نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره2، پاییز و زمستان1398، صفحه 88-77

اثر هندسه پین بر خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیم6061-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 کامپوزیت‌سازی نیز همزمان نیز صورت می‌گیرد. هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی اثر هندسه پین بر خواص نانوکامپوزیت آلومینیم۶۰۶۱-آلومینا ایجاد شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. بدین منظور انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با انتخاب پنج نوع هندسه پین بر روی آلیاژ آلومینیوم۶۰۶۱ که ذرات Al_2O_3 در آن جاگذاری شده انجام گردید و نمونه‌ها با استفاده از آزمون‌های کشش، سختی سنجی، میکروسکوپ نوری و الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. پین شش ضلعی منتظم به علت داشتن شش صفحه صاف و حرکت ضربه‌ای در حین چرخش، اغتشاش مناسبی را ایجاد کرده که باعث ایجاد بیشترین استحکام کششی و درصد ازدیاد طول به ترتیب به مقدار MPa ۱۹۸و ۱۰/۲۵ و کمترین اندازه دانه ۱۳/۳ میکرون شده است. در نمونه جوشکاری شده با پین استوانه‌ای رزوه‌دار 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 MPa ۱۳۳/۵و 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-aluminacomposite 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 Aluminum 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 Aluminum 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

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

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

یکی از ویژگیهای کامپوزیت‌های زمینه فلزی، خواص مکانیکی مناسب آن‌هاست. به‌منظور اتصال فلزات و یا آلیاژها با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و در حضور پودرهای تقویت‌کننده سرامیکی، کامپوزیت زمینه فلزی ایجاد می‌گردد که باعث بهبود خواص مکانیکی در محل اتصال می‌گردد. تقویت‌کننده‌های سرامیکی، ویژگی‌های استحکام و مدول الاستیسیته بالا را با کارایی مناسب در دمای بالا را ایجاد می‌نمایند. از دیگر خصوصیات مهم این مواد که ممکن است اهمیت بسیار زیادی داشته باشد، مقاومت به سایش است. برای ساخت تجهیزات پیچیده و بزرگ‌تر می‌بایست کامپوزیت‌ها به یکدیگر متصل شود. به‌منظور اتصال کامپوزیت‌های زمینه فلزی روش‌های متعددی نظیر جوشکاری‌های ذوبی، لحیم‌کاری سخت و اتصال نفوذی به کار گرفته‌شده‌اند که هر یک تا حدی موجب افت خواص مکانیکی می‌شوند. به‌عنوان‌مثال در جوشکاری ذوبی، عیوبی مانند تخلخل، ترک‌های ناشی از انجماد مجدد، جدایش ذرات تقویت‌کننده در حین انجماد و واکنش‌های شیمیایی نامطلوب بین ذرات تقویت‌کننده و زمینه‌ای که تقریباً مذاب است، رخ می‌دهد. همچنین در روش اتصال نفوذی یا لحیم‌کاری سخت، ناحیه‌ای تحت عنوان ناحیه انتقالی تشکیل می‌شود که سبب می‌شود خواص ناحیه انتقالی با آلیاژ یا ماده پایه متفاوت باشد. به‌منظور رفع این مشکل از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی(FSW) استفاده شده است و ازآنجایی‌که در این فرآیند عمل اتصال در حالت‌جامد ایجاد می‌شود، هیچ‌گونه ذوبی ایجاد نگشته و مشکلات و عیوب فرآیندهای اتصال ذوبی به‌طور خودبه‌خود حذف می‌شوند به همین علت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به‌عنوان روش مناسبی جهت ایجاد اتصال شناخته می‌شود[۱]. تاکنون مطالعات زیادی 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[۶و۵]. 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 می‌باشد[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 آلومینیم 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 اصکاکی اغتشاشی را بر خواص مکانیکی و اندازه دانه کامپوزیت آلومینیم 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 آلومینیم 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.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

از آنجا که بررسی اثر هندسه پین در ساخت کامپوزیت Al۶۰۶۱-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 Al۶۰۶۱-Al_2O_3 با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی جهت حصول خواص مکانیکی بهینه می باشد.

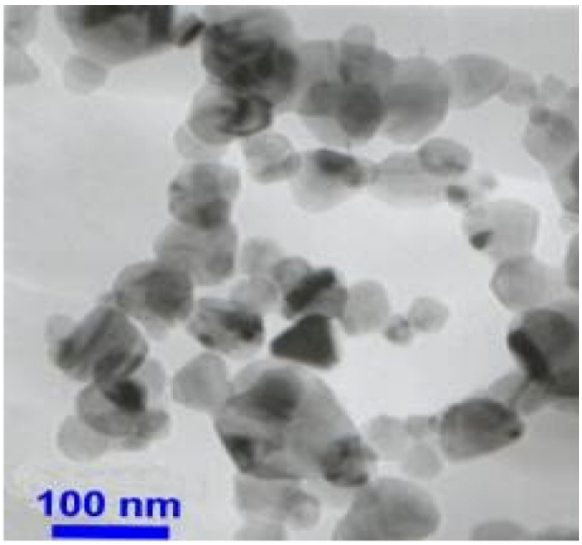
2- روش آزمایش

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°۳ و جهت دوران ابزار پادساعتگرد بود. ورق آلومینیوم ۶۰۶۱–T6 به عنوان ماده زمینه جهت ایجاد کامپوزیت پایه فلزی انتخاب شد. نتایج آنالیز شیمیایی در جدول(۱) آورده شده است. تسمه هایی به ابعاد ۳۰۰×۵۰×۶ میلی متر توسط اره نواری بریده شد. همچنین به منظور افزودن ذرات تقویت کننده روی لبه هر تسمه نیم شیارهایی کاملا متقارن با عرض ۶ ، عمق ۴ و طول ۴۰ میلیمتر ایجاد گردید.

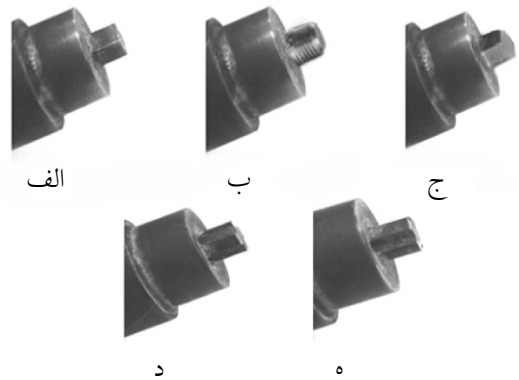
جدول۱– نتایج آنالیز شیمیایی ورقه آلومینیومی 6061- T6

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، نانوذرات تقویت کننده سرامیکی اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) به ابعاد ۸۵–۷۰ 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 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.



شکل۱– تصویر میکروسکوپی الکترونی عبوری از نانو ذرات اکسید آلومینیوم مورد استفاده.



شکل۲– 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

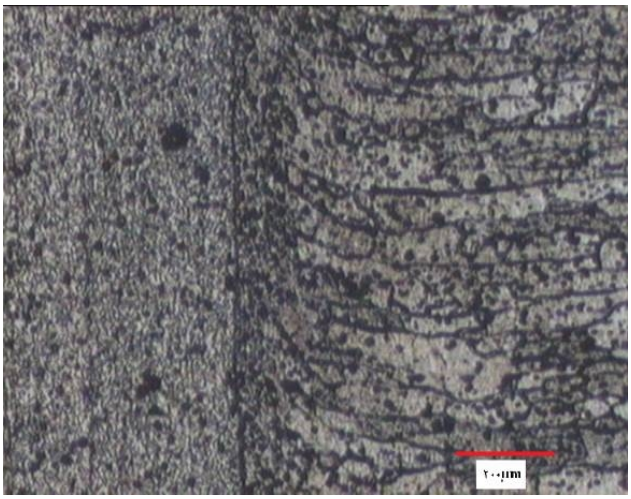
مقایسه ریزساختار فلز پایه با نمونه‌های جوشکاری شده توسط هر پنج پین، نشان می‌دهد که در اثر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اندازه نمونه‌ها کاهش یافته است. پدیده‌ای که باعث تشکیل دانه‌های ریزتر می‌گردد، تبلورمجدد دینامیکی می‌باشد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول۲- مشخصات پین های مورداستفاده 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

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. درنتیجه مکان‌های مناسبی جهت جوانه‌زنی دانه‌های مجدد فراهم می‌شود. در حین تبلورمجدد دینامیکی مرزهای کم زاویه به مرزهای زاویه بزرگ تبدیل می‌گردند و جوانه‌زنی دانه‌های 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) ریزساختارمناطق اغتشاش وتحت‌عملیات ترمومکانیکی نمونه S۲ در بزرگنمایی ۵۰x را نشان می‌دهد. افزودن ذرات تقویت‌کننده از رشد دانه‌های تبلورمجدد یافته جلوگیری می‌کند و به دلیل اثر قفل کنندگی و ایجاد مانع برای حرکت مرزدانه‌ها، از رشد دانه جلوگیری به عمل می‌آید. همچنین ریز شدن ذرات تقویت‌کننده باعث افزایش مکان‌های جوانه‌زنی و اثر قفل کنندگی می‌گردد[۱۴]. درشکل(۴) تصویری از نانوذره تقویت کننده اکسیدآلومینیوم در زمینه آلـومینیـوم 6061 –T6 را 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.

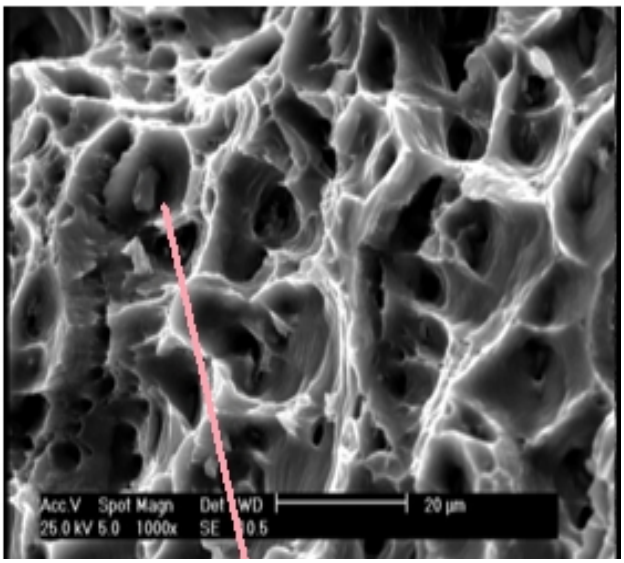


شکل۳- ریزساختار مناطق اغتشاش و تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی نمونه S۲ در بزرگنمایی ۵۰x

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

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

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 قفل‌کردن مرزدانه‌ها توسط ذرات پودر بیشتر می‌گردد و سبب یکنواختی ساختار و کاهش اندازه دانه به دلیل اختلاط بهتر ذرات تقویت‌کننده با زمینه می‌شود[۱۵].



شکل۴- نانوذره تقویت کننده Al_2O_3 در زمینه آلومینیومی

جدول۳- مشخصات اندازه دانه منطقه جوش با استفاده از پین‌های مختلف

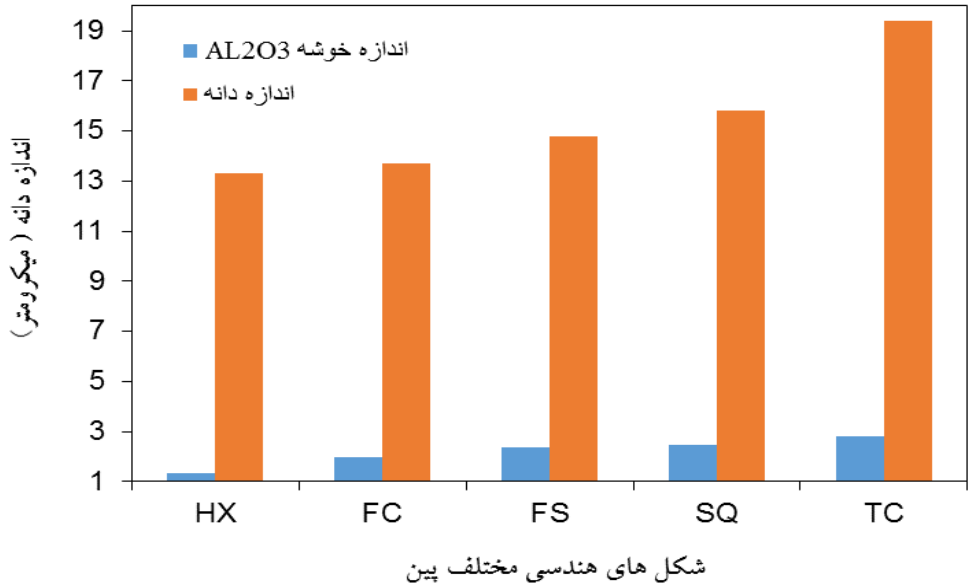
هندسه پین	شش ضلعی منتظم	مربعی	استوانه‌ای شیاردار	استوانه ای رزوه دار	مربعی شیاردار
کد پین	HX	SQ	FC	TC	FS
شماره پین	S1	S2	S3	S4	S5
اندازه دانه (µm)	۱۳/۳	۱۵/۸	۱۳/۷	۱۹/۴	۱۴/۸
اندازه خوشه $(\mu m)Al_2O_3$	۱/۳۲	۲/۴۸	۱/۹۹	۲/۸۱	۲/۳۵

شکل(۵) تغییرات اندازه دانه و خوشه Al_2O_3 را بر اساس هندسه پین های مختلف نشان می دهد. با توجه به تغییرات مشاهده شده میتوان نتیجه گرفت که شکل هندسه پین بر توزیع کمی ذرات تاثیر گذار می باشد. طبق جدول(۳) 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(۶) و جدول(۳) در نمونه (S۴) 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 ۱۹/۴و ۲/۸۱ میکرون است. کوچکترین اندازه دانه برابر ۱۳/۳ میکرون و متعلق به پین شش ضلعی منتظم (نمونه S1) است. اندازه خوشه مشاهده شده در این نمونه ۱/۳۲ 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(۴) آورده شده است. همانطور که در جدول(۴) مشاهده می‌شود نمونه جوشکاری شده با پین شش ضلعی منتظم(S1) بیشترین استحکام کششی ۱۹۸ MPa را داشته در حالی که نمونه جوشکاری شده توسط پین استوانه‌ای رزوه دار(S۴) کمترین استحکام کششی ۱۳۳ MPa را دارا می باشد. این استحکام پایین ناشی از اندازه دانه بزرگتر نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد. اندازه دانه در نمونه S1 برابر۱۳/۲ میکرون بوده در حالی که در نمونه S۴ برابر ۱۹/۴ میکرون می‌باشد. دانه‌های درشت حاصل اغتشاش غیریکنواخت و ناکافی ذرات تقویت کننده در ناحیه جوش است. حضور ذرات تقویت کننده سبب کاهش قابل‌توجه اندازه دانه، اصلاح و یکنواختی بیشتر ساختار، افزایش تعداد مرزدانه‌ها، ایجاد موانع بیشتر بر سر راه حرکت نابجـایـی‌ها و درنتیجه افزایش نیروی لازم برای حرکت

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل۵- تغییرات اندازه دانه و خوشه براساس هندسه پین های مختلف استفاده شده

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

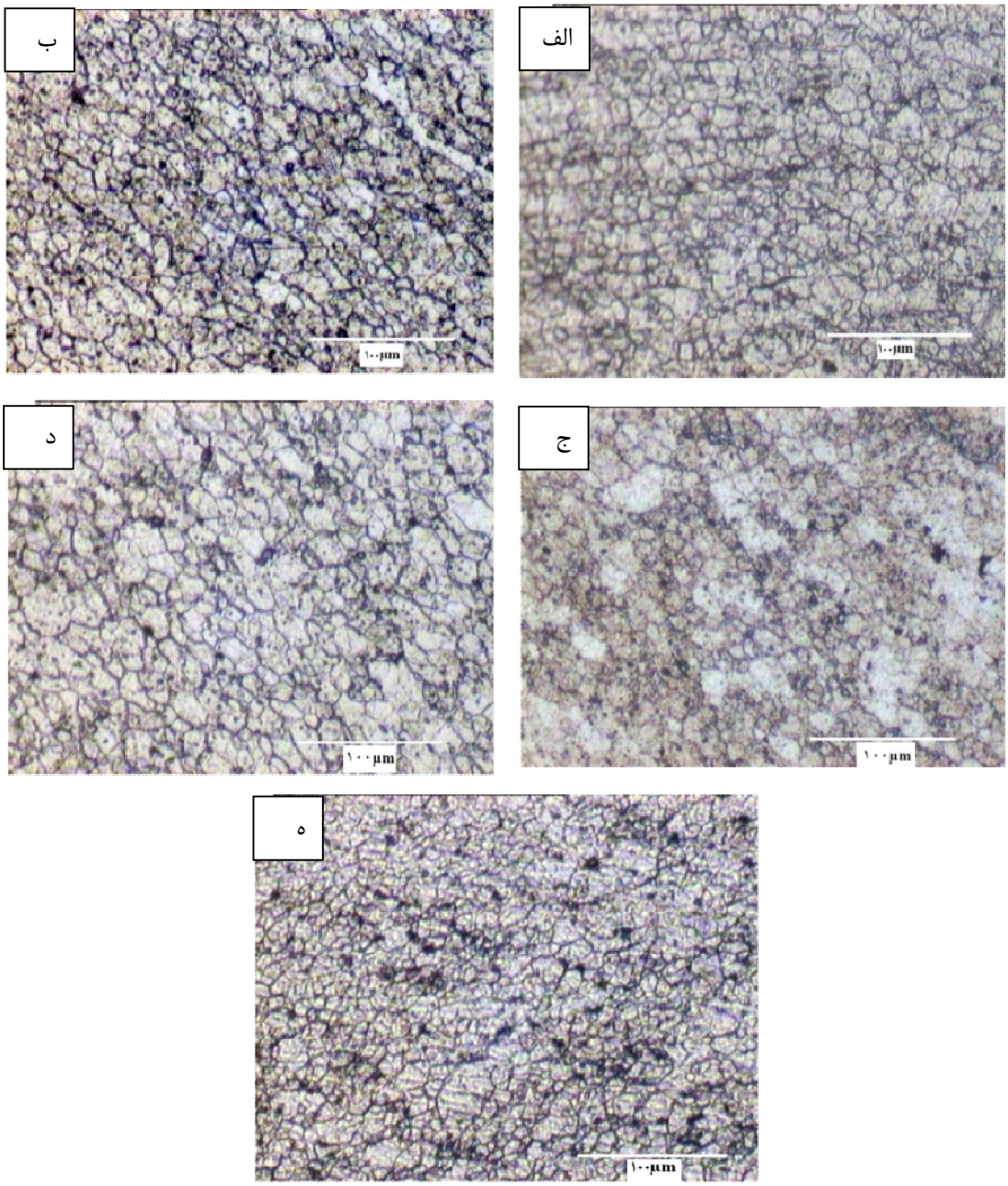
بنابراین استحکام کششی نهایی تحت تاثیر اندازه دانه و چگونگی توزیع ذرات تقویت کننده است. اتصال و چسبندگی مناسب فاز تقویت کننده و زمینه، سبب انتقال تنش کششی به فاز سخت تر(فاز تقویت کننده) حین آزمون کشش و افزایش استحکام کششی نمونه می‌گردد. با توجه به ثابت ماندن سرعت چرخشی و پیشروی هنگام جوش، اثر هندسه حایز 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(S۱) 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. باتوجه 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 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.

جدول۴- نتایج آزمون کشش نمونه ها

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 ازدیادطول	۱۰/۲۵	۴/۱۵	۱۰/۲	۱/۹۵	۱۰/۶

ازدیاد طول نمونه ها 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 استوانه ای رزوه دار کمترین استحکام کششی و درصد ازدیاد (۱/۹۵) را به دلیل افزایش اندازه دانه و توزیع

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



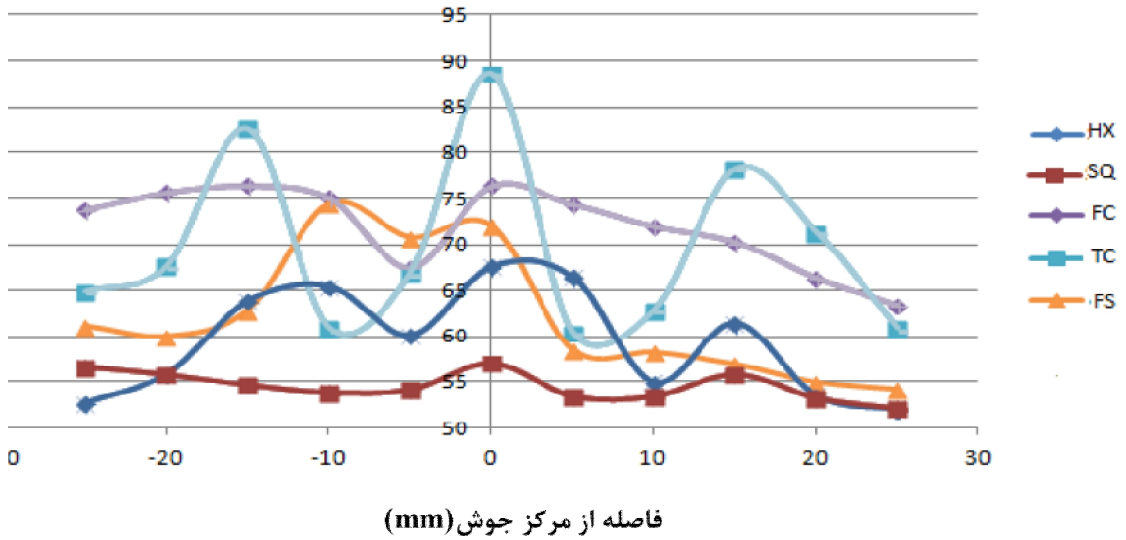
شکل۶- ریزساختار نمونه‌های جوشکاری شده توسط هندسه پین های الف) شش ضلعی منتظم، ب) مربعی، ج) استوانه‌ای شیار دار، د) استوانه‌ای رزوه دار، ه) مربعی شیاردار.

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 کنندهٔ تجمع یافته، تمرکز تنش ایجاد شده و باعث گسیختگی می‌گردد. زیرا تحت کمترین تنش، ذرات چسبیده به هم به راحتی از یکدیگر جدا می‌شوند.

3-3- نتایج سختی سنجی

به منظور اندازه گیری 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 اندازه گیری شد و پروفیل میکروسختی برای هر نمونه به دست آمد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل۷- منحنی تغیرات سختی هر پنج نمونه در مناطق اغتشاش، تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی و تحت تاثیر حرارت.

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 تقویت کننده و میزان سختی می باشد. همچنین عدم تقارن و یکنواختی در سختی مناطق پیش رونده و پس رونده ناشی از نحوه توزیع ذرات تقویت کننده و اثر هندسه پین است. اندازه دانه، حضور ذرات تقویت کننده و میزان گرمای ورودی حین جوشکاری میزان سختی نمونه ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. اثر اندازه دانه به حرارت ایجاد شده در محل جوش مربوط بوده که هندسه پین تعیین کننده میزان حرارت وارده به داخل جوش است. در اثر ضربه پین ذرات تقویت کننده 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 ریزدانگی بیشتر است. به دلیل اینکه کسر حجمی ذرات تقویت کننده ثابت است در اثر کاهش اندازه ذرات تقویت‌کننده تعداد آن‌ها افزایش می‌یابد. درنتیجه 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 تبلوریافته 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 مجددا

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

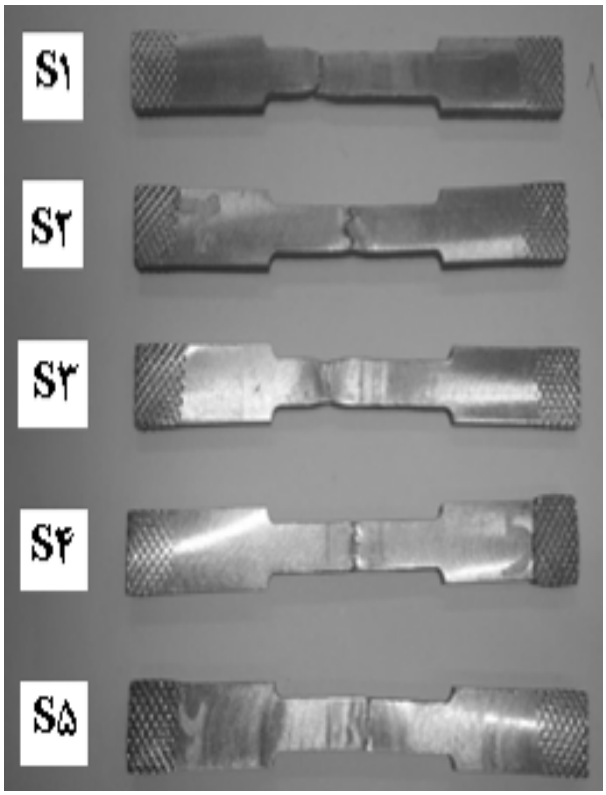
افزایش می‌یابد، زیرا تعداد رسوبات استحکام دهنده در این ناحیه بیشتر از سایر مناطق است و کمتر دچار انحلال شده اند. در حین اغتشاش درصد حجمی زیادی از نانوذرات اکسید آلومینیوم در منطقه اغتشاش باقی می‌ماند و صرفا در یک محدوده مشخصی پراکنده می‌گردند بنابراین هندسه پین بر نحوه اغتشاش نانوذرات اکسید آلومینیوم تاثیرگذار است. هندسه متقارن منجر به توزیع متقارن نانوذرات اکسید آلومینیوم می‌گردد. بیشترین عدد سختی بدست آمده مربوط به نمونهS3 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 نمونه ها.

هندسه پین	مربعی شیار دار	استوانه‌ای رزوه دار	استوانه‌ای شیار دار	مربعی	شش ضلعی 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

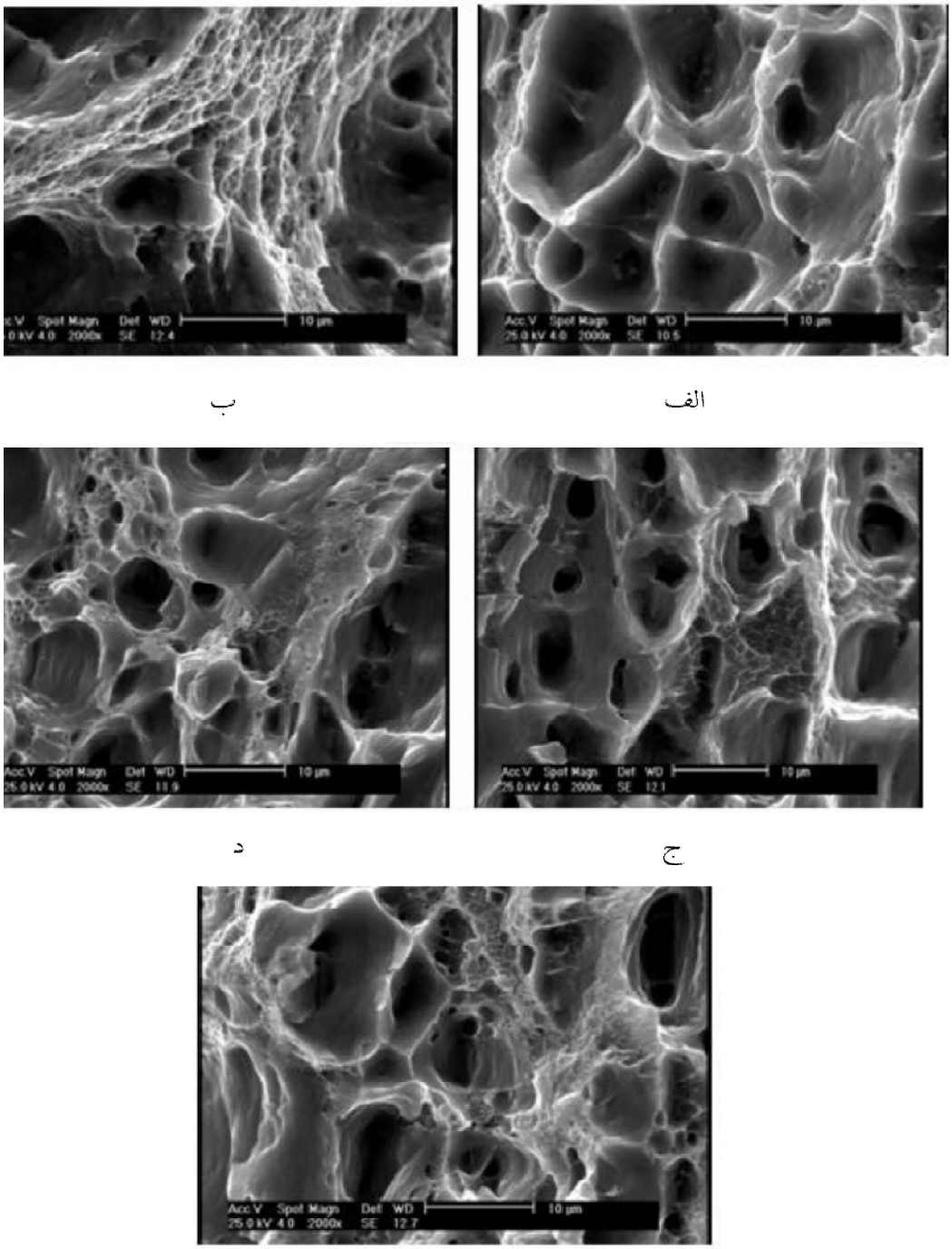
بعد از انجام آزمون کشش، سطح شکست نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. شکل(۸) تصاویر ماکروسکوپی محل شکست نمونه ها پس از انجام آزمون کشش را نشان می دهد. سطح مقطع نمونه S۲ وS۴ از منطقه تحت تاثیر حرارت دچار شکست شده اند. این دو نمونه دارای کمترین استحکام و پایین‌ترین مقدار درصد ازدیاد 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.



شکل۸- تصاویر ماکروسکوپی از محل شکست نمونه ها پس از انجام آزمون کشش.

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

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل۹- سطح شکست نمونه‌های جوشکاری شده با پین های الف) شش ضلعی منتظم. ب) مربعی، ج) استوانه‌ای شیار دار، د) استوانه‌ای رزوه دار و ه) مربعی شیاردار.

دیمپل‌ها در ارتباط است. در نمونه‌های S۳،S۱ وS۵ توزیع یکنواختی از ذرات تقویت کننده مشاهد می شود. توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده می تواند باعث شود تا کامپوزیت زمینه آلومینیومی به صورت نرم بشکند و دیمپل‌ها که مشخصه شکست نرم هستند در سطوح شکست مشاهده می شوند. در 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 S۲ دیمپل‌های کمتری در سطح شکست مشاهده شده و پیوند نامناسب بین ذرات تقویت کننده و زمینه سبب تشکیل ترک و

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]