

زینترینگ و بررسی خواص شیشه - سرامیک‌های ماشین کاری شونده فلونور و میکا

سوسن هاشمی نیا^۱ - بیژن افتخاری یکتا^۲

۱- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرند

۲- دانشیار، دانشگاه علم و صنعت ایران

S.hashemina@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش رفتار زینترپذیری، تبلور و قابلیت ماشین کاری شیشه‌های سیستم SiO_2 ، Al_2O_3 ، MgO ، K_2O ، B_2O_3 ، F مورد بررسی قرار گرفت. با انتخاب یک فرمول مینا و با افزودن عوامل جوانه‌زایی از قبیل ZrO_2 و Cr_2O_3 ، TiO_2 - سرامیک مناسب از نظر زینترپذیری و قابلیت ماشین کاری حاصل شد.

پارامترهای مختلفی از قبیل ابعاد و نحوه توزیع ذرات میکا در ریزساختار، اندازه تراشه‌های حاصل از ماشین کاری (d_{50})، استحکام و سختی قطعات زینتر شده تعیین و با مشاهدات تجربی مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده به نظر می‌رسد که شدت نسبی پیک مربوط به میکا در الگوهای XRD، سختی و اندازه تراشه‌های بعد از ماشین کاری (d_{50}) شاخص‌های مناسبی برای ارزیابی قابلیت ماشین کاری این نوع شیشه - سرامیک‌ها می‌باشند.

واژه‌های کلیدی:

شیشه سرامیک فلونور و میکا، زینترینگ، ماشین کاری

۱- مقدمه

می‌گردند. با توجه به این موضوع یکی از روش‌های مرسوم برای ماشین کاری مواد سرامیکی، انجام عملیات ماشین کاری بر روی قطعه خام و یا نیمه خام می‌باشد.

این روش عدم دقت ابعادی قطعات نهایی و (احتمالاً) بروز ضایعات و یا کاهش ویژگی‌های مکانیکی ناشی از ایجاد ریزترک به هنگام ماشین کاری و رشد آنها به هنگام پخت را در پی خواهند داشت.

چقرمگی شکست پایین یا مقاومت کم بدنه‌های سرامیکی در برابر رشد ترک، تردی و همچنین سختی بسیار زیاد از جمله ویژگی‌هایی هستند که سرامیک‌ها را از فلزات متمایز می‌نمایند. ویژگی‌های مذکور از عواملی محسوب می‌شوند که مانع از قابلیت ماشین کاری مناسب این مواد در مقایسه با فلزات

خاصی برخوردار خواهد بود.

۲- روش تحقیق

مواد اولیه شامل پودر سیلیس ده حاجی اسیدشویی شده با خلوص بیش از ۹۹ درصد، H_3BO_3 (صنعتی ترکیه)، $(Merck\ 5828)MgCC_3$ ، $(Merck\ 4928)K_2CO_3$ ، آلومینای ژاپن با خلوص ۹۹ درصد، $(Merck\ 5846)MgF_2$ ، $(Merck\ 812)TiO_2$ ، $(Merck\ 2483)Cr_2O_3$ و $(Merck\ 8909)ZrO_2$ برای تهیه شیشه مورد استفاده قرار گرفت. مواد اولیه به صورت پودر نرم پس از مخلوط شدن کامل، تحت فشار ۲MPa متراکم شده و سپس درون بوته زیرکنی و توسط کوره الکتریکی در دمای $1400^\circ C$ و اتمسفر محیط ذوب گردید. آنگاه مذاب شیشه سریعاً در آب سرد شد. شیشه به دست آمده ابتدا به وسیله هاون دستی و سپس درون هاون عقیق به مدت ۲ ساعت آسیاب شد. پس از آن به مدت ۵ ساعت توسط آسیاب سیاره‌ای آسیاب گردید. پس از خشک کردن دوغاب در خشک کن و در دمای $100^\circ C$ پودر شکل دهی به دست آمد. چگونگی توزیع اندازه ذرات پودر شیشه به دست آمده پس از طی مراحل فوق‌الذکر توسط دستگاه اندازه‌گیری لیزری توزیع ذرات مورد بررسی قرار گرفت.

برای شکل دادن پودر شیشه از پرس هیدرولیک دستی تک محوره و قالب فولادی استفاده شد. پرس کردن هر قطعه در دو مرحله با فشار اولیه ۱۳ و ثانویه ۴۹MPa انجام گرفت. ابعاد قطعات پرس شده برابر با $55 \times 13 \times 5$ mm بود. بررسی رفتار حرارتی هر یک از آمیزهای شیشه به منظور تعیین دمای انتقال به شیشه (T_g)، دمای نرم‌شوندگی (T_s)، دمای تبلور و دمای ذوب فاز بلورین با استفاده از دستگاه آنالیز حرارتی همزمان انجام شد. سرعت سرمایش $10^\circ C/mm$ از دمای اتاق تا $1200^\circ C$ بود. پس از خشک کردن قطعات پرس شده در خشک کن الکتریکی در دمای $100^\circ C$ ، پخت آنها در محدوده دمایی بین نقطه نرم‌شوندگی شیشه‌ها (T_s) و دمای $1100^\circ C$ با سرعت گرمایش $20^\circ C/mm$ انجام شد. ارزیابی میزان زیت‌پذیری هر یک از

در حوالی سال ۱۹۷۰ شرکت آمریکایی Corning شیشه - سرامیکی را با نام تجاری Macor به بازار عرضه نمود که از قابلیت ماشین‌کاری بسیار بالایی برخوردار بوده و بی‌نیاز از عملیات حرارتی مجدد قابل استفاده بود [۱]. ریزساختار مشخصه این شیشه - سرامیک‌ها شامل بلورهای دوبعدی و درهم قفل شده میکا است که به‌طور اتفاقی در زمینه ترد شیشه پخش شده‌اند [۲ و ۵].

از مهم‌ترین خواص شیشه - سرامیک‌های میکا و یکی از ویژگی‌هایی که این شیشه - سرامیک‌ها را از شیشه - سرامیک‌های دیگر متمایز می‌کند، قابلیت ماشین‌کاری آنها با دقت ابعادی بسیار خوب (± 0.1 mm)، با ابزارآلاتی که برای ماشین‌کاری فلزات به کار می‌رود، است [۴ و ۳]. ساختار درهم قفل شده و جهت‌گیری اتفاقی بلورهای میکا باعث انحراف، شاخه‌شاخه شدن و کند شدن نوک ترک شده و در نتیجه باعث متوقف شدن شکست و جلوگیری از شکست‌های ناگهانی می‌شود. بنابراین شکست‌های ریزی در مناطق ضعیف از قبیل فصل مشترک میکا - شیشه و صفحات بازال میکا ایجاد می‌شود که خارج و جدا شدن مواد در طی ماشین‌کاری ناشی از به هم پیوستن این شکست‌ها و ترک‌های ریز می‌باشد [۶ و ۷].

مطالعه و تحقیق جهت ساخت این نوع شیشه - سرامیک در ایران در سال ۱۳۷۷ در پژوهشگاه مواد و انرژی به روش ریخته‌گری مذاب شیشه انجام شد [۸]. ولی به دلیل وجود مشکلاتی از قبیل نیاز به سرعت گرمایش بسیار پایین در حین عملیات حرارتی، تبلور سطحی و ناتوانی در ریخته‌گری قطعات پیچیده تصمیم گرفته شد که شیشه - سرامیک مذکور به روش زینترینگ پودر شیشه فشرده شده نیز تهیه شود. با جستجو در منابع علمی موجود به راحتی می‌توان دریافت که عوامل مؤثر بر زینتر شدن این شیشه - سرامیک‌ها تاکنون چندان مطالعه نشده و بررسی زینترپذیری این خانواده از شیشه - سرامیک‌ها از جاذبه

بررسی‌های انجام شده نشان داد که تبخیر فلونور در طی فرایند ذوب شیشه یکی از مشکلات تهیه شیشه - سرامیک‌های بر پایه میکا می‌باشد [۹] و شرایط ذوب از جمله دما و زمان ذوب کردن نیز در میزان تبخیر فلونور نقش مهمی دارند [۱۰].

بنابراین با تجربیاتی که در طی ذوب‌های متعدد از فرمول‌های یکسان به دست آمد، مشخص گردید که شرایط ذوب از قبیل سرعت گرمایش، دما و زمان ذوب تأثیر به‌سزایی در رفتار زینترینگ و قابلیت ماشین‌کاری محصول زینتر شده خواهد داشت.

بر اساس نتایج مذکور و با توجه به نقش فلونور در زینترپذیری و تبلور این نوع شیشه‌ها مشخص گردید که کاهش سرعت گرمایش، افزایش دما و زمان ذوب موجب افزایش فراریت فلونور از شیشه مذاب و در نتیجه نوسانات در زینترپذیری و قابلیت ماشین‌کاری می‌گردد.

با توجه به این موضوع برای ذوب سریع ترکیب ابتدا پودر مواد اولیه با متوسط اندازه ذرات (d_{50}) ۷ میکرون تحت فشار ۲MPa متراکم شده و سپس با سرعت گرمایش $10^\circ\text{C}/\text{mm}$ و دمای 1400°C (بدون زمان ماندگاری) مذاب مناسبی تهیه گردید.

از آنجا که اندازه ذرات پودر شیشه یکی از عوامل اصلی مؤثر در سرعت زینترشدن پودر شیشه فشرده می‌باشد، توزیع اندازه ذرات پودر شیشه حاصل با دستگاه اندازه‌گیری لیزری توزیع اندازه ذرات تعیین شد.

شکل (۱) چگونگی توزیع اندازه ذرات پودر شیشه مذکور را نشان می‌دهد. همانطوری که از نمودار مشخص است، متوسط اندازه ذرات (d_{50}) پودر شیشه در حدود ۳ میکرون می‌باشد.

آمیزهای شیشه با اندازه‌گیری میزان انقباض خطی (با استفاده از کولیس و با دقت ۰/۰۵ mm) صورت گرفت.

برای شناسایی نوع فازهای بلورین پس از هر مرحله عملیات حرارتی یا پخت از دستگاه پراشگر پرتو ایکس استفاده شد. همچنین از پودر Si با خلوص ۹۹/۹۹۹٪ به میزان (۲۰ درصد وزنی) به عنوان ماده استاندارد استفاده گردید.

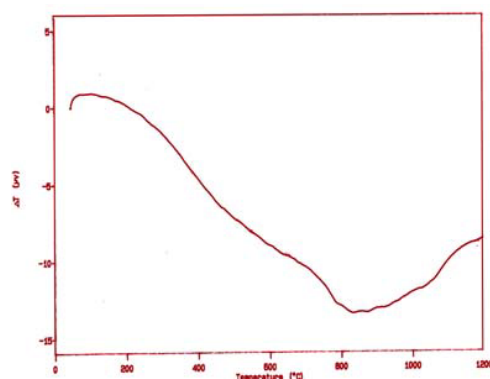
برای تعیین مقدار فازهای موجود در الگوهای اشعه ایکس، شدت نسبی بزرگ‌ترین پیک فاز مورد نظر به شدت نسبی پیک (۱۱۱) سیلیکون اندازه‌گیری شد.

بررسی‌های میکروسکوپی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) انجام گرفت. همچنین قابلیت ماشین‌کاری نمونه‌ها از طریق بازرسی چشمی نحوه سوراخ شدن نمونه با مته ۲mm معمولی با سرعت چرخش ۳۰۰rpm و سرعت باردهی ۳/۸cm/min مورد ارزیابی قرار گرفت.

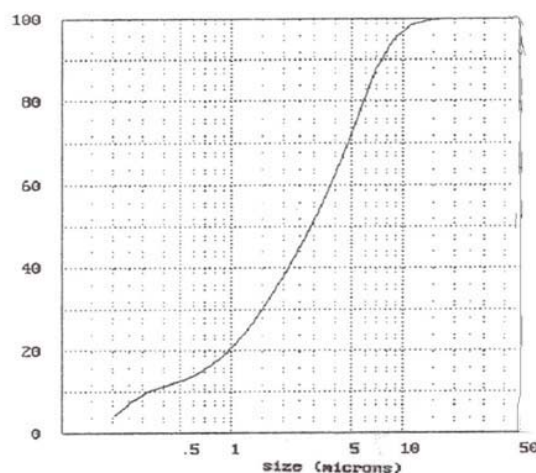
همچنین توزیع اندازه تراشه‌های ناشی از سوراخ‌کاری را نیز به عنوان معیاری برای ارزیابی قابلیت ماشین‌کاری قرار داده شد. اندازه‌گیری استحکام خمشی با استفاده از دستگاه (Instron Universal Testing Machine 1196) به صورت چهار نقطه‌ای و اندازه‌گیری سختی قطعات با استفاده از دستگاه ریزسنج ویکرز (Buechler, Micomet 1) با بار ۵۰۰ gr و زمان ۳۰ ثانیه انجام پذیرفت. تعداد نمونه‌ها در هر آزمایش ۵ عدد بود.

۳- نتایج و مباحث

همانطور که قبلاً بیان شد، شیشه مبنا در این پژوهش ترکیب GC5 بود که حاوی مقادیر وزنی ۴۰/۱۳٪ SiO_2 ، ۱۶/۲۴٪ Al_2O_3 ، ۱۹/۱۱٪ MgO ، ۸٪ K_2O ، ۶٪ B_2O_3 ، ۹/۵۵٪ F می‌باشد.



شکل (۲): گرمانگاشت DTA شیشه GC5 با سرعت گرمایش $10^\circ\text{C}/\text{mm}$.



شکل (۱): چگونگی توزیع اندازه ذرات شیشه GC5.

جدول (۱): ویژگی‌های شیشه - سرامیک GC5 پس از زینتر کردن در دماهای مختلف.

ویژگی‌ها	850°C	1000°C	1050°C	1100°C
درصد انقباض خطی	۴	۸/۳	۱۲	۱۹/۳
$\frac{I_{mica(001)}}{I_{st(111)}}$	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۰۹	۰/۱۲
مشاهده چشمی قابلیت ماشین کاری *	خیلی خوب	خیلی خوب	خوب	متوسط

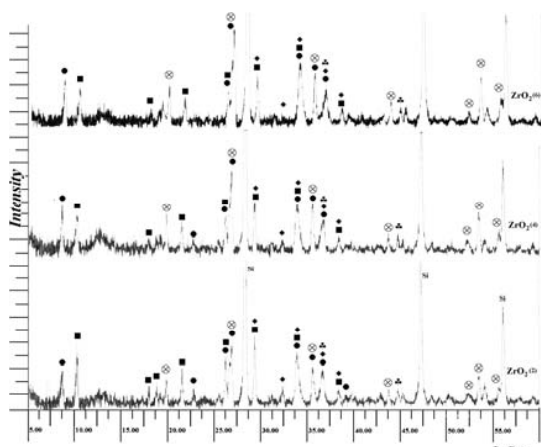
زمانی که به هنگام سوراخ کاری با مته به محض تماس مته با نمونه، قطعه شکسته شود، قابلیت ماشین کاری بد، زمانی که یک سوراخ کامل ایجاد شود ولی نمونه در وسط کار شکسته شود، قابلیت ماشین کاری متوسط، زمانی که سوراخ کامل با لب‌پریدگی کمی ایجاد شود، قابلیت ماشین کاری خوب و در حالی که سوراخ کامل بدون لب‌پریدگی ایجاد شود، قابلیت ماشین کاری خیلی خوب می‌باشد.

قطعات شیشه‌ای پرس شده 1100°C - 850°C انتخاب گردید. جدول (۱) مشخصات شیشه - سرامیک GC5 (و همچنین شدت نسبی فاز میکا در مقایسه با سیلیکون ناشی از آزمایش XRD) را پس از پخت در محدوده دمای 1100°C - 850°C نشان می‌دهد. سرعت افزایش دما در این آزمایش‌ها $200^\circ\text{C}/\text{mm}$ و زمان ماندگاری در دمای بیشینه 120 دقیقه بود.

شکل (۲) گرمانگاشت DTA شیشه GC5 را نشان می‌دهد. چنین مرسوم است که برای تهیه شیشه - سرامیک‌ها به روش زینتر پودر شیشه باید شیشه را قبل از تبلور به‌طور کامل زینتر نمود. در غیر این صورت تبلور قبل از زینترینگ انجام شده و گرانبوی افزایش یافته و زینترینگ متوقف می‌شود و تهیه قطعه‌ای با چگالی تئوریک ممکن نخواهد بود [۱۱، ۱۲ و ۱۸]. بنابراین به‌نظر می‌رسد که مناسب‌ترین دما برای زینترینگ شیشه محدوده دمایی بین T_g و T_0 (دمای شروع تبلور) می‌باشد [۱۹]. از آنجا که گرمانگاشت DTA شیشه GC5 پیک تیز و مشخصه‌ای مشاهده نشد، بنابراین محدوده دمایی انتخاب شده برای زینتر کردن قطعات شیشه‌ای پرس شده 1100°C - 850°C انتخاب گردید. جدول (۱) مشخصات شیشه - سرامیک GC5 (و همچنین شدت نسبی فاز میکا در مقایسه با سیلیکون ناشی از آزمایش XRD) را پس از پخت در محدوده دمای 1100°C - 850°C نشان می‌دهد. سرعت افزایش دما در این آزمایش‌ها $20^\circ\text{C}/\text{mm}$ و زمان ماندگاری در دمای بیشینه 120 دقیقه بود. از آنجا که گرمانگاشت DTA شیشه GC5 پیک تیز و مشخصه‌ای مشاهده نشد، بنابراین محدوده دمایی انتخاب شده برای زینتر کردن

جدول (۲): آنالیز شیمیایی شیشه‌ها بعد از افزودن عوامل جوانه‌زای به شیشه GC۵.

شیشه	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	B ₂ O ₃	F	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	ZrO ₂
GC ₅	۴۰/۱۳	۱۶/۴۴	۱۹/۱۱	۸	۶/۶۸	۹/۵۵	—	—	—
TiO ₂ 2	۴۰/۱۳	۱۶/۴۴	۱۹/۱۱	۸	۶/۶۸	۹/۵۵	۲	—	—
TiO ₂ 4	۴۰/۱۳	۱۶/۴۴	۱۹/۱۱	۸	۶/۶۸	۹/۵۵	۴	—	—
TiO ₂ 6	۴۰/۱۳	۱۶/۴۴	۱۹/۱۱	۸	۶/۶۸	۹/۵۵	۶	—	—
Cr ₂ O ₃ 3	۴۰/۱۳	۱۶/۴۴	۱۹/۱۱	۸	۶/۶۸	۹/۵۵	—	۲	—
Cr ₂ O ₃ 4	۴۰/۱۳	۱۶/۴۴	۱۹/۱۱	۸	۶/۶۸	۹/۵۵	—	۴	—
Cr ₂ O ₃ 6	۴۰/۱۳	۱۶/۴۴	۱۹/۱۱	۸	۶/۶۸	۹/۵۵	—	۶	—
ZrO ₂ 2	۴۰/۱۳	۱۶/۴۴	۱۹/۱۱	۸	۶/۶۸	۹/۵۵	—	—	۲
ZrO ₂ 4	۴۰/۱۳	۱۶/۴۴	۱۹/۱۱	۸	۶/۶۸	۹/۵۵	—	—	۴
ZrO ₂ 6	۴۰/۱۳	۱۶/۴۴	۱۹/۱۱	۸	۶/۶۸	۹/۵۵	—	—	۶

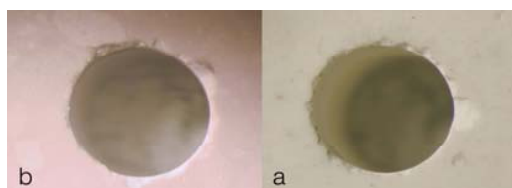


شکل (۳): الگوهای پراش پرتو ایکس سه شیشه - سرامیک ZrO₂ ۴، ZrO₂ ۲ و ZrO₂ ۶ پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۱۰۰°C. میکا، کئوردیریت، نوربرگیت، اسپینل MgAl₂O₄، سیلیکات زیرکونیم ZrSiO₄

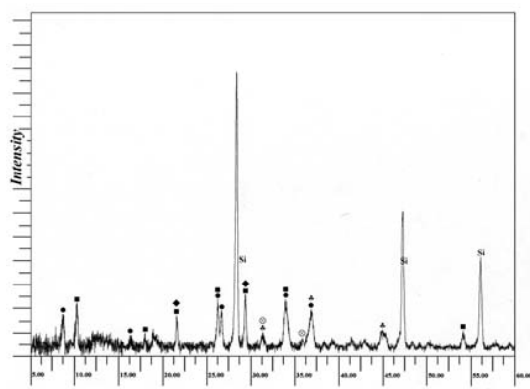
بنابراین به منظور تعیین ویژگی‌های موثر بر قابلیت ماشین‌کاری و یا پیش‌بینی این قابلیت در شیشه - سرامیک‌های مختلف پارامترهای مختلفی از قبیل شدت نسبی الگوی پراش پرتو ایکس میکا، ستر شده، چگونگی توزیع و ابعاد ذرات میکا در قطعه، متوسط اندازه تراشه‌های حاصل از سوراخ‌کاری شیشه - سرامیک‌ها (d_{50})، سختی و استحکام اندازه‌گیری شد

از جدول (۱) نتیجه گرفته می‌شود که ترکیب GC۵ علی‌رغم آنکه در دمای ۱۱۰۰°C قابلیت زیت‌پذیری خوبی دارد ولی از قابلیت ماشین‌کاری مطلوبی برخوردار نمی‌باشد. بنابراین اثر افزایش اکسیدهای جوانه‌زای TiO₂، Cr₂O₃ و ZrO₂ بر روی خواص شیشه - سرامیک GC۵ مطالعه شد. در جدول (۲) آنالیز شیمیایی ترکیب شیشه‌های انتخاب شده آورده شده است. ملاک انتخاب یک ترکیب در این پژوهش ابتدا زیت‌پذیری و رسیدن به چگالی تئوریک و آنگاه بهره‌مندی از قابلیت ماشین‌کاری مطلوب می‌باشد. بنابراین از مشاهدات چشمی نمونه‌ها به هنگام ماشین‌کاری نتیجه گرفته شد که شیشه - سرامیک‌های GC۵، TiO₂ ۶ و Cr₂O₃ ۶ همگی به طور نسبی از قابلیت زیت‌پذیری و ماشین‌کاری برخوردار بودند و شیشه - سرامیک‌های حاوی عامل جوانه‌زای ZrO₂ از قابلیت ماشین‌کاری نامطلوبی برخوردار بودند.

عدم قابلیت ماشین‌کاری این شیشه - سرامیک‌ها را می‌توان با وجود ذرات سخت زیرکن توجیه نمود. شکل (۳) افزایش پیک مربوط به تبلور ZrSiO₄ را در سه شیشه - سرامیک ZrO₂ ۴، ZrO₂ ۲ و ZrO₂ ۶ پس از زیت‌شدن در دمای ۱۱۰۰°C نشان می‌دهد.



شکل (۴): تصاویر سطح سوراخ کاری شده شیشه - سرامیک های
(a) $TiO_2 6$ و (b) $Cr_2O_3 6$.



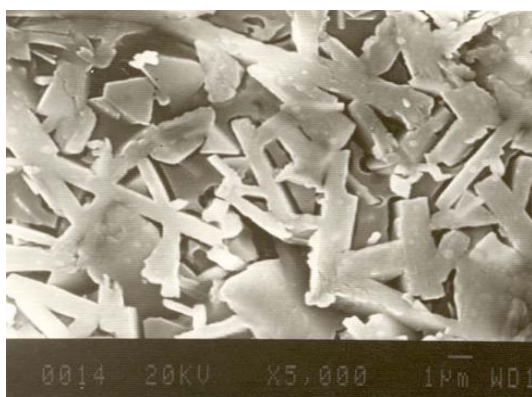
شکل (۵): الگوی پراش اشعه ایکس شیشه - سرامیک
GC5 در دمای $1100^\circ C$ • میکا، کنوردیریت،
♦ نوربرگیت، ♣ اسپینل $MgAl_2O_4$.

$TiO_2 6$ با داشتن اندازه تراشه های کوچک تر از صافی سطح بهتری نسبت به شیشه - سرامیک $Cr_2O_3 6$ برخوردار است. بالا بودن سختی شیشه - سرامیک های GC5 و $Cr_2O_3 6$ در نتیجه قابلیت ماشین کاری متوسط این شیشه - سرامیک ها را با توجه به الگوهای XRD می توان به ترتیب به وجود فازهایی با سختی بالا از قبیل کنوردیریت [۲۰] و $MgCr_2O_4$ نسبت داد. شکل (۵ و ۶) ریزساختار شیشه - سرامیک ها و نحوه توزیع بلورهای میکا، ابعاد و نسبت طول به ضخامت آن نیز در قابلیت ماشین کاری مؤثر می باشد.

جدول (۳): پارامترهای اندازه گیری شده در شیشه - سرامیک های مختلف.

پارامترها	GC5	$TiO_2 6$	$Cr_2O_3 6$
$\frac{I_{mica(001)}}{I_{si(111)}}$	۰/۱۲	۰/۱۷	۰/۱۲
d_{50} (μm)	۱۶/۶۵	۲۰/۹۵	۲۶/۵۶
سختی (GPa)	۲/۱۳	۱/۳۹	۱/۶۸
استحکام (MPa)	اندازه گیری نشد	۴۷/۷	۸۳
مشاهده چشمی قابلیت ماشینکاری	متوسط	خوب	متوسط

و با مشاهدات چشمی مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول (۳) نتایج حاصل از اندازه گیری پارامترهای مذکور را در شیشه - سرامیک های مختلف نشان می دهد. با مقایسه نتایج حاصل از اندازه گیری ویژگی های فیزیکی و مشاهدات چشمی قابلیت ماشین کاری شیشه - سرامیک های مختلف مندرج در جدول (۳)، می توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از فاکتورهایی از قبیل سختی، d_{50} و $\frac{I_{mica(001)}}{I_{si(111)}}$ با نتایج حاصل از مشاهدات چشمی تقریباً هم سو می باشند. با توجه به این نتایج کاهش سختی شیشه - سرامیک و بیشتر شدن فاز میکا بهبود قابلیت ماشین کاری را در پی خواهند داشت و کوچک تر شدن اندازه تراشه های حاصل از ماشین کاری حاکی از مناسب بودن قابلیت ماشین کاری است. اندازه تراشه های حاصل از ماشین کاری با صافی سطح قطعه ماشین کاری شده ارتباط دارد. شکل (۴) تصاویر سطح سوراخ کاری شده شیشه - سرامیک $TiO_2 6$ و $Cr_2O_3 6$ را نشان می دهند. همانطور که مشاهده می شود شیشه - سرامیک



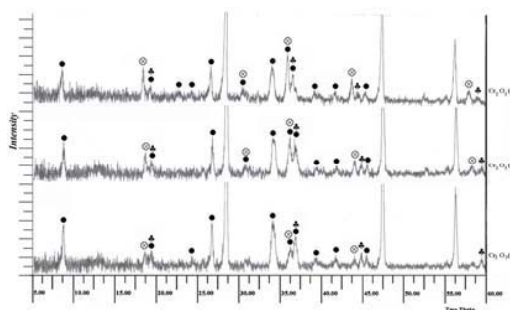
شکل (۸): تصویر SEM از ریزساختار شیشه - سرامیک $TiO_2/6$ عملیات حرارتی شده در دمای $1100^\circ C$.



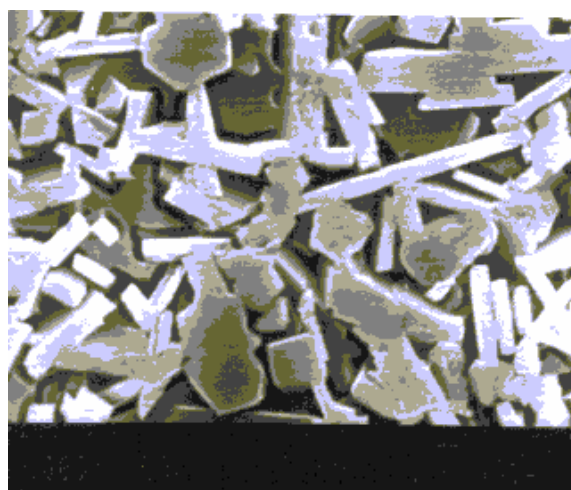
شکل (۹): تصویر SEM از ریزساختار شیشه - سرامیک $Cr_2O_3/6$ عملیات حرارتی شده در دمای $1100^\circ C$.

به نظر می‌رسد که با استفاده از روش زیتترینگ استحکام قطعه (به دلیل کوچک شدن ابعاد بلورهای میکا) و میزان فاز بلوری میکا (به دلیل زیاد شدن سطح) به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و قابلیت تولید شیشه - سرامیک با این روش به خاطر افزایش سرعت گرمایش و دیگر مسائلی که در مقدمه به آنها اشاره شد، افزایش می‌یابد.

شکل (۱۰) برخی از قطعات ماشین‌کاری شده ترکیبات $TiO_2/6$ و $Cr_2O_3/6$ را نشان می‌دهند.



شکل (۶): الگوهای پراش پرتو ایکس سه شیشه - سرامیک $Cr_2O_3/2$ ، $Cr_2O_3/6$ و $Cr_2O_3/6$ پس از عملیات حرارتی در دمای $1100^\circ C$.
 میکا، \clubsuit اسپینل $MgAl_2O_4$ ، \otimes اسپینل $MgCr_2O_4$.



شکل (۷): تصویر SEM از ریزساختار شیشه - سرامیک GC5 عملیات حرارتی شده در دمای $1100^\circ C$.

اشکال (۷) الی (۹) تصاویر SEM شیشه - سرامیک‌های مختلف را نشان می‌دهند. این تصاویر نشان می‌دهند که شیشه - سرامیک‌های مذکور دارای ساختاری با بلورهای ورقه‌ای شکل و درهم قفل شده میکا با طول (قطر) حدوداً ۵ - ۴ میکرون می‌باشند. در جدول (۴) برخی از خواص شیشه - سرامیک‌های به دست آمده در کار حاضر با نتایج حاصل از مرجع شماره (۸) گویای بهبود ویژگی‌های تکنولوژیکی و ماشین‌کاری شیشه - سرامیک‌هایی که از روش زیتتر کردن تهیه شده‌اند،

جدول (۴): مقایسه خواص شیشه - سرامیک حاصل از پژوهش اخیر با مرجع شماره (۸).



شکل (۱۰): برخی از قطعات ماشین کاری شده ترکیبات TiO_2 و Cr_2O_3 .

خطیبزاده (۸)	پژوهش اخیر	
بالک	زینتر	روش ساخت
~۱۰۰	۴-۵	اندازه بلورها میکا (μm)
ورقه‌ای	ورقه‌ای و یا کروی	شکل بلورهای میکا
۴۱/۹۵	۷۰-۸۳	استحکام خمشی (MPa)
۲/۵۱	۰/۸۵-۲/۱۳	سختی (GPa)

۵- مراجع

- [1] Beall, G.H., "Design of Glass - Ceramics", Reviews of Solid State Science, World Scientific Publishing Company, 3 113-133, 1989.
- [2] Chyung, C.K., Beall, G.H. and Grossman, D.G., "Microstructure & Mechanical properties of Mica Glass - Ceramics", In Tenth International Congress on Glass, Part II, Edited by Kunugi, M., Tshiro, M., and Sagm N., The Ceramics Society of Japan, Koyoto Japan, PP. 1167 -1197, 1994.
- [3] Grossman, D.G., "Machinng a Machinable Glass - Ceramics", Vacuum, 28 55-61, 1977.
- [4] .Baik, D.S., No., K.S. and chun, J.S., "A Comparative Evaluation Method of Machinability for Mica - Based Glass - Ceramics", J. Mat. Sci., 30 1801-6, 1995.
- [5] Grossman, D.G., "Machinable Glass - Ceramics Based on Tetrasilic Mica", J.Am. Cer.Soc., 55 446-449, 1972.
- [6] Baik, D.S., No, K.S., Chun, J.S., "Effect of the Aspect Ratio of Mica Crystals and Crystallinity on the Microhardness and Machinability of Mica Glass - Ceramics", Journal of Materials Processing Technology 67 50-54, 1997.
- [7] . Davis, J.B., Marshall, D.B., "Machinable Ceramics Containing Rare Earth Phosphates", J.Am. Cer.Soc., 81 2169-2175, 1998.

[۸] صدیقه خطیبزاده، بیژن افتخاری یکتا، ماندانا شیخانی و سید بهزاد طباطبائی، مطالعه و ساخت شیشه - سرامیک ماشین کاری شونده، پروژه ملی پژوهشگاه مواد و انرژی، ۱۳۷۷.

- [9] Wood, D., "Novel Machinable Mica- Based Glass- Ceramics", European Research at the University of Leeds.

۴- نتیجه گیری

۱- شیشه - سرامیک‌های حاوی جوانه‌زای TiO_2 از قابلیت زینترپذیری و ماشین کاری بهتری نسبت به شیشه - سرامیک‌های حاوی ZrO_2 و Cr_2O_3 برخوردار بودند. نتایج حاصله نشان داد که Cr_2O_3 از این نظر بر ZrO_2 برتری دارد.

۲- بررسی‌ها نشان داد که درصد حجمی فاز میکا به تنهایی پارامتر مناسبی برای تعیین قابلیت ماشین کاری شیشه - سرامیک‌های میکا نمی‌باشد و عوامل دیگری از قبیل سختی و اندازه تراشه‌های حاصل از ماشین کاری نیز در این امر دخالت دارند.

۳- روش زینتر موجب افزایش تبلور از طریق افزایش سطح پودر، کاهش اندازه ذرات میکای متبلور شده و در نتیجه بهبود استحکام مکانیکی قطعه می‌گردد.

- [10] Beall, et al., "Sodium Flurmica Glass- Ceramics", United State Patent November 25, 4624933, 1986.
- [11] Mo Sung Y., "The Effect of Additives on the Crystallization and Sinterring of $2\text{MgO}-2\text{Al}_2\text{O}_3-5\text{SiO}_2$ Glass- Ceramics", J.Mat. Sci., 31 5421-5427, 1996.
- [12] Knickerbocker, S.H., Kumar, A.H., "Cordierite Glass- Ceramics for Multilayer Ceramics Packaging", Am.Cer.Soc.Bull, 72, 90-95, 1993.
- [13] Panda, P.C., Mobley, W.H., "Effect of the Heating Rate on the Relative Rates of Sinterring and Crystalliaztion in Glass", J.Am.Cer.Soc, 72 2361-2364, 1989.
- [14] .. Panda, P.C., Raj, R., "Sintering and Crystallization of Glass at constant Heating Rates", J.Am.Cer.Ser., 721564- 66,1989.
- [15] . Shyu, Jiin- Jyh and Lee, Hsin- Hui, "Sintering, Crystallization and Properties of $\text{B}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ doped $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$ Glass- Ceramics", J.Am.Cer.Soc., 78 2161- 2167, 1995.
- [16] . Shyu, Jiin- Jyh and Chiang, Ming- Tsung, "Sintering and Phase Transformation in $\text{B}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ doped $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$ Glass- Ceramics", J.Am.Cer.Soc., 83 635- 639, 2000.
- [17] Lambrinou, K., Biest, O.V., "Densification and Crystallization Behaviour of Barium Magnesium Aluminosilicate Glass Powder Compacts", J.Eur.Cer.Soc, 16 1237- 1244, 1996.
- [18] Oliveria, A.P., Manfredini, T., "Sintering and Crystallization of a Glass Powder in the $\text{Li}_2\text{O}-\text{ZrO}_2-\text{SiO}_2$ System", J.Am.Cer.Soc., 81 777-780, 1998.
- [19] Mo Sung, Y., AHN, J.W., "Sintering and Crystallization of Off Stoichiometric $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ Glasses", J.Mat.Sci., 35 4913-4918, 2000.
- [20] Unuma, H., Miura, K., "Improvement of Mechanical Properties of Machinable Glass- Ceramics through Postmachining Heat Treatments", J.Am.Cer.Soc., 8 2300- 2301, 1992.