

ارزیابی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت سطحی AZ31/TiC ایجاد شده توسط فرایند همزن اصطکاکی

احسان صلیبی و سید فرشید کاشانی بزرگ*

دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران

تاریخ ثبت اولیه: ۹۲/۱۰/۲۳، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۹۲/۱۱/۲۷، تاریخ پذیرش قطعی: ۹۲/۱۱/۲۹

چکیده فرایند همزن اصطکاکی برای ایجاد نانو کامپوزیت سطحی AZ31/TiC بکار گرفته شد و ریز ساختار و خواص مکانیکی لایه های ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفت. دو دسته لایه سطحی و بدون قراردی ذرات در مقیاس نانو TiC در شکافی در مقابل ابزار چرخنده و پیشرونده بر زیر لایه AZ31 در اثر فرایند همزن اصطکاکی و انجام سه پاس بعدی حاصل شدند. لایه کامپوزیتی ایجاد شده بعد از یک پاس، ریزساختاری شامل توزیع غیر یکنواخت مجتمع های TiC را نشان داد. انجام سه پاس بعدی باعث جدا شدن ذرات و توزیع تقریباً یکنواختی از ذرات TiC در مقیاس نانو در زمینه ای با میانگین اندازه دانه های حدود سه میکرون گردید. لایه نانو کامپوزیتی AZ31/TiC سختی بالای ۹۱ ویکرز و استحکام تسلیم ۲۹۰ MPa را نشان داد که به ترتیب حدود ۱.۵ برابر سختی و ۱.۳ برابر استحکام تسلیم زیر لایه AZ31 است؛ این موارد به حضور ذرات سخت نانو TiC و ریز شدن دانه های زمینه مرتبط می گردد. اگر چه لایه ایجاد شده بدون ذرات TiC کاهش میانگین اندازه دانه ها تا حدود ۵.۵ میکرومتر را نشان داد لیکن این مورد با کاهش توام سختی و استحکام تسلیم نسبت به زیر لایه همراه بود که این موارد به حل شدن ذرات فاز دوم بین فلزی زیر لایه تحت رژیم حرارتی-مکانیکی اعمال شده در فرایند همزن اصطکاکی نسبت داده می شود. این لایه بیشترین میزان کرنش را نشان داد که حاکی از نرمی آن به واسطه ریز شدن دانه ها نسبت به زیر لایه AZ31 دارد.

کلمات کلیدی: فرایند همزن اصطکاکی، نانو کامپوزیت، AZ31/TiC، ریزساختار، سختی، استحکام.

Mechanical Assessment of AZ31/TiC nano-composite surface layer fabricated using friction stir processing

E. Solbi and S.F. Kashani-Bozorg*

School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran

Abstract Friction stir processing was carried out on an AZ31 substrate with and without introduction of nano-sized TiC powder. Clusters of TiC were found in the fabricated layer with a non-uniform distribution. Applied additional passes resulted in gradual break-up of TiC clusters; a nano-composite layer with a uniform dispersion of nano-sized TiC reinforcements in a matrix of fine grains (~3µm) was achieved after three further passes. This layer exhibited a micro hardness and yield strength of ~91HV and 290MPa, respectively. These values are found to be ~1.5 and 1.3 times of those of the as-received AZ31 substrate, respectively. Enhancement of mechanical properties is attributed to dispersion of nano-sized hard reinforcements in a matrix of fine grains. The layer produced without introduction of TiC powder showed a microstructure of fine grains (~5.5µm). However, it exhibited a lower micro hardness and yield strength than those of the as-received AZ31; this softening is related to dissolution of an intermetallic compound phase during the thermo-mechanical phenomena associated with friction stir processing.

Keywords: Friction stir processing; Nano-composite; AZ31; TiC; Microstructure; Hardness; Strength.

*عهده دار مکاتبات

نشانی:

تلفن: -، دورنگار: -، پیام نگار: fkashani@ut.ac.ir

۱- مقدمه

شیمیایی، نقطه ذوب بالا می باشد که در مجموع مقاومت به سایش عالی و ضریب اصطکاک کم را برای آن به ارمغان آورده است. این ماده به واسطه سختی بالا (درحالت فله در حدود 30GPa) [۱۵] در سایش سطحی مواد کاربرد دارد. تاثیر توزیع نانو ذرات سرامیکی بر ریزساختار و ارتقای خواص مکانیکی با مطالعات میکروسکوپی نوری و الکترونی روبشی با حد تفکیک بالا و آزمایش های میکروسختی و کشش بررسی شده است.

۲- نحوه آزمایش

آلیاژ AZ31 کارشده به عنوان زیرلایه انتخاب شده است. ابتدا قطعاتی به طول و عرض به ترتیب ۱۰ و ۵ سانتی متر و ضخامت ۱ سانتی متر برش زده شد و نیز شیاری به عمق و عرض به ترتیب ۲/۵ و ۱/۳mm در وسط راستای طولی سطح با ماشینکاری ایجاد گردید. ابزاری از جنس فولاد ابزار H-13 با اندازه شانه ۱۸mm و پین به شکل مخروط ناقص شیاردار به ارتفاع ۳mm و قطرهای بزرگ و کوچک به ترتیب ۵ و ۴ میلیمتر ساخته (شکل ۱) و مورد عملیات حرارتی سختکاری قرار گرفت. نانو ذرات TiC با میانگین اندازه حدود ۳۵ nm جهت انجام فرایند کامپوزیت سازی سطحی استفاده شد (شکل ۲).

فرایند همزن اصطکاکی با به کارگیری یک فرز عمودی تحت سرعت چرخشی و پیشروی ابزار به ترتیب ۱۰۰۰rpm و ۵۰mm/min در امتداد طول و در وسط قطعات انجام گردید. انتخاب این متغیرها بعد از آزمونهای متعدد صورت گرفت که در این مقاله از ذکر آن خودداری می گردد. لیکن با به کارگیری این متغیرهای منتخب، لایه های بدون نقائص مطرح در فرایند همزن اصطکاکی (عیب تونلی و ..) بر آلیاژ AZ31 حاصل گردید. که به ابزار میزان سه درجه زاویه رو به جلو نسبت به راستای عمود بر افق داده شد. سه قطعه کار تحت فرایند همزن اصطکاکی قرار گرفت. دو قطعه کار از ذرات TiC در مقیاس نانو پر گردید و جهت حصول لایه با توزیع یکنواخت ذرات، بعد از انجام فرایند به ترتیب یکی تحت دو پاس و دومی تحت چهار پاس اضافی قرار گرفتند. جهت چرخش حرکت ابزار بعد از هر پاس عوض می شد. این

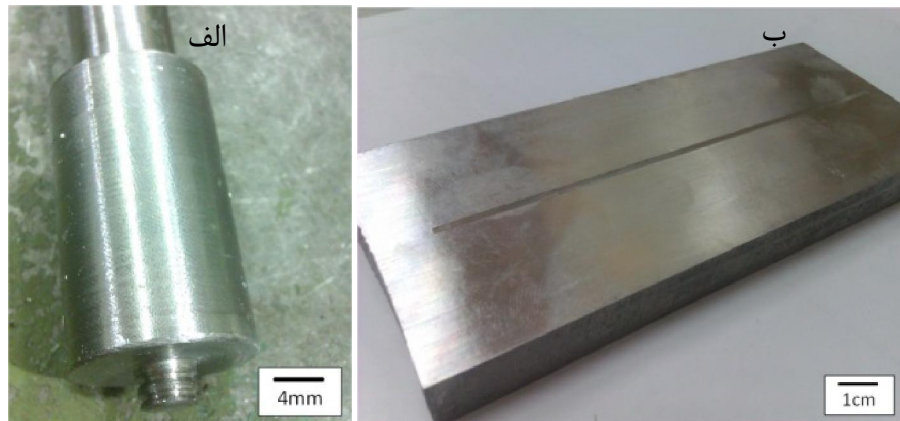
آلیاژهای منیزیم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا جایگزین مناسبی برای آلیاژهای سنگین تر (مانند فولاد، چدن و حتی آلومینیم) در بسیاری کاربردها تشخیص داده شده است [۱]. نیاز به مواد سبک با کارایی بالا برای کاربردهای مهم باعث تلاش برای گسترش کامپوزیت های زمینه فلزی شده است. در این راستا منیزیم به عنوان زمینه کامپوزیت فلزی مورد توجه قرار گرفته [۲] و از ذرات سخت سرامیکی در مقاوم سازی آن به سایش و حفظ استحکام در دمای بالا استفاده شده است [۳-۴]. از دیگر محدودیت های مواد فلزی منیزیمی تغییر شکل محدود آنها می باشد. ریزدانه نمودن، موضوع بررسی دیگری است که در راستای افزایش قابلیت شکل دهی مطرح شده است.

فرایند همزن اصطکاکی که بر اساس جوشکاری همزن اصطکاکی است [۵] حدوداً یک دهه پیش ارائه گردید. این فرایند یک روش حالت جامد برای اصلاح ریزساختار می باشد [۶]. تا کنون از این فرایند با اهدافی چون کاهش اندازه دانه آلیاژهای ریختگی و کارشده [۷-۸]، بهبود خواص سوپرپلاستیسیته [۹] تشکیل ترکیبات بین فلزی درجا [۱۰] و ایجاد کامپوزیت های سطحی و حجمی [۱۱] استفاده شده است. Mishra و همکارانش [۱۲] ذرات سرامیکی SiC را توسط فرایند همزن اصطکاکی وارد زمینه آلومینیم نموده و کامپوزیت سطحی Al/SiC را ایجاد کردند، که موجب افزایش سختی آلیاژ زمینه شد. عزیزیه و همکارانش [۱۳] با توزیع نانو ذرات آلومینا توسط فرایند همزن اصطکاکی در زمینه AZ31، نانو کامپوزیت زمینه منیزیمی AZ31/Al₂O₃ را ایجاد کردند و خواص سطحی چون سختی و مقاومت به سایش را به دلیل توزیع مناسب نانو ذرات و کاهش اندازه دانه، ارتقا دادند. ظهور و همکارانش [۱۴] نیز با ایجاد کامپوزیت سطحی Al-Mg/Cu توسط فرایند همزن اصطکاکی، به بررسی خواص کششی آن پرداختند که افزایش تنش تسلیم در نمونه کامپوزیت شده را نتیجه گرفتند.

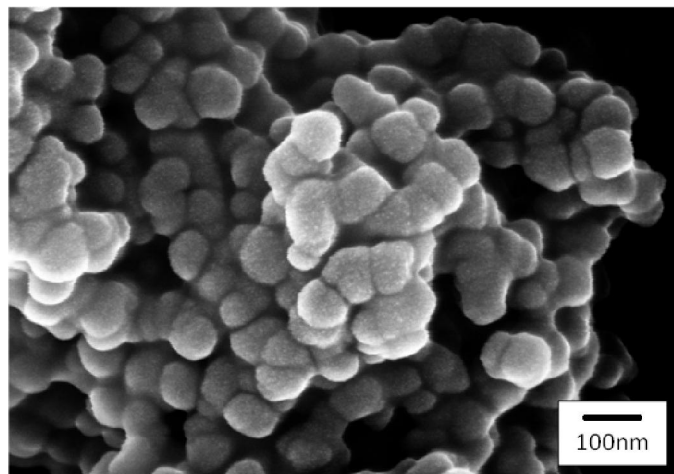
در این پژوهش از فرایند همزن اصطکاکی برای ایجاد نانو کامپوزیت سطحی AZ31/TiC استفاده شده است. کاربرد تیتانیم یک ماده سرامیکی با سختی، استحکام، سفتی، پایداری

حضور نانو ذرات تحت ۴ پاس فرایند همزن اصطکاکی قرار گرفت.

تغییر جهت نیز به توزیع یکنواخت ذرات و ایجاد ناحیه همگن و تقریباً متقارن کمک می کند. همچنین جهت مشاهده تاثیر پودر بر ریز ساختار و خواص مکانیکی، قطعه سوم بدون



شکل ۱. ابزار استفاده شده (الف) و نمونه یک قطعه کار با شیار ایجاد شده در وسط سطح (ب).



شکل ۲. نانو ذرات TiC، کنتراست الکترون های ثانویه داخل عدسی میکروسکپ الکترونی روبشی با حد تفکیک بالا.

شد. سطح شکست نیز توسط میکروسکپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

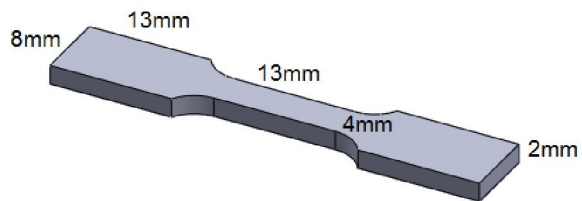
۳-۱ ریزساختار

در شکل (۴) تصویر ریز ساختار آلیاژ زیر لایه، لایه سطحی ایجاد شده بدون افزودن پودر (لایه بدون پودر) و لایه سطحی ایجاد شده در حضور نانو ذرات TiC نشان داده شده است. مشاهده می شود که توسط فرایند همزن اصطکاکی میانگین اندازه دانه های زمینه ناحیه فرایند شده در ضخامت لایه از حدود ۴۰ میکرومتر به حدود ۵/۵ میکرومتر در لایه

مقاطع عرضی لایه های سطحی ایجاد شده پس از مسطح و براق نمودن با میکروسکپ الکترونی روبشی با حد تفکیک بالا (Field emission scanning electron microscope, FE-SEM) مورد بررسی واقع شد. سپس همین نمونه ها بعد از حکاکی با محلول شامل ۷۰ میلی لیتر اتانول، ۱۰ میلی لیتر استیک اسید، ۱۰ میلی لیتر آب مقطر و ۰/۴ گرم اسید پیکریک بعد از مدت ۱۵ ثانیه، توسط میکروسکپ نوری مطالعه شدند. آزمون کشش لایه های ایجاد شده بعد از چهار پاس فرایند (بدون پودر و با حضور نانو ذرات TiC) و زیر لایه آلیاژ AZ31 مطابق استاندارد ASTM E8M (شکل ۳) توسط دستگاه کشش Instron تحت نرخ کرنش 10^{-3} mm/s انجام

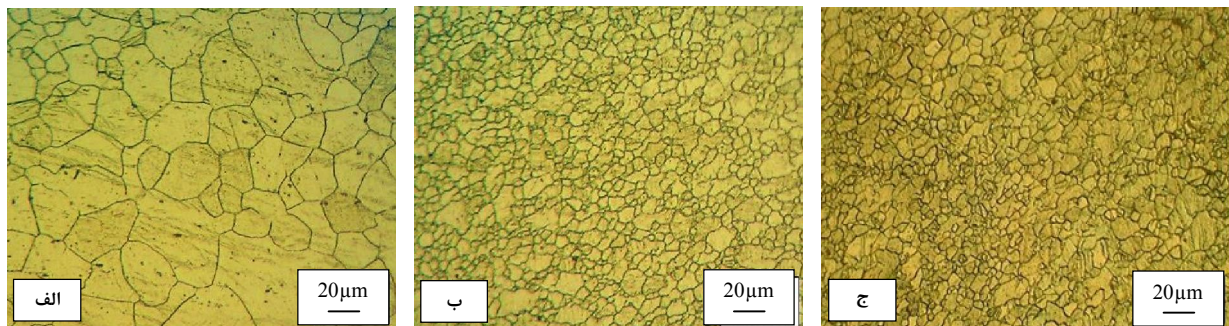
الکترونی با حد تفکیک بالا لایه سطحی ایجاد شده در حضور نانو ذرات TiC را بعد از ۲ و ۴ پاس فرایند همزن اصطکاکی نشان می دهد. همچنانکه مشاهده می شود بعد از ۲ پاس ذراتی با اندازه ای بزرگتر از اندازه ی اولیه دیده می شود. همچنین توزیع این ذرات یکنواخت نیست. به طور کلی نانوذرات دارای انرژی سطحی نسبتاً بالائی هستند [۱۷]. این انرژی زیاد تمایل به مجتمع و خوشه ای شدن آنها را باعث می شود. از آنجا که فرایند همزن اصطکاکی همراه با حرارت ایجاد شده در اثر اصطکاک و همزدن ابزار می باشد، انرژی سطحی را افزون نموده، ذرات به تجمع ترغیب می شوند. توزیع نسبتاً یکنواخت از ذرات در زمینه پس از ۴ پاس فرایند مشاهده می شود. فرایند همزن اصطکاکی همراه با جریان های پیچیده زمینه پلاستیک شده می باشد [۱۸]. این جریان ها علاوه بر جهت دورانی حرکت ابزار در راستاهای دیگر همچون از پائین به بالای لایه نیز وجود دارند [۱۹]. این جریان ها که همراه با اعمال کرنش هستند می توانند موجب جدا شدن نانوذرات TiC از خوشه ها شوند [۱۳]. با استفاده از پاس های بیشتر این میزان جدایش ها افزایش یافته به قسمی که پس از ۴ پاس در مقیاس نانومتری در زمینه به صورت نسبتاً یکنواخت توزیع شده اند.

بدون پودر و حدود ۳ میکرومتر در لایه سطحی ایجاد شده در حضور نانو ذرات TiC کاهش یافته است. در واقع به علت تغییر شکل شدید و افزایش دما، دانه های جدید توسط پدیده تبلور مجدد پویا [۱۲] جوانه زنی و رشد نموده اند؛ دانه های ایجاد شده ریز و هم محور می باشند. ریزتر شدن دانه ها در لایه سطحی ایجاد شده در حضور نانو ذرات TiC اثر قفل کنندگی در مرز دانه های ارائه شده توسط زنر (Zener) را تداعی می نماید [۱۶]. لذا با توجه به قرارگیری ذرات در مرز دانه ها و قفل نمودن این مناطق، مانع از رشد دانه ها شده و لایه سطحی ایجاد شده در حضور نانو ذرات TiC میانگین اندازه دانه های کوچکتری را دارا می گردد.



شکل ۳. طرح واره ای از نمونه آزمون کشش.

شکل (۵ الف و ب) به ترتیب تصاویر میکروسکپ



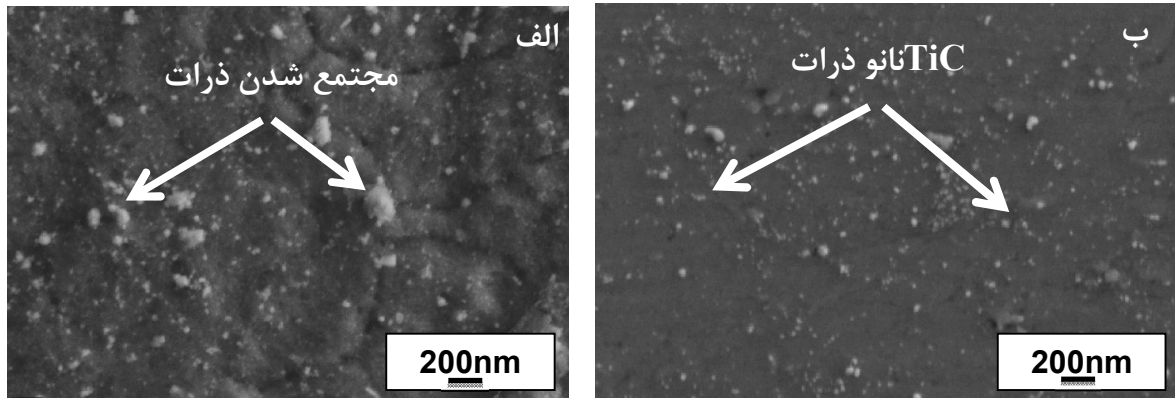
شکل ۴. تصاویر میکروسکپ نوری از ریزساختار زمینه آلیاژ زیر لایه (الف)، لایه ایجاد شده بدون ذرات بعد از ۴ پاس (ب) و لایه ایجاد شده در حضور ذرات TiC بعد از ۴ پاس (ج)

فرایند همزن اصطکاکی، سختی تا حدود ۵۴ ویکرز کاهش می یابد. این در حالی است که میانگین سختی لایه سطحی نانو کامپوزیت AZ31/TiC حدود ۸۷ ویکرز است. بررسی دقیق ریزساختار زیر لایه AZ31 حاکی از حضور فاز دوم دارد (شکل ۷-الف). تجزیه شیمیائی از طریق سنجش انرژی پرتو

۳-۲- سختی

شکل (۶)، مقادیر میانگین سختی نمونه های نانو کامپوزیت سطحی AZ31/TiC، لایه سطحی همزن اصطکاکی شده (بدون ذرات TiC) و زیر لایه AZ31 را نشان می دهد. میانگین سختی زیر لایه ۶۱ ویکرز می باشد. بعد از

ایکس (EDS) این ذرات حاکی از یک فاز بین فلزی با ترکیب نزدیک به استوکیومتری Al_8Mn_5 دارد (شکل ۷ ب، ج و د).



شکل ۵. زمینه لایه سطحی نانو کامپوزیت AZ31/TiC ایجاد شده بعد از ۲ پاس (الف) یا ۴ پاس (ب)، کنتراست الکترون های ثانویه داخل عدسی میکروسکپ الکترونی روبشی با حدتفکیک بالا.

به دور استوانه ابزار و به موازات یال آن قرار می گیرند [۲۰]. از آنجا که میزان سختی لایه از روی آن اندازه گیری شده است، اثر بافت نیز می تواند در کاهش سختی لایه سطحی همزن اصطکاکی شده نقش داشته باشد.

در خصوص لایه نانو کامپوزیت AZ31/TiC با توجه به حضور دو فاز زمینه و ذرات TiC می توان قانون اختلاط (role of mixture) را برای تخمین سختی کامپوزیت (\bar{H}) محک زد:

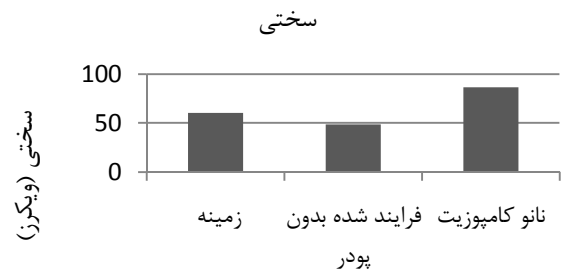
$$[\bar{H} = \frac{H_h H_s}{f_h H_s + f_s H_h} \approx \frac{H_s \rho_1}{f_s} \quad (1) \text{ معادله}]$$

در این رابطه H_h سختی فاز سخت (ذرات TiC)، H_s سختی فاز نرم زمینه، f_s درصد حجمی فاز نرم و f_h درصد حجمی فاز تقویت کننده است. این رابطه سختی موثر کامپوزیت تقویت شده با ذرات TiC را نشان می دهد. البته باید در نظر داشت که میزان سختی فاز دوم با سختی زمینه فاصله زیادی دارد و همچنین میزان فاز زمینه غالب بوده و میزان فاز دوم محدود است. لذا می توان نوشت:

با استفاده از تحلیل تصاویر مشخص شد که میزان درصد حجمی ذرات TiC در لایه نانو کامپوزیتی حدود چهار و شش دهم درصد است. بنابراین:

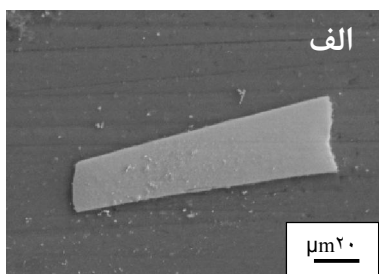
و میزان سختی کامپوزیت برابر می گردد با:

مطالعه ریز ساختار لایه سطحی همزن اصطکاکی شده (بدون افزودن ذرات TiC) چنین فاز دومی را نشان نمی دهد. چنین استنتاج می شود که در اثر فرایند همزن اصطکاکی که همراه با اعمال یک رژیم حرارتی-مکانیکی به زیر لایه است، این ذرات در زمینه حل شده اند. یافته شدن انعکاس هماهنگ با ترکیب بین فلزی Al_8Mn_5 در الگوی پراش پرتو ایکس زیر لایه نیز استنتاج ذکر شده را تقویت می نماید (شکل ۸).

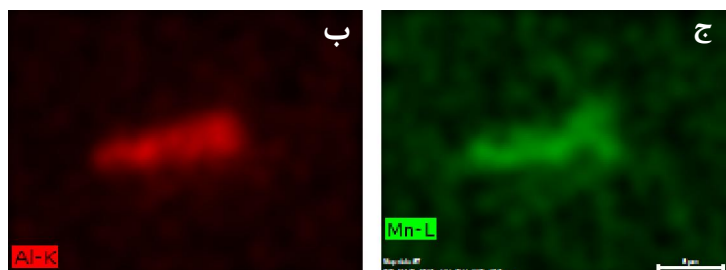
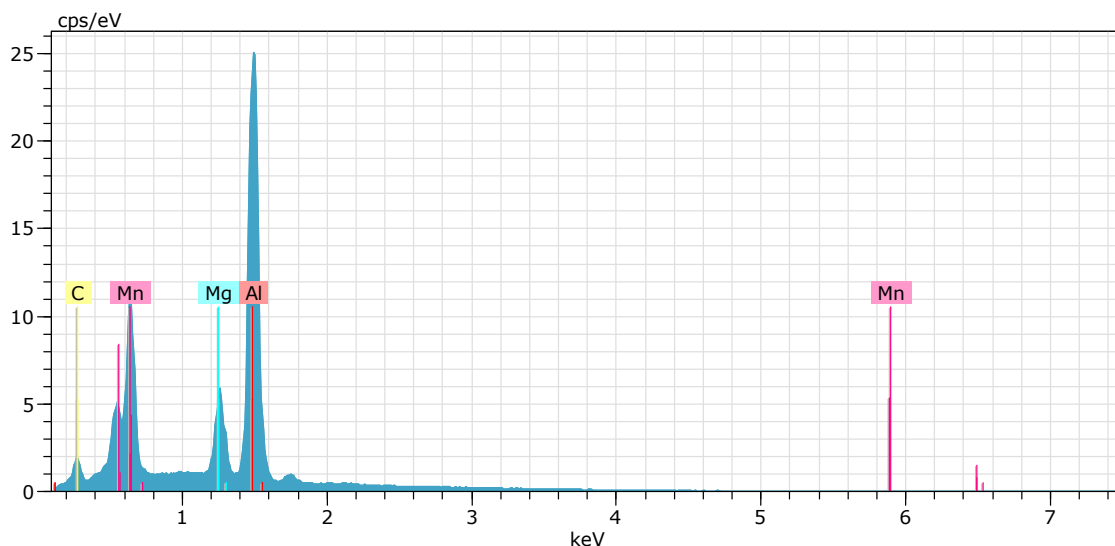


شکل ۶. میانگین سختی نانو کامپوزیت AZ31/TiC، لایه سطحی همزن اصطکاکی شده (بدون ذرات TiC) و زیر لایه AZ31.

از آنجا که ترکیبات بین فلزی به خاطر وجود معدودی پیوند های غیر فلزی معمولا سختی بیشتری از زمینه های فلزی دارند، علت کاهش سختی لایه $f_h H_h \gg H_s$ اصطکاکی شده (بدون پودر) در مقایسه با زیر لایه آن علیرغم ریز شدن دانه ها حین فرایند به حل شدن این فاز بین فلزیدر رژیم ترمومکانیکی اعمال شده، نسبت داده می شود. از طرف دیگر فرایند همزن اصطکاکی بافت ریزساختار را تغییر می دهد. پژوهشهای محققین نشان داده که با توجه به ساختمان هگزاگونال فشرده منیزیم و نحوه چرخش استوانه ابزار، $\bar{H} \approx \frac{H_s}{f_s} = \frac{95.4}{100} = 84.9$ (0001)



Elements	Atomic Number	X-ray line	At. %
Mn	25	L-series	34.4
Al	13	K-series	56.2
Mg	12	K-series	9.4
			100



شکل ۷. رسوب فاز دوم در آلیاژ زیرلیایه AZ31، کنتراست الکترون های برگشتی (الف)، نقشه پرتو ایکس Mn-L α (ب)، نقشه پرتو ایکس Al-K α (ج) و طیف انرژی پرتو ایکس مربوط به پرتو متمرکز شده روی رسوب (د).

مقادیر سختی تخمینی با استناد به قانون اختلاط و نیز بر طبق رابطه هال-پیچ محاسبه شده و در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مقادیر سختی اندازه گیری شده لایه کامپوزیتی و مقادیر تخمینی محاسبه شده با توجه به روابط اختلاط و هال-پیچ

درصد حجمی ذرات	اندازه دانه های زمینه منیزیمی	سختی اندازه گیری شده، HV	سختی بر طبق رابطه هال-پیچ، HV	سختی بر طبق قانون اختلاط، HV
۴/۶	μm^3	۸۷	۸۱	۸۴/۹

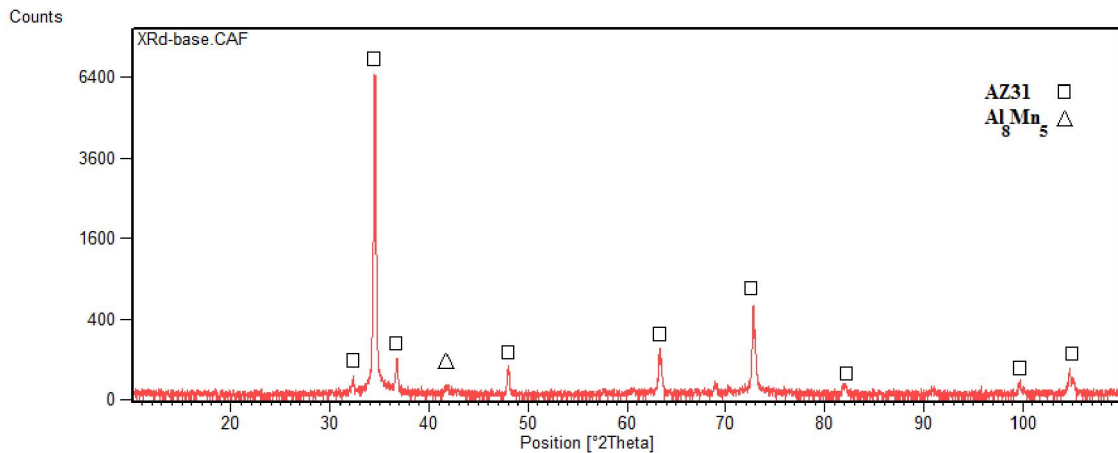
پدیده دیگری که با فرایند هم زن اصطکاکی اتفاق می افتد ریز شدن دانه ها در اثر کرنش و حرارت است که می تواند سهمی را در افزایش سختی داشته باشد. سختی زمینه ناشی از کاهش اندازه دانه از رابطه هال-پیچ بدست می آید [۲۲]:

$$H_v = H_0 + kd^{-1/2} \quad [22] \quad (\text{معادله } ۲)$$

در این رابطه H میزان سختی، k ثابت و d اندازه دانه می باشد. طبق این رابطه با کاهش اندازه دانه، سختی افزایش می یابد. برای آلیاژ AZ31 مقادیر H₀ و k به ترتیب ۴۰ و ۷۲ می باشد [۲۲].

پیچ و افزایش فاز دوم توسط قانون اختلاط در نظر گرفته می شود، لیکن کرنش اعمال شده در فرایند همزن اصطکاکی و نیز افزایش سطح فصل مشترک ذرات با زمینه به خاطر حضور نانوذرات با توزیع نسبتاً یکنواخت مواردی هستند که قادر به افزایش میزان سختی کامپوزیت بوده و در روابط لحاظ نشده‌اند.

طبق جدول (۱) کاهش میانگین اندازه دانه‌ها طبق قانون هال-پیچ، سختی را تا ۸۱ و یکرز افزایش می‌دهد و طبق قانون اختلاط، ذرات این سختی را تا حدود ۸۵ و یکرز افزایش می‌دهند. مشاهده می‌شود که مقدار سختی اندازه گیری شده مقدار کمی بیش از سختی محاسبه شده توسط قانون اختلاط و رابطه هال-پیچ است. لازم به ذکر است که اگر چه میزان ریزی دانه های حاصل از فرایند هم زن اصطکاکی توسط رابطه هال-



شکل ۸. الگوی پراش زیر لایه AZ31 بیانگر حضور ساختمان بلوری بر پایه منیزیم آلیاژی و یک انعکاس مرتبط با فاز بین فازی Al_8Mn_5

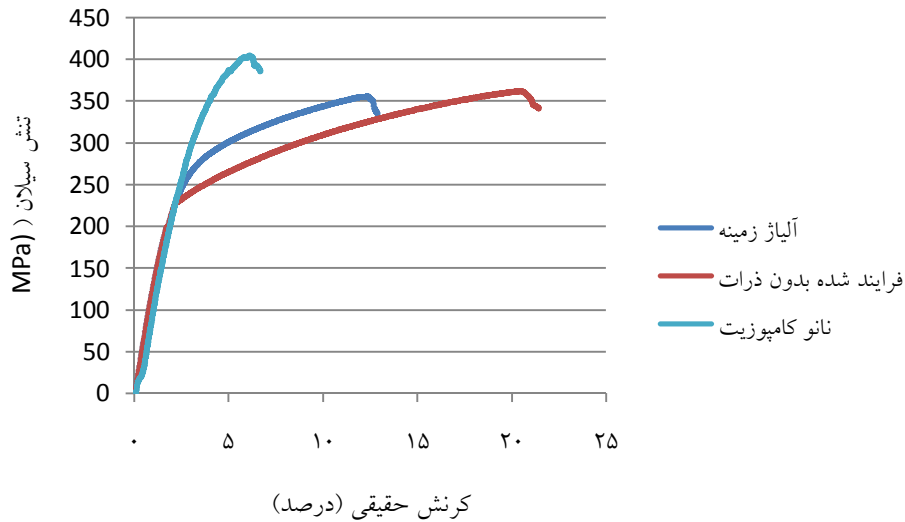
قسمت قبل مطرح گردید. افزون بر آن، کاهش تنش تسلیم را می‌توان به جهت گیری صفحات و اثر بافت پس از انجام فرایند نسبت داد. افزایش میزان کرنش لایه بدون TiC همراه با ریز شدن دانه های زمینه آن است که نرمی و انعطاف پذیری بیشتر را به همراه می‌آورد.

در نمونه نانو کامپوزیت نیز علاوه بر کاهش اندازه دانه، وجود ذرات TiC در زمینه می‌تواند نقش قفل کنندگی مرز دانه ها را ایفا نموده و با توزیع نسبتاً یکنواخت، از طریق مکانیزم استحکام دهی اروان، بهبود دهنده تنش تسلیم و استحکام کششی باشند [۲۳]. البته با توجه به سختی زیاد آنها، با جلوگیری از تغییر شکل پلاستیک، کاهش انعطاف پذیری را نیز باعث شده اند.

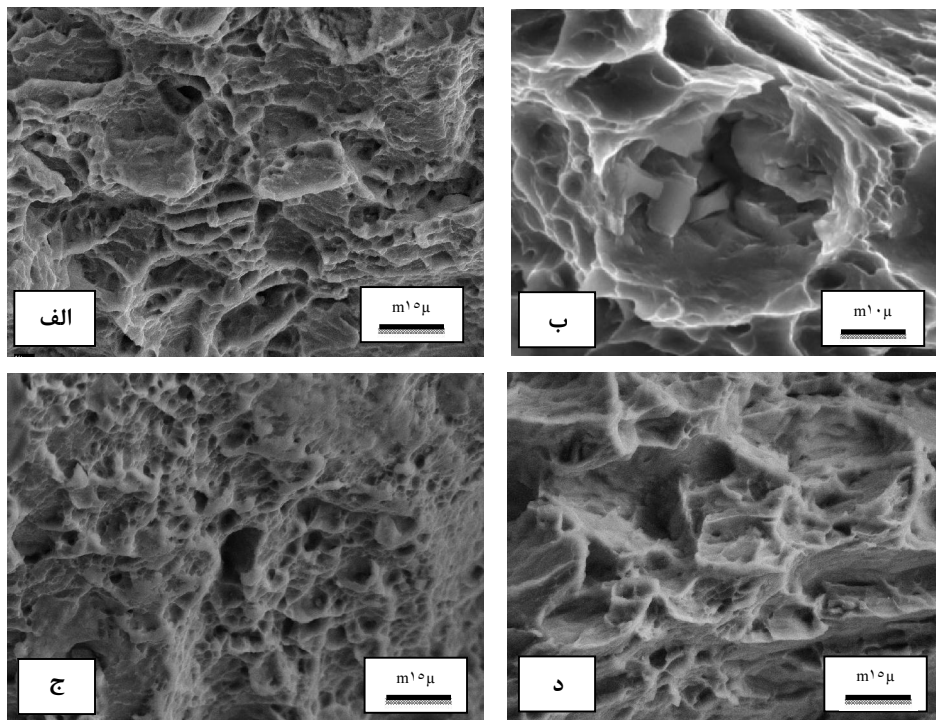
۳- خواص کششی

در شکل (۹) نمودار تنش-کرنش حقیقی آلیاژ زیر لایه AZ31، لایه سطحی همزن اصطکاکی شده (بدون پودر) و لایه نانو کامپوزیت سطحی AZ31/TiC بعد از چهار پاس فرایند را نشان می‌دهد. تنش تسلیم لایه سطحی همزن اصطکاکی شده (بدون پودر) نسبت به آلیاژ زیر لایه کاهش و کرنش آن حدود ۱۰ درصد افزایش پیدا کرده است. همچنین لایه نانو کامپوزیت ایجاد شده دارای بیشترین استحکام تسلیم به میزان حدود ۲۹۰ MPa است. البته این لایه نانو کامپوزیتی در مقایسه دارای کرنش کمتری نسبت به زیر لایه می‌باشد.

خواص کششی به عواملی مانند اندازه دانه، میزان نابجایی، میزان ذرات فاز دوم و اتصال زمینه و فاز دوم وابسته است [۲۳]. یک دلیل کاهش تنش تسلیم لایه سطحی ایجاد شده (بدون پودر)، حل شدن فازهای دوم می‌باشد که در



شکل ۹. نمودار تنش-کرنش نمونه های آزمون کشش آلیاژ زیرلایه AZ31، لایه های سطحی همزن اصطکاکی شده (بدون ذرات TiC) و نانو کامپوزیت AZ31/TiC.



شکل ۱۰. سطح شکست نمونه های کششی آلیاژ زیرلایه AZ31 (الف و ب) لایه سطحی همزن اصطکاکی شده بدون ذرات TiC (ج) و نانو کامپوزیت AZ31/TiC (د).

ریزتر و عمیق تر می شود و لذا مکانیزم شکست آن بر طبق مواد انعطاف پذیر است، ایجاد حفرات و به هم پیوستن حفرات می باشد. در نمونه نانو کامپوزیت ایجاد شده از میزان این حفرات کاسته شده و کم عمق نیز شده اند و بنابراین حالت شکست به سمت ترد متمایل گردیده است.

در شکل (۱۰) هم تصویر سطح شکست نمونه ها نشان داده شده است. شکل (الف و ب)، تصویر سطح شکست آلیاژ زمینه را نشان می دهد. در شکل (ب-۹) ذرات شکسته شده زمینه هنگام آزمون کشش مشخص می باشد. همانطور که مشاهده می شود در نمونه فرایند همزن اصطکاکی شده بدون ذرات TiC که دارای ازدیاد طول بیشتری است، میزان حفرات

- Materials Science and Engineering A. 278 (2000) 267.
5. Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Much, M. G., Optimum Processing and Tool Controls for Three-Dimensional Friction Stir, GB Patent Application, No 9125978.8. (1991).
 6. Shafiei Zarghani, A., Kashani-Bozorg, S. F., Zarei-Hanzaki, A., Ultrafine Grained 6082 Aluminum Alloy Fabricated by Friction Stir Processing, Journal of Materials Physics B. 22 [18&19] (2008) 2874-2878.
 7. Kwon, Y. J., Saito, N., Shigematsu, I., Friction Stir Process as a New Manufacturing Technique of Ultrafine Grained Aluminum Alloy, Materials Science Letter. 21 (2002) 1473-1476.
 8. Ma, Z. Y., Sharma, S. R., Mishra, R. S., Effect of Friction Stir Processing on the Microstructure of Cast A356 Aluminum, Materials Science and Engineering A. 433 (2006) 269-278.
 9. Ma, Z. Y., Mishra, R. S., Mahoney, M. W., Superplastic Deformation Behavior of Friction Stir Processed 7075Al Alloy, Acta Materialia. 50 (2006) 4419-4430.
 10. Hsu, C. J., Kao, P. W., Ho, N. J., Ultrafine-grained Al-Al₂Cu Composite Produced in situ by Friction Stir Processing, Scripta Materialia. 53 (2005) 341-345.
 11. Wang, W., Shi, Q. Y., Liu, P., Li, H. K., Li, T., A Novel Way to Produce Bulk SiCp Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites by Friction Stir Processing, Journal of Materials Processing Technology. 209 (2009) 2099-2103.
 12. Mishra, R. S., Ma, Z. Y., Charit, I., Friction Stir Welding and Processing, Materials Science and Engineering A. 341(2003) 307-310.
 13. Azizieh, M., Kokabi, A. H., Abachi, P., Effect of Rotational Speed and Probe Profile on Microstructure and Hardness of AZ31/Al₂O₃ Nanocomposites Fabricated by Friction Stir Processing, Materials and Design. 32 (2011) 2034-2041.
 14. Zohoor, M., Besharati Givi, M. K., Salami, P., Effect of Processing Parameters on Fabrication of Al-Mg/Cu Composites via Friction Stir Processing, Materials and Design. 39 (2012) 358-365.
 15. Krajewski, A., D'Alessio, L., De Maria, G., Physico-Chemical and Thermo physical Properties of Cubic Binary Carbides, Crystal Research and Technology. 33 (1998) 341-374.
 16. Zener, C. S., Grains, Phases and Inter- faces: An Interpretation of Micro- structure, Transactions of AIME. 175 (1948) 45-48.
 17. Tomas, J., Adhesion of UltraFine Particles-energy Absorption at Contact, Chemical Engineering Science. 62 (2007) 5925-5939.
 18. Hamilton, C., Dymek, S., Blicharski, M., A Model of Material Flow During Friction Stir Welding, Materials Characterization, 2008, 59, 1206-1214.
 19. Heurtier, P., Jones, M. J., Desrayaud, C., Driver, J. H., Montheillet, F., Allehaux, D., Mechanical and Thermal Modelling of Friction Stir Welding,

۴- نتیجه گیری

- ۱- با به کار گیری فرایند همزن اصطکاکی بر زیر لایه آلیاژ کار شده AZ31، میانگین اندازه دانه‌ها از حدود ۴۰ به حدود ۵.۵ میکرومتر کاهش یافت.
- ۲- فرایند همزن اصطکاکی در حضور نانو ذرات TiC باعث تشکیل کامپوزیت AZ31/TiC گردید. لیکن نانوذرات TiC به صورت خوشه ای درآمده و توزیع غیر یکنواختی را در زمینه نشان دادند.
- ۳- با انجام سه پاس بعدی فرایند، توزیع تقریباً یکنواختی از ذرات TiC در مقیاس نانومتری حاصل گردید. این توزیع تقریباً یکنواخت کاهش بیشتر میانگین اندازه دانه ها را تا حدود ۳ میکرومتر باعث شد.
- ۴- نمونه‌ای که تحت ۴ پاس فرایند همزن اصطکاکی قرار گرفت، ازدیاد طول تا حدود دو برابر آلیاژ پایه از خود نشان داد.
- ۵- لایه سطحی نانو کامپوزیت AZ31/TiC، استحکام تسلیمی به میزان ۲۹۰ MPa که حدوداً بیش از ۱.۳ برابر آلیاژ پایه است، ارائه نمود.

سپاسگزاری

به این وسیله از دانشگاه تهران و ستاد فناوری نانو معاونت علمی ریاست جمهوری به لحاظ کمک های مالی جهت انجام این پژوهش تشکر و سپاسگزاری می نماید.

مراجع

1. Mordike, B. L., Ebert, T., Magnesium, Properties Applications Potential, Materials Science and Engineering A. 302 (2001) 37-45.
2. Zhiye, H., Yang Liu, X., Review of Recent Studies in Magnesium Matrix Composites, Materials Science and Engineering A. 39 (2004) 6153-6171.
3. Paskaramoorthy, R., Bugarin, S., Reid, R., Effect of an Interphase Layer on the Dynamic Stress Concentration in a Mg-matrix Surrounding a SiC-particle, Compound Structure. 9 (2009) 451-460.
4. Lianxi, H., Erde, W., Fabrication and Mechanical Properties of SiCw/ZK51A Magnesium Matrix Composite by Two-step Squeeze Casting,

- Journal of Materials Processing Technology. 171 (2006) 348-357.
20. C.I. Chang, C.J. Lee, J.C. Huang, Relationship Between Grain Size and Zener-Holloman Parameter
 21. During Friction Stir Processing in AZ31 Mg Alloys, Scripta Materialia. 51 (2004) 509-514.
 22. Chang, C. I., Wang, Y. N., Pei, H. R., Lee, C. J., Huang, J. C., On the Hardening of Friction Stir Processed Mg-AZ31 Based Composites with 5-20% Nano-ZrO₂ and Nano-SiO₂ Particles, Materials Transaction. 47[12] (2006) 2942-2949.
 23. Lee, C., Huang, J., Hsieh, P., Mg Based Nano-Composites Fabricated by Friction Stir Processing, Scripta Mater. 54 (2006) 1415-1420.
 24. Lloyd, D. J., Particle Reinforced Aluminum and Magnesium Matrix Composites, International Materials Review. 39 (1994) 1-24.