling for sheet metal forming: Influence of the die local roughness, *Tribology International* 165, 107259.

شکل دهی با قالب های ماشین کاری شده با روش های GF و GR است.

## مراجع

[1] Behrens B. A, Bouguecha A, Lüken I, Mielke J, Bistrion M, Garbsen, Germany , 2014. Tribology in Hot Forging, *Comprehensive materials processing*. Vol 5 , P. 211-234.

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

[3] Zhu Y, Zeng W, Ma X, Tai Q, Li Z, and Li X, 2011. 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.

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

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

[6] Alves M, Karagiozova D, Micheli GB, Calle MAG, November 2012. *International Journal of Impact Engineering*, Volume 49, Pages 130-141

[7] Forcellese A, Mancini, E, Sasso M, Simoncini M, 2016. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89. (1-4). doi: 10.1007/s00170-016-9049-7

[8] Chengliang Hu, Hengan Ou, Zhen Zhao, 2015, An alternative evaluation method for

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

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

[18] Klaus S, Andre L.H, Saulo C.P, 20 October 2006. The influence of the manufacturing strategy on the production of molds and dies. Journal of Materials Processing Technology, Volume 179, Issues 1-3, Pages 172-177

[19] Montgomery D.C, 2001. Design and analysis of experiments, john wiley & sons.