



شبیه‌سازی و بررسی امکان صیقل کاری قالب فورج با انحنای خاص به روش ماشین کاری با جریان سایشی

داریوش عبدالهی¹، سید محسن صفوی^{2*}

1- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 84156-83111، mosafavi@cc.iut.ac.ir

کلیدواژگان

چکیده

صیقل کاری

ماشین کاری با جریان سایشی

شبیه‌سازی

امروزه در صنایع مختلف سعی بر این است تا از به کارگیری انسان تا حد امکان کاسته شود چراکه این امر مستلزم صرف زمان و هزینه‌ی زیاد، نیاز به مهارت بالا و احتمال وجود خطای انسانی می‌باشد. به همین منظور جهت حذف پرداخت دستی، این مقاله به بررسی پرداخت قالب فورج با سطح انحنادار که با فرایند ماشین کاری با تخلیه الکتریکی تولید شده، توسط روش ماشین کاری با جریان سایشی پرداخته است. این قالب‌ها معمولاً به صورت دستی پرداخت می‌شوند. روش ماشین کاری با جریان سایشی به طور معمول برای صیقل کاری نواحی از قطعه‌کار به کار می‌رود که در راستای جریان سایشی باشند. به همین منظور برای توزیع جریان در انحنای قالب از قطعه‌ی واسطه‌ای برای ایجاد گذرگاه استفاده شده است. شبیه‌سازی دو فازی (سیال - جامد) جریان در دو بعد نشان می‌دهد که مجموع فشار در هر نقطه در یک کورس کامل (کورس رفت و کورس برگشت) تقریباً برابر مقدار ثابتی است که با توجه به رابطه‌ی مستقیم میزان براده‌برداری در فرایند با میزان فشار، می‌توان پرداخت یکنواختی را انتظار داشت. آزمایش‌های صورت گرفته نیز صحت شبیه‌سازی را اثبات می‌کنند. آزمایش‌های تجربی نشان داد که هرچه اندازه‌ی دانه‌های ساینده بزرگتر باشد، میزان براده‌برداری نیز بیشتر است. همچنین با افزایش تعداد کورس و غلظت ساینده، نرخ براده‌برداری نیز افزایش می‌یابد. دقت ابعادی نیز در این فرایند حفظ شده است.

Simulation and study of polishing of special curvature based forging die by using abrasive flow machining

Dariush Abdollahi, Seyed Mohsen Safavi*

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

* P.O.B. 84156-83111 Isfahan, Iran, mosafavi@cc.iut.ac.ir

Keywords

Finishing
Abrasive Flow Machining
Simulation

Abstract

Nowadays in different industries, researchers perform many attempts to reduce manpower because it is time consuming and needs high cost, high skill, and involves more human error. For this reason, for eliminating of the manual finishing, this article investigates finishing of special curvature based forging die manufactured by EDM process, the finishing process is performed by abrasive flow machining. These dies usually are finished manually. Abrasive flow machining is used for polishing of points of workpiece, which are in the direction of abrasive flow. This is the reason that, for flow distribution in die curvature an intermediate piece is used in other to provide a passage. Two phase simulation (fluid/solid) of flow in two dimensions shows that the total pressure at each point in complete cycle (piston stroke) is equal to a constant value since a direct relation exists between the amount of material removal in the process and the pressure amount, a uniform polishing could be expected. Performed experiments assert correctness of simulation. Empirical tests showed that the abrasive grain size is larger, the material removal rate is also higher. Also, by increasing the number of courses and concentrations of abrasive, material removal rate is also increasing. Dimensional accuracy has been maintained in this process.

1- مقدمه

در قالب به منظور کاهش اصطکاک، جدا شدن ساده قطعه‌ی تولیدی از قالب، کاهش استهلاک، افزایش کیفیت قطعات تولیدی از نظر صافی سطح با حفظ کامل شکل هندسی و یا به عنوان پیش نیاز برای انجام یک سری دیگر فرایندها روی فولاد و

پرداخت کاری یک روش مؤثر برای بهبود دقت و زبری قطعه‌کار در ماشین کاری با دقت بالا می‌باشد [2,1]. پرداخت کاری در قطعات مختلف مخصوصاً در قالب‌ها کاربرد دارد. پرداخت کاری

Please cite this article using:

D. Abdollahi, S. M. Safavi, Simulation and study of polishing of special curvature based forging die by using abrasive flow machining, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 48-57, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

برگشتی درون قطعه جریان می‌یابد. این فرایند از طریق مسیرهای تشکیل شده بوسیله قطعه و ابزار کار انجام می‌گیرد.

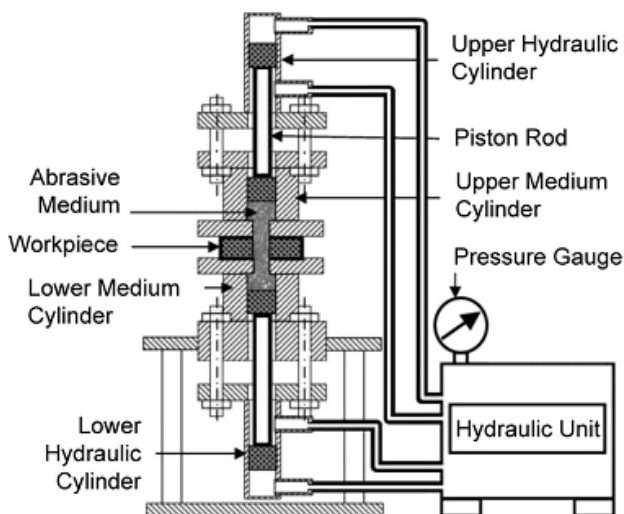


Fig. 1 Schematic diagram of AFM [4]

شکل 1 اجزای تشکیل دهنده دستگاه ماشین‌کاری با جریان سایشی [4]

بازده فرایند به پارامترهایی بستگی دارد که می‌توان آنها را در سه دسته قرار داد [4]:

- 1- پارامترهای مدیا (گرانروی، مواد ساینده، مش ذرات ساینده، غلظت ساینده و دما)؛
- 2- پارامترهای فرایند ماشین‌کاری با جریان سایشی (فشار، جریان حجمی، تعداد سیکل و زمان ماشین‌کاری)؛
- 3- پارامترهای قطعه کار (مواد، سختی، زبری، فرایند پیش ماشین‌کاری، جهت بافت و شکل قطعه‌کار).

در این بخش به تعدادی از کارهای انجام شده روی قطعات مختلف توسط روش ماشین‌کاری با جریان سایشی پرداخته می‌شود. کان یو چن و کن چون چنگ [5] از این روش برای پرداخت کثیرالاضلاع استفاده کردند. آن‌ها بطور تجربی دریافتند که استفاده از قطعه‌ی واسط (ماندرل) ماریچ باعث توزیع یکنواخت مدیا شده و نرخ کرنش را از 72% به 42% کاهش می‌دهد. کندا و همکاران [6] از فرایند ماشین‌کاری با جریان سایشی برای پرداخت و بهبود سطح چرخ‌دنده‌های پلاستیکی استفاده کردند و نشان داده‌اند که بسیار مؤثرتر از پرداخت دستی است. جیونگ و همکاران [7] برای پلیسه‌گیری قطعه کولت فنی از فرایند ماشین‌کاری با جریان سایشی استفاده کردند و دریافتند که بازده بالاتری نسبت به دیگر فرایندها دارد. سینگ و همکارانش [8]، به پرداخت‌کاری قطعه‌ی استوانه‌ای از جنس $Al/15\text{ wt\% SiC}_p\text{-MMC}$ کردند. آن‌ها بر مبنای روش تاگوچی به بهینه‌سازی پارامترهای فرایند پرداختند. طراحی آزمایش

در نتیجه به منظور افزایش عمر قالب انجام می‌شود. قالب‌هایی که شکل‌های پیچیده‌ای دارند معمولاً به صورت دستی پرداخت می‌شوند. پرداخت دستی بسیار پرهزینه، زمان‌بر و همراه با خطای انسانی می‌باشد. پرداخت دستی همچنین به افراد با مهارت بالا نیاز دارد. قطعه مورد استفاده در این پژوهش، قالب فورج به شکل مخروطی و دارای انحنای بوده که به‌وسیله فرایند ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی تولید شده است و در ردیف قالب‌های با شکل پیچیده دسته‌بندی می‌شود. این قالب‌ها نیز به صورت دستی پرداخت می‌شوند. برای حذف پرداخت دستی نیاز به فرایند انعطاف‌پذیری است که قابلیت دسترسی به نقاط مختلف هندسه را داشته باشد. برای این منظور روش‌هایی وجود دارند، اما زمان‌بر بوده و محدودیت شکل و هزینه‌ی بالایی دارند. در این زمینه ماشین‌کاری با جریان سایشی¹ فرایند بسیار مؤثری می‌باشد. هدف اصلی ماشین‌کاری با جریان سایشی جایگزینی برای صیقل‌کاری دستی قطعات کوچک با هندسه‌ی پیچیده است، در جایی که عملیات دستی صیقل‌کاری گران‌قیمت و زمان‌بر است. پرداخت با جریان سایشی یک فرایند پرداخت پیشرفته است و بیشتر برای پلیسه‌گیری، تیزی‌گیری، صیقلی نمودن، برطرف کردن لایه‌ی انجماد مجدد و ایجاد تنش‌های پسماند فشاری به‌کار می‌رود [3]. ماشین‌کاری با جریان سایشی قادر به پرداخت‌کاری مواد مختلف از قبیل آلومینیوم، فولادهای عملیات حرارتی شده و تنگستن کاربرد می‌باشد. یکی از مشکلات فرایند ماشین‌کاری با جریان سایشی تعیین ارتباط بین پارامترها و نتایج فرایند می‌باشد.

شکل 1 طرح کلی از اجزای تشکیل دهنده دستگاه ماشین‌کاری با جریان سایشی را نشان می‌دهد. این فرایند بوسیله شرکت اکستروود هون² در سال 1960 در ایالات متحده به عنوان روشی برای پلیسه‌گیری و صیقل نمودن سطوح و لبه‌هایی که دسترسی به آنها مشکل است، به کار گرفته شد. در فرایند ماشین‌کاری با جریان سایشی مقدار کمی از مواد بوسیله جریان سیال مملو از ذرات ساینده که مدیا³ نامیده می‌شود از سراسر سطوح قطعه کار برداشته می‌شود. طبق شکل 1، قطعه بین دو سیلندر مدیا بالایی و پایینی که سیال ساینده (مدیا) را درون خود جای داده، گیره‌بندی می‌شود و سیال ساینده توسط دو سیلندر هیدرولیک که در قسمت فوقانی و تحتانی قرار گرفته‌اند به صورت عمودی درون سیلندرهای مدیا از عقب و جلو تزریق می‌شود. بدین ترتیب سیال ساینده یا مدیا بصورت رفت و

¹ Abrasive Flow Machining (AFM)

² Extrude Hone

³ Media

هیدرولیک گیره‌بندی شود.

شکل 3 قالب مورد نظر را نشان می‌دهد. هدف این پژوهش پرداخت دندانه قالب می‌باشد که در شکل 3 با عدد (1) نشان داده شده است. با توجه به اینکه چنین قطعه‌ای برای اولین بار است که با این روش پرداخت می‌شود و با توجه به هندسه قالب که در راستای جریان مدیا یا محور سیلندر مدیا نیست، نیاز به بکارگیری قطعه واسطه‌ای (ماندرل³) است تا جریان مدیا یا سیال ساینده توسط آن در قالب بطور یکنواخت توزیع شود تا در کل قالب پرداخت یکنواخت صورت گیرد. هندسه ماندرل شبیه به هندسه قالب اما با مقیاس کوچکتر است تا بین ماندرل و قالب شکاف یا گذرگاهی برای عبور مدیا جهت پرداخت سطح قالب ایجاد شود. در بخش بعدی شبیه‌سازی فرایند بیان خواهد شد.



Fig. 2 AFM of complex work pieces [11]

شکل 2 قطعات پیچیده ماشین‌کاری شده با جریان سایشی [11]

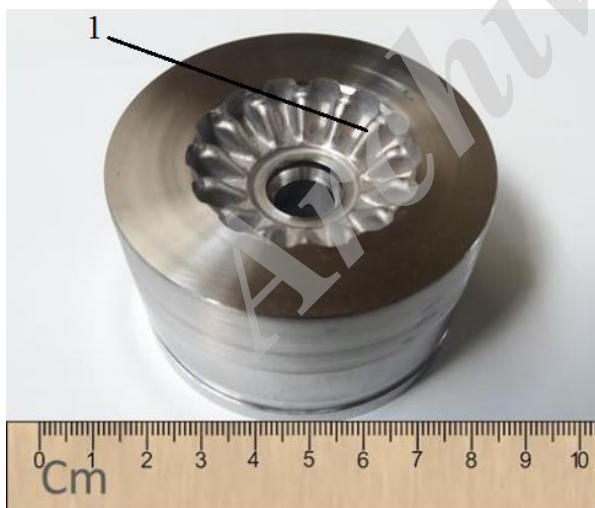


Fig. 3 Work pieces

شکل 3 قطعه‌کار

2- شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی

دینامیک سیالات محاسباتی علم پیش‌بینی رفتار جریان سیال، انتقال حرارت و جرم، واکنش‌های شیمیایی و پدیده‌های مرتبط

تاگوچی بصورت $L_{18}(6^{137})$ آرایه‌ی متعامد برای تعیین نرخ S/N^1 و بهینه‌سازی پارامترهای فرایند استفاده کردند. مدل‌های ریاضی $\Delta R_a, R_t, R_a, \Delta R_t$ و نرخ براده‌برداری برای بررسی پارامترهای ماشین‌کاری با جریان سایشی برقرار کردند. پوساک و همکاران [9] از یک شیوه‌ی جدید با نام ماشین‌کاری با جریان سایشی با ماندرل قابل حرکت استفاده کردند. در این روش از یک ماندرل قابل حرکت در هندسه‌های داخلی در شرایط خشک استفاده می‌شود. آنها ادعا کردند که این روش برای اصلاح عیوب ناشی از فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی² مناسب است و بازده انرژی خوبی دارد. شبگرد و همکاران [10] به بررسی فرایند ماشین‌کاری با جریان سایشی در پرداخت فولاد ابزار گرم کار H13 با اعمال میدان مغناطیسی خارجی حول قطعه‌کار پرداختند. آنها نشان دادند که با افزایش مش ذرات ساینده، زبری سطح و نرخ براده‌برداری کاهش می‌یابد و همچنین افزایش شدت میدان مغناطیسی سبب افزایش نرخ براده‌برداری و بهبود صافی سطح می‌شود. افزایش سختی قطعه‌کار نیز نرخ براده‌برداری را کاهش داده و در شرایط برابر، صافی سطح بیشتر است.

هندسه اکثر قطعاتی که در کارهای گذشته مورد مطالعه قرار گرفتند، بصورت استوانه‌ای ساده و یا در مواردی که از آن به‌عنوان قطعات پیچیده یاد شده است، دارای هندسه‌ای در راستای محور خود قطعه یا محور سیلندر مدیا بودند (شکل 2). در این پژوهش قطعه مورد مطالعه بصورت مخروطی و انحنا دار می‌باشد که هندسه آن هم راستا با محور سیلندر مدیای دستگاه نمی‌باشد، این امر پرداخت قطعه را با مشکل مواجه می‌کند چراکه سیال ساینده بطور مناسب با سطح شیب‌دار و انحنا دار در تماس نبوده و جریان نمی‌یابد و به درستی در هندسه قطعه توزیع نمی‌شود تا پرداخت قابل قبولی بدست آید (شکل 3). به همین دلیل است که نیاز به ماندرل برای توزیع سیال و پرداخت مناسب قطعه وجود دارد. این چالش به همراه جنس سخت قطعه‌کار که فولاد SPK است، جنبه‌های جدید این پژوهش محسوب می‌شوند، چراکه به دلیل سختی بالای این فولاد، در هیچ پژوهشی پرداخت این ماده با روش ماشین‌کاری با جریان سایشی مشاهده نشده است. چالش دیگر طراحی فیکسچر متناسب با قطعه و دستگاه برای موقعیت‌دهی قطعه در راستای محور سیلندر مدیا است، بطوریکه قطعه درون فیکسچر، بین سیلندرهای مدیای بالایی و پایینی قرار گرفته و با فشار

¹ Signal to Noise Ratio

² Wire Electric Discharge Machining

³ Mandrel

میکرومتر در نظر گرفته شده است. چگالی مدیا 2800kg/m^3 و گرانیوی آن $1000\text{Pa}\cdot\text{s}$ می‌باشد [11].

برای حل معادلات از نرم‌افزار انسیس فلونت 15 استفاده شده است. در این مطالعه از مدل مخلوط¹ جریان چند فاز مایع-جامد استفاده شده است. شکل 4 هندسه طرح و هندسه سیال دوبعدی استخراج شده از آن را نشان می‌دهد.

جدول 1 شرایط مرزی [11]

مقدار	شرط مرزی
5MPa	فشار ورودی
3MPa	فشار خروجی
40%	گرانیوی
1000Pa.s	کسر حجمی

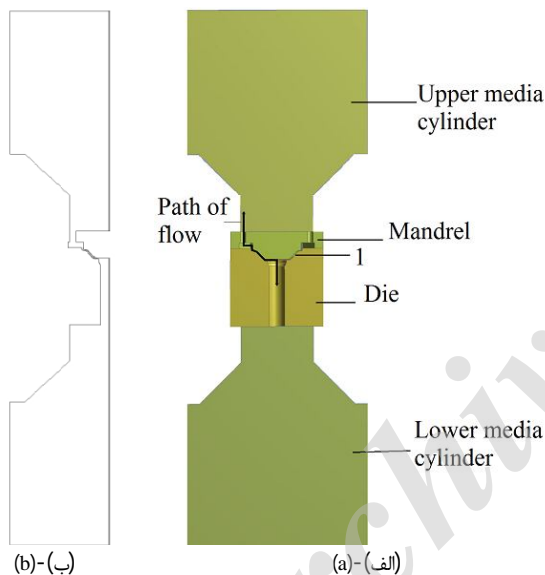


Fig. 4 (a) Geometry of design for simulation (b) Extracted 2D fluid model symmetrically

شکل 4 الف) هندسه طرح برای شبیه‌سازی ب) سطح سیال استخراج شده از هندسه به صورت متقارن

از شکل‌های 5، 6 و 7 می‌توان دریافت که تغییرات سرعت هنگام ورود به قالب شروع می‌شود و حداکثر سرعت در مرکز بوده و هرچه به دیواره نزدیک می‌شود سرعت کاهش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند گرانیوی بالای مدیا و سرعت اندک نزدیک دیواره می‌باشد. توزیع فشار (شکل‌های 8، 9 و 10) نشان می‌دهند که فشار تا قبل از ورود به قالب ثابت است و در بیشترین مقدار خود قرار دارد و به تدریج کاهش یافته تا از 5 MPa به 3 MPa برسد.

با آنها با استفاده از حل عددی مجموعه معادلات ریاضی حاکم بر آنها می‌باشد. لذا برای کاهش هزینه و بررسی میزان توزیع فشار در قالب حین فرایند، در این پژوهش شبیه‌سازی دو بعدی جریان به صورت دو فازی انجام شده است. ساخت تجهیزات مثل ماندل و فیکسچر متناسب با آن، بطوری که عملکرد مناسب داشته باشند، هزینه بر می‌باشد. به همین دلیل باید به گونه‌ای مطمئن شد که طرح ماندل و فیکسچر انتخاب شده کارایی مناسب را داشته باشند و باعث براده‌برداری یکنواخت قطعه شوند تا دقت ابعادی نقاط پرداخت کاری مورد نظر حفظ شود. بهترین راه برای کاهش هزینه، شبیه‌سازی فرایند با حضور ماندل می‌باشد. از طرفی چون عامل اصلی براده‌برداری، فشار موجود در محیط ماشین‌کاری است [12] لذا پارامتر فشار در شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ماهیت فرایند ماشین‌کاری با جریان سایشی بصورت رفت و برگشتی است و به دو کورس رفت و برگشت تقسیم می‌شود. دستگاه به گونه‌ای کار می‌کند که فشار سیال ساینده هنگام ورود به قطعه در هر کورس بیشتر از فشار خروجی آن از قطعه است. بطور مثال اگر کورس رفت از پایین به سمت بالا باشد، فشار در پایین بیشتر از فشار در بالاست تا سیال از پایین به سمت بالا جریان یابد. در کورس برگشت عکس این قضیه رخ می‌دهد. بنابراین اگر با توجه به مشخصات دستگاه و طرح ماندل بررسی شود که توزیع فشار در مجموع دو کورس رفت و برگشت در سراسر قطعه یکنواخت است، پس می‌توان ادعا کرد که پرداخت یکنواختی وجود خواهد داشت و دقت ابعادی حفظ خواهد شد و طرح ماندل مناسبی انتخاب شده است. همان‌طور که قبلاً عنوان شد چون هدف پژوهش بررسی امکان پرداخت دندان قالب می‌باشد، شبیه‌سازی‌ها بصورت دوبعدی در مقطعی که دندان قرار دارد، صورت گرفته است. در این شبیه‌سازی‌ها تأثیر فاصله شکاف بین ماندل و قالب بر روی فشار نیز مورد بررسی قرار گرفته است. زاویه فیکسچر 45 درجه و فاصله شکاف در سه سطح مقیاس 2%، 4% و 6% کمتر از هندسه قالب انتخاب شده است، بدین معنی که در شبیه‌سازی‌ها از ماندل با سه مقیاس 98%، 96% و 94% نسبت به هندسه قالب استفاده شده است. ترکیب موارد فوق تعداد سه تحلیل عددی را شامل می‌شود.

در تحلیل عددی با توجه به عدد رینولدز پایین جریان آرام در نظر گرفته شده است. سیال نیوتنی و غیرقابل تراکم و همگن در نظر گرفته شده است. طبق جدول 1 شرط مرزی در ورودی، فشار 5MPa و در خروجی 3MPa می‌باشد. کسر حجمی ذرات ساینده که سیلیکون کارباید (SiC) 40% و با قطر متوسط 109

¹ Mixture

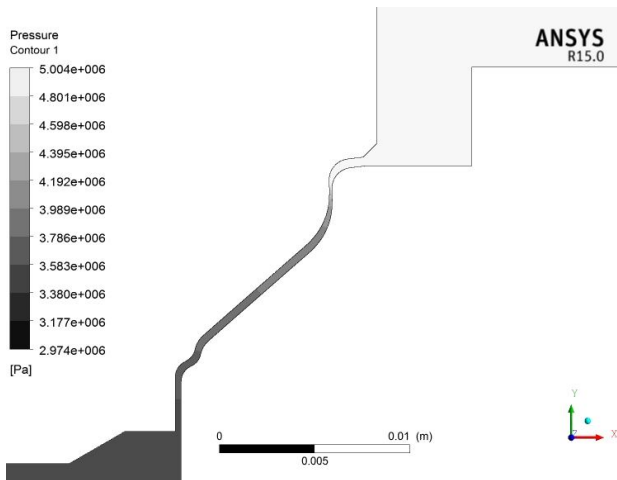


Fig. 8 Contour of pressure in mandrel 98% state
شکل 8 کانتور فشار در حالت ماندل 98%

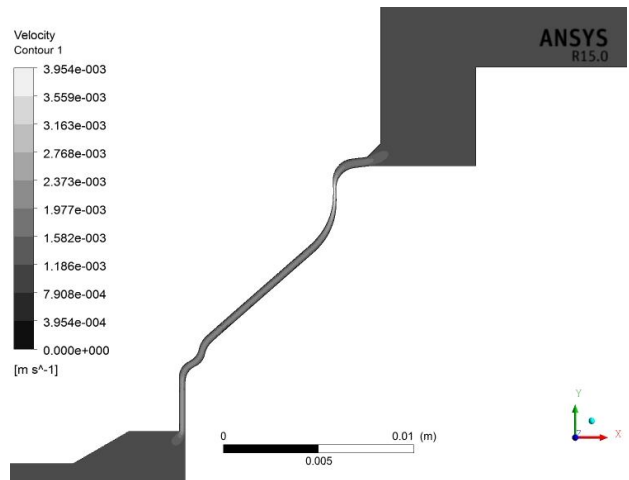


Fig. 5 Contour of velocity in mandrel 98% state
شکل 5 کانتور سرعت در حالت ماندل 98%

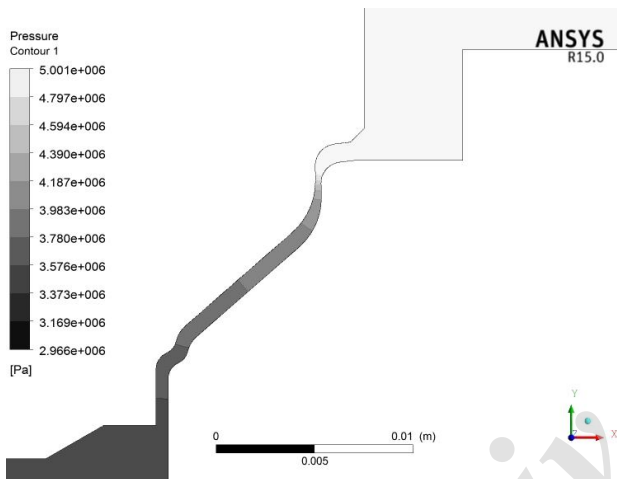


Fig. 9 Contour of pressure in mandrel 96% state
شکل 9 کانتور فشار در حالت ماندل 96%

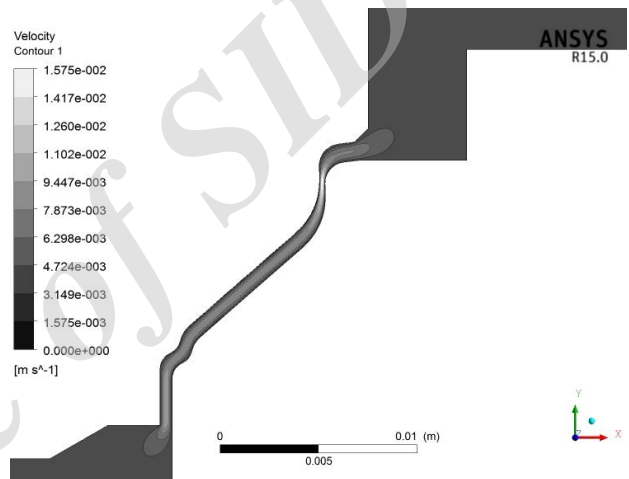


Fig. 6 Contour of velocity in mandrel 96% state
شکل 6 کانتور سرعت در حالت ماندل 96%

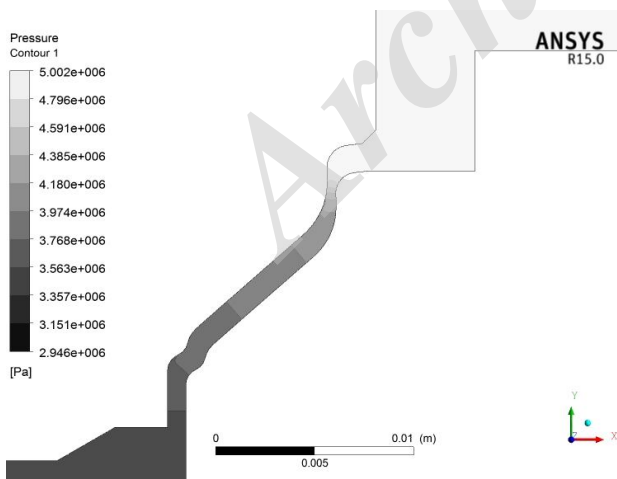


Fig. 10 Contour of pressure in mandrel 94% state
شکل 10 کانتور فشار در حالت ماندل 94%

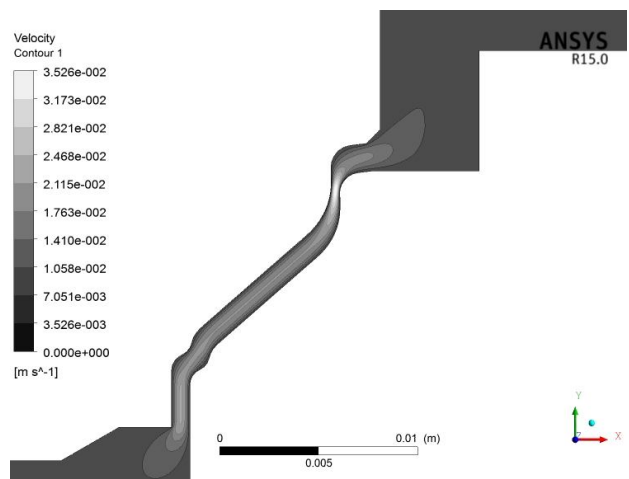


Fig. 7 Contour of velocity in mandrel 94% state
شکل 7 کانتور سرعت در حالت ماندل 94%

پس این معنی را می‌توان استنباط کرد که توزیع فشار به شکل هندسی وابسته بوده و مستقل از فاصله‌ی شکاف است. شکل‌های 11، 12 و 13 نرخ کرنش را نشان می‌دهند. نرخ کرنش

فشار با کاهش مقطع به شدت تغییر کرده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که توزیع فشار در همه‌ی حالت‌ها به طور تقریبی یکسان است.

تمام تحلیل‌ها برای یک نیم کورس انجام شده است. با توجه به این که فشار در تمام طول قالب یکسان نیست نمی‌توان انتظار پرداخت یکنواخت را در ماشین کاری با جریان سایشی با یک سیلندر مدیا که یک طرفه نامیده می‌شود، داشت. با شبیه‌سازی کورس برگشت در حالت ماندلر با مقیاس 96% (شکل 14) دیده می‌شود که در مناطقی از کورس رفت که حداکثر فشار وجود دارد، در کورس برگشت حداقل فشار مشاهده می‌شود. لذا می‌توان با ماشین کاری با جریان سایشی دو طرفه (با دو سیلندر مدیا) به پرداخت یکنواخت رسید.

3- وسایل و مواد

در فرایند ماشین کاری با جریان سایشی معمولاً نواحی مورد پرداخت در راستای جریان یعنی هم محور با سیلندره‌ای مدیا قرار دارد. در این مقاله هدف، بررسی پرداخت قطعاتی است که سطح آن‌ها هم محور با جریان مدیا یا محور سیلندر نمی‌باشد. برای این منظور از قالب فورج با انحنای خاص که در شکل 3 مشخص است، استفاده شده است. این قالب از جنس فولاد SPK می‌باشد و با روش ماشین کاری تخلیه الکتریکی تولید شده است. جدول 2 ترکیب شیمیایی فولاد SPK را نشان می‌دهد.

برای این منظور از دستگاه ماشین کاری با جریان سایشی دو طرفه استفاده شده است. در شکل 15 ساختار دستگاه مذکور نشان داده شده است. طول کورس 25cm، حجم مدیای $0/02m^3$ تنظیم شده است. تمام آزمایش‌ها در دمای اتاق انجام شده است. مدیا از ترکیب سیال حمل‌کننده و ذرات سیلیکون کاربرد ساخته شده است و تا حد امکان سعی شده تا گرانروی بالا به دست آید چراکه باعث شکل گرفتن بهتر آن در قالب می‌شود (شکل 16).

در دیواره‌ها حداکثر است، که نشانگر این موضوع است که در این نواحی تنش بیشتری برای براده برداری ایجاد خواهد شد، به همین دلیل انتظار می‌رود در دیواره‌ها براده برداری وجود داشته باشد.

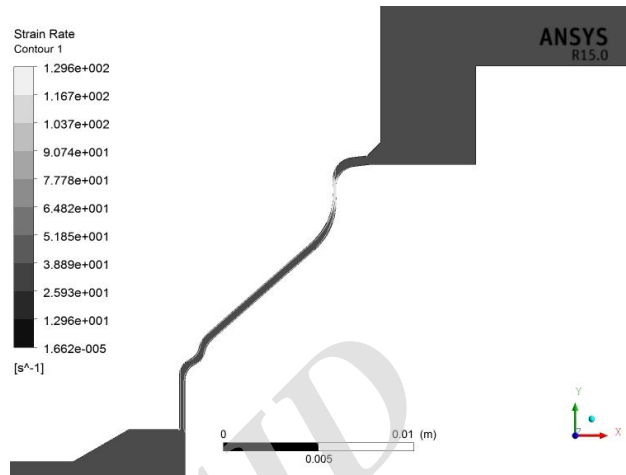


Fig. 11 Contour of strain rate in mandrel 98% state

شکل 11 کانتور نرخ کرنش در حالت ماندلر 98%

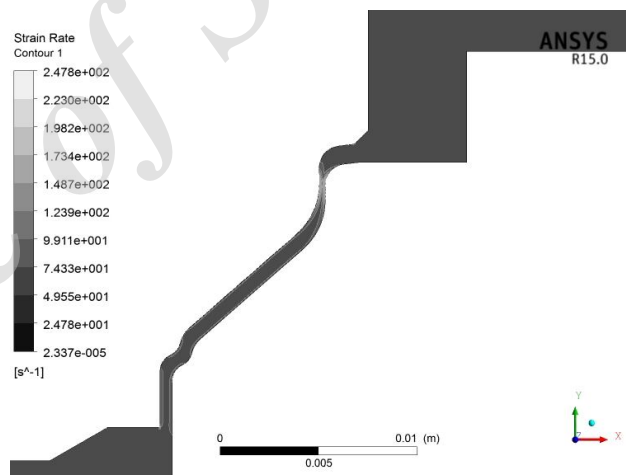


Fig. 12 Contour of strain rate in mandrel 96% state

شکل 12 کانتور نرخ کرنش در حالت ماندلر 96%

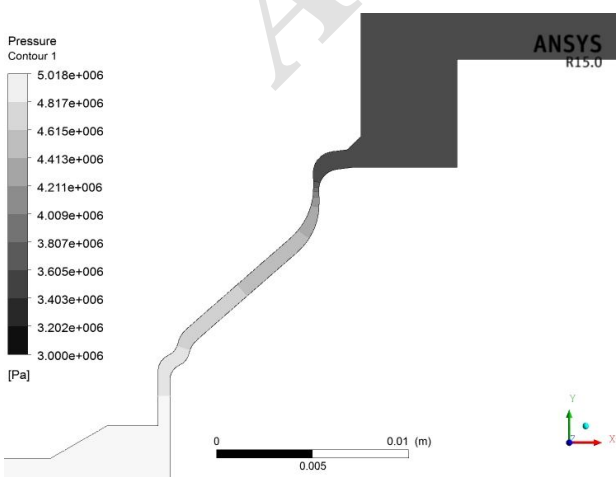


Fig. 14 Contour of back stroke pressure in mandrel 96% state

شکل 14 کانتور فشار کورس برگشت در حالت ماندلر 96%

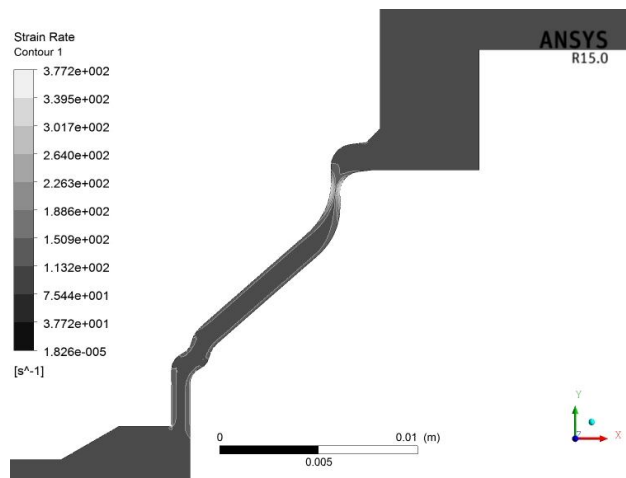


Fig. 13 Contour of strain rate in mandrel 94% state

شکل 13 کانتور نرخ کرنش در حالت ماندلر 94%

جدول 2 ترکیب شیمیایی فولاد SPK [13]

نام عنصر	کربن	سیلیسیم	منگنز	فسفر	گوگرد	کروم
درصد عنصر	1.9-2.20	0.1-0.4	0.15-0.45	0.03max	0.03max	11-12

پیکان‌های مشخص شده در شکل از فضای بین ماندرل و قالب وارد یا خارج می‌شود تا باعث براده‌برداری روی دندانه‌های قالب شود. شکل 15 نیز ترتیب قرارگیری قالب، ماندرل و فیکسچرها را نشان می‌دهد.

4- طرح آزمایش

برای بررسی اثر فرایند، شش آزمایش بطور تصادفی انتخاب شده است. متغیرهای فرایند ماشین‌کاری با جریان سایشی، معمولاً اندازه‌ی دانه‌ی ساینده، غلظت ذرات ساینده، فشار و تعداد کورس می‌باشند. در آزمایش‌های صورت گرفته، دو اندازه‌ی دانه‌ی ساینده‌ی F120 و F60 در استاندارد¹ FEPA [14] در نظر گرفته شده است. جدول 3، مقدار متغیرهای فرایند ماشین‌کاری در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

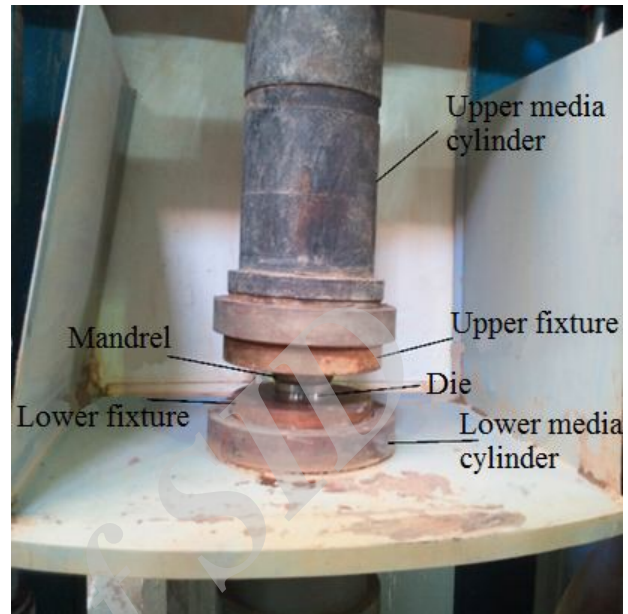


Fig. 15 View of AFM set up

شکل 15 نمای کلی از دستگاه مورد استفاده

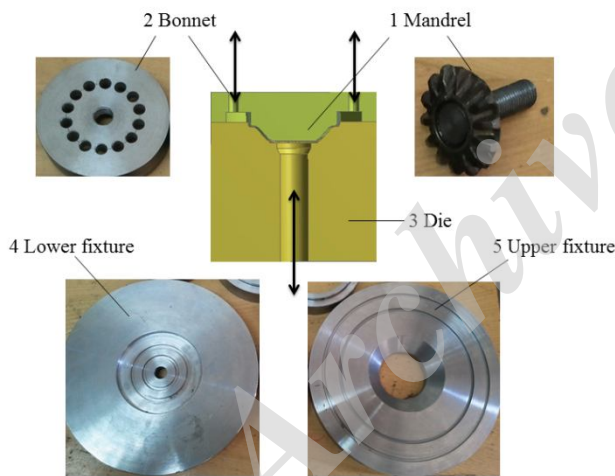


Fig. 17 Mandrel and fixtures

شکل 17 ماندرل و فیکسچرها



Fig. 16 Media

شکل 16 مدیا

فیکسچر متناسب با دستگاه و قطعه‌کار ساخته شده و به کار رفته است. شکل 17 ماندرل را به همراه فیکسچرها را نشان می‌دهد. ماندرل 1 به سوراخ مرکزی کلاهدک 2 متصل می‌شود. این دو روی قالب 3 به گونه قرار می‌گیرند که فضایی بین ماندرل و قالب بوجود آید. فیکسچر پایینی 4 روی سیلندر مدیا پایینی قرار گرفته و کف قالب روی فیکسچر پایینی قرار می‌گیرد. فیکسچر بالایی 5 نیز بین کلاهدک و سیلندر مدیا بالایی قرار می‌گیرد. بدین ترتیب قطعه بین سیلندر مدیا بالایی و پایینی گیره‌بندی می‌شود. بنابراین سیال ساینده از طریق

جدول 3 آزمایش‌ها با میزان متغیرهای فرایند

واحد	6	5	4	3	2	1	آزمایش متغیر
-	40	30	20	10	40	10	تعداد کورس
MPa	50	50	40	50	50	30	فشار
-	120	120	60	60	120	120	اندازه‌ی دانه
-	60	60	50	50	30	30	غلظت

¹ Federation European of Producers Abrasives

همچنین در طول فرایند، ذرات ساینده درشت تحت فشار به ذرات ریزتر با لبه‌های برنده تیز شکسته می‌شوند که باعث افزایش بازده و براده‌برداری بیشتر می‌شود. در آزمایش‌های 2 و 6 به غیر از پارامتر غلظت، مابقی سطوح پارامترها برابر هستند. در آزمایش 6 اختلاف زبری بیشتری بدست آمده، که این به دلیل بالا بودن غلظت ساینده‌اش نسبت به آزمایش 2 می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که هرچه غلظت ساینده بیشتر باشد، براده‌برداری نیز بیشتر است. دلیل افزایش براده‌برداری با افزایش غلظت ذرات را می‌توان این دانست که با افزایش غلظت، گرانیروی افزایش یافته و متعاقب آن نیروهای مماسی و نرمال وارد بر سطح قطعه افزایش می‌یابند [12].

با مقایسه آزمایش‌های 5 و 6 که پارامترهای فشار، اندازه دانه‌های ساینده و غلظت ساینده سطوح یکسانی دارند، مشخص می‌شود که آزمایش 6 با تعداد کورس بیشتر، اختلاف زبری بیشتری نسبت به آزمایش 5 که تعداد کورس کمتری دارد، بدست آورده است. این نشان می‌دهد که با افزایش تعداد کورس براده‌برداری نیز افزایش می‌یابد. البته باید در نظر داشت که با افزایش تعداد کورس، ذرات ساینده مستهلک و گرد شده و لبه برنده خود را از دست می‌دهند. فشار نیز همانطور که در بخش شبیه‌سازی بیان شد، ارتباط مستقیمی با براده‌برداری دارد، بطوریکه با افزایش فشار، تنش افزایش یافته و عمق نفوذ ذرات ساینده بیشتر شده در نتیجه براده‌برداری افزایش می‌یابد [12]. بطور کلی افزایش فشار تا حدی می‌تواند باعث کاهش زبری سطح شود. با بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که دقت ابعادی قالب حفظ شده است.

برای بررسی دقت ابعادی در کورس‌های بالا، آزمایشی جداگانه با تعداد کورس 300، اندازه دانه ساینده F60، فشار 60MPa و غلظت 60% انجام شد. تعداد کورس بالا از این جهت انتخاب شد که مشخص شود آیا در کورس‌های زیاد دقت ابعادی حفظ خواهد شد یا خیر؟ از دستگاه اندازه‌گیری مختصات اپتیکی برای بررسی دقت ابعادی استفاده شده است. برای این منظور از دستگاه اسکنر اپتیکی ATOS از شرکت GOM آلمان استفاده شده است. این دستگاه دارای لنزهای دقیق و نرم افزار بسیار قدرتمند است که قابلیت ثبت زوایای مختلف در قطعات پیچیده را دارد. بخش بزرگنمایی شده قالب در شکل 18 ناحیه مورد بررسی توسط اسکنر اپتیکی را نشان می‌دهد. شکل 19 مقطعی از قالب را نشان می‌دهد که توسط این دستگاه بدست آمده است. در این شکل، ابعاد قالب تحت آزمایش بعد از فرایند ماشین‌کاری با جریان سایشی با ابعاد قالب مرجع استاندارد توسط سیستم

در محاسبه‌ی غلظت دانه‌های ساینده به طور معمول از دو فرمول استفاده می‌شود که در این بین فرمول (1) رایج‌تر است. در اینجا نیز از فرمول (1) برای محاسبه کسر وزنی یا همان غلظت ذرات ساینده استفاده شده است [15].

$$\text{Concentration} = (\text{weight of abrasive particle}) \times 100 / (\text{weight of media}) \quad (1)$$

$$\text{Concentration} = (\text{weight of abrasive particle}) \times 100 / (\text{weight of putty}) \quad (2)$$

5- نتایج و بحث

نتایج آزمایش‌های فرایند ماشین‌کاری با جریان سایشی بر روی قالب فورج در جدول 4 نمایش داده شده است. ورودی‌های آزمایش تعداد کورس، فشار، اندازه‌ی دانه‌ی ساینده و غلظت ساینده می‌باشد و خروجی هر آزمایش زبری R_a و اختلاف زبری قبل و بعد از آزمایش ΔR_a بر حسب میکرومتر می‌باشد. به دلیل سنگینی قالب امکان سنجیدن وزن با دقت بالا برای محاسبه‌ی نرخ براده‌برداری وجود نداشته است. برای این منظور زبری روی انحنای قالب مشخص شده در شکل 3 با عدد (1) اندازه‌گیری شده است.

با توجه به تعداد کم آزمایش امکان انجام بهینه‌سازی و بررسی دقیق‌تر هر متغیر وجود ندارد. اما هدف اصلی از این مقاله بررسی امکان پرداخت‌کاری قالب مورد نظر می‌باشد. با توجه نتایج به دست آمده، می‌توان دریافت که براده‌برداری صورت پذیرفته است و همچنین با بررسی‌های صورت گرفته می‌توان ادعا کرد که این براده‌برداری به طور تقریباً یکنواخت انجام شده است. بطور متوسط در آزمایش‌هایی که از اندازه‌ی دانه‌ی ساینده‌ی F60 که در رده‌ی متوسط مش ساینده می‌باشد، استفاده شده است، مشاهده می‌شود که اختلاف زبری بیشتر از مواقعی است که از دانه‌ی ساینده F120 استفاده شده است. این امر نشانه‌ی براده‌برداری بیشتر در این فرایند می‌باشد. دلیل براده‌برداری بیشتر هنگام استفاده از دانه‌های درشت‌تر این است که عمق نفوذ دانه‌های درشت‌تر بیشتر بوده و باعث سایش بیشتر سطح قطعه‌کار شده و زبری را کاهش می‌دهد [16].

جدول 4 خروجی آزمایش‌ها

Table4 Output of experiments

آزمایش	R_a (زبری ثانویه)	زبری اولیه
1	0.391	2.683
2	0.11	2.292
3	0.94	3.846
4	1.306	3.449
5	0.857	2.375
6	0.972	2.761

فورج) را داشته و از جنس فولاد بوده است، در آزمایش‌ها بطور کامل صیقل یافت. البته از جهت دقت ابعادی و تأثیر پارامترها نیاز به بررسی‌ها و آزمایش‌های جداگانه‌ی بیشتری دارد.

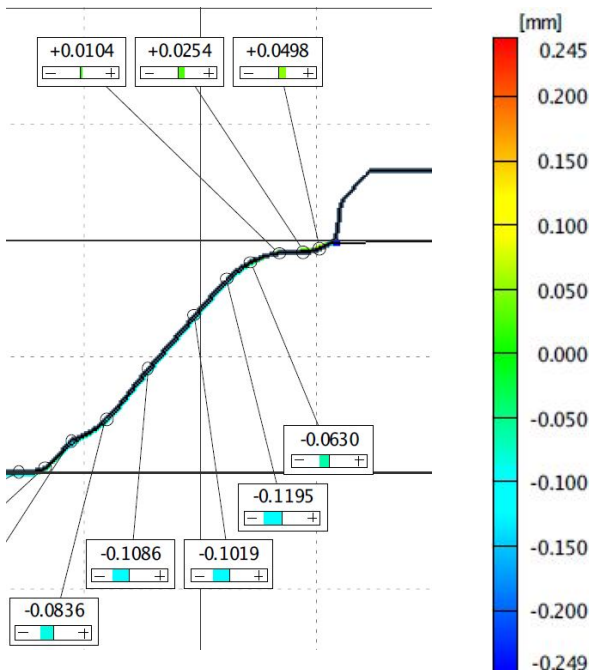


Fig. 19 Study of dimensional accuracy by using optical CMM

شکل 19 بررسی دقت ابعادی با استفاده از اندازه‌گیری مختصات اپتیکی

اندازه‌گیری مختصات اپتیکی¹ مقایسه شده است. میزان کم یا زیاد بودن ابعاد به ترتیب با علامت (-) و (+) مشخص می‌باشد. در حالت عادی ابعاد قطعه تولیدی که در مرحله پرداخت قرار دارد، در حد بسیار کمی از ابعاد نهایی و استاندارد قطعه بیشتر است تا در فرایند پرداخت جبران شده و به تolerانس مجاز برسد. به همین دلیل می‌توان گفت که در نقاطی در شکل 19 ابعاد قطعه مورد آزمایش بیشتر از ابعاد قطعه استاندارد است، براده‌برداری کمتر اتفاق افتاده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این تفاوت ابعاد در حد مجاز بوده و دقت ابعادی قالب حفظ شده است. بنابراین با توجه به حفظ دقت ابعادی می‌توان براده‌برداری قالب را تقریباً یکنواخت دانست که صحت نتایج شبیه‌سازی را نیز اثبات می‌کند. شکل 20 تصویر مورفولوژی سطح روی دندانه قالب است که در شکل 3 با عدد (1) نشان داده شده است. این تصویر توسط میکروسکوپ نوری بدست آمده است و سطح دندانه قالب را قبل و بعد از فرایند ماشین‌کاری با جریان سایشی نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است ناهمواری سطح ناشی از فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بعد از پرداخت با فرایند ماشین‌کاری با جریان سایشی بطور کامل از بین رفته است. به دلیل اینکه قطعه بکار رفته در این پژوهش قالب فورج است و خود قالب در فرایند فورج برای تولید قطعه‌ای دیگر استفاده می‌شود، قطعه حاصل از فرایند فورج را نیز می‌توان با روش ماشین‌کاری با جریان سایشی پرداخت کرد، با این تفاوت که این بار قطعه‌ای مشابه با قالب فورج بعنوان ماندرل استفاده می‌شود تا مدیا در قطعه حاصل از فرایند فورج بطور یکنواخت جریان یابد و پرداخت بصورت یکنواخت انجام شود.

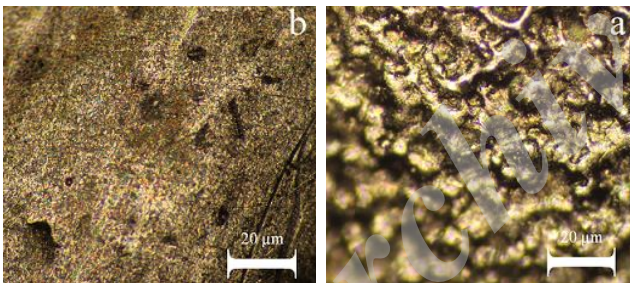


Fig. 20 Surface morphologies of the work piece (a) before AFM (b) after AFM

شکل 20 مورفولوژی سطح قطعه کار (a) قبل از فرایند (b) بعد از فرایند

6- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، صیقل‌کاری قالب با انحنای خاص به روش ماشین‌کاری با جریان سایشی صورت پذیرفت. برای این منظور از قطعه‌ی واسطه‌ای به نام ماندرل برای توزیع سیال ساینده در انحنای قالب فورج استفاده شد. برای تعیین امکان پرداخت قالب با روش ماشین‌کاری با جریان سایشی تعداد 6 آزمایش انجام شد. در نهایت دقت ابعادی قالب نیز بصورت اندازه‌گیری اپتیکی مورد بررسی قرار گرفت. هدف بررسی زبری سطح دندانه قالب بوده است و دیده شد که در زبری تغییراتی صورت پذیرفت.

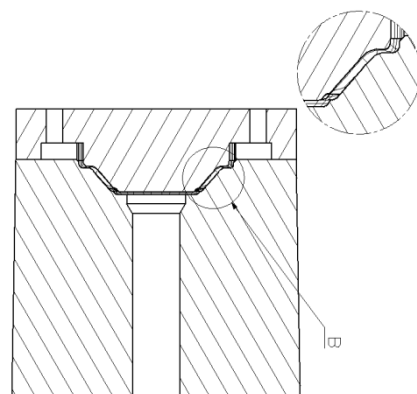


Fig. 18 Finishing area

شکل 18 ناحیه پرداخت‌کاری

این نتیجه بدین سبب گرفته شد که ماندرل استفاده شده در این پژوهش که هندسه قالب (یا همان قطعه حاصل از فرایند

¹ Optical Coordinate Measure Machine

- Applicd To Polagon Holes In Abrasive Machin, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 74.5-8, pp. 781-790, 2014 .
- [6] J. D. J. Kenda, Abrasive Flow Machining Applied To Plastic Gear, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 71 ,pp. 141–151, 2014 .
- [7] K.-D. K. J. D. Kim, Deburring Of Burrs In Spring Collets By Abrasive Flow Machining, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, pp. 469–473, 2004 .
- [8] A. M. H. S. Mali, Optimum Selection Of Abrasive Flow Machining Conditions During Fine Finishing Of Al/15 Wt% Sic-Mmc Using Taguchi Method, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 50, pp. 1013–1024, 2010 .
- [9] J. K. Franci Pusavec The transition to a clean dry and energy efficient polishing process:an innovative upgrade of abrasive flow machining for simultaneous generation of micro-geometry and polishing in the tooling industry *Journal of Cleaner Production*, Vol. 76, pp. 180-189, 2014 .
- [10] F. A. T. M. R. Shabgard, A. Gholipoor, Experimental study of the effects of abrasive particle size and work piece hardness in Magnetic abrasive flow Machining, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 131-138, 2016 .
- [11] S. R. Garanayak, *CFD And Optimization Of Abrasive Flow Machining*, Thesis, Mechanical Engineering, National Institute of Technology Rourkela, 2013 .
- [12] V. K. J. R. K. Jain, P. M. Dixit, Modelling Of Material Removal And Surface Roughness In Abrasive Flow Machining Process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 1903-1923, 1999 .
- [13] C. W. Wegst, *Stahlschlüssel*: Asm International, 1992 .
- [14] www.fepa-abrasives.com, 17 June 2017 .
- [15] S. G. A. V. K. Jain, Experimental Investigation Into Abrasive flow Machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 1003–1021, 2000 .
- V. K. J. R. K. Jain, P. K. Kalra, Modeling Of Abrasive flow Machining Process: A Neural Network Approach, *Journal of Wear*, Vol. 231, pp. 242–248, 1999 .
- نتایج به دست آمده را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود.
- شبیه‌سازی‌ها، فشار تقریباً یکسان را در قالب حین ماشین‌کاری نشان دادند.
 - در همه‌ی آزمایش‌ها کاهش زبری مشاهده شده است.
 - براده‌برداری تقریباً یکنواخت در سطح قطعه‌کار دیده شده است که موید نتایج شبیه‌سازی است.
 - هرچه اندازه‌ی دانه‌ها درشت‌تر باشد به دلیل عمق نفوذ بیشتر، میزان براده‌برداری و سایش نیز بیشتر می‌باشد، در نتیجه زبری بیشتر کاهش می‌یابد.
 - هرچه غلظت ساینده بیشتر باشد، براده‌برداری نیز بیشتر است.
 - با افزایش تعداد کورس براده‌برداری نیز افزایش می‌یابد.
 - دقت ابعادی قالب نیز حفظ شده است.
 - قطعه حاصل از فرایند فورج را نیز می‌توان با روش ماشین‌کاری با جریان سایشی پرداخت کرد، با این تفاوت که این بار قطعه‌ای مشابه با قالب فورج بعنوان ماندل استفاده می‌شود.
- ### 7- مراجع
- [1] Y. C. L. B. H. Yan, F. Y. Huang, Surface Modification Of Al-Zn-Mg Alloy By Combined Electrical Discharge Machining With Ball Burnish Machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 925–934, 2002 .
- [2] B. H. Y. A. C. Wang ,X. T. Lee, F. Y. Huang, Use Of Micro Ultrasonic Vibration Lapping To Enhance The Precision Of Microholes Drilled By Micro Electrodischarge Machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 915–923, 2002 .
- [3] W. L. F. Zhang, Z .Qiu, H. Ohmori, Application Of Elid Grinding Technique To Precision Machining Of Optics, *International Topical Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technology*, pp. 218-223, 2000 .
- [4] C. H. L. A. C. Wang, K. Z. Liang, S. H. Pai, Study Of The Rheological Propertiesand The Finishing Behavior Of Abrasive Gels In Abrasive Flow Machining, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, pp. 1593-1598, 2007 .
- [5] K. C. c. K. y. chan, A Study Of Helical Passageways