



مطالعه تجربی و عددی تأثیر هندسه ابزار بر مشخصه ریزشکست‌ها در ماشین‌کاری میکرونانو ساختار ترد متخلخل

مهدي حیدری^{1*}، جواد اکبری²، جیوانگ یان³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه کیو، یوکوهاما، ژاپن

* شاهرود، صندوق پستی 3619995161، Heidari@shahroodut.ac.ir

چکیده

مواد با ساختار متخلخل نسل جدید از مواد مهندسی هستند که کاربردهای گسترده‌ای در دهه اخیر به سرعت در حال رشد است. با این وجود ساختار متخلخل محدودیت‌های نیز در فرایند ساخت این مواد ایجاد کرده است. یکی از چالش‌های اصلی در برشکاری مواد متخلخل ترد وجود ریزشکست‌ها در اطراف حفره‌ها است که به شدت بر کیفیت سطح قطعه نهایی تأثیرگذار است. در این تحقیق تلاش شده است تا تأثیر زاویه براده ابزار بر روی میزان شکست ترد اطراف حفره‌ها در قطعات سیلیکونی متخلخل مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان می‌دهد که کاهش زاویه براده، ریز شکست‌ها در اطراف حفره‌ها را افزایش می‌دهد که این به نوبه خود بر فشار برشکاری تأثیرگذار است. نتایج محاسبه فشار تماس در منطقه برشکاری نشان از کاهش فشار کل در منطقه تماس با کاهش زاویه براده را دارد. افزایش ریزشکست‌ها، براساس افزایش تنش کششی در زیر لبه ابزار در زمان نزدیک شدن ابزار به حفره توضیح داده می‌شود. یافته‌های آزمایشگاهی با شبیه‌سازی المان محدود نیز مورد تأیید قرار گرفتند. در پایان نتایج آزمایشات تأیید می‌کند که با تنظیم زاویه براده ابزار در برشکاری قطعات سیلیکونی متخلخل، می‌توان به کیفیت سطحی تا حدود 25 نانومتر دست یافت.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 دی 1397

پذیرش: 21 اسفند 1397

ارائه در سایت: مهر 1398

کلیدواژگان:

ماشین‌کاری میکرونانو

ساختار ترد متخلخل

ریز شکست‌ها

کیفیت سطح، هندسه ابزار

An experimental and numerical study of tool geometry effect on microfracture characteristics in micro/nano machining of brittle porous structure

Mehdi Heidari^{1*}, Javad Akbari², Jiwang Yan³

1- Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Keio University, Yokohama, Japan

* P.O.B. 3619995161 Shahrood, Iran, Heidari@shahroodut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 3 January 2018

Accepted 12 March 2019

Available September 2019

Keywords:

Micro/nano machining

Brittle porous structure

Microfractures

Surface quality

Tool geometry

Abstract

Porous materials are a special class of engineering materials which have received increasing interest for technical and medicinal applications within the last decade. However, one of the main challenges in the cutting of porous structure is the microfractures occurred around pores having a profound impact on the final surface quality. In this study, the effect of tool geometry on the magnitude of microfractures around pores of porous silicon has been investigated. The results reveal that as rake angle decreases, microfractures around pore edges increase influencing the cutting pressure. The calculated pressure in the contact area shows a decrease as the rake angle decreases. Increase in microfractures can be explained based on a large tensile stress area formed beneath the tool cutting edge as tool tip feeds toward pore. The simulation results agree well with the experimental results. The findings also reveal that by choosing the optimal tool rake angle in the cutting process, a nanometric surface flatness (25 nanometer) can be achieved on porous silicon.

1- مقدمه

زیاد، سطح تماس بالا و مقاومت قابل قبول در مقایسه با پلیمرها باعث شده است که این مواد نه تنها در پزشکی بلکه در دیگر صنایع نیز مورد استفاده قرار بگیرد. این مواد از پایه‌مواد مختلفی ساخته می‌شوند که یکی از آن‌ها سیلیکون است. استفاده از سیلیکون متخلخل هم در پزشکی به‌عنوان فیلتر، و هم در پنل‌های خورشیدی و باتری به سرعت در حال رشد است [1، 2].

با معرفی مواد متخلخل¹ در علوم پزشکی در یک دهه اخیر استفاده از این مواد نه تنها در صنایع پزشکی بلکه در بسیاری صنایع دیگر نیز به سرعت در حال رشد است. وزن کم، حجم

¹ Porous materials

Please cite this article using:

M. Heidari, J. Akbari, J. Yan, An experimental and numerical study of tool geometry effect on microfracture characteristics in micro/nano machining of brittle porous structure, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 5, pp. 47-52, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

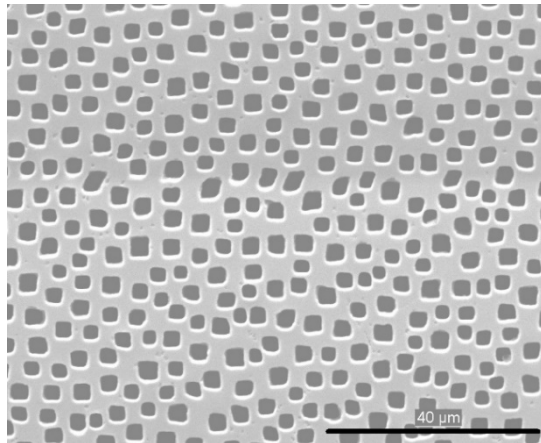


Fig. 1 SEM micrographs of porous silicon surface

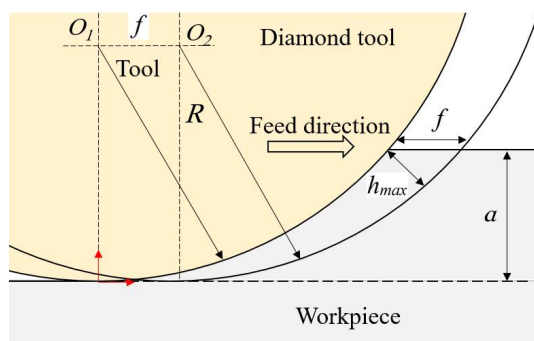
شکل 1 عکس الکترونی از سطح سیلیکون متخلخل

در تراشکاری با ابزار دماغه گرد و با نرخ پیشروی و عمق برش کم، فاکتور بیشترین ضخامت براده تغییر شکل نیافته (h_{max}) تبدیل به مهمترین پارامتر برای ارزیابی فرایند می‌شود. این فاکتور را می‌توان براساس شعاع دماغه ابزار (R)، عمق برش (a) و نرخ پیشروی (f) محاسبه کرد (شکل 2). این پارامتر وقتی $f < \sqrt{2Ra - a^2}$ باشد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h_{max} = R - \sqrt{R^2 + f^2 - 2f\sqrt{2Ra - a^2}} \quad (1)$$

اما هنگامی که $f \geq \sqrt{2Ra - a^2}$ باشد، این پارامتر برابر عمق برش می‌شود.

برای ارزیابی زوایای مختلف براده، علاوه بر گیره اصلی با زاویه صفر، از دو گیره دیگر با زوایای منفی 15° و 45° درجه نیز استفاده شده است. در هر قطعه، نواحی دایروی به پهنای 1 میلی‌متر ماشین‌کاری می‌شود. پارامترهای ماشین‌کاری در جدول 1 ارائه شده است.



شکل 2 مدل شماتیک از برشکاری با ابزار دماغه گرد

Fig. 2 Schematic model of cutting process with a round-nosed tool

برای عکس‌برداری از سطح، از میکروسکوپ الکترونی⁶

یکی از موانع کاربرد این مواد در صنایع، توانایی تولید هندسه‌های پیچیده و کیفیت سطح بالا با حفره‌های باز می‌باشد، جایی که برشکاری فوق دقیق می‌تواند راهگشا باشد.

تحقیقاتی بسیار اندکی بر روی برشکاری دقیق مواد متخلخل انجام شده که بیشترین این تحقیقات مربوط به آزمایشگاه ماشین‌کاری فوق دقیق و فرایند نانو در دانشگاه کیو¹ [3، 4] و انستیتو ساخت پایدار در دانشگاه کنتاکی² [5، 6] است. در تحقیقات قبلی انجام شده توسط نویسندگان حاضر امکان برشکاری فوق دقیق به وسیله ابزار الماس در سیلیکون متخلخل مورد ارزیابی قرار گرفت [7]. آن‌ها نشان دادند که وجود حفره تأثیر بسیار زیادی بر رشد ترک و ریزشکست³ در اطراف حفره دارند. کاهش بیشترین ضخامت براده می‌تواند به کاهش این ریزشکست‌ها و افزایش کیفیت سطح کمک کند. اما اثرگذاری زاویه براده که تأثیر بسیار زیادی بر روی رشد ترک‌ها و یکپارچگی سطح دارد تاکنون مورد ارزیابی قرار نگرفته است.

برشکاری میکرونانو مواد متخلخل به دلیل وجود حفره بسیار پیچیده‌تر از مواد غیر متخلخل است. مخصوصاً اگر بازنگه‌داشتن حفره‌ها یکی از اهداف اصلی باشد. به همین دلیل، تنظیم پارامترهای ماشین‌کاری و هندسه ابزار در این فرایند بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله، زاویه براده ابزار به عنوان یکی از اصلی‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر میزان ریزشکست‌ها در اطراف حفره، که خود عامل تعیین‌کننده کیفیت سطح قطعه است، به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2- روش تحقیق

چندین قطعه سیلیکون متخلخل با ضخامت 300 میکرون با حفره‌هایی به قطر $2/7$ میکرون در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ابعاد قطعه کار 20 میلی‌متر در 20 میلی‌متر است که در شکل 1 عکس الکترونی سطح متخلخل نشان داده شده است. قطعه کار با استفاده از موم صنعتی⁴ به سطح گیره و سپس به اسپیندل خلأ متصل می‌شود. دستگاه ماشین‌کاری استفاده شده برای انجام آزمایشات، دستگاه تراش سه محوره ساخت شرکت ناچی فوجیکوشی⁵ ژاپن می‌باشد.

ابزار استفاده شده از نوع الماس تک کریستال با شعاع دماغه 1 میلی‌متر، شعاع براده صفر، شعاع آزادی 6 میلی‌متر و شعاع لبه برشی 60 نانومتر می‌باشد.

¹ Keio University

² University of Kentucky

³ Microfractures

⁴ Wax

⁵ NACHI-FUJIKOSHI CORP

⁶ FE-SEM, Model JSM-7600F, JEOL

هنگامی که نوک ابزار به حفره نزدیک می‌شود توضیح داد. برشکاری قطعات سیلیکونی در حالت نرم را می‌توان براساس پدیده منطقه پرتنش⁶ استدلال کرد. وقتی ضخامت براده از حد بحرانی کمتر باشد، فشار هیدرواستاتیک القاء‌شده بوسیله لبه ابزار به بیشتر از سختی سیلیکون می‌رسد و در نتیجه فرایند برشکاری به‌صورت نرم انجام می‌گیرد. اما اگر این ضخامت بیشتر از حد بحرانی باشد، ترک‌های ریز شروع به رشد می‌کنند و به سطح ماشین‌کاری شده می‌رسند، لذا سطح قطعه به‌صورت ترد شکسته⁷ می‌شود [8, 9]. میزان این شکست‌های ترد با افزایش ضخامت براده افزایش می‌یابند. وقتی که منطقه پرتنش در زیر لبه ابزار به حفره نزدیک می‌شود، چون هیچ نیرویی عکس‌العملی از سمت دیواره برای حفظ آن وجود ندارد، تنش کششی به‌شدت افزایش یافته و باعث رشد ریزترک‌ها⁸ می‌شود (شکل 4(a)).

استفاده می‌شود. همچنین برای اندازه‌گیری نیروهای ماشین‌کاری از دینامومتر پیزوالکترترونیکی کیسلر¹ استفاده شده است.

جدول 1 پارامترهای ماشین‌کاری

عمق براده برداری	1-4 μm
نرخ پیشروی	0/5 , 2/0 $\mu\text{m}/\text{rev}$
سرعت ماشین‌کاری	12/0 m/min

برای کمک به فهم بهتر تأثیر زاویه براده بر فرایند برشکاری، مکانیزم برشکاری توسط نرم افزار المان محدود ادونت ادج² با بهره‌گیری از مدل ساختاری دراگر پرگر³ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به‌دلیل دو بعدی بودن فرایند شبیه‌سازی، پارامتر بیشترین ضخامت براده همان عمق براده‌برداری خواهد بود. کلیه پارامترهای ابزار و قطعه کار مشابه فرایند آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفته است.

3- ارائه نتایج و بحث

شکل 3 عکس الکترونی از سطح ماشین‌کاری‌شده سیلیکون متخلخل را در شرایط برشی $f=0.5 \mu\text{m}/\text{rev}$ و $a=2.0 \mu\text{m}$ و بیشترین ضخامت براده 44 نانومتر برای دو زاویه براده مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 3(a) مشاهده می‌شود، سطح قطعه به صورت نرم⁴ بریده شده است و کمترین ریزشکست در لبه حفره‌ها دیده می‌شود. مناطق بین حفره‌ها در اثر برشکاری نرم کاملاً صاف می‌باشد. در مقابل، کاهش زاویه براده به 45° باعث افزایش شدید ریزشکست‌ها در لبه و اطراف حفره‌ها شده است. این ریزشکست‌ها به مناطق بین حفره‌ها نیز نفوذ کرده و باعث شده‌اند فقط قسمت‌های کوچکی بین حفره‌ها هنوز بصورت نرم برش خورده باقی بمانند (شکل 3(b)). خاطر نشان می‌شود که بسیاری از حفره‌ها توسط براده برداشته شده در طول فرایند ماشین‌کاری پر شده‌اند. در مطالعات پیشین توسط نویسندگان حاضر [7] برشکاری نرم و ترد مناطق بین حفره‌ها در قطعات سیلیکون متخلخل با ضخامت براده مختلف و زاویه براده صفر ابزار، توسط دستگاه لیزر رامان اسپکرا⁵ مورد بررسی قرار گرفتند.

1-3- مکانیزم شکست

افزایش ریزشکست‌ها را می‌توان براساس افزایش تنش کششی

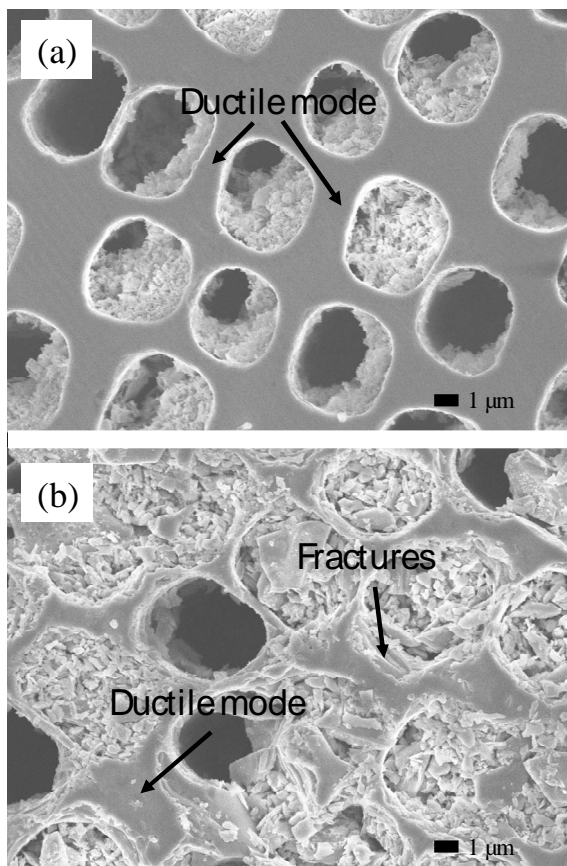


Fig. 3 SEM micrographs of machined surfaces of porous silicon with $h_{\text{max}}=44 \text{ nm}$ and tool rake angles: (a) zero (b) -45°

شکل 3 عکس الکترونی از سطح ماشین‌کاری شده با $h_{\text{max}}=44 \text{ nm}$ و زاویه براده برابر با (a) صفر درجه و (b) -45° درجه

⁶ high-stress region

⁷ brittle mode

⁸ Microcracks

¹ Kistler 9256C2

² AdvantEdge

³ Drucker-Prager

⁴ ductile mode

⁵ Laser micro-Raman spectra

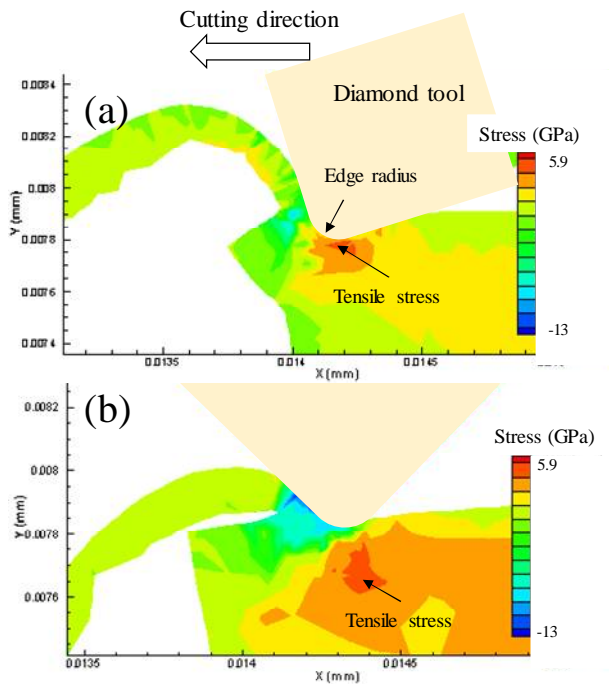


Fig. 5 FE modeling of cutting area near pore in different tool rake angles: (a) -15° (b) -45°

شکل 5 شبیه‌سازی منطقه برش با دو زاویه براده متفاوت: (a) -15° (b) -45°

در این مورد حد استحکام تنش فشاری معادل سختی¹ سیلیکون و حد استحکام تنش کششی معادل کمتر از نصف سختی در نظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی عمق براده دوبرابر شعاع لبه ابزار در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی تأیید می‌کند که با کاهش زاویه براده میزان تنش کششی که دلیل اصلی رشد ریزترک در مواد شکننده است به شدت افزایش پیدا می‌کند و حتی باعث می‌شود تا ترک‌ها در فاصله دورتری قبل از اینکه نوک ابزار به حفره برسد باعث شکست لبه شود.

3-3- تنش فشاری

از آنجایی که تغییر فاز از حالت ترد به نرم در سیلیکون در زمان ماشین کاری مربوط به تنش فشاری القاء شده از طرف لبه ابزار است، در گام بعد، فشار منطقه تماس ابزار و قطعه کار براساس برآیند نیروهای ماشین کاری اندازه‌گیری شده و مساحت سطح عمود بر این نیرو محاسبه گردید. با توجه به اینکه ماده متخلخل استفاده شده دارای 30 درصد تخلخل می‌باشد، مساحت سطح تماس 70 درصد سطح غیر متخلخل در نظر گرفته می‌شود. این نتایج در شکل 6 نشان داده شده است.

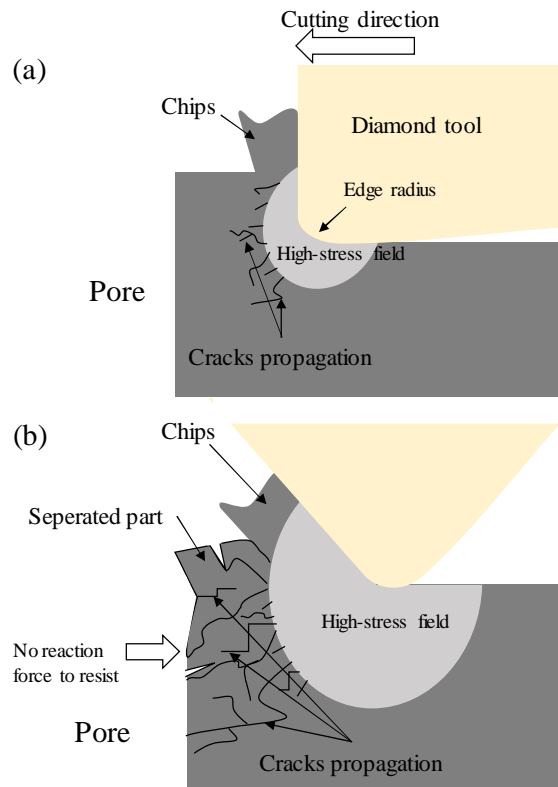


Fig. 4 Schematic illustrations of brittle fracture near a pore at two different tool rake angles: (a) zero (b) -45°

شکل 4 مدل شماتیک شکست ترد در لبه حفره با دو زاویه براده متفاوت: (a) صفر درجه (b) -45°

به محض اینکه این ترک‌ها به دیواره حفره می‌رسند، قسمتی از لبه حفره به صورت ترد برداشته می‌شود. با این وجود، مناطق بین حفره‌ها می‌توانند به صورت نرم بریده شوند. با کاهش زاویه براده نیروی ماشین کاری و به طبع آن منطقه پر تنش اولیه به شدت افزایش می‌یابد. این افزایش فشار در برشکاری مواد سیلیکونی غیر متخلخل یک مزیت محسوب می‌شود چرا که در این شرایط با ضخامت‌های بالاتری از حد بحرانی نیز می‌توان در حالت نرم برشکاری کرد. با این وجود این افزایش نیرو در قطعات متخلخل، تنش کششی را افزایش می‌دهد و باعث می‌شود که علاوه بر لبه حفره‌ها مناطق بین حفره‌ها نیز بصورت ترد بریده شوند (شکل 4(b)). مطابق شکل 4، در برشکاری حالت متخلخل، کاهش بیشتر زاویه براده، باعث می‌شود ترک‌ها در فاصله دورتری از لبه باعث شکست شوند.

3-2- شبیه‌سازی

شکل 5 نتایج شبیه‌سازی تنش در قطعه کار سیلیکونی، زمانی که ابزار به حفره نزدیک می‌شود را نشان می‌دهد.

¹ Hardness

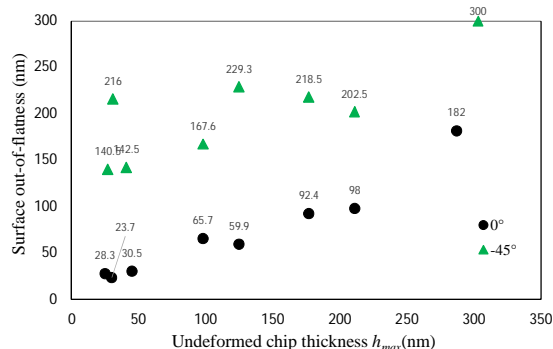


Fig. 7 The flatness of machined surfaces for different chip thicknesses using two different tool rake angles: (a) zero (b) -45°

شکل 7 میزان صافی سطح برای ضخامت‌های متفاوت براده با استفاده از دو زاویه براده ابزار صفر درجه و -45°

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با زاویه براده صفر درجه و با کاهش ضخامت براده به کمتر از 50 نانومتر، می‌توان به صافی‌ای کمتر از 25 نانو متر رسید که تقریباً معادل برشکاری سیلیکون غیر متخلخل در شرایط ماشین کاری مشابه است.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر کاهش زاویه براده ابزار بر فرایند برشکاری میکرونانو سیلیکون متخلخل به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به‌صورت خلاصه در موارد زیر بیان کرد:

- تغییر زاویه براده تأثیر بسیار زیادی در کیفیت سطح ماشین کاری شده دارد. با کاهش زاویه براده، اندازه منطقه پرتنش اولیه در زیر ابزار افزایش می‌یابد که به نوبه خود میزان شکست ترد در لبه حفره‌ها را بیشتر می‌کند.

- نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تایید می‌کنند که افزایش تنش کششی در زیر لبه ابزار زمانی که ابزار به حفره نزدیک می‌شود دلیل اصلی رشد ترک و شکست ترد در حفره می‌باشد. افزایش سطح شکست در اطراف حفره‌ها فشار ماشین کاری اولیه را کاهش می‌دهد.

- در برشکاری با زاویه براده بیشتر (صفر) و ضخامت براده کمتر از 50 نانومتر، می‌توان به زبری سطحی برابر 25 نانومتر دست یافت.

این تحقیق امکان برشکاری میکرو نانو مواد شکننده متخلخل را با کیفیت نانو نشان می‌دهد. هر چند با توجه به جدید بودن تحقیق، ارزیابی آزمایشگاهی دیگر پارامترها مانند شعاع دماغه ابزار می‌تواند به بهبود کیفیت سطح کمک نماید.

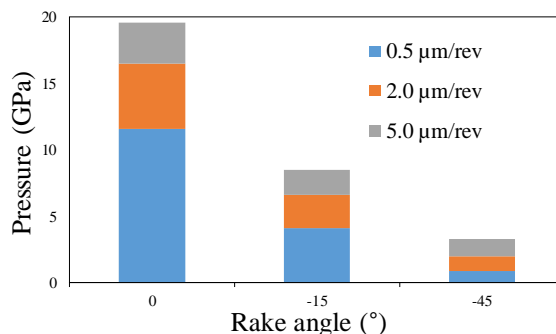


Fig. 6 Changes in cutting pressure with tool rake angle and feed rate

شکل 6 تغییر فشار ماشین کاری با نرخ پیشروی و زاویه براده ابزار

همان‌طور که نتایج شکل 6 نشان می‌دهد، با افزایش نرخ پیشروی فشار تماس کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش ضخامت براده می‌باشد. به‌بیان دیگر، هرچند با افزایش ضخامت براده نیرو افزایش می‌یابد، اما نرخ رشد نیرو در مقایسه با مساحت سطح کمتر است. این نرخ کم در افزایش نیرو مربوط به افزایش شکست ترد در ضخامت‌های بالاتر است که در مقایسه با برشکاری در حالت نرم نیروی کمتری را مصرف می‌کند. اما مهم‌ترین شاخص این نمودار کاهش فشار با کاهش زاویه براده است که کاملاً بر خلاف نتایج نشان داده شده در ماشین کاری سیلیکون غیر متخلخل می‌باشد [10]. وقتی زاویه براده کم می‌شود، نیروهای ماشین کاری اولیه افزایش می‌یابند که تنش فشاری هیدرواستاتیک شدیدتری را نیز القا می‌کنند. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، افزایش تنش باعث شکست بیشتر در منطقه اطراف حفره‌ها می‌شود که به نوبه خود باعث آزاد شدن تنش و کاهش مجدد آن می‌گردد.

3-4- صافی سطح

در گام آخر، میزان صافی سطوح برشکاری شده در شرایط ماشین کاری با زوایای براده مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری صافی سطح از یک تداخل سنج نوری که بصورت سه بعدی سطح قطعه را اسکن می‌کند استفاده شد. سپس این اطلاعات توسط نرم افزار تیلی مپ¹ تحلیل می‌شوند. مقایسه نتایج صافی سنج نشان می‌دهد که با کاهش زاویه براده، میزان زبری و ناصافی سطح افزایش می‌یابند. این افزایش ناصافی را می‌توان براساس افزایش مناطق شکسته شده در اطراف لبه حفره در برشکاری با زاویه براده کم توضیح داد. شکل 7 نتایج به‌دست آمده از دستگاه صافی سنج نوری در دو زاویه صفر درجه و -45° را نشان می‌دهد.

¹ Tallymap

5- مراجع

- [6] I.S. Jawahir, D.A. Puleo, J. Schoop, Cryogenic Machining of Biomedical Implant Materials for Improved Functional Performance, Life and Sustainability, *Procedia CIRP*, Vol. 46, pp. 7–14, 2016.
- [7] M. Heidari, J. Yan, Ultraprecision surface flattening of porous silicon by diamond turning, *Precision Engineering*, Vol. 49, pp. 262–277, 2017.
- [8] J. Patten, H. Cherukuri, J. Yan, Ductile-regime machining of semiconductors and ceramics, in: Y. Gogotsi, V. Domnich (Eds.), *High Press. Surf. Sci. Eng.*, Taylor & Francis, pp. 543–632, 2003.
- [9] M. Yoshino, T. Aoki, T. Shirakashi, R. Komanduri, Some experiments on the scratching of silicon: In situ scratching inside an SEM and scratching under high external hydrostatic pressures, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, pp. 335–347, 2001.
- [10] J. Yan, T. Asami, H. Harada, T. Kuriyagawa, Fundamental investigation of subsurface damage in single crystalline silicon caused by diamond machining, *Precision Engineering*, Vol. 33, pp. 378–386, 2009.
- [1] S.R. Gowda, V. Pushparaj, S. Herle, G. Girishkumar, J.G. Gordon, H. Gullapalli, X. Zhan, P.M. Ajayan, A.L.M. Reddy, Three-dimensionally engineered porous silicon electrodes for Li ion batteries, *Nano Letter*, Vol. 12, pp. 6060–5, 2012.
- [2] V. Pacebutas, K. Grigoras, A. Krotkus, Porous silicon applications in solar cell technology, *Physica Scripta*. Vol. T69, pp. 255–258, 1997.
- [3] M. Heidari, J. Yan, Material removal mechanism and surface integrity in ultraprecision cutting of porous titanium, *Precision Engineering*, Vol. 52, pp. 356–369, 2018.
- [4] M. Heidari, J. Yan, Fundamental characteristics of material removal and surface formation in diamond turning of porous carbon, *International Journal of Additive and Subtractive Materials Manufacturing*, Vol. 1, pp. 23–41, 2017
- [5] J. Schoop, I.S. Jawahir, T.J. Balk, Size effects in finish machining of porous powdered metal for engineered surface quality, *Precision Engineering*, Vol. 44, pp. 180–191, 2016.