

## اثر هندسه پین بر خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیم 6061-آلومینا ایجاد شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

مجید بلباسی\*، مهرداد رضایی

گروه مهندسی نفت، معدن و مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد واحد تهران مرکزی، تهران، ایران  
(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۳؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۲۹)

### چکیده

امروزه علاوه بر ایجاد اتصال با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، فرآیند کامپوزیت سازی نیز همزمان نیز صورت می گیرد. هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی اثر هندسه پین بر خواص نانوکامپوزیت آلومینیم ۶۰۶۱-آلومینا ایجاد شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. بدین منظور انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با انتخاب پنج نوع هندسه پین بر روی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ که ذرات  $Al_2O_3$  در آن جاگذاری شده انجام گردید و نمونه ها با استفاده از آزمون های کشش، سختی سنجی، میکروسکوپ نوری و الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. پین شش ضلعی منظم به علت داشتن شش صفحه صاف و حرکت ضربه ای در حین چرخش، اغتشاش مناسبی را ایجاد کرده که باعث ایجاد بیشترین استحکام کششی و درصد ازدیاد طول به ترتیب به مقدار ۱۹۸ MPa و ۱۰/۲۵ و کمترین اندازه دانه ۱۳/۳ میکرون شده است. در نمونه جوشکاری شده با پین استوانه ای رزوه دار به علت عدم ضربه در حین چرخش، سیلان نامناسب ذرات تقویت کننده و تجمع آن در محل اغتشاش، کمترین استحکام کششی و درصد ازدیاد طول به ترتیب به مقدار ۱۳۳/۵ MPa و ۱/۹۵ درصد حاصل گردید.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، هندسه پین، آلومینیوم ۶۰۶۱، ذرات  $Al_2O_3$

## The effect of pin geometry on the mechanical property of aluminium 6061-alumina composite produced by friction stir welding

M. Belbasi\*, M. Rezae

Department of petroleum, mining and materials engineering, Islamic Azad University, Central Tehran branch  
(Received 13 May 2019 ; Accepted 21 October 2019)

### Abstract

Today in addition to join by friction stir welding, the composite fabrication process is also performed simultaneously. The main purpose of the present research is to investigate the effect of pin geometry on the property of Aluminium 6061- alumina nanocomposite created by friction stir welding. For this purpose friction stir welding was carried out by selecting five types of pin geometries on Aluminium 6061 in which  $Al_2O_3$  particles were deposited and the samples were examined by tensile and hardness tests, optical and electron microscope. Samples were investigated by tensile and hardness test, optical and electronic microscopy. Regular hexagonal pins due to having six smooth face and impulsive movement during rotation, caused a good perturbation which resulted in maximum tensile strength and elongation percentage of 198 MPa and 10.25 and minimum grain size of 13.3 micron, respectively. In the sample welded by a

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: dr.belbasi@gmail.com

threaded cylindrical pin due to non-impact during rotation, inappropriate flow of reinforcing particles and its accumulation at perturbation the lowest tensile strength and elongation percentage of 133.5 MPa and 1.95%, respectively, were observed.

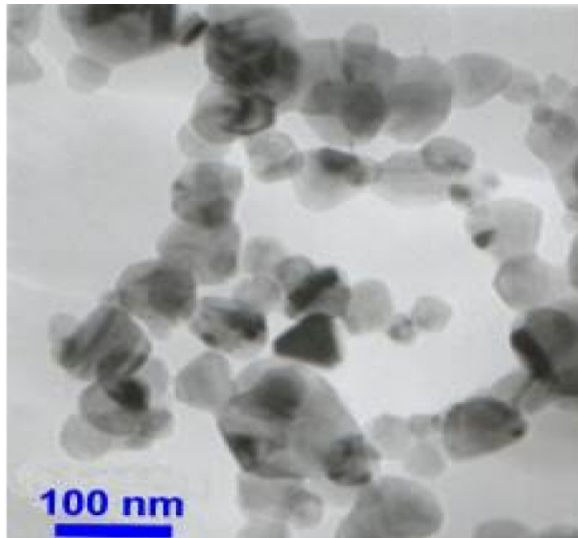
**Keywords:** Friction stir welding, Pin geometry, Aluminum 6061,  $Al_2O_3$  particles.

## 1- مقدمه

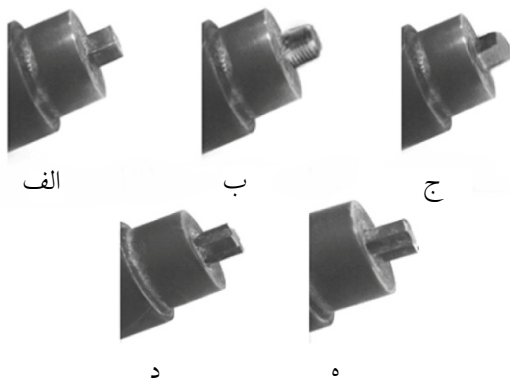
زیادتی در خصوص جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژها و فلزات مختلف از جمله آلومینیوم، منیزیم و مس صورت گرفته است [۴-۲]. همچنین از این روش جهت اتصال فلزات غیرمشابه نظیر آلومینیوم، مس و منیزیم استفاده شده است [۵ و ۶]. برای بهبود خواص مکانیکی ناحیه جوش از ذرات تقویت کننده سرامیکی سخت نظیر اکسید آلومینیوم، کاربید سیلیسیم استفاده می شود تا در منطقه جوش کامپوزیت با خواص دلخواه حاصل گردد و بدین ترتیب با داشتن زمینه نرم خواص مکانیکی در منطقه جوش بهبود یابد [۷]. نوع ذرات تقویت کننده، سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی، تعداد پاس و شکل هندسی ابزار از جمله عوامل موثر بر خواص کامپوزیت حاصل از فرآیند FSW می باشد [۸]. تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم، اصلاح ساختار، اتصال مشابه این آلیاژ و تولید کامپوزیت با این روش انجام شده است [۱۰-۷]. مارزولی و همکاران [۱۱] جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۶۰۶۱ با استفاده از ذرات  $Al_2O_3$  را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که اثر اغتشاش ایجاد شده توسط ابزار، اثر مهمی بر شکل و توزیع ذرات تقویت کننده دارد. شریفی تبار و همکاران [۱۲] اثر تعداد پاس فرآیند اصطکاکی اغتشاشی را بر خواص مکانیکی و اندازه دانه کامپوزیت آلومینیوم ۵۰۵۲ با ذرات  $Al_2O_3$  را بررسی نمودند و نشان دادند که با افزایش تعداد پاس استحکام افزایش می یابد بطوریکه با اعمال ۴ پاس استحکام کششی تا ۱۱۸ درصد افزایش می یابد. فرهمند و همکاران [۱۳] اثر سرعت پیشروی را بر خواص مکانیکی و ریزساختار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۶۰۶۱ با استفاده از ذرات  $Al_2O_3$  مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که نمونه جوشکاری شده با سرعت ۴۵ میلیمتر بر دقیقه بیشترین استحکام کششی را ایجاد نموده است.

یکی از ویژگیهای کامپوزیت های زمینه فلزی، خواص مکانیکی مناسب آنهاست. به منظور اتصال فلزات و یا آلیاژها با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و در حضور پودرهای تقویت کننده سرامیکی، کامپوزیت زمینه فلزی ایجاد می گردد که باعث بهبود خواص مکانیکی در محل اتصال می گردد. تقویت کننده های سرامیکی، ویژگی های استحکام و مدول الاستیسیته بالا را با کارایی مناسب در دمای بالا را ایجاد می نمایند. از دیگر خصوصیات مهم این مواد که ممکن است اهمیت بسیار زیادی داشته باشد، مقاومت به سایش است. برای ساخت تجهیزات پیچیده و بزرگ تر می بایست کامپوزیت ها به یکدیگر متصل شود. به منظور اتصال کامپوزیت های زمینه فلزی روش های متعددی نظیر جوشکاری های ذوبی، لحیم کاری سخت و اتصال نفوذی به کار گرفته شده اند که هر یک تا حدی موجب افت خواص مکانیکی می شوند. به عنوان مثال در جوشکاری ذوبی، عیوبی مانند تخلخل، ترک های ناشی از انجماد مجدد، جدایش ذرات تقویت کننده در حین انجماد و واکنش های شیمیایی نامطلوب بین ذرات تقویت کننده و زمینه ای که تقریباً مذاب است، رخ می دهد. همچنین در روش اتصال نفوذی یا لحیم کاری سخت، ناحیه ای تحت عنوان ناحیه انتقالی تشکیل می شود که سبب می شود خواص ناحیه انتقالی با آلیاژ یا ماده پایه متفاوت باشد. به منظور رفع این مشکل از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) استفاده شده است و از آنجایی که در این فرآیند عمل اتصال در حالت جامد ایجاد می شود، هیچ گونه ذوبی ایجاد نگشته و مشکلات و عیوب فرآیندهای اتصال ذوبی به طور خودبه خود حذف می شوند به همین علت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عنوان روش مناسبی جهت ایجاد اتصال شناخته می شود [۱]. تاکنون مطالعات

سی افزایش یافت. شکل (۲) تصاویر هندسه پین‌های مختلف استفاده شده را نمایش می‌دهد. همچنین در جدول (۲) مشخصات پین‌های مورد استفاده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آورده شده است.



شکل ۱- تصویر میکروسکوپی الکترونی عبوری از نانو ذرات اکسید آلومینیوم مورد استفاده.



شکل ۲- هندسه پین‌ها: الف) مربعی، ب) استوانه رزوه‌دار ج) شش ضلعی منتظم د) مربعی شیاردار وه) استوانه‌ای شیاردار

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- بررسی های ریزساختاری

مقایسه ریزساختار فلز پایه با نمونه‌های جوشکاری شده توسط هر پنج پین، نشان می‌دهد که در اثر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اندازه نمونه‌ها کاهش یافته است. پدیده‌ای که باعث تشکیل دانه‌های ریزتر می‌گردد، تبلور مجدد دینامیکی می‌باشد.

از آنجا که بررسی اثر هندسه پین در ساخت کامپوزیت  $Al_6061-Al_2O_3$  با استفاده از فرآیند FSW بطور جامع مورد بررسی قرار نگرفته است لذا هدف از این تحقیق، بررسی اثر هندسه پین در ساخت کامپوزیت  $Al_6061-Al_2O_3$  با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی جهت حصول خواص مکانیکی بهینه می‌باشد.

#### 2- روش آزمایش

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۴۰ میلی‌متر در دقیقه با استفاده از ۵ نوع پین مختلف انجام گرفت. زاویه ابزار ۳۰° و جهت دوران ابزار پادساعتگرد بود. ورق آلومینیوم T6-۶۰۶۱ به عنوان ماده زمینه جهت ایجاد کامپوزیت پایه فلزی انتخاب شد. نتایج آنالیز شیمیایی در جدول (۱) آورده شده است. تسمه‌هایی به ابعاد  $6 \times 50 \times 300$  میلی متر توسط اهر نواری بریده شد. همچنین به منظور افزودن ذرات تقویت کننده روی لبه هر تسمه نیم شیارهایی کاملاً متقارن با عرض ۶، عمق ۴ و طول ۴۰ میلی‌متر ایجاد گردید.

جدول ۱- نتایج آنالیز شیمیایی ورقه آلومینیومی 6061-T6

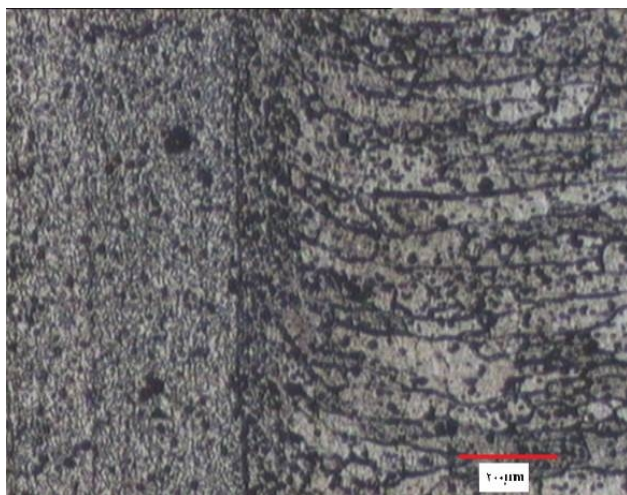
عنصر	Ti	Zn	Cr	Mg	Mn	Cu	Fe	Si
درصد	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۰۹	۱	۰/۱۵	۰/۲۷۵	۰/۷	۰/۶

فاز تقویت کننده مورد استفاده جهت ساخت کامپوزیت، نانو ذرات تقویت کننده سرامیکی اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ ) به ابعاد ۷۰-۸۵ نانومتر بود. شکل (۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانو ذرات اکسید آلومینیوم را نشان می‌دهد. درصد حجمی استفاده شده در این پژوهش ۱۵٪ می‌باشد. ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی استفاده شده در این تحقیق شامل دو قسمت شانه و پین بوده است. جهت انجام آزمایش‌ها مختلف و بررسی اثر هندسی پین، پنج نوع ابزار با هندسه پین متفاوت به کار گرفته شد. جنس ابزار فولاد گرم کار H13 بود که طی یک فرایند عملیات حرارتی، سختی آن به ۵۸ راکول

جدول ۲- مشخصات پین های مورد استفاده در فرآیند جوشکاری

شماره نمونه	کد پین	شکل پین	سرعت چرخش (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	قطر پین (mm)	قطر شانه (mm)
S1	HX	شش ضلعی منتظم	۱۰۰۰	۴۰	۶	۱۸
S2	SQ	مربعی	۱۰۰۰	۴۰	۶	۱۸
S3	FC	استوانه‌ای شیاردار	۱۰۰۰	۴۰	۶	۱۸
S4	TC	استوانه‌ای رزوه دار	۱۰۰۰	۴۰	۶	۱۸
S5	FS	مربعی شیار دار	۱۰۰۰	۴۰	۶	۱۸

مشاهده می‌کنید. وجود این ذرات در زمینه آلیاژی آلومینیوم ۶۰۶۱ به دلیل ممانعت از حرکت مرزدانه‌ها و جلوگیری از رشد دانه باعث ریز شدن دانه‌ها می‌گردد.



شکل ۳- ریزساختار مناطق اغتشاش و تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی نمونه S2 در بزرگنمایی ۵۰x

اندازه دانه در محل اغتشاش به هندسه پین و سرعت چرخشی و پیشروی وابسته است. بررسی ها نشان می دهد که هندسه پین در سیلان مواد موثر است و هر پین الگوی سیلان مختص

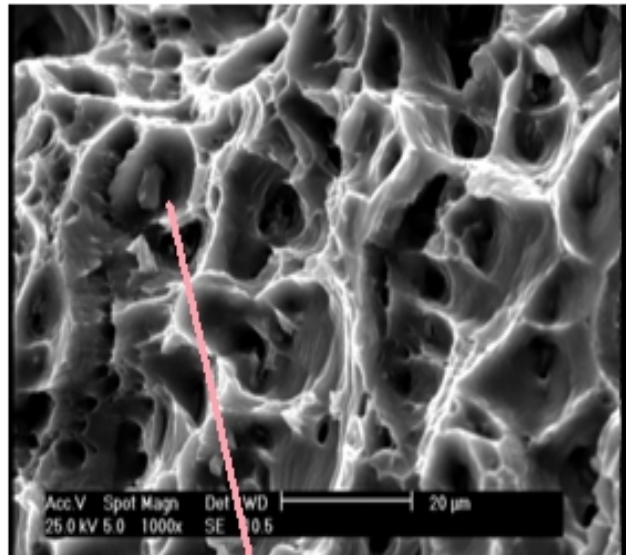
در طول این فرایند، ماده تغییر شکل شدیدی را تجربه می‌کند. در حین تغییر شکل دانه‌ها شکسته شده و تعداد زیادی از مرزدانه‌های کم زاویه شکل می‌گیرد. در نتیجه مکان‌های مناسبی جهت جوانه‌زنی دانه‌های مجدد فراهم می‌شود. در حین تبلور مجدد دینامیکی مرزهای کم زاویه به مرزهای زاویه بزرگ تبدیل می‌گردند و جوانه‌زنی جدید در مکان‌های مرجح اتفاق می‌افتد. هسته دانه‌های جدید رشد می‌کنند و در نهایت ساختار دانه‌ریز و هم‌محور تشکیل می‌شود. ساختار دانه‌ریز شامل تعداد زیادی مرزدانه است. بنابراین انرژی زیادی دارد و در اثر تغییر شکل در دمای بالا رشد دانه‌ها اتفاق می‌افتد. در پایین‌ترین سطح انرژی، رشد دانه‌های جدید آغاز می‌گردد [۱۴]. شکل (۳) ریزساختار مناطق اغتشاش و تحت عملیات ترمومکانیکی نمونه S2 در بزرگنمایی ۵۰x را نشان می‌دهد. افزودن ذرات تقویت‌کننده از رشد دانه‌های تبلور مجدد یافته جلوگیری می‌کند و به دلیل اثر قفل‌کنندگی و ایجاد مانع برای حرکت مرزدانه‌ها، از رشد دانه جلوگیری به عمل می‌آید. همچنین ریز شدن ذرات تقویت‌کننده باعث افزایش مکان‌های جوانه‌زنی و اثر قفل‌کنندگی می‌گردد [۱۴]. در شکل (۴) تصویری از نانوذره تقویت‌کننده اکسید آلومینیوم در زمینه آلومینیوم T6-6061 را

مشاهده شده میتوان نتیجه گرفت که شکل هندسه پین بر توزیع کمی ذرات تاثیر گذار می باشد. طبق جدول (3) در میان این پنج هندسه، پین شش ضلعی منتظم کوچکترین اندازه دانه را ایجاد کرده و بزرگترین اندازه دانه مربوط به پین استوانه‌ای رزوه‌دار است. اندازه دانه کوچک نمونه مربوط به پین شش ضلعی منتظم، بیانگر توزیع مناسب ذرات تقویت کننده است که منجر به جلوگیری از رشد دانه و مهاجرت مرزدانه‌ها شده است. باتوجه به شکل (6) و جدول (3) در نمونه (S4) مربوط به پین استوانه‌ای رزوه دار، در نتیجه ی سیلان ناکافی و پراکندگی نامناسب ذرات تقویت کننده، اندازه دانه و خوشه آن بزرگتر از سایر نمونه‌ها و به ترتیب برابر 19/4 و 2/81 میکرون است. کوچکترین اندازه دانه برابر 13/3 میکرون و متعلق به پین شش ضلعی منتظم (نمونه S1) است. اندازه خوشه مشاهده شده در این نمونه 1/32 میکرون بوده که کوچکترین اندازه خوشه در میان سایر نمونه هاست. علت کوچک بودن اندازه خوشه، وجود ضربات زیاد به علت شش صفحه صاف پین شش ضلعی منتظم در هنگام اختلاط است.

### 3-2- نتایج آزمون کشش

نتایج آزمون کشش نمونه‌های تهیه شده از ناحیه جوش در جدول (4) آورده شده است. همانطور که در جدول (4) مشاهده می‌شود نمونه جوشکاری شده با پین شش ضلعی منتظم (S1) بیشترین استحکام کششی 198 MPa را داشته در حالی که نمونه جوشکاری شده توسط پین استوانه‌ای رزوه دار (S4) کمترین استحکام کششی 133 MPa را دارا می باشد. این استحکام پایین ناشی از اندازه دانه بزرگتر نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد. اندازه دانه در نمونه S1 برابر 13/2 میکرون بوده در حالی که در نمونه S4 برابر 19/4 میکرون می‌باشد. دانه‌های درشت حاصل اغتشاش غیریکنواخت و ناکافی ذرات تقویت کننده در ناحیه جوش است. حضور ذرات تقویت کننده سبب کاهش قابل توجه اندازه دانه، اصلاح و یکنواختی بیشتر ساختار، افزایش تعداد مرزدانه‌ها، ایجاد موانع بیشتر بر سر راه حرکت نابجایی‌ها و در نتیجه افزایش نیروی لازم برای حرکت

خود را ایجاد می‌کند. زمانی که از ذرات تقویت کننده استفاده می‌شود سیلان مواد نقش مهمی در توزیع ذرات تقویت کننده ایفا می‌کند. بنابراین هندسه پین توزیع ذرات تقویت کننده را تعیین و کنترل می‌کند. با افزایش میزان اختلاط و توزیع پودر در زمینه، تأثیر قفل کردن مرزدانه‌ها توسط ذرات پودر بیشتر می‌گردد و سبب یکنواختی ساختار و کاهش اندازه دانه به دلیل اختلاط بهتر ذرات تقویت کننده با زمینه می‌شود [15].

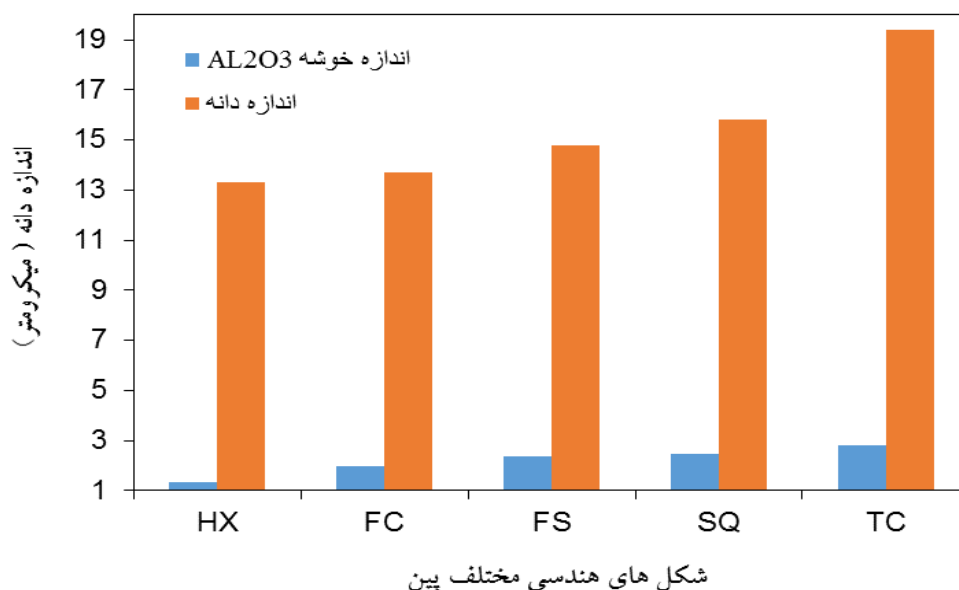


شکل 4- نانوذره تقویت کننده  $Al_2O_3$  در زمینه آلومینیومی

جدول 3- مشخصات اندازه دانه منطقه جوش با استفاده از پین‌های مختلف

هندسه پین	شش ضلعی منتظم	مربعی	استوانه‌ای شیاردار	استوانه‌ای رزوه دار	مربعی شیاردار
کد پین	HX	SQ	FC	TC	FS
شماره پین	S1	S2	S3	S4	S5
اندازه دانه ( $\mu m$ )	13/3	15/8	13/7	19/4	14/8
اندازه خوشه ( $\mu m$ ) $Al_2O_3$	1/32	2/48	1/99	2/81	2/35

شکل (5) تغییرات اندازه دانه و خوشه  $Al_2O_3$  را بر اساس هندسه پین‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به تغییرات



شکل ۵- تغییرات اندازه دانه و خوشه براساس هندسه پین های مختلف استفاده شده

به نمونه حاصل از پین استوانه‌ای رزوه‌دار و به میزان ۱/۹۵ درصد است و نمونه متعلق به پین مربعی نیز ازدیاد طولی برابر ۴/۱۹ درصد دارد.

جدول ۴- نتایج آزمون کشش نمونه‌ها

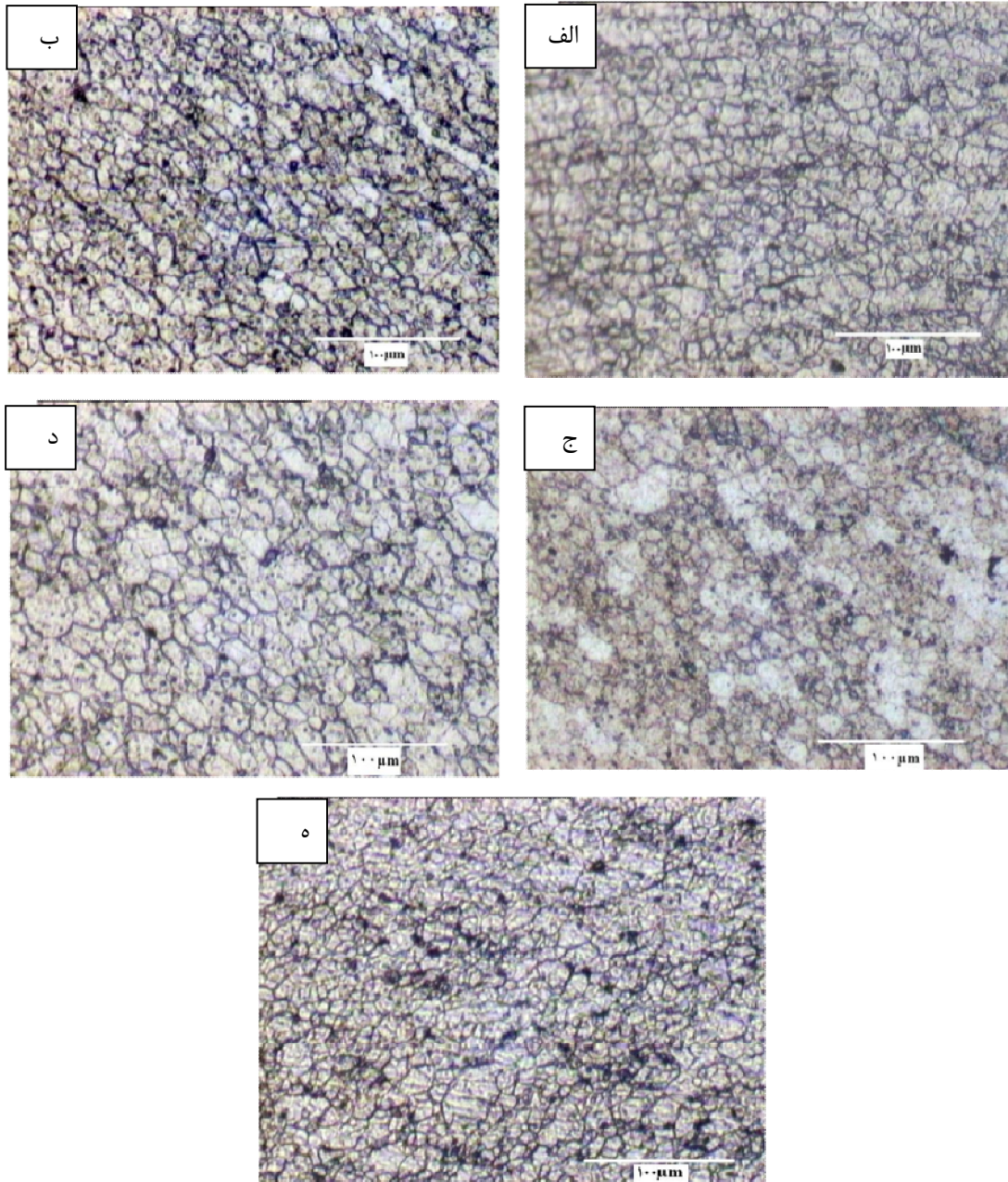
هندسه پین	شش ضلعی منتظم (HX)	مربعی (SQ)	استوانه‌ای شیار دار (FC)	استوانه‌ای رزوه دار (TC)	مربعی شیار دار (FS)
استحکام کششی (MPa)	۱۹۸	۱۶۵	۱۹۴	۱۳۳/۵	۱۸۶/۵
استحکام تسلیم (MPa)	۱۰۸	۵۴	۸۶	۱۲۹/۵	۸۲
درصد ازدیاد طول	۱۰/۲۵	۴/۱۵	۱۰/۲	۱/۹۵	۱۰/۶

ازدیاد طول نمونه‌ها تحت تاثیر اندازه دانه است. هر چه قدر دانه بندی ریزتر باشد، درصد ازدیاد طول بالا می‌رود. لذا در نمونه‌های جوش خورده با پین مربعی شیاردار، پین شش ضلعی منتظم و استوانه‌ای شیاردار که دانه‌های ریزتری نسبت به بقیه حالات دارند و استحکام بالاتری را نیز دارا هستند، درصد ازدیاد طول نیز بالا می‌باشد (بیش از ۱۰٪) و نمونه جوشکاری شده با پین استوانه‌ای رزوه دار کمترین استحکام کششی و درصد ازدیاد (۱/۹۵) را به دلیل افزایش اندازه دانه و توزیع

ناجایی‌ها می‌گردد. البته در صورتی که ذرات به یکدیگر بچسبند و در یک جا جمع شوند، همین محل‌ها، مکان‌های مناسبی جهت جوانه‌زنی و رشد ترک می‌شوند [۱۶].

بنابراین استحکام کششی نهایی تحت تاثیر اندازه دانه و چگونگی توزیع ذرات تقویت کننده است. اتصال و چسبندگی مناسب فاز تقویت کننده و زمینه، سبب انتقال تنش کششی به فاز سخت تر (فاز تقویت کننده) حین آزمون کشش و افزایش استحکام کششی نمونه می‌گردد. با توجه به ثابت ماندن سرعت چرخشی و پیشروی هنگام جوش، اثر هندسه حایز اهمیت می‌باشد. توزیع بهتر ذرات تقویت کننده به معنای افزایش تعداد مکان‌های جوانه زنی و کاهش رشد دانه‌های تبلور مجدد یافته است. لذا در نمونه جوشکاری شده با پین شش ضلعی منتظم (S1) توزیع ذرات به بهترین نحو صورت گرفته است و به دلیل وجود مکان‌های جوانه زنی بیشتر، باعث ریزتر شدن دانه‌ها و در نتیجه افزایش استحکام کششی گردید. با توجه به جدول (۴) بیشترین درصد ازدیاد طول برابر ۱۰/۶ و مربوط به نمونه جوش خورده با پین مربعی شیاردار است. ازدیاد طول برای نمونه حاصل از پین شش ضلعی منتظم و استوانه‌ای شیاردار به ترتیب ۱۰/۲۵ و ۱۰/۲ درصد است. نتایج سه نمونه بسیار به هم نزدیک اند اما در مقابل کمترین ازدیاد طول مربوط



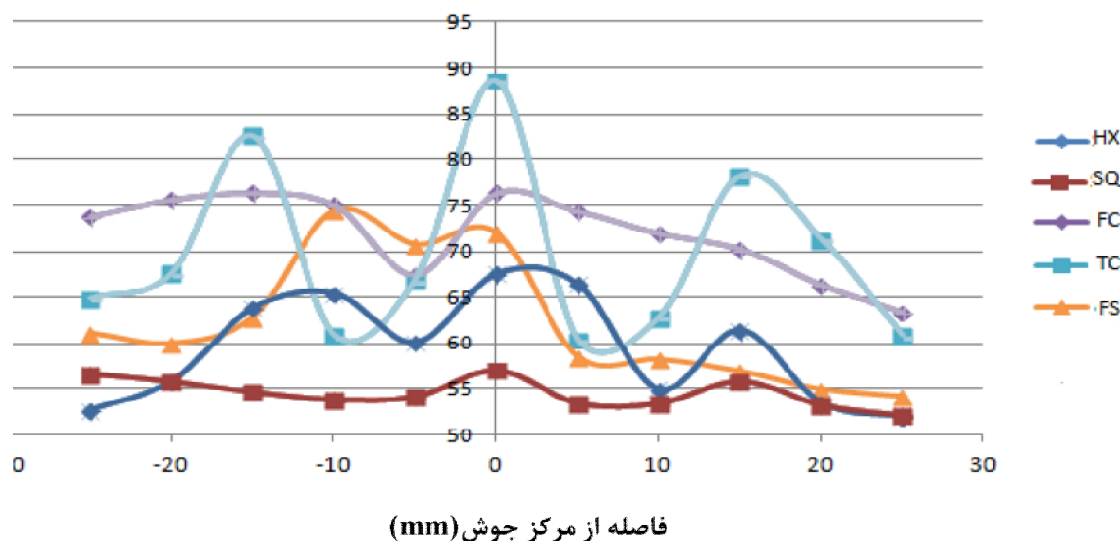


شکل ۶- ریزساختار نمونه‌های جوشکاری شده توسط هندسه بین‌های الف) شش ضلعی منظم، ب) مربعی، ج) استوانه‌ای شیار دار، د) استوانه‌ای رزوه دار، ه) مربعی شیاردار.

### 3-3- نتایج سختی سنجی

به منظور اندازه‌گیری سختی، از محل اتصال نمونه‌های جوشکاری شده و در فاصله حدود ۳ میلیمتر از سطح بالایی ورق، نمونه تهیه شد. سختی سنجی در فاصله‌های ۵ میلیمتری از مرکز جوش به سمت راست و چپ اندازه‌گیری شد و پروفیل میکروسختی برای هر نمونه به دست آمد.

ذرات تقویت کننده ذکر کرد. توزیع نامناسب ذرات تقویت کننده از طرفی مانع از دستیابی به یک ساختار ریزدانه در محل اغتشاش می‌گردد. از طرف دیگر، به علت عدم پیوند مستحکم بین ذرات تقویت کننده تجمع یافته، تمرکز تنش ایجاد شده و باعث گسیختگی می‌گردد. زیرا تحت کمترین تنش، ذرات چسبیده به هم به راحتی از یکدیگر جدا می‌شوند.



شکل ۷- منحنی تغییرات سختی هر پنج نمونه در مناطق اغتشاش، تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی و تحت تاثیر حرارت.

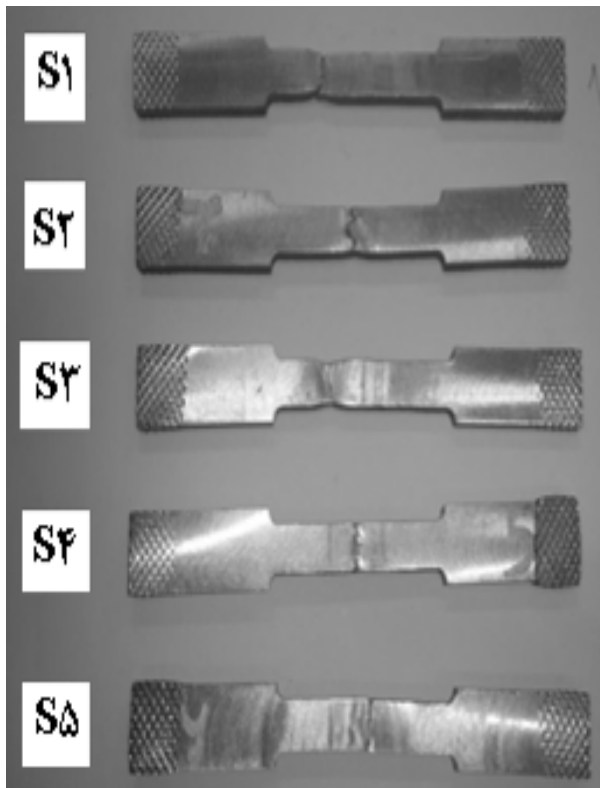
تعداد آن‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه تعداد مکان‌های جوانه زنی افزایش می‌یابد و تأثیر قفل‌کنندگی مرزدانه‌ها بیشتر می‌شود. در حین عملیات جوشکاری، در اثر تبلور مجدد دینامیکی ساختار ریز و هم محوری در ناحیه اغتشاش پدید می‌آید که می‌تواند باعث بهبود سختی گردد. همچنین ذرات تقویت‌کننده به تشکیل ساختار با دانه‌های ریزتر کمک می‌کند زیرا به‌عنوان مانعی در مقابل حرکت مرزدانه‌ها عمل کرده و از رشد دانه‌های تبلور یافته جلوگیری به عمل می‌آید [۱۷].

همچنین سختی نهایی تحت تاثیر حضور نانوذرات اکسید آلومینیوم قرار می‌گیرد که در منطقه اغتشاش بیشترین مقدار را دارد. از طرف دیگر، در اثر تغییر شکل شدیدی که در ناحیه اغتشاش یافته رخ می‌دهد ذرات تقویت‌کننده شکسته شده و اندازه دانه در این ناحیه کاهش می‌یابد و همین موضوع سبب شده است تا سختی ناحیه اغتشاش یافته بیشتر از سایر نواحی باشد. میزان سختی با حرکت از منطقه اغتشاش به سمت مناطق تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی و تحت تاثیر حرارت، کاهش می‌یابد. در منطقه تحت تاثیر حرارت، افت سختی مشاهده می‌شود که علت آن را می‌توان در میزان بالای گرمای ورودی به این منطقه و به دنبال آن درشت شدن دانه نسبت داد. علت کاهش سختی در ناحیه تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی انحلال رسوبات موجود است. سختی در ناحیه فلز پایه مجدداً

شکل (۷) توزیع میکروسختی هر پنج نمونه در مناطق اغتشاش، تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی و تحت تاثیر حرارت را نشان می‌دهد. روند کلی در همه نمونه‌ها بیانگر کاهش سختی با فاصله گرفتن از ناحیه جوش و افزایش مجدد آن در ناحیه فلز پایه است. از طرفی هر نمونه الگوی توزیع سختی مخصوص خود را دارد که بیانگر اثر هندسه پین در توزیع ذرات تقویت‌کننده و میزان سختی می‌باشد. همچنین عدم تقارن و یکنواختی در سختی مناطق پیش رونده و پس رونده ناشی از نحوه توزیع ذرات تقویت‌کننده و اثر هندسه پین است. اندازه دانه، حضور ذرات تقویت‌کننده و میزان گرمای ورودی حین جوشکاری میزان سختی نمونه‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. اثر اندازه دانه به حرارت ایجاد شده در محل جوش مربوط بوده که هندسه پین تعیین‌کننده میزان حرارت وارده به داخل جوش است. در اثر ضربه پین ذرات تقویت‌کننده تحت نیروی برشی قرار گرفته و ریز می‌شوند. هر چه ریزتر باشند تعداد مکان‌های جوانه زنی افزایش می‌یابد، زیرا درصد حجمی پودر برای همه نمونه‌ها یکی است. پینی که نیروی برشی بیشتری ایجاد کند می‌تواند تعداد مکان‌های جوانه زنی بیشتری فراهم کند، پس ساختار ریزدانه تری حاصل می‌گردد. پس ضربه بیشتر به معنای برش بیشتر و ریزدانه‌گی بیشتر است. به دلیل اینکه کسر حجمی ذرات تقویت‌کننده ثابت است در اثر کاهش اندازه ذرات تقویت‌کننده



ازدیاد طول در مقایسه با نمونه‌های دیگر می‌باشند که شکست در ناحیه HAZ به دلیل پایین بودن استحکام جوش و درصد ازدیاد طول می‌باشد. حل شدن رسوبات موجود در زمینه باعث کاهش استحکام در این ناحیه می‌گردد. از طرفی رسوبات فاز دوم ( $Mg_2Si$ ) با زمینه غیر هم سیما هستند و اطراف این رسوب‌ها میکرو حفره‌ها جوانه می‌زند و گسیختگی در این منطقه را تشدید می‌کند.



شکل ۸- تصاویر ماکروسکوپی از محل شکست نمونه‌ها پس از انجام آزمون کشش.

طبق شکل محل شکست سایر نمونه‌ها فلز پایه می‌باشد. شکست در ناحیه فلز پایه بیانگر وجود پیوند قوی میان فاز زمینه و تقویت کننده می‌باشد. تحت این شرایط ذرات تقویت کننده اکسید آلومینیوم توانسته تنش وارده بر کامپوزیت را به خوبی تحمل کرده و نمونه از ناحیه ضعیف تر یعنی فلز پایه دچار شکست شده است. شکل (۹) سطح مقطع شکست نمونه‌ها پس از آزمون کشش را نشان می‌دهد. طبق شکل حضور دیپل‌های کوچک وقوع شکست نرم را تایید می‌کند. به نظر می‌رسد که توزیع ذرات تقویت کننده با چگونگی توزیع

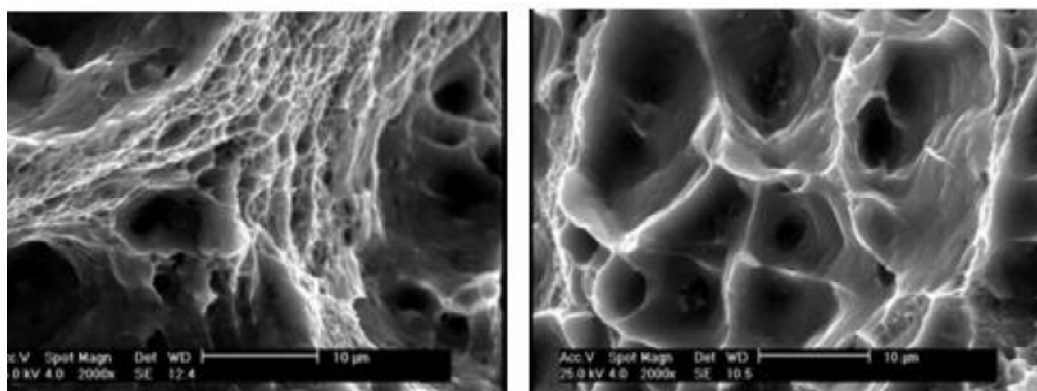
افزایش می‌یابد، زیرا تعداد رسوبات استحکام دهنده در این ناحیه بیشتر از سایر مناطق است و کمتر دچار انحلال شده‌اند. در حین اغتشاش درصد حجمی زیادی از نانوذرات اکسید آلومینیوم در منطقه اغتشاش باقی می‌ماند و صرفاً در یک محدوده مشخصی پراکنده می‌گردند بنابراین هندسه پین بر نحوه اغتشاش نانوذرات اکسید آلومینیوم تاثیرگذار است. هندسه متقارن منجر به توزیع متقارن نانوذرات اکسید آلومینیوم می‌گردد. بیشترین عدد سختی بدست آمده مربوط به نمونه S3 است که نشان دهنده حضور دانه‌های درشت در ساختار است. عدم یکنواختی سختی در مناطق پیش رونده و پس رونده نشان می‌دهد که حرارت و اغتشاش مناسب و یکنواخت نبوده است. از طرفی پین نتوانسته اغتشاش ذرات تقویت کننده را به گونه‌ای فراهم کند تا ساختار دانه ریز ایجاد گردد. همانطور که در جدول (۵) مشاهده می‌گردد بیشترین مقدار سختی برای پین استوانه ای رزوه دار با ۸۹ ویکرز و کمترین مقدار سختی برای پین مربعی با ۵۶ ویکرز می‌باشد.

جدول ۵- مشخصات اندازه دانه و سختی برای نمونه‌ها.

هندسه پین	مربعی	استوانه‌ای	استوانه‌ای	شش ضلعی	شش ضلعی
شمار دار	شمار دار	رزوه دار	شمار دار	منتظم	منتظم
کد پین	FS	TC	FC	SQ	HX
نمونه	S5	S4	S3	S2	S1
اندازه دانه (میکرون)	۱۴/۸	۱۹/۴	۱۳/۷	۱۵/۸	۱۳/۳
سختی (ویکرز)	۷۵	۸۹	۷۶	۵۶	۶۷

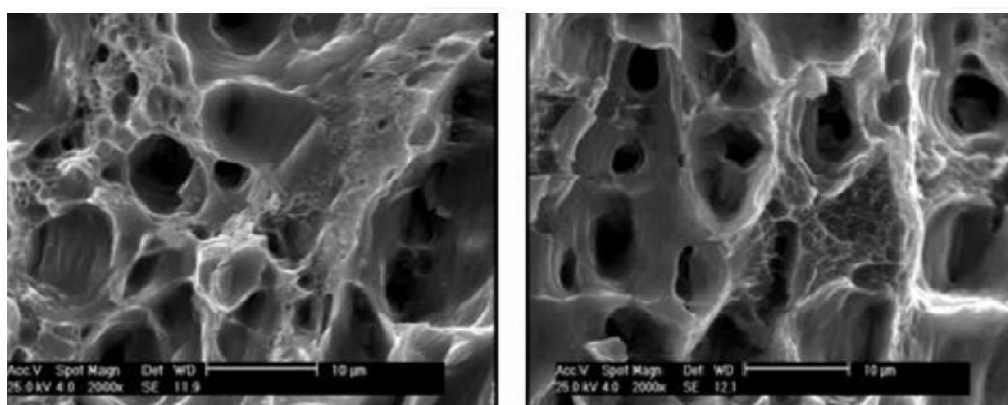
### 3-4- شکست نگاری

بعد از انجام آزمون کشش، سطح شکست نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۸) تصاویر ماکروسکوپی محل شکست نمونه‌ها پس از انجام آزمون کشش را نشان می‌دهد. سطح مقطع نمونه S2 و S4 از منطقه تحت تاثیر حرارت دچار شکست شده‌اند. این دو نمونه دارای کمترین استحکام و پایین‌ترین مقدار درصد



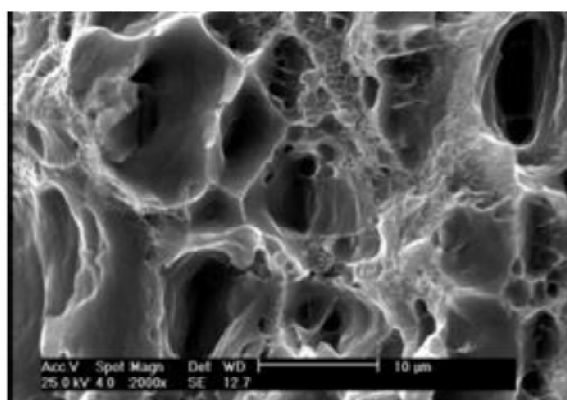
ب

الف



د

ج



شکل ۹- سطح شکست نمونه‌های جوشکاری شده با پین های الف) شش ضلعی منظم، ب) مربعی، ج) استوانه‌ای شیار دار، د) استوانه‌ای رزوه دار و ه) مربعی شیاردار.

تصاویر شکست این نمونه‌ها نیز توزیع یکنواختی از دیمپل‌ها مشاهده می‌گردد. این توزیع یکنواخت سبب انتقال مناسب نیرو به ذرات تقویت کننده می‌گردد. در حالیکه در نمونه S2 دیمپل‌های کمتری در سطح شکست مشاهده شده و پیوند نامناسب بین ذرات تقویت کننده و زمینه سبب تشکیل ترک و

دیمپل‌ها در ارتباط است. در نمونه‌های S1، S3 و S5 توزیع یکنواختی از ذرات تقویت کننده مشاهده می‌شود. توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده می‌تواند باعث شود تا کامپوزیت زمینه آلومینیومی به صورت نرم بشکند و دیمپل‌ها که مشخصه شکست نرم هستند در سطوح شکست مشاهده می‌شوند. در