



اندازه‌گیری عمق آسیب‌های سطحی و زیرسطحی در سنگ‌زنی شیشه-سرامیک Zerodur و ارتباط آن با زبری سطح

امیر اسماعیل زارع^{۱*}، حامد قلی‌پور^۱، حامد ادیبی^۲، سید مهدی رضاعی^۳

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۱۶۷۵۱۱۶۷/aut.ac.ir/amir-esmaeil-zare

چکیده

در این مقاله آسیب‌های سطحی و زیرسطحی به وجود آمده در طی فرآیند سنگ‌زنی به کمک چرخ سنگ‌کاپ با باند فلزی بر روی شیشه-سرامیک Zerodur مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه زبری سطحی به وجود آمده حاصل از سنگ‌زنی تحت تاثیر سه پارامتر سرعت پیش‌روی، عمق برش و سرعت برش مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای بررسی مکانیزم برداشت براده و اندازه‌گیری عمق آسیب‌های زیرسطحی از روش پولیش زاویه‌ای استفاده گردید. برای این کار از پولیش با ذرات ساینده اکسید سربیم استفاده گردیده است که به دلیل ماهیت شیمیایی-مکانیکی آن هیچ‌گونه آسیب سطحی و زیرسطحی ایجاد نمی‌نماید. بعد از این فرآیند از تصاویر میکروسکوپ اسکن الکترونی برای اندازه‌گیری عمق و پراکندگی طول ترک در عمق‌های مختلف از سطح نمونه استفاده شده است. اندازه‌گیری سریع، دقیق و غیرمخرب عمق آسیب‌های زیرسطحی یکی از اهداف مهم این تحقیق بوده است. برای این امر از ارتباط بین زبری سطحی نمونه سنگ‌زده شده و عمق آسیب‌های زیرسطحی بهره گرفته شده است. دلیل اهمیت بالای اندازه‌گیری دقیق عمق آسیب‌های زیرسطحی کاهش زمان و هزینه فرآیندهای ثانویه مانند پولیش برای حذف لایه‌های آسیب‌دیده است. برای پیش‌بینی عمق آسیب‌های زیرسطحی در فرآیند سنگ‌زنی شیشه-سرامیک Zerodur از مدل لامبرپولوس استفاده شده است که در این مدل مقدار زبری سطح حاصل از عمق ترک جانبی و عمق آسیب‌های زیرسطحی برابر با عمق ترک میانی در نظر گرفته شده است. این مدل براساس پارامترهای ماشین‌کاری، پارامترهای چرخ سنگ و خواص مکانیکی ماده سنگ‌زده شده توسعه یافته است که در آن مشاهده می‌شود که زبری سطح دارای یک ارتباط مستقیم غیرخطی ($SSD \approx SR^{3/4}$) با عمق آسیب‌های زیرسطحی است. نتایج تجربی نشان می‌دهند که با افزایش پیش‌روی و عمق برش زبری افزایش و با افزایش سرعت برش زبری سطحی و در نتیجه عمق آسیب‌های زیرسطحی کاهش می‌یابد که به ترتیب سرعت پیش‌روی، عمق برش و سرعت برش بیشترین تاثیر را بر زبری سطح دارند. با مقایسه مدل پیش‌بینی عمق آسیب‌های زیرسطحی و نتایج تجربی مشخص گردید که مدل انتخاب شده برای پیش‌بینی عمق آسیب‌های زیرسطحی از قدرت بالایی برای پیش‌بینی برخوردار است.

کلید واژگان: سنگ‌زنی ترد، شیشه-سرامیک Zerodur، چرخ سنگ الماس کاپ، آسیب‌های زیرسطحی، زبری سطحی

Surface and Subsurface Damage Measurements in Zerodur Glass-Ceramic Grinding Process and their Correlation with Surface Roughness

Amir Esmaeilzare*, Hamed Gholipour, Hamed Adibi, Seyed Mehdi Rezaei

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 141671167 Tehran, Iran, a.esmaeilzare@gmail.com

ABSTRACT

In this work, surface and subsurface damages due to grinding process using diamond cup grinding wheel with metal band on Zerodur glass-ceramic have been studied. The surface roughness resulted from the grinding process affected by three parameters including: feed rate, depth of cut and cutting speed is investigated. In order to study the material removal mechanism and measuring the depth of subsurface damages, the method of angular polishing is used. In order for polishing, cerium oxide abrasive particles were used due to their chemomechanical behavior, they make no surface and subsurface damages. Scanning electron microscopy images of the samples' surface are used to measure the depth and distribution of cracks lengths in various depths from the sample's surface. Fast, accurate and nondestructive measurement of subsurface damages depth is one of the important objectives of this research. For this purpose, the relationship between the surface roughness and depth of subsurface damages has been used. The reason for importance of accurate measurement of the depth of the subsurface damages is the reduction in time and cost of the secondary processes (i.e. polishing) to remove the damaged layers. The Lambropoulos model is applied to predict the depth of the subsurface damages in the grinding process of Zerodur glass-ceramic in which the amount of surface roughness resulted from depth of lateral cracks and the depth of subsurface damage have been assumed to be equal to the depth of medial crack. This model is developed based on machining parameters, the parameters of the grinding wheel and mechanical properties of the ground surface. It have been shown that there is a direct nonlinear relation () between the surface roughness and depth of subsurface damages. The experimental results revealed that the surface roughness and then depth of subsurface damages increases by an increase in feed rate and depth of cut but decreases by increasing the cutting speed. Generally, feed rate, depth of cut and cutting speed had the most influential effect on the surface roughness, respectively. By comparing the developed statistical model and the experimental results, the developed model has an acceptable accuracy in predicting the depth of subsurface damages.

Keywords: Brittle Grinding, Diamond Cup Wheel Grinding, Subsurface Damage, Surface Roughness, Zerodur Glass-Ceramic.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Esmaeilzare, H. Gholipour, H. Adibi, S.M. Rezaei, Surface and Subsurface Damage Measurements in Zerodur Glass-Ceramic Grinding Process and their Correlation with Surface Roughness, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No.13, pp. 332-337, 2015 (in Persian/Farsi)

۱- مقدمه

در تولید قطعات دقیق اپتیکی برای رسیدن به پروفیل سطحی مناسب استفاده از فرآیند سنگ زنی یک امر غیر قابل اجتناب است و تقریباً در تولید تمام قطعات دقیق اپتیکی از فرآیند سنگ زنی به عنوان مرحله اولیه تولید استفاده می شود. با توجه به ماهیت ترد و سخت بودن شیشه ها، سنگ زنی این مواد باعث ایجاد آسیب های زیر سطحی در سطح ماده سنگ زده شده می گردد. به همین دلیل جلوگیری از به وجود آمدن آسیب های زیر سطحی و سطحی در سنگ زنی مواد ترد و سخت امری مشکل است.

در این پروژه سنگ زنی شیشه- سرامیک Zerodur که اصلی ترین کاربرد آن در ساخت آینه های اپتیکی است مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از مهمترین مشکلات سنگ زنی مواد ترد و سخت پیش بینی عمق آسیب های زیر سطحی است تا بتوان در مراحل بعدی تولید لایه های آسیب دیده را حذف نمود. استفاده از فرآیندهای ماشین کاری مانند پولیش شیمیایی- مکانیکی به دلیل نرخ براده برداری بسیار پایین آن بسیار وقت گیر و در نتیجه پرهزینه است و همچنین این فرآیندها توانایی ایجاد پروفایل مورد نیاز را ندارند. بنابراین پیش بینی و کاهش عمق آسیب های زیر سطحی در فرآیند سنگ زنی این مواد از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

ملکین^۱ و هوانگ^۲ در بررسی مکانیک شکست نفوذی به تغییر شکل شکست تحت یک تماس نرمال با فرورونده هرمی ویکرز به این نتیجه رسیدند که تحت یک فرورونده یک ناحیه تغییر شکل یافته پلاستیک و دو نوع ترک میانی/ شعاعی و جانبی تشکیل می شود که ترک جانبی از محل زیر نقطه تغییر شکل یافته پلاستیک گسترش می یابد [۱]. کوک^۳ و همکارانش نشان دادند که در مواد ترد و سخت، شکل گیری ترک های میانی در حالت های مختلف از سیکل بارگذاری و حذف بارگذاری اتفاق می افتد [۲]. آرگون^۴ مشاهده نمود که توزیع تعداد ترک ها در واحد سطح به عمق ترک ها از یک تابع توانی پیروی می کند [۳]. لامبرپولوس^۵ معادلات تئوری برای ترک های میانی و جانبی را بر پایه نفوذ یک فرورونده تیز با توجه به مکانیزم میکرو فرو رفتگی به دست آورد و نشان داد که زبری سطحی به وجود آمده در سنگ زنی حالت ترد برابر با عمق ترک جانبی بوده و این نوع ترک باعث جدا شدن براده از سطح ماده می شود [۴-۶]. لی^۷ و همکارانش آسیب های زیر سطحی در سنگ زنی شیشه اپتیک BK7 را مورد مطالعه قرار دادند و مدل قبلی که توسط لامبرپولوس گسترش داده شده بود را اصلاح نمودند [۸،۷].

روش های اندازه گیری مختلفی برای اندازه گیری عمق آسیب های زیر سطحی در قطعات اپتیک توسعه یافته است. مینیس^۹ و همکارانش از یک روش پرداخت کاری رتولوی مغناطیسی (MRF) برای تکنیک ایجاد شکل گوه ای بر روی نمونه استفاده نمودند [۹]. تونلیر^۸ و همکارانش از یک تکنیک پولیش با یک فرآیند پولیش قطعی استفاده نمودند. بعد از فرآیند اچ کردن، از یک میکروسکوپ نوری برای مشاهده تعداد ترک های به وجود آمده در یک مقطع یک میلی متر مربع با شمارش دستی استفاده نمودند [۱۰]. ژو و جاهانمیر^۱ نمونه ها را به دو قسمت تقسیم کردند که در آن هر کدام از سطح مقاطع جداگانه سنگ زنی شده و پولیش می شود و به هم چسبانده می شوند.

1. Malkin
2. Hwang
3. Cook
4. Argon
5. Lambropoulos
6. Li
7. Menapace
8. Tonnlier
9. Jahanmir

بعد از این مراحل آسیب های زیر سطحی به وجود آمده ناشی از سنگ زنی زیر میکروسکوپ مشاهده می شود [۱۱]. آگاروال^{۱۰} و همکارانش از یک تکنیک مشابه برای مشاهده آسیب های زیر سطحی سیلیکون کارباید سنگ زده شده و به کمک یک میکروسکوپ الکترونی استفاده کردند [۱۲،۱۳].

در این پروژه برای پیش بینی عمق آسیب های زیر سطحی، ارتباط عمق آسیب های زیر سطحی با زبری سطح بررسی گردیده است و همچنین تاثیر پارامترهای ماشین کاری (عمق برش، سرعت پیشروی، سرعت برش) و پارامترهای چرخ سنگ بر روی زبری سطح بررسی گردیده است.

۲- مدل تئوری برداشت براده در مواد ترد

مکانیزم برداشت براده در فرآیند سنگ زنی مواد ترد به صورت نفوذ یک نفوذ کننده ویکرز به داخل سطح نمونه صورت می گیرد. وقتی بار تماسی از یک مقدار بحرانی فراتر می رود تغییر پلاستیک غیر قابل برگشت در زیر نقطه تماس وارد می کند. افزایش این نیرو منجر به توسعه تغییر شکل پلاستیک و ایجاد ترک های میانی و شعاعی می شود که مشخصه تماس الاستیک و پلاستیک است (شکل ۱).

معادلات عمق ترک های میانی و شعاعی توسط لامبرپولوس توسعه داده شده اند که بر مبنای یک نفوذ کننده تیز مطابق مکانیک میکرو نفوذ و مدل هیل در ماده کاملاً پلاستیک است [۵]. معادله عمق ترک میانی در رابطه (۱) نشان داده شده است:

$$c_m = \alpha_k^{2/3} \left(\frac{E}{H} \right)^{(1-m)/2/3} (\cot \psi)^{4/9} \left(\frac{P}{K_c} \right)^{2/3} \quad (1)$$

که در آن c_m عمق ترک میانی، P نیروی نفوذ، ψ زاویه تیزی فرو رنده، E مدول الاستیک، H سختی، K_c تافنس شکست قطعه کار، m ثابت بدون بعد (۰/۳۳ تا ۰/۵) و α_k عددی بی بعد است که توسط رابطه (۲) به دست می آید:

$$\alpha_k = 0.027 + 0.09(m - \frac{1}{3}) \quad (2)$$

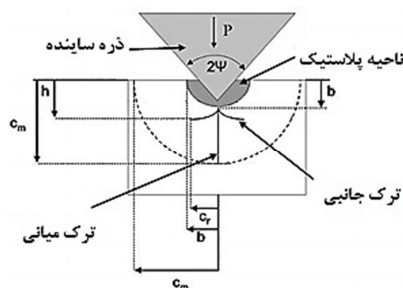
اندازه عمق ترک میانی از معادله (۳) به دست می آید [۵]:

$$h = 0.43 (\sin \psi)^{1/2} (\cos \psi)^{1/3} \left(\frac{E}{H} \right)^m \left(\frac{P}{H} \right)^{1/2} \quad (3)$$

عمق ترک میانی برابر با عمق ناحیه پلاستیک توسعه یافته است که برابر با عمق برداشت براده است. لامبرپولوس اثبات نمود که عمق آسیب های زیر سطحی برابر با عمق ترک های میانی و عمق ترک شعاعی برابر با زبری سطح خواهد بود [۵]. با ترکیب معادله (۱) و (۳) نسبت عمق آسیب های زیر سطحی به زبری سطح حاصل خواهد شد که در رابطه (۴) آمده است:

$$\frac{SSD}{SR} = \frac{c_m}{h} = 2.236 \alpha_k^{2/3} \left(\frac{E}{H} \right)^{(2-5m)/3} \frac{(\cot \psi)^{1/9}}{(\sin \psi)^{1/2}} \left[\frac{P}{K_c^4/H^3} \right]^{1/6} \quad (4)$$

در معادله فوق برای محاسبه نسبت عمق آسیب های زیر سطحی بر زبری سطح باید نیروی اعمال شده توسط هر ذره ساینده محاسبه گردد. در فرآیند



شکل ۱ ایجاد ترک میانی و جانبی در ماده ترد و سخت

جدول ۳ مشخصات چرخ سنگ کاپ	
مشخصات چرخ سنگ	مقدار
نوع چرخ سنگ	D76
اندازه دانه (d_g)	63-75 μ m
درصد حجمی (v)	12.5%
تعداد دانه های فعال در واحد سطح (C)	50 #/mm ²

جدول ۴ پارامترهای متغیر در سنگ زنی			
ردیف	سرعت برش (v_c) m/s	سرعت پیشروی (f_i) mm/rev	عمق برش (a_e) μ m
۱	۵	۰/۰۴	۲۵۰
۲	۹	۰/۲۴	۲۵۰
۳	۱۳	۰/۶	۲۵۰
۴	۵	۰/۲۴	۱۰۰
۵	۹	۰/۶	۱۰۰
۶	۱۳	۰/۰۴	۱۰۰
۷	۵	۰/۶	۵۰
۸	۹	۰/۰۴	۵۰
۹	۱۳	۰/۲۴	۵۰

۲-۲- اندازه گیری عمق آسیب های زیر سطحی

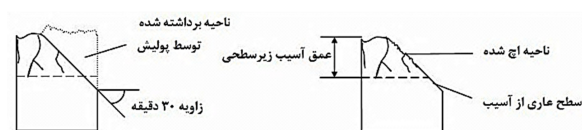
یکی از پارامترهای بسیار مهم در فرایند سنگ زنی مواد ترد و سخت، اندازه گیری عمق آسیب های زیر سطحی است که متأثر از پارامترهای ورودی می باشد. اندازه گیری این آسیب ها از این نظر دارای اهمیت است که باید در فرایندهای بعد از سنگ زنی حذف گردند تا مقاومت مکانیکی در برابر شکست کاهش نیابد. در این مطالعه برای مشاهده آسیب های زیر سطحی از میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است.

برای اندازه گیری آسیب های زیر سطحی از تکنیک پولیش زاویه ای استفاده شده است. در این تکنیک نمونه ها بعد از سنگ زنی تحت زاویه ی ۳۰ دقیقه ابتدا لپینگ و سپس پولیش شده است. برای فرایند لپینگ از ذرات ساینده اکسید آلومینیوم با متوسط اندازه ذرات ۱۰ تا ۱۲ میکرون و برای فرایند پولیش از ذرات اکسید سیریم با متوسط اندازه ذرات ۱ تا ۳ میکرون استفاده شده است. به منظور مشاهده بهتر ترک های ایجاد شده، نمونه ها قبل از استفاده از میکروسکوپ الکترونی اچ شده اند. نمونه ها برای اچ شدن به مدت ۱۰ تا ۱۲ ثانیه و دمای اتاق در مجاورت اسید HF قرار گرفته اند. در شکل ۲ تکنیک استفاده شده برای اندازه گیری عمق آسیب ها نشان داده شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- عمق آسیب های زیر سطحی

در روش پولیش زاویه ای عمق آسیب های سطحی و زیر سطحی سطح سنگ زده شده با ایجاد سطح گوه ای به وسیله پولیش مطالعه می شود که امکان بررسی عمق آسیب های سطحی و زیر سطحی و همچنین توزیع ترک های ایجاد شده در عمق های مختلف از سطح نمونه سنگ زنی شده را



شکل ۲ تکنیک استفاده شده برای اندازه گیری عمق آسیب های زیر سطحی

سنگ زنی محاسبه نیروی اعمالی توسط هر ذره ساینده بر روی سطح سنگ زده بسیار مشکل است. در معادله (۵) مقدار نیروی اعمال شده توسط ذره ساینده از معادله حذف شده است تا بتواند با اندازه گیری زبری سطح عمق آسیب های زیر سطحی سریع و با دقت بالا محاسبه نمود [۷].

$$SSD = 3.08 \alpha_K^{2/3} \frac{1}{(\sin \psi)^{2/3}} \frac{H^{2m}}{E^{(2m-2/3)} K_c^{2/3}} SR^{4/3} \quad (5)$$

۳- آزمایشات تجربی

۳-۱- مواد و چیدمان آزمایش ها

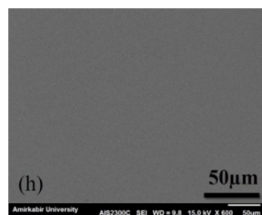
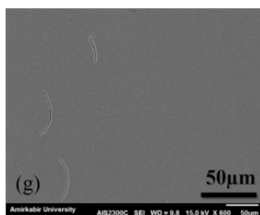
در این مطالعه فرایند سنگ زنی شیشه- سرامیک zerodur که یک ماده مهندسی بر پایه لیتیم آلومینا- سیلیکات است، بررسی شده است. این شیشه- سرامیک در بازه صفر تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد دارای انبساط حرارتی صفر است. ۷۰-۷۸ درصد این ماده دارای ساختار کریستالی با اندازه ذرات ۵۰-۵۵ نانومتر و سایر ساختار آن دارای یک ساختار شیشه ای است. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آن به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است [۱۵، ۱۴].

نمونه های سنگ زنی شده دارای قطر ۳۰ و ضخامت ۱۰ میلی متر می باشند. چرخ سنگ استفاده شده برای سنگ زنی از نوع کاپ الماس با باند فلزی و دارای قطر ۴۸ میلی متر و ساخت شرکت وینتر است که مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است. برای اندازه گیری زبری سطح از ماشین هامل- اتامیک مدل T8000 RC در طول ارزیابی ۱۲/۵ میلی متر و طول نمونه برداری ۲/۵ میلی متر مطابق استاندارد ISO 4288:1988 استفاده شده است.

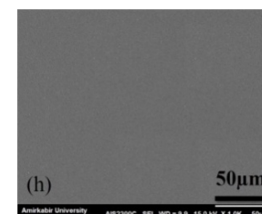
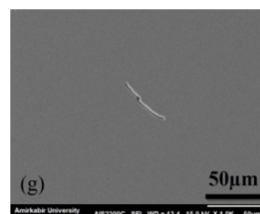
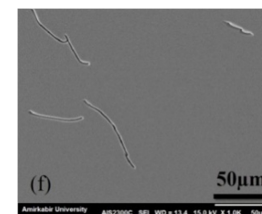
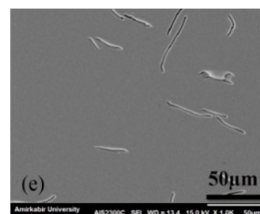
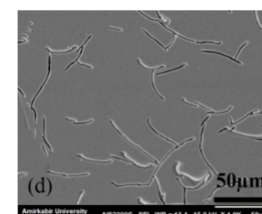
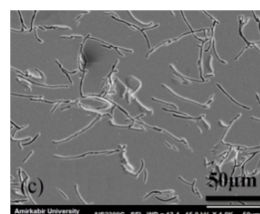
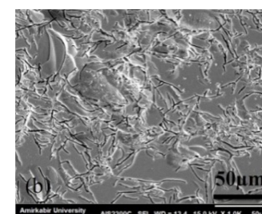
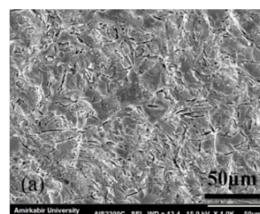
پارامترهای متغیر در این مطالعه شامل سه پارامتر سرعت برش، عمق برش و سرعت پیشروی می باشند. لیست مقادیر مختلف این پارامترها در طی ۹ آزمایش انجام شده در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی Zerodur		
عناصر	ترکیب	
	%wt	%mol
SiO ₂	۵۵/۴	۶۳/۹
Al ₂ O ₃	۲۵/۴	۱۷/۲
Li ₂ O	۳/۷	۸/۵
Na ₂ O	۰/۲	۰/۲
K ₂ O	۰/۶	۰/۵
MgO	۱	۱/۷
ZnO	۱/۶	۱/۳
P ₂ O ₅	۷/۲	۳/۵
TiO ₂	۲/۳	۲
ZrO ₂	۱/۸	۱
AsO ₃	۰/۶	۰/۰۲

جدول ۲ خواص مکانیکی Zerodur	
مقدار	خواص مکانیکی
۹۱	مدول الاستیسیته (E, GPa)
۰/۲۴	ضریب پواسون (ν)
۲/۵۳	چگالی (ρ , g/cm ³)
۶/۲	سختی نوپ (H, GPa)
۹۰	استحکام (MPa)



شکل ۳ میکروگراف SEM سطح سنگ زنی شده نمونه دوم در جدول ۶ ایجاد شده به روش پولیش زاویه ای، (a) سطح سنگ زنی شده، (b) نقطه شروع پولیش، (c) عمق ۹ میکرومتر از سطح سنگ زنی شده، (d) در عمق ۱۸ میکرومتر، (e) عمق ۲۸ میکرومتر، (f) عمق ۳۸ میکرومتر، (g) عمق ۴۶/۵ میکرومتر، (h) عمق ۵۷/۵ میکرومتر



شکل ۴ میکروگراف SEM سطح سنگ زنی شده نمونه چهارم در جدول ۶ ایجاد شده به روش پولیش زاویه ای، (a) سطح سنگ زنی شده، (b) نقطه شروع پولیش، (c) عمق ۸ میکرومتر از سطح سنگ زنی شده، (d) در عمق ۱۵ میکرومتر، (e) عمق ۲۳ میکرومتر، (f) عمق ۳۲/۵ میکرومتر، (g) عمق ۴۰ میکرومتر، (h) عمق ۴۸/۵ میکرومتر

۴-۲- اندازه گیری طول ترک های زیر سطحی

برای تعیین اثر سفتی دینامیکی ماشین سنگ زنی بر روی عمق آسیب های زیر سطحی آنالیز توزیع ترک های ایجاد شده در عمق های مختلف از سطح سنگ زنی شده ضروری است. در کارهای انجام شده قبلی به منظور

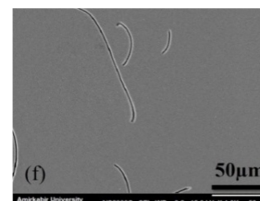
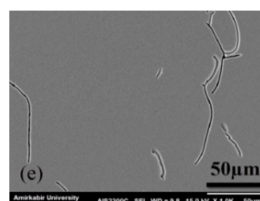
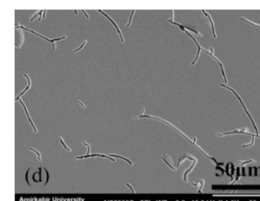
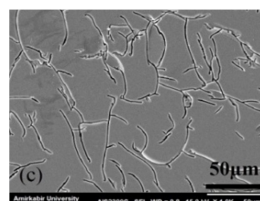
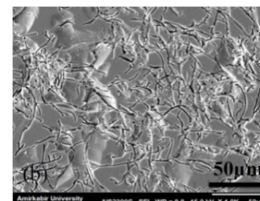
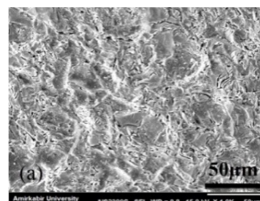
امکان پذیر می کند. به دلیل ماهیت شیمیایی- مکانیکی فرآیند پولیش هیچ گونه آسیب سطحی و زیر سطحی توسط آن ایجاد نمی شود. نتایج نشان می دهد که تعیین عمق آسیب های سطحی و زیر سطحی با تکنیک پولیش زاویه ای برای اندازه گیری دقیق عمق و توزیع آسیب ها در عمق های مختلف از سطح سنگ زنی شده بسیار مناسب می باشد. در جدول ۵ عمق آسیب های سطحی (زبری سطح) و زیر سطحی (عمق ترک ها) برای آزمایش های انجام شده ارائه شده است.

جدول ۵ نتایج عمق آسیب های زیر سطحی در نتایج تجربی

ردیف	سرعت برش (m/s)	عمق برش (µm)	سرعت پیشروی (mm/rev)	عمق آسیب (µm)	سرعت برش (µm)
۱	۵	۲۵۰	۰/۰۴	۴۱/۸	۱۴/۵
۲	۹	۲۵۰	۰/۲۴	۵۵/۴	۱۸
۳	۱۳	۲۵۰	۰/۶	۱۲۰	۳۲
۴	۵	۱۰۰	۰/۲۴	۴۸/۲۵	۱۶/۵
۵	۹	۱۰۰	۰/۶	۱۰۵	۲۹
۶	۱۳	۱۰۰	۰/۰۴	۲۶/۷	۱۰/۵
۷	۵	۵۰	۰/۶	۱۰۳/۴	۲۸
۸	۹	۵۰	۰/۰۴	۲۵/۲	۱۰
۹	۱۳	۵۰	۰/۲۴	۳۲/۷	۱۲

در جدول ۶ زبری سطحی برحسب عمق قله تا دره (p-v) ارائه شده است.

شکل ۳ میکروساختار SEM سطح سنگ زنی شده Zerodur است که با روش پولیش زاویه ای ایجاد شده است. همان گونه که می توان در شکل مشاهده نمود با افزایش عمق پولیش تعداد ترک ها در سطح سنگ زنی شده کاهش می یابد تا زمانی که تقریباً همه ترک ها محو شوند. شایان ذکر است که عمق اندازه گیری شده در این تصاویر میکروسکوپی براساس زاویه پولیش و حرکت خطی میکروسکوپ تعیین گردیده است. برای تأیید این رفتار میکروگراف SEM یک نمونه دیگر در شکل ۴ ارائه شده است.



۴-۳- مدل آماری تاثیر پارامترهای سنگ زنی بر روی صافی سطح

به منظور بررسی آسیب های سطحی ایجاد شده به وسیله سنگ زنی در شیشه- سرامیک Zerodur اثر عمق برش، سرعت برش و سرعت پیشروی بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که پیشروی بیشترین تاثیر را بر زبری سطح و در نتیجه عمق آسیب های زیرسطحی دارد. عمق و سرعت برش به ترتیب پارامترهای تاثیرگذار بعدی می باشند. افزایش سرعت پیشروی و عمق برش باعث افزایش عمق آسیب می شود درحالی که افزایش سرعت برش باعث کاهش عمق آسیب ها می شود. تغییرات زبری سطح با عمق برش و سرعت برشی در نتایج تجربی تقریباً خطی است. مدل آماری به دست آمده توسط آنالیز واریانس (ANOVA) برای زبری سطح برطبق پارامترهای سنگ زنی و نتایج تجربی به صورت نشان داده شده در رابطه (۶) است.

$$SR = 9.87 + 0.023a_e - 0.187v_c + 9.07v_w + 36.05v_w^2 \quad (6)$$

در این رابطه a_e عمق برش، v_c سرعت برش و v_w سرعت پیشروی می باشد.

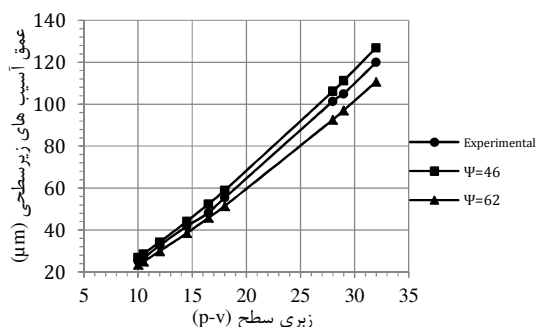
۴-۴- مقایسه نتایج تجربی و مدل لی

نتایج تجربی به دست آمده در این مطالعه با مدل لامبرپولوس اصلاح شده توسط لی مقایسه شده است. این مدل برای بررسی رابطه بین زبری سطح و آسیب های سطحی و زیرسطحی توسعه داده شده است. نتایج نشان می دهد که نتایج تجربی مطابقت خوبی با این مدل دارد. مدل اصلاح شده لی در معادله (۵) ارائه شده است. در این مدل زبری سطح و عمق آسیب های سطحی و زیرسطحی به ترتیب مساوی با عمق ترک جانبی و ترک میانی در نظر گرفته می شود.

در این مدل زاویه تیزی ذرات ساینده الماس (ψ) مطابق با تحقیق انجام گرفته توسط محمود [۱۶] در گستره ۴۶ تا ۶۲ درجه گزارش شده است. پارامتر m نیز یک پارامتر بدون بعد بوده که در این مطالعه ۰/۳۳ در نظر گرفته شده است. پارامترهای دیگر براساس خواص مکانیکی Zerodur انتخاب شده اند (جدول ۲). شکل ۸ نتایج مطالعه در مقایسه با مدل اصلاح شده لی را نشان می دهد. نتایج تجربی مطابقت خوبی با مدل تئوری داشته است.

۵- نتیجه گیری

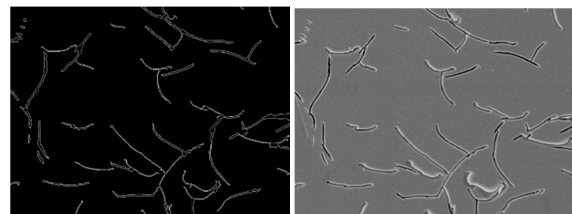
براساس مطالعات تئوری و آزمایش های تجربی نتایج زیر حاصل شده است: نتایج تجربی نشان می دهد که به ترتیب سرعت پیشروی و عمق و سرعت برش بیشترین تاثیر را بر زبری سطح دارند. با افزایش سرعت پیشروی و عمق برش زبری سطح افزایش یافته و افزایش سرعت برشی به کاهش زبری سطح و همچنین عمق آسیب های زیرسطحی می شود.



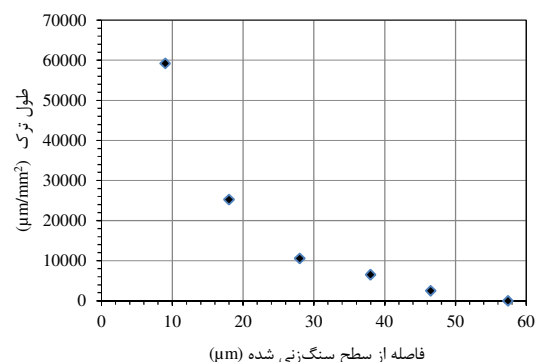
شکل ۸ نمودار عمق آسیب های زیرسطحی برحسب زبری سطحی برای مدل تئوری و نتایج تجربی

اندازه گیری توزیع ترک های ایجاد شده از روش شمارش دستی استفاده شده است [۱۰]. برای بحث در مورد طول ترک معیار مناسبی نیاز است. تعداد ترک نمی تواند معیار مناسبی باشد. زیرا طول ترک های ایجاد شده در نمونه ها متفاوت بوده و جدا کردن آن ها از یکدیگر مشکل است. بنابراین در این مطالعه از نرم افزار متلب^۱ برای پردازش تصاویر میکروسکوپی به منظور اندازه گیری طول ترک در عمق های مختلف از سطح سنگ زنی شده استفاده شده است. برای این منظور میکروگراف SEM طی پردازش تصویر به دو قسمت پیکسل سفید و سیاه تبدیل شده اند. سپس با شمارش تعداد پیکسل سفید طول ترک محاسبه شده است. در شکل ۵ نمونه ای از پردازش تصویر انجام شده نشان داده شده است.

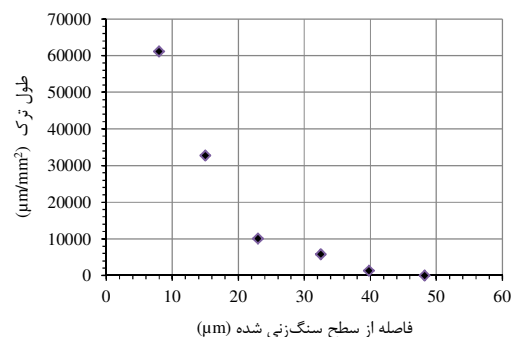
نتایج مربوط به اندازه گیری طول ترک در عمق های مختلف از سطح سنگ زنی شده در نمودارهای شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است. در این نمودار محور افقی مربوط فاصله از سطح سنگ زنی شده و محور عمودی مربوط به طول ترک در واحد میلی متر مربع می باشد.



شکل ۵ تصویر میکروگراف پردازش شده توسط نرم افزار متلب



شکل ۶ نمودار توزیع طول ترک در عمق مختلف از سطح سنگ زنی شده



شکل ۷ نمودار توزیع طول ترک در عمق مختلف از سطح سنگ زنی شده

- مدل توسعه یافته برای پیش بینی زبری سطح مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد. میزان خطای حاصل ۵٪ بوده و پیش بینی مناسبی داشته است.
- به دلیل موانع موجود در روش های دستی شمارش تعداد ترک، روش پردازش تصویر می تواند روش بسیار مناسبی برای مطالعه توزیع آسیب های زیرسطحی در عمق های مختلف از سطح سنگ زده شده باشد.
- نتایج نشان می دهد که اندازه گیری و تخمین عمق آسیب های زیرسطحی با استفاده از مدل اصلاح شده لی دقیق و قابل اعتماد است.

۶- مراجع

- [1] S. Malkin, T. W. Hwang, Grinding Mechanisms for Ceramics, *Annals of the CIRP*, Vol. 45/2/, pp79-96, 1996.
- [2] Cook, R. F. and Pharr, G. M, Direct observation and analysis of indentation cracking in glasses and ceramics, *Journal of the American Ceramic Society*, 73(4), pp 787-817, 1990.
- [3] Argon, A. S. Distribution of cracks on glass surfaces, *Royal Society of London Proceedings*, Series A 250, 482-492, 1959.
- [4] J. C. Lambropoulos, From abrasive size to subsurface damage in grinding, *Optical abrication & Testing*, OSA Technical Digest 8, 17-18, 2000.
- [5] J. C. Lambropoulos, S. D. Jacobs, J. Ruckman, MATERIAL REMOVAL MECHANISMS FROM GRINDING TO POLISHING, *Finishing of Advanced Ceramics and Glasses*, Ceramic Transactions V.102, 1999.
- [6] J. C. Lambropoulos, T. Fang, P. D. Funkenbusch, S. D. Jacobs, M. J. Cumbo, D. Golini, Surface Microroughness of Optical Glasses under Deterministic Microgrinding, *Optical Society of America APPLIED OPTICS*, Vol. 35, No. 22, 1996.
- [7] S. Li, Z. Wang, Y. Wu, Relationship between subsurface damage and surfaceroughness of optical materials in grinding and lapping processes, *journal of materials processing technology*, 205, pp34-41, 2008.
- [8] Z. Yao, W. Gu, K. Li, Relationship between surface roughness and subsurface crack depth during grinding of optical glass BK7, *Journal of Materials Processing Technology*, 212, pp 969- 976, 2012.
- [9] Menapace, J. A., Davis, P. J, Steele, W. A., Wong, L. L., Suratwala, T. I. and Miller, P. E., MRF Applications: measurement of process-dependent subsurface damage in optical materials using the MRF wedge technique, *Proceedings of the SPIE*, Vol. 5991, pp. 599103.1-599103.11, 2005.
- [10] Tonnellier, X., Morantz, P., Shore, P., Baldwin, A., Evans, R. and Walker, D. Subsurface damage in precision ground ULE and Zerodur surfaces, *Optics Express*, 15(19), pp12197-12205, 2007.
- [11] Xu, H. K. and Jahanmir, S., Simple technique for observing subsurface damage in machining of ceramics, *Journal of the American Ceramic Society* 7(5), pp1388-1390, 1994.
- [12] Agarwal, S., Venkateswara Rao, P., Experimental investigation of surface /subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48(6), pp 698-710, 2008.
- [13] Agarwal, S. and Venkateswara Rao, P., A probabilistic approach to predict surface roughness in ceramic grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45(6), pp 609-616, 2005.
- [14] J.D. Miranda, A.L. Christoforo, A.M. Dias, Determination of the mechanical behavior of a ceramic glass composite by finite element method, *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, Vol 13, pp 428-435, 2012.
- [15] M.J. Viens, Fracture Toughness and Crack Growth of Zerodur®, NASA Technical Memorandum 4185 1990, <http://handle.dtic.mil/100.2/ADA309969>.
- [16] T. Mahmoud, J. Tamaki, J. Yan, Three-dimensional shape modeling of diamond abrasive grains measured by a scanning laser microscope, *Key Engineering Material*, Vol 238, pp131-136, 2003.