

به نام خدا



# مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

[www.Iran-mavad.com](http://www.Iran-mavad.com)



# اثر سرعت جوشکاری اصطکاکی اختلاطی (FSW) بر خواص مکانیکی اتصال آلیاژ آلومینیم 2024-T8

محمد علی صفرخانیان، مسعود گودرزی، محمد علی بوتراپی

دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

## چکیده

یکی از مهمترین پارامترهای موثر بر ریزساختار و خواص مکانیکی منطقه اتصال در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی (FSW)، سرعت پیشروی ابزار یا سرعت جوشکاری می باشد که یکی از عوامل مهم گرمای ورودی در فرایند FSW می باشد. در این تحقیق اثر سرعت جوشکاری در محدوده  $100-200 \text{ mm/min}$  بر روی ریزساختار، خواص میکروسختی و خواص کششی آلیاژ 2024-T8 به ضخامت  $5 \text{ mm}$  بررسی شده است. مشاهده شد که افزایش سرعت جوشکاری باعث افزایش خواص میکروسختی و خواص کششی شده که دلیل آن کاهش حرارت ورودی و در نتیجه جلوگیری از شدت فرایپر شدن رسوبات استحکام دهنده، با افزایش سرعت جوشکاری می باشد.

## ۱- مقدمه

روش جوشکاری اصطکاکی اختلاطی<sup>۱</sup> یا FSW اولین بار توسط موسسه جوشکاری انگلستان (TWI) در سال ۱۹۹۱ به ثبت رسیده است [۱]. این روش، در مدت زمان بسیار کوتاهی به طور چشمگیری مورد توجه قرار گرفته است. جوشکاری FSW به طور وسیعی برای آلیاژهای آلومینیم، مخصوصاً آلیاژهایی که روش های جوشکاری ذوبی برای آنها مناسب نمی باشد، مانند گروه  $2\times\times\times$ ، که جزء آلیاژهای استحکام بالا می باشد، کاربرد دارد [۳]. آلیاژ 2024 که مهمترین آلیاژ گروه  $2\times\times\times$  می باشد به طور وسیعی در صنایع مختلف، استفاده می شود ولی به دلیل تشکیل مک، تخلخل و ترک گرم و همچنین افت شدید خواص مکانیکی در منطقه ی اتصال پس از جوشکاری از طریق روش های ذوبی، این آلیاژ به عنوان آلیاژ جوش ناپذیر شناخته می شود [۴و۲].

در شکل ۱ شماتیک روش FSW نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، ابزار FSW شامل دو قسمت مهم می باشد پین غیر مصرفی<sup>۲</sup> و شانه ی پین<sup>۳</sup> [۴]. در اثر تماس شانه ی پین با سطح کار در حین چرخش ابزار، حرارت تولید می شود، و مواد در محل اتصال بدلیل حرکت دورانی پین، متحمل تغییر شکل شدید در دمای بالا می شوند، بدین ترتیب، همراه با از بین رفتن درز منطقه اتصال، در این منطقه تبلور مجدد

Friction Stir Welding - ۱

Pin - ۲

Shoulder - ۳

اتفاق افتاده و دانه های بسیار ریز و هم محور در این منطقه تشکیل می شوند [۶۵]. در این روش از آنجا که جوشکاری در حالت جامد انجام می شود [۲، ۷ و ۸] عیوب انجمادی از قبیل مک، تخلخل و ترک گرم که در روش های جوشکاری ذوبی به وفور یافت می شوند، وجود نخواهد داشت.

بر اساس تغییرات ایجاد شده در شکل و اندازه های دانه ها و رسوبها، سه منطقه ی مجزا در محل اتصال می توان تشخیص داد. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود این سه منطقه عبارتند از:

(۱) منطقه ی جوش<sup>۱</sup> یا NZ،

(۲) منطقه ی تحت تاثیر فرایند ترمومکانیکی<sup>۲</sup> یا TMAZ، و

(۳) منطقه ی متأثر از حرارت<sup>۳</sup> یا HAZ [۹-۱۳].

هندسه ی ابزار، سرعت دورانی ابزار ( $\omega$ )، سرعت پیشروی ( $v$ ) و نیروی فورج مهمترین پارامترهای موثر بر الگوی سیلان مواد و توزیع دما می باشند [۴].

در این تحقیق اثر سرعت جوشکاری در محدوده ی ۱۰۰-۲۰۰ mm/min بر روی ریزساختار، خواص میکروسختی و خواص کششی آلیاژ 2024-T8 به ضخامت ۵ mm بررسی شده است.

## ۲- روش آزمایش

ابتدا ورق آلومینیم 2024-T851 به ضخامت ۵ mm تهیه شد. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلیاژ مورد نظر به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ آورده شده است. ابعاد نمونه های تهیه شده ۷ × ۱۵ mm بود که در راستای طولی و عمود بر جهت نورد در حالت لب به لب<sup>۴</sup> به روش جوشکاری FSW با تغییر سرعت جوشکاری در محدوده ی ۱۰۰-۲۰۰ mm/min جوشکاری شدند. شرایط مختلف جوشکاری در جدول ۳ آورده شده است. جنس ابزار جوشکاری از فولاد گرم کار H13 انتخاب شد. قطر شانه پین، قطر پین و ارتفاع پین به ترتیب ۱۸، ۶ و ۴/۷ میلیمتر در نظر گرفته شدند. در حین جوشکاری، تغییرات دما بر حسب زمان در منطقه ی کنار خط اتصال توسط ترموکوپل نوع K در فاصله ی ۱۲ mm از خط اتصال در سمت پیش زده شده به صورت تماسی با سطح زیرین قطعه کار، ثبت شد.

پس از انجام جوشکاری، ابتدا آزمایش رادیوگرافی با اشعه X بر روی تمام درز اتصال ها انجام شد و هیچ گونه عیبی (عیب کانالی، مک و تخلخل و ...) مشاهده نشد و برای اطمینان از عدم حضور این عیوب، نمونه های متالوگرافی از مقاطع اتصال تهیه گردید، و مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۳ مشاهده می شود که هیچگونه عیبی در مقطع

<sup>۱</sup> - Nugget Zone.

<sup>۲</sup> - Thermo Mechanically Affected Zone.

<sup>۳</sup> - Heat Affected Zone.

<sup>۴</sup> - Butt Weld.

اتصال نمونه ها وجود ندارد. آزمایش میکرو سختی سنجی در امتداد خط AB از منطقه‌ی پیش زده شده به طرف منطقه‌ی پس زده شده، مطابق شکل ۴، بر روی تمام نمونه ها انجام گرفت و نتایج آن استخراج گردید. سه نمونه تست کشش عمود بر خط اتصال مطابق استاندارد DIN 50125 برای هر یک از حالات جوشکاری تهیه گردید و خواص کششی هر یک از آنها توسط دستگاه کشش Instron 8500 بدست آمد.

### ۳- نتایج و بحث

در شکل ۵ نتایج میکروسختی سنجی از منطقه‌ی اتصال و اطراف آن برای نمونه های مورد بررسی آورده شده است، همانطور که مشاهده می‌شود سختی در مرز منطقه‌ی اتصال/ فلز پایه، کمترین مقدار می‌باشد و نیز سختی در منطقه‌ی اتصال نسبت به فلز پایه پائین‌تر است ولیکن منطقه‌ی اتصال نسبت به منطقه‌ی HAZ دارای سختی بالاتری می‌باشد. در شکل ۶ نشان داده شده است که سختی در مرز اتصال/ فلز پایه، با افزایش سرعت جوشکاری افزایش می‌یابد.

در شکل ۷ نتایج خواص کششی عمود بر خط اتصال برای نمونه های مورد بررسی آورده شده است، همانطور که مشاهده می‌شود استحکام تسلیم و استحکام نهایی با افزایش سرعت جوشکاری افزایش یافته ولیکن درصد انعطاف پذیری (%E) تغییر چندانی نکرده است.

عامل اصلی افزایش استحکام و سختی در آلیاژ 2024، تشکیل رسوبهای بسیار ریز  $Al_2CuMg$  یا S در زمینه آلیاژ می‌باشد [14]. با اعمال حرارت نسبتاً بالا حین فرایند FSW، این رسوبها یا در زمینه حل می‌شوند و یا درشت می‌شوند. در نتیجه سختی در مناطق حرارت دیده کاهش می‌یابد.

همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است با افزایش مقدار سرعت جوشکاری، دمای ماکزیمم ثبت شده توسط ترموکوپل کاهش یافته است و در نتیجه انحلال و یا درشت‌تر شدن رسوبهای استحکام دهنده کمتر شده و به عبارت دیگر شدت پدیده فرایپر شدن کاهش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود افت سختی در منطقه‌ی اتصال و اطراف آن و همچنین استحکام تسلیم و نهایی، همراه با افزایش سرعت جوشکاری، افزایش یابد. از آنجائیکه استحکام تسلیم و نهایی، هر دو با افزایش سرعت جوشکاری افزایش می‌یابند بنابراین درصد تغییر طول نسبی با افزایش سرعت جوشکاری تغییر نمی‌کند. تصاویر متالوگرافی شکل ۹ مربوط به فلز پایه و منطقه‌ی اتصال می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود دانه‌ها در منطقه‌ی اتصال بسیار ریز و هم محور بوده، این در حالی است که دانه‌ها در فلز پایه در راستای نورد کشیده شده می‌باشند. این دانه‌های هم محور و بسیار ریز نشان دهنده تبلور مجدد در حین فرایند FSW است [۳]. حضور این دانه های ریز و هم محور دلیلی بر افزایش سختی منطقه‌ی اتصال نسبت به منطقه‌ی HAZ است که در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

## ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر سرعت جوشکاری FSW در محدوده  $100-200 \text{ mm/min}$  بر روی ریزساختار، خواص میکروسختی و خواص کششی آلیاژ 2024-T8 به ضخامت  $5 \text{ mm}$  بررسی شده است. نتایج بدست آمده از این بررسی به شرح ذیل می باشد:

۱. سختی در منطقه‌ی اتصال نسبت به منطقه‌ی TMAZ بالاتر است که علت آن حضور دانه های بسیار ریز و هم محور در منطقه‌ی اتصال می باشد.
۲. افزایش سرعت جوشکاری سبب کاهش حرارت ورودی شده بنابراین شدت فرایر شدن رسوبات استحکام دهنده ( رسوبات S ) کاهش می یابد که نتیجه‌ی آن افزایش استحکام عمود بر مقطع اتصال و سختی منطقه HAZ، با افزایش سرعت جوشکاری است.

## ۵- مراجع

1. W.M. Thomas, et al., Friction stir butt welding, International Patent Application PCT/GB92, Patent Application GB9125978.8, 6, December 1991.
2. D. Fersini, A. Pirondi, "Fatigue behaviour of Al2024-T3 friction stir welded lap joints", Eng. Frac. Mech., Vol 74, 2007, P.468-480.
3. S. Di, X. Yang, G. Luan, B. Jian, "Comparative study on fatigue properties between AA2024-T4 friction stir welds and base materials", Mat., Sci., Eng., A, Vol. 436, 2006, P. 389-395.
4. R.S. Mishra, Z.Y. Ma, "Friction stir welding and processing ", Mat. Sci. Eng., Vol. 50, 2005, P. 1-78.
5. J.Q. Su, T. W. Nelson, R. Mishra, M. Mahoney, "Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium ", Acta. Ma.t, Vol. 51, 2003, 713-729.
6. C. Genevois, D. Fabrègue, A. Deschamps, J. Poole, "On the coupling between precipitation and plastic deformation in relation with friction stir welding of AA2024 T3 aluminium alloy", Mat. Sci. Eng., Vol. 441A, 2006, P. 39-48.
7. C. Meran, "The joint properties of brass plates by friction stir welding", Mat. Des., In Press, Corrected Proof, Available online 6 July 2005,
8. J. Yan, M. Sutton, A. Reynolds, "Notch tensile response of mini-regions in AA2024 and AA2524 friction stir welds", Mat. Sci. Eng., Vol.427A, 2006, P. 289-300.
9. S. Lomolino, R. Tovo, J. dos Santos, "On the fatigue behaviour and design curves of friction stir butt-welded Al alloys", Inter. J. Fat., Vol 27, 2005, P. 305-316.
10. G. Buffa, L. Donati, L. Fratini, L. Tomesani, "Solid state bonding in extrusion and FSW: Process mechanics and analogies", J. Mat. Pro. Tec., Vo 177, N. 3, 2006, P. 344-347
11. K. V. Jata, S. L. Semiatin, "Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys", Scr. Mat., Vol. 43, 2000, P. 743-749.
12. G. Salem, "Friction stir weld evolution of dynamically recrystallized AA 2095 weldments", Scr. Mat., Vol. 49, 2003, P. 1103-1110.

13. A.L. Etter, T. Baudin, N. Fredj, R. Penelle, "Recrystallization mechanisms in 5251 H14 and 5251 O aluminum friction stir welds ", Mat. Sci. Eng., Vol 445A, 2007, P. 94-99
14. William F. Smith, "Structure and Properties of Engineering materials", McGraw-Hill, 1987.

جدول ۱- درصد وزنی عناصر شیمیایی آلیاژ 2024-T851.

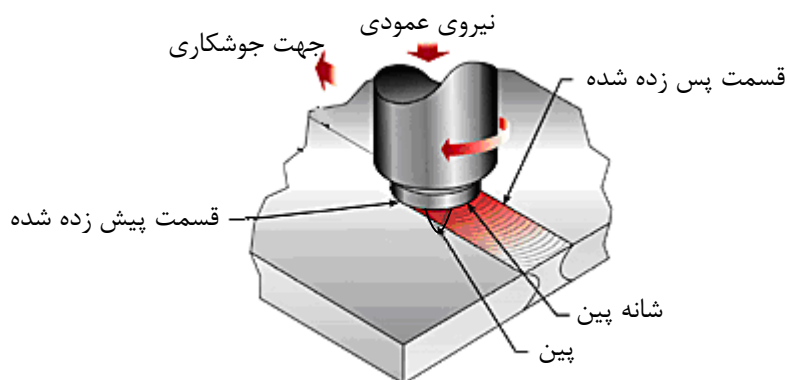
Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Al
۰/۱۱	۰/۲۶	۰/۷۲	۱/۵۰	۴/۴۳	Base

جدول ۲- خواص مکانیکی آلیاژ 2024-T851.

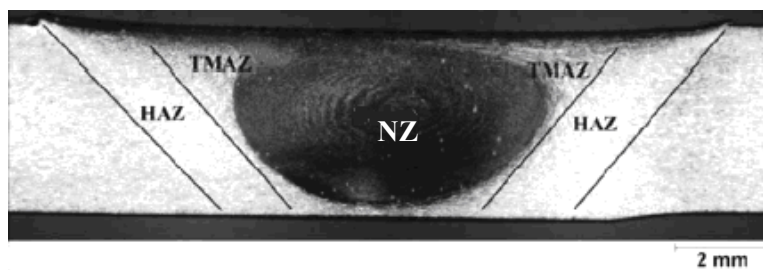
HB	%E	UTS (MPa)	YS (MPa)	
۱۵۵	۷/۲	۵۰۰	۴۶۵	در جهت نورد
۱۵۵	۵/۵	۴۹۵	۴۵۸	در جهت عمود بر نورد

جدول ۳- شرایط جوشکاری FSW.

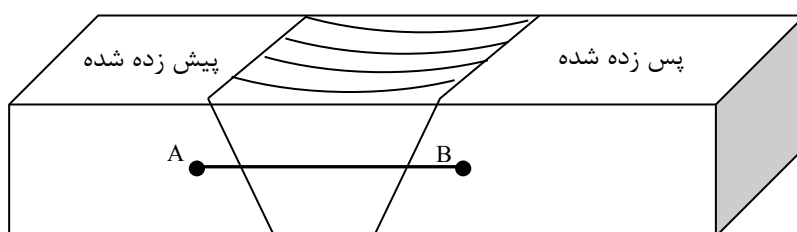
v (mm/min)	$\omega$ (rpm)	نام نمونه
۱۰۰	۹۰۰	TAX
۱۵۰	۹۰۰	TAY
۲۰۰	۹۰۰	TAZ



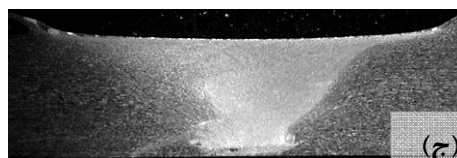
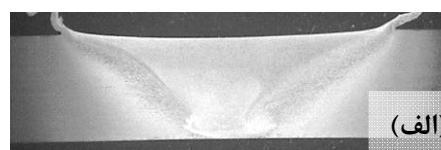
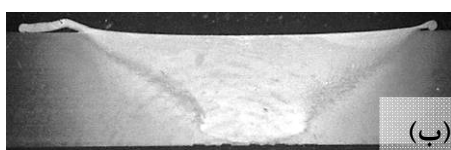
شکل ۱- شماتیک فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی



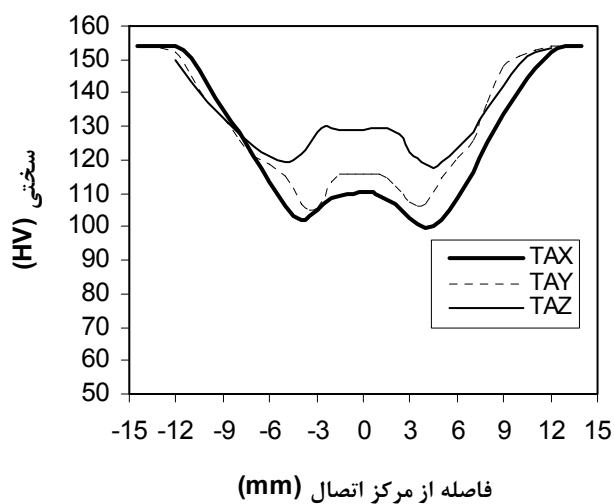
شکل ۲ - مناطق مختلف به وجود آمده در منطقه‌ی اتصال FSW [۹]



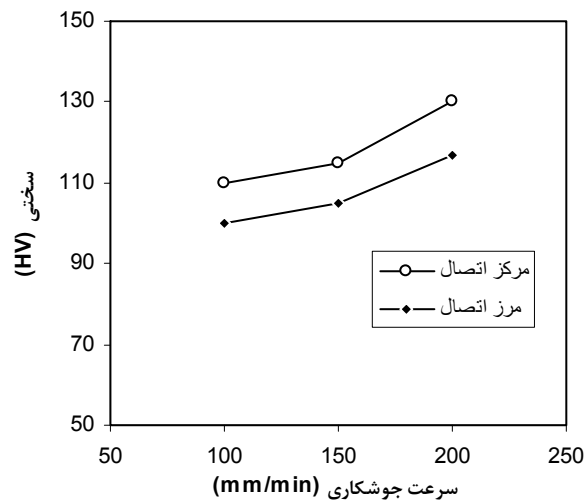
شکل ۳ - شماتیک مکان میکرو سختی سنجی



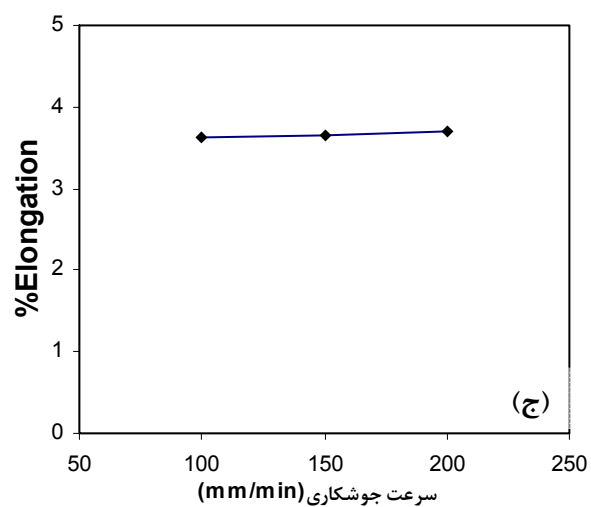
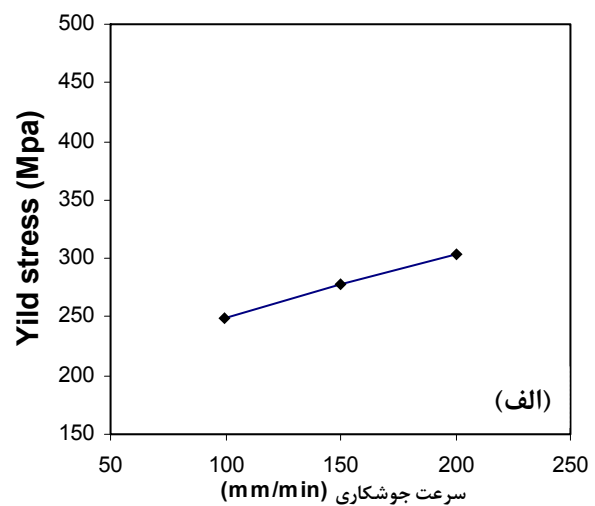
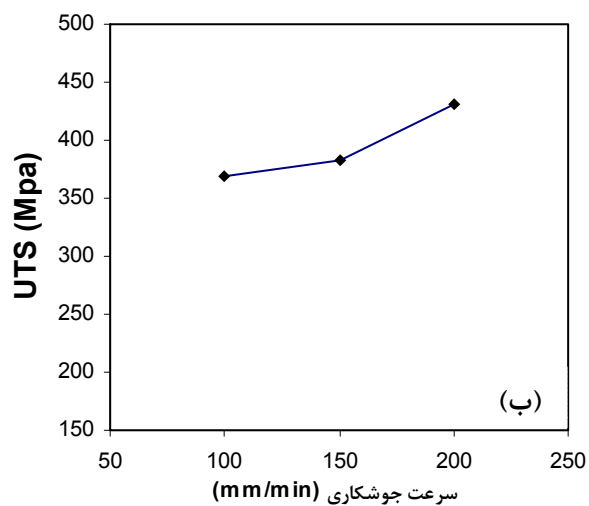
شکل ۴ - مقاطع خط اتصال الف (TAX) ب (TAY) ج (TAY)



شکل ۵ - پروفیل سختی از مکان نشان داده شده در شکل ۲ برای تمام نمونه ها



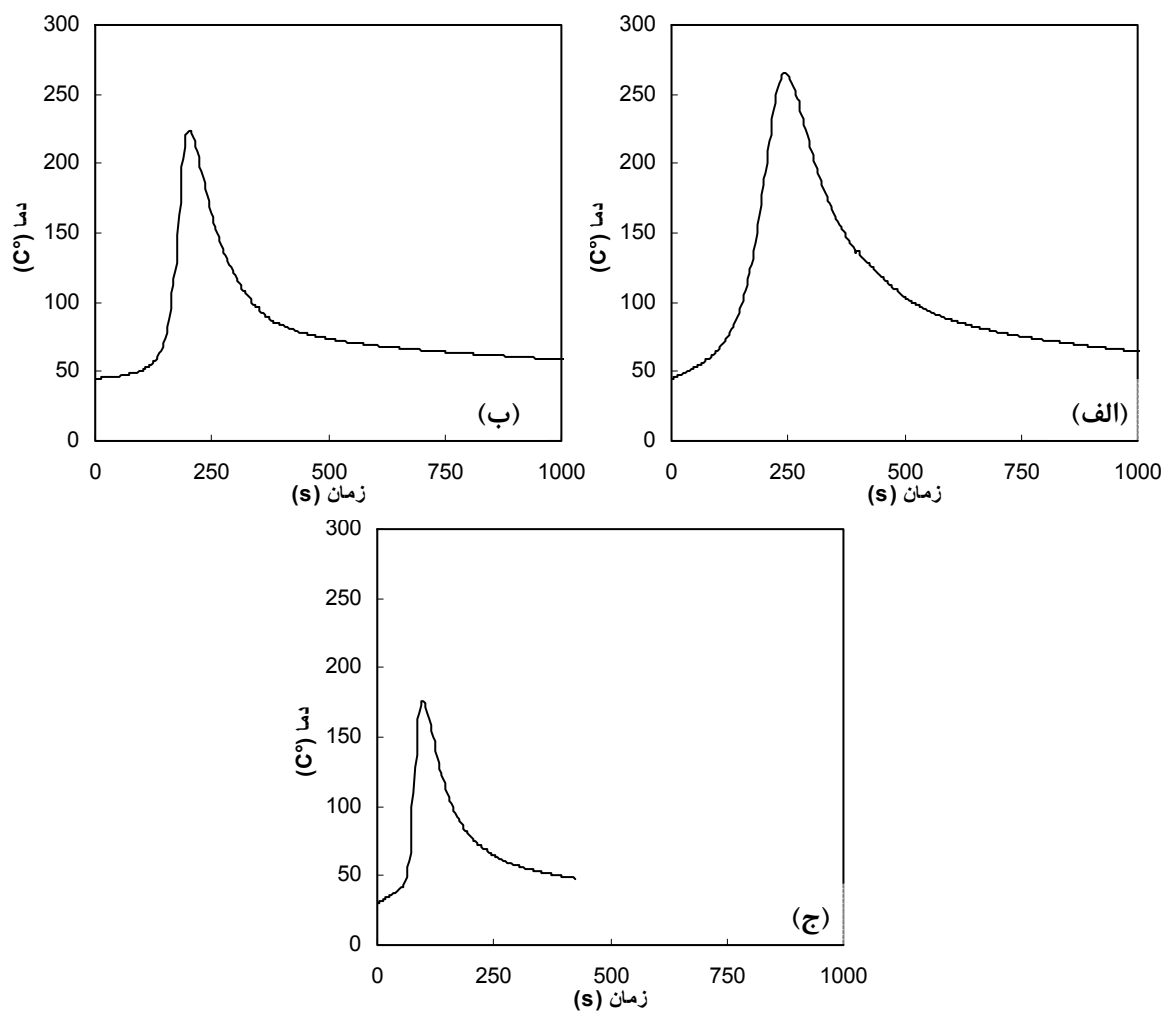
شکل ۶- تغییرات سختی مرکز اتصال و مرز اتصال با افزایش سرعت جوشکاری



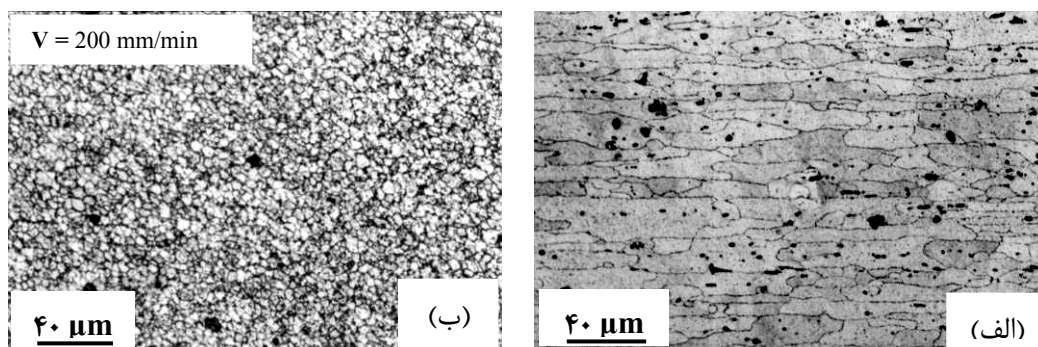
شکل ۷- تغییرات خواص کششی عمود بر مقطع اتصال با افزایش سرعت جوشکاری

الف) استحکام تسلیم ب) استحکام کششی ج) درصد تغییر طول نسبی





شکل ۸- تغییرات دما بر حسب زمان (الف) TAX (ب) TAY (ج) TAZ



شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به (الف) فلز پایه (ب) مقطع اتصال