

## بررسی امکان سخت کردن ضربه‌ای نواحی اطراف جوش آلیاژهای آلومینیم توسط پرتوهای الکترونی پرنرژی

محمد فرنوش

مربی گروه مهندسی متالورژی و مواد - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

امیر ریاحی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی و مواد - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۰/۲/۲۲، تاریخ تصویب ۸۰/۱/۳۰)

### چکیده

در تحقیق حاضر امکان سخت کردن ضربه ای نواحی اطراف جوش در آلیاژهای آلومینیم ۵۰۱۰ و ۶۰۶۳ توسط پرتوهای الکترونی پرنرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه های جوشکاری شده از هر آلیاژ توسط شتاب دهنده الکترون غیر خطی رودترون در مدت زمان ۵ ثانیه و شدت جریان ۶mA با انرژی ثابت ۱۰ MeV بصورت استاتیک تحت پرتو دهی باشدت های متفاوت گردید. نتایج حاصل از آزمایش سختی سنجی روی نمونه ها نشان می دهد که بیشترین افزایش سختی در نواحی اطراف جوش آلیاژ ۶۰۶۳ بعد از اعمال پرتوهای الکترونی در دز ۶۹/۹۹ KGY ایجاد گردید. نتایج مطالعات انجام شده روی نمونه ها توسط آزمایشهای متالوگرافی، تحلیل گر تصویری، میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ الکترونی عبوری حاکی از آن است که سخت کردن ضربه ای در نمونه ها ایجاد نشده و افزایش سختی ایجاد شده ناشی از اثر پرتوهای الکترونی بر روی ماده است.

واژه های کلیدی: آلومینیم، جوشکاری، پرتوهای الکترونی، سختی

### مقدمه

سخت کردن ضربه ای وجود دارد، از جمله استفاده از امواج الکترونی است که سبب ایجاد ضربه در فلز و سخت کردن آن می شود. با استفاده از پرتوهای الکترونی پرنرژی زیاد، در مدت زمان کوتاه و تمرکز آن به فلز می توان در ساختار آن ایجاد نواقص و عیوب شبکه ای کرد، که این عیوب مانع حرکت نابجایی ها در فلز می گردند، در نتیجه سختی فلز افزایش می یابد.

نواحی اطراف جوش (HAZ) آلیاژهای آلومینیم دارای استحکام کمتری نسبت به بقیه ساختار هستند [۴] که این نواحی، نقاط ضعف ساختار هستند. برای رفع این نقص باید به طریقی سختی نواحی اطراف جوش را بالا برد. سختی این مناطق رامی توان بوسیله عملیات حرارتی بعد از جوشکاری یا نور کردن گرده جوش، یا ضربه زدن انفجاری بالا برد. اما کثراوقات این روشها نامطلوب و یا غیر قابل انجام شدن هستند. اخیراً روشهای دیگری مثل سخت کردن ضربه ای توسط اشعه لیزر پالسی [۵] و سخت کردن ضربه ای توسط پرتوهای الکترونی پرنرژی [۶] برای افزایش سختی نواحی اطراف جوش آلیاژهای آلومینیم تحت تحقیق و بررسی قرار گرفته

روشهای مختلفی برای سخت کردن فلزات وجود دارند. از آن جمله می توان روشهای عملیات حرارتی، کار سختی و تغییر فرم مکانیکی را نام برد. اما در این فرآیندها سرعت تغییر فرم (سرعت کرنش) و سخت کردن پایین است. روشهای دیگری نیز برای سخت کردن فلزات وجود دارند. یکی از آنها سخت کردن ضربه ای است. در این روش می توان با اعمال نیروی زیاد در زمان کوتاهی سختی را افزایش داد و حتی تغییر فرم پلاستیک ایجاد کرد. برای ایجاد سخت کردن ضربه ای، فرایندهای مختلفی وجود دارد. یکی از این فرایندها، سخت کردن انفجاری [۱] است. در این روش با استفاده از انرژی حاصل از انفجار یک ماده منفجره می توان نیروی زیادی را در مدت زمان کوتاهی به یک فلز اعمال کرد که علاوه بر کار سختی می تواند منجر به تغییر شکل آن شود. روش بعدی، سخت کردن ضربه ای توسط اشعه لیزر [۲] (ویا با استفاده از روش امواج الکترومغناطیس [۳]) است. در این روش با استفاده از پرتولیزر پرنرژی و فاصله زمانی پالس مشخص و معین می توان یک فلز را تحت سخت کردن ضربه ای قرار داد. روشهای دیگری نیز برای

الکترونی عبوری و تحلیل گر تصویری قرار گرفتند.

در این تحقیق سختی سنجی بوسیله روش ویکرز بانیروی  $10\text{KP}$  (۹۸/۰۴N) انجام شد. ابتدا نمونه های اولیه  $5010$  و  $6063$  قبل از جوشکاری تحت آزمایش سختی سنجی قرار گرفتند. سپس نمونه های جوشکاری شده از دو آلیاژ (که طول آنها  $10\text{ cm}$  و خط جوش در وسط آنها بود) از وسط خط جوش به سمت دو طرف نمونه در نقاط متوالی با فاصله یکسان  $5\text{ mm}$  از یکدیگر به سمت دو انتهای نمونه، سختی سنجی شدند و پروفیل سختی در طول نمونه جوشکاری شده رسم شد. پس از پرتو دهی، نمونه ها در همان نقاط قبلی مجدداً سختی سنجی شد و پروفیل سختی در هر نمونه بعد از پرتو دهی رسم شد. پروفیل سختی قبل و بعد از پرتو دهی مقایسه شد.

نمونه هایی که تحت آزمایش SEM و متالوگرافی قرار گرفتند برای انجام آزمایش TEM استفاده شدند. ابتدا نمونه ها توسط سمباده به ضخامت  $0.25\text{ mm}$  رسانده شدند. سپس توسط دستگاه اسپارک اروژن از هر نمونه تعدادی دیسک به قطر  $3\text{ mm}$  جدا گردید. سپس دیسکها توسط دستگاه جت الکتروپولیش با استفاده از محلول  $25\text{ cc}$  اسید پرکلریک،  $75\text{ cc}$  متانول در ولتاژ  $14\text{ V}$  -  $12\text{ V}$  با شدت جریان  $0.2\text{ A}$  -  $0.15\text{ A}$  الکتروپولیش گردیدند تا دیسکها سوراخ شدند.

## نتایج

نتایج سختی سنجی در جدول (۱) ارائه گردیده است.

### نمونه های $5010$

باتوجه به جدول (۱) مشاهده می شود که پس از جوشکاری سختی در منطقه HAZ مجاور جوش به مقدار زیادی نسبت به سختی اولیه کاهش یافته است. اما پس از پرتو دهی افزایش سختی قابل ملاحظه ای مشاهده نمی شود. در بین این نمونه هانمونه شماره ۴۱ بیشترین افزایش سختی را از خود نشان داده است.

### نمونه های $6063$

باتوجه به جدول (۱) مشاهده می شود که سختی پس از جوشکاری در منطقه HAZ مجاور جوش به مقدار نسبتاً زیادی کاهش یافته است و پس از پرتو دهی نیز سختی به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. در بین این نمونه هانمونه شماره ۳ بیشترین افزایش سختی را از خود نشان داده است.

است. در روش سخت کردن ضربه ای توسط پرتوهای الکترونی سعی می شود با استفاده از ضربات الکترونیهای پرتو دهی بر روی نواحی اطراف جوش آلیاژهای آلومینیم در آن ایجاد کار سختی کرد و سختی این مناطق را بالا برد.

هدف از این تحقیق، بررسی امکان سخت کردن ضربه ای نواحی اطراف جوش آلیاژهای آلومینیم  $5010$  (عملیات حرارتی ناپذیر) و  $6063$  (عملیات حرارتی پذیر) بوسیله پرتوهای الکترونی پرتو دهی است.

## روش تحقیق

در این تحقیق از دو ماده اولیه استفاده شده است:

۱- آلیاژ آلومینیم عملیات حرارتی ناپذیر  $5010$  نورد شده  
 $0.16\text{Mn}$  -  $0.47\text{Fe}$  -  $0.24\text{Si}$  -  $0.02\text{Cu}$  -  $0.02\text{Ti}$   
Al -  $0.28\text{Mg}$  ( درصدوزنی ) به ضخامت  $2/5\text{ mm}$ .

۲- آلیاژ عملیات حرارتی پذیر  $6063$  اکستروژن شده  
 $0.13\text{Ti}$  -  $0.39\text{Si}$  -  $0.21\text{Fe}$  -  $0.59\text{Mg}$  - Al ( درصدوزنی ) به ضخامت  $3\text{ mm}$ .

جهت تهیه نمونه های جوشکاری ابتدائاً سمه هایی از آلیاژ  $5010$  در جهت نورد و آلیاژ  $6063$  در جهت اکستروژن بریده شد. سپس دو تسمه از هر آلیاژ به ابعاد  $10\text{ cm} \times 5\text{ cm}$  کنار هم قرار داده شده و به صورت لب به لب عمود بر جهت نورد و اکستروژن توسط روش جوش قوس الکتریکی با الکتروود تنگستن باحفاظ گاز خنثی (TIG) با فیلر متال  $4047\text{ (Al}_{12}\text{Si)}$  با جریان DC از دو طرف جوشکاری شدند. در کل ۵ نمونه جوشکاری شده هریک از آلیاژها مورد آزمایش پرتو دهی قرار گرفتند. برای انجام آزمایشها، مناطق اطراف جوش (HAZ) نمونه های جوشکاری شده هریک از آلیاژها از نمونه ها جدا شدند. پس از آن، این مناطق تحت آزمایش پرتو دهی قرار گرفتند. پرتو دهی نمونه ها توسط یک شتاب دهنده الکترون (رودوترون) غیر خطی انجام شد. نمونه ها در مدت زمان ۵ ثانیه و در شدت جریان ثابت  $6\text{ mA}$  با انرژی ثابت  $10\text{ MeV}$  به صورت استاتیک پرتو دهی شدند. تغییرات دز (dose) پرتو الکترونی در زیر محل خروج پرتو به صورت گوسی بود، یعنی در وسط محل خروج پرتو الکترونی دز ماکزیمم بود و در اطراف آن، دز کاهش می یافت.

نمونه های اولیه، نمونه های جوشکاری شده و نمونه های جوشکاری شده پرتو دهی شده با دز متفاوت مورد سختی سنجی و بررسی ریزساختاری توسط میکروسکوپ های الکترونی روبشی،

جدول ۱: مقادیر سختی نمونه های اولیه، نواحی اطراف جوش (HAZ) و نواحی (HAZ) پرتو دهی شده و مقادیر دزد یافتی پرتوافکنی.

شماره نمونه	میانگین سختی اولیه، (Hv)	میانگین سختی نواحی HAZ بعد از جوشکاری، (Hv)	میانگین سختی نواحی HAZ بعد از پرتو دهی، (Hv)	میزان انرژی دریافتی (KGY)
نمونه ۵۰۱۰ اولیه	۸۰	-	-	-
نمونه ۱۱ (۵۰۱۰)	-	۴۲	۴۵	۷۶/۴۳
نمونه ۲۱ (۵۰۱۰)	-	۴۱	۴۳	۸۴/۳۹
نمونه ۳۱ (۵۰۱۰)	-	۴۲	۴۴	۷۰/۱۸
نمونه ۴۱ (۵۰۱۰)	-	۴۲	۴۸	۴۳/۵۸
نمونه ۵۱ (۵۰۱۰)	-	۴۳	۴۶	۲۵/۶۲
نمونه ۶۰۶۳ اولیه	۸۵	-	-	-
نمونه ۱ (۶۰۶۳)	-	۵۳	۶۱	۷۶/۹۳
نمونه ۲ (۶۰۶۳)	-	۶۲	۶۵	۸۴/۰۷
نمونه ۳ (۶۰۶۳)	-	۵۲	۶۲	۶۹/۹۹
نمونه ۴ (۶۰۶۳)	-	۵۷	۶۳	۳۹/۲۳
نمونه ۵ (۶۰۶۳)	-	۵۴	۵۹	۲۲/۱۱

## نتایج بررسی های ریز ساختاری بامیکروسکوپ نوری و تحلیل گر تصویری

### نمونه های ۵۰۱۰

نمونه ۵۰۱۰ اولیه ریز ساختار شامل زمینه و دونوع رسوب است. رسوبهای درشت،  $(Fe, Mn)Al_6$  و رسوبهای ریز  $Al, Mn, Si, Fe$  هستند که در زمینه پخش شده اند زمینه محلول جامدی از  $Al$  با عناصر آلیاژی مانند  $Mg$  است. متوسط درصد فاز  $(Fe, Mn)Al_6$  برابر ۱/۶٪ و متوسط درصد فاز  $Al, Mn, Si, Fe$  برابر ۱/۵۴٪ است.

HAZ نمونه ۵۰۱۰ جوشکاری شده ریز ساختار شامل زمینه به صورت دانه بندی با همان رسوبهای موجود در نمونه ۵۰۱۰ پایه است. این دانه بندی نشان دهنده بوجود آمدن تبلور مجدد در منطقه تحت تأثیر حرارت قرار گرفته (HAZ) اطراف جوش است. متوسط درصد فاز  $(Fe, Mn)Al_6$  برابر ۲/۴۳٪ و متوسط درصد فاز  $Al, Mn, Si, Fe$  برابر ۱/۶۱٪ است.

HAZ نمونه شماره ۴۱ (۵۰۱۰) بعد از پرتو دهی: ریز ساختار مانند ساختار نمونه جوش داده شده است و تغییری در آن دیده نمی شود. متوسط درصد فاز  $(Fe, Mn)Al_6$  برابر ۱/۵۹٪ و متوسط درصد فاز  $Al, Mn, Si, Fe$  برابر ۱/۶۶٪ است.

### نمونه های ۶۰۶۳

نمونه ۶۰۶۳ اولیه: ریز ساختار شامل زمینه بادونوع رسوب است. رسوبهای درشت  $Fe_3SiAl_{12}$  و رسوبهای ریز  $Mg_2Si$  هستند که در زمینه پخش شده است. در این نمونه متوسط درصد فاز  $Fe_3SiAl_{12}$  برابر ۲/۸۹٪ و متوسط درصد فاز  $Mg_2Si$  ۴/۲۳٪ است.

HAZ نمونه ۶۰۶۳ جوشکاری شده: ریز ساختار شامل زمینه به صورت دانه بندی با رسوبهای موجود در نمونه ۶۰۶۳ پایه است. در این نمونه متوسط درصد فاز  $Fe_3SiAl_{12}$  برابر ۱/۷۸٪ و متوسط درصد فاز  $Mg_2Si$  برابر ۰/۲۷٪ است. این مسئله نشان دهنده کاهش درصد رسوب بعد از جوشکاری است. این کاهش درصد رسوب و ساختار دانه بندی نشان دهنده آنیل جزئی در HAZ و همچنین تجزیه و انحلال رسوبهای فوق در زمینه است.

HAZ نمونه شماره ۳ (۶۰۶۳) بعد از پرتو دهی: ریز ساختار مانند ساختار نمونه جوش داده شده است. در این نمونه درصد فاز  $Fe_3SiAl_{12}$  برابر ۱/۳٪ و متوسط درصد فاز  $Mg_2Si$  برابر ۰/۵۹٪ است. این امر نشان دهنده این است که درصد رسوبهای ریز  $Mg_2Si$  نسبت به نمونه جوش داده شده افزایش یافته است که به علت اعمال پرتوهای الکترونی است.

## نتایج بررسی ریزساختار با میکروسکپ الکترونی عبوری (TEM) نمونه های ۵۰۱۰

نمونه ۵۰۱۰ اولیه: عکسهای TEM حاکی از یک ساختار کارسرد شده است که شامل نابجایی های بادانسیته زیاد است. شکل (۲-ا) ساختار این نمونه را نشان می دهد.

HAZ نمونه ۵۰۱۰ جوشکاری شده: عکسهای TEM از این نمونه حاکی از یک ساختار آنیل شده است که شامل دانه بندی است در صورتیکه در نمونه پایه دانه بندی مشاهده نمی شود. همچنین در بزرگنمایی های بالاتر دیده می شود که دانسیته نابجایی ها نسبت به حالت قبلی کاهش یافته است. شکل (۲-ب) این حالت را نشان می دهد.

HAZ نمونه شماره ۴۱ (۵۰۱۰) بعد از پرتو دهی: عکسهای TEM از این نمونه مانند نمونه قبلی از دانه بندی تشکیل شده و دارای دانسیته نابجایی خطی کم است. اما در بزرگنمایی بالاتر حلقه های نابجایی دیده می شوند که نشان دهنده اثر پرتو دهی با پرتوهای الکترونی است. این حلقه های نابجایی به صورت پراکنده در نمونه پخش شده اند و هماهنگی خاصی ندارند. شکل (۲-ج) حلقه های نابجایی را در بزرگنمایی بالا نشان می دهد.

### نمونه های ۶۰۶۳

نمونه ۶۰۶۳ اولیه: عکسهای TEM از این نمونه حاکی از یک ساختار اکستروژن شده است که دارای دانسیته نابجایی نسبتاً زیاد است. شکل شماره (۴-ا) ساختار این حالت را نشان می دهد.

## نتایج بررسی ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه های ۵۰۱۰

نمونه ۵۰۱۰ اولیه از زمینه با رسوبهای نسبتاً درشت  $(Fe, Mn)Al_6$  و رسوبهای ریز  $Al, Mn, Si, Fe$  تشکیل شده است (شکل ۱-ا). HAZ نمونه ۵۰۱۰ جوشکاری شده (شکل ۱-ب) و همچنین HAZ نمونه شماره ۴۱ (۵۰۱۰) بعد از پرتو دهی (شکل ۱-ج) نیز به همین صورت است. در شکل (۱-ب) مشاهده می شود که مقدار رسوبها کاهش یافته است که علت آن حل شدن رسوبها در اثر حرارت جوشکاری است. اما در شکل (۱-ج) مشاهده می شود که بعد از پرتو دهی مقدار رسوبها افزایش یافته که علت آن دیفوزیون در اثر پرتو دهی است.

### نمونه های ۶۰۶۳

نمونه ۶۰۶۳ اولیه از زمینه با رسوبهای درشت  $Fe_3SiAl_{12}$  و رسوبهای ریز  $Mg_2Si$  پخش شده در زمینه تشکیل شده است که زمینه محلول جامد از آلومینیم با عناصر آلیاژی حل شده در آن است (شکل ۳-ا). HAZ نمونه ۶۰۶۳ جوشکاری شده (شکل ۳-ب) و همچنین HAZ نمونه شماره ۳ (۶۰۶۳) بعد از پرتو دهی (شکل ۳-ج) نیز به همین صورت است. در شکل (۳-ب) مشاهده می شود که مقدار رسوبها کاهش یافته است که علت آن حل شدن رسوبها در اثر حرارت جوشکاری است. اما در شکل (۳-ج) مشاهده می شود که مقدار رسوبها افزایش یافته که علت آن دیفوزیون در اثر پرتو دهی است.



شکل ۱: تصاویر SEM از نمونه های ۵۰۱۰. (a) نمونه اولیه. (b) HAZ نمونه جوشکاری شده. (c) HAZ نمونه جوشکاری شده و پرتو دهی شده (نمونه ۴۱). رسوبهای درشت از جنس  $(Fe, Mn)Al_6$  و رسوبهای ریز از جنس  $Al, Mn, Fe, Si$  در زمینه آلومینیم هستند.

مشاهده می شود که سختی در ناحیه تحت تأثیر حرارت قرار گرفته کنار جوش کاهش یافته است.

#### نمونه های ۶۰۶۳

باتوجه به شکل‌های متالوگرافی مشاهده می شود که بعد از جوشکاری در منطقه تحت تأثیر حرارت قرار گرفته کنار جوش (HAZ)، بسیاری از سوپهادر زمینه حل شده‌اند و حالت آنیل جزئی اتفاق افتاده است. بعد از جوشکاری در HAZ، ساختار دانه بندی نیز دیده می شود در صورتیکه قبل از جوشکاری در ساختار دانه بندی دیده نمی شود. باتوجه به تصاویر TEM مشاهده می شود که قبل از جوشکاری ساختار دارای نابجایی با دانسیته زیاد است که در اثر اکستروژن بوجود آمده است. اما بعد از جوشکاری دانسیته نابجایی ها کم شده است. در نتیجه در این نمونه به علت از بین رفتن حالت پیرسختی و کاهش دانسیته نابجایی در اثر حرارت جوشکاری سختی در ناحیه HAZ کنار جوش کاهش یافته است.

#### اثر پرتو دهی الکترونی روی ساختار منطقه تحت تأثیر حرارت قرار گرفته کنار جوش (HAZ)

##### نمونه های ۵۰۱۰

باتوجه به آزمایش های متالوگرافی، SEM اثر سخت شدن ضربه‌ای توسط پرتو دهی روی نمونه های ۵۰۱۰ دیده نمی شود و نمونه های قبل و بعد از پرتو دهی تقریباً مشابه هستند. اما در

HAZ نمونه ۶۰۶۳ جوشکاری شده: عکسهای TEM از این نمونه حاکی از یک زمینه تک فاز است که دانسیته نابجایی های آن کاهش یافته است. در اثر حرارت جوشکاری هم جیتی نابجایی ها از بین رفته و نابجایی ها به صورت نامنظم پخش شده‌اند. شکل (۴-ب) ساختار این نمونه را نشان می دهد.

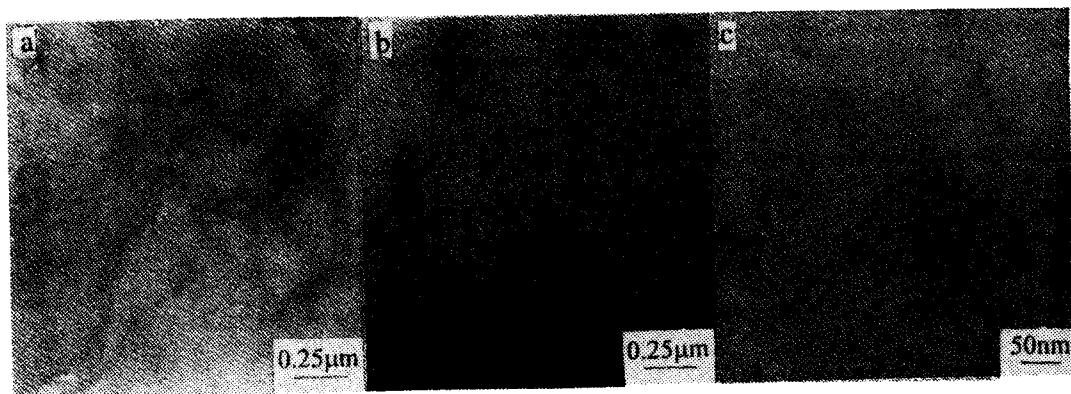
HAZ نمونه شماره ۳ (۶۰۶۳) بعد از پرتو دهی: عکسهای TEM از این نمونه همانند نمونه جوشکاری شده است. اما در بزرگنمایی های بالاتر حلقه های نابجایی دیده می شود که نشان دهنده اثر پرتو دهی با پرتو های الکترونی است. این حلقه های نابجایی به صورت پراکنده در نمونه پخش شده‌اند و هماهنگی خاصی ندارند. شکل (۴-ج) حلقه های نابجایی را در بزرگنمایی بالا نشان می دهد.

#### بحث

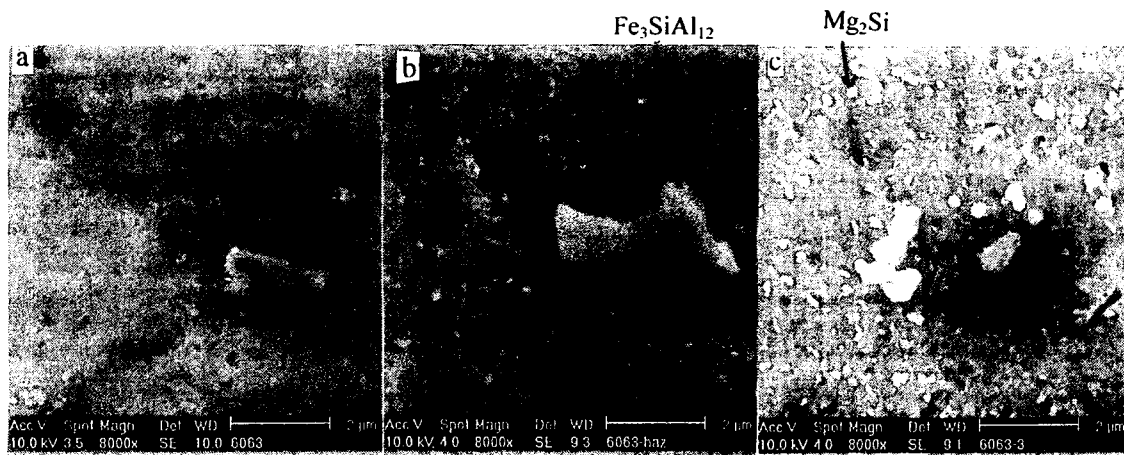
#### علل کاهش سختی HAZ بعد از جوشکاری

##### نمونه های ۵۰۱۰

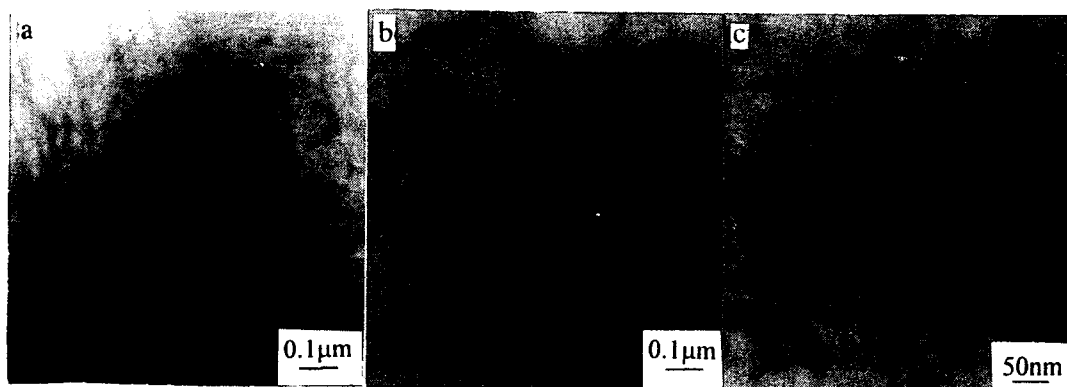
باتوجه به شکل‌های متالوگرافی مشاهده می شود که در این نمونه بعد از جوشکاری در ناحیه تأثیر پذیرفته در اثر حرارت جوشکاری (HAZ) آنیل شده و تبلور مجدد اتفاق افتاده است. ساختار حالت نورد شده، در اثر حرارت جوشکاری به حالت آنیل شده تبدیل شده و به صورت دانه بندی شده است. همچنین باتوجه به عکسهای TEM مشاهده می شود که قبل از جوشکاری، ساختار دارای نابجایی با دانسیته زیاد است. اما بعد از جوشکاری دانسیته نابجایی در HAZ کاهش یافته است. در نتیجه پس از جوشکاری



شکل ۲: تصاویر TEM از نمونه های ۵۰۱۰. (a) نمونه اولیه: ساختار شامل نابجایی های خطی با دانسیته زیاد است. (b) HAZ نمونه جوشکاری شده: دانسیته نابجایی های خطی کاهش یافته است. (c) HAZ نمونه جوشکاری شده و پرتو دهی شده (نمونه ۴۱): در بزرگنمایی بالا حلقه های نابجایی دیده می شود.



شکل ۳: تصاویر SEM از نمونه‌های ۶۰۶۳ (a) نمونه اولیه. HAZ (b) نمونه جوشکاری شده. HAZ (c) نمونه جوشکاری شده و پرتو دهی شده (نمونه ۳). رسوبهای درشت از جنس  $Fe_3SiAl_{12}$  و رسوبهای ریز از جنس  $Mg_2Si$  در زمینه آلومینیم هستند.



شکل ۴: تصاویر TEM از نمونه‌های ۶۰۶۳ (a) نمونه اولیه: ساختار شامل نابجانی‌های خطی با دانسیته زیاد است. HAZ (b) نمونه جوشکاری شده: دانسیته نابجانی‌های خطی کاهش یافته است و هم‌جهتی آنها از بین رفته است. HAZ (c) نمونه جوشکاری شده و پرتو دهی شده (نمونه ۳): در بزرگنمایی بالا حلقه‌های نابجانی دیده می‌شود.

شکل دیده می‌شود که دانسیته حلقه‌های نابجایی بسیار کم است و نحوه پخش آنها یکنواخت نیست. در نتیجه اثراتی که به علت پرتو دهی الکترونی در ساختار ایجاد شده است نمی‌تواند باعث افزایش سختی پس از پرتو دهی شود. علت این عدم افزایش سختی

آزمایش‌های TEM با بزرگنمایی‌های بسیار بالا اثر پرتو دهی روی ساختار HAZ نمونه ۴۱ (۵۰۱۰) دیده می‌شود. با توجه به شکل (۲-۳) حلقه‌های نابجایی<sup>۱</sup> دیده می‌شود. این حلقه‌های نابجایی در اثر پرتو دهی الکترونی در ساختار نمونه ایجاد شده است. در این

## دلایل ایجاد نشدن سخت شدن ضربه ای

دلیل ایجاد نشدن سخت شدن ضربه ای در HAZ دو آلیاژ ۵۰۱۰ و ۶۰۶۳ به نحوه پرتو دهی الکترونی ارتباط می یابد. در این تحقیق نمونه هابصورت استاتیک و در مدت زمان ۵ ثانیه با انرژی ثابت ۱۰ MeV و شدت جریان ۶ mA پرتو دهی شد. توزیع پرتوی الکترونی در محل خروج پرتو به صورت گوسی بود یعنی در وسط محل خروج پرتو، انرژی دارای حداکثر مقدار در اطراف آن بتدریج کاهش می یافت.

برای ایجاد سختی ضربه ای توسط پرتوهای الکترونی لازم است که الکترونها ی زیاد با انرژی زیاد در محل مورد نظر روی فلز در مدت زمان کوتاهی برخورد کنند، بدون اینکه سبب بالارفتن درجه حرارت در آن نقطه شوند باعث ایجاد نقص های بلوری در شبکه فلز و مانع حرکت نابجایی ها شوند (در نتیجه باعث ایجاد کار سختی شوند). اگر پرتو دهی باعث بالارفتن درجه حرارت فلز شود باعث آنیل شدن و در نتیجه از بین رفتن نقص های ایجاد شده در اثر پرتو دهی می شود. در نتیجه برای ایجاد کردن سخت شدن ضربه ای در فلز باید بتوان پرتوهای الکترونی را به صورت پالسی در مدت زمان کوتاهی به نقاط مورد نظر نمونه (بطور متمرکز) ساطع کرد. همچنین اگر شدت جریان دستگاه پرتو دهی زیاد باشد تعداد الکترونها ی برخورد کننده به سطح نمونه زیاد می شود و در اثر برخورد پیاپی الکترونها به سطح نمونه در سطح نمونه کار سختی ایجاد می شود و سختی بالایی رود.

به علت محدودیت هایی که در دستگاه پرتو دهی وجود داشت امکان پرتو دهی برای ایجاد شدن سخت کردن ضربه ای وجود نداشت. شدت جریان دستگاه پرتو دهی بسیار پایین و در نتیجه تعداد الکترونها ی برخورد کننده به سطح نمونه کم بود. همچنین امکان متمرکز کردن پرتوها در نقاط مورد نظر نمونه (HAZ) و اعمال پرتو بصورت پالسی در مدت زمان کوتاه وجود نداشت. در نتیجه تعداد نقص های ایجاد شده در اثر پرتو دهی کم بود و سخت شدن ضربه ای در نمونه ها ایجاد نشد. در نهایت در اثر این پرتو دهی دیفوزیون اتمها تسریع شده و سبب ایجاد رسوب های ریز بطور یکنواخت در نمونه گردید که این مسئله سبب افزایش سختی نمونه ها گردید.

## نتیجه گیری

۱- پرتو دهی الکترونی (به صورتی که در این تحقیق انجام شده) در نمونه جوشکاری شده ۶۰۶۳ سبب افزایش قابل ملاحظه سختی

به نحوه پرتو دهی برمی گردد. زیرا توزیع پرتوهای الکترونی در زیر محل خروج پرتو به صورت گوسی است یعنی در مرکز محل خروج پرتو بیشترین شدت و در کناره های محل خروج پرتو کمترین شدت پرتو دهی وجود داشت. در نتیجه امکان متمرکز کردن پرتوهای الکترونی در منطقه HAZ نمونه ها و اعمال پرتوهای الکترونی به صورت پالسی وجود نداشت. به همین دلیل تعداد حلقه های نابجایی و نقص های ایجاد شده در اثر پرتو دهی کم بود. همچنین مدت زمان پرتو دهی زیاد بود که این امر سبب دیفوزیون در اثر پرتو دهی می شد. در نتیجه تعدادی از حلقه های نابجایی و نقص هایی که در اثر پرتو دهی ایجاد شده بودند به علت دیفوزیون در اثر پرتو دهی از بین رفتند. این موضوع سبب شد که بعد از پرتو دهی، افزایش سختی قابل ملاحظه ای مشاهده نشود. در نتیجه سخت شدن ضربه ای در این نوع پرتو دهی الکترونی ایجاد نشد.

باتوجه به نتایج تحلیل گر تصویری مشاهده می شود که در اثر پرتو دهی درصد فاز  $(Fe, Mn)Al_3$  بعد از پرتو دهی کاهش یافته است. علت این پدیده دیفوزیون در اثر پرتو دهی و در نتیجه حل شدن مقداری از این رسوبها در اثر پرتو دهی می باشد.

## نمونه های ۶۰۶۳

در این نمونه هانیزمانند نمونه های ۵۰۱۰ اثر پرتو دهی الکترونی روی ساختار توسط TEM مشخص می شود. باتوجه به شکل (۴-۱) حلقه های نابجایی ایجاد شده در اثر پرتو دهی HAZ نمونه شماره ۳ (۶۰۶۳) در بزرگنمایی بسیار بالا دیده می شوند. در این نمونه نیز دانسیته حلقه های نابجایی بسیار کم و نحوه پخش آنها یکنواخت نیست. باتوجه به توضیحات قسمت قبل این پدیده به نحوه پرتو دهی نمونه برمی گردد. در نتیجه افزایش سختی قابل ملاحظه ای در اثر ایجاد این حلقه های نابجایی و نواقص پرتو دهی بوجود نمی آید. اما در این نمونه دیده می شود که سختی بعد از پرتو دهی به مقدار قابل توجهی بالارفته است. علت این افزایش سختی، افزایش درصد رسوبهای ریز  $Mg_3Si$  بعد از پرتو دهی است. بدلیل این که مکانیزم سخت شدن این آلیاژ سختی رسوبی است در نتیجه بعد از پرتو دهی ملاحظه می شود که سختی نمونه نسبت به قبل از پرتو دهی افزایش می یابد. علت افزایش این رسوبها بعد از پرتو دهی، دیفوزیون در اثر پرتو دهی است که باعث تجمع عناصر آلیاژی در نواقص و عیوب شبکه ای و در نتیجه تشکیل رسوب در این نواحی می گردد.

الف) پرتوهای الکترونی رابتوان به صورت پالسی به سطح نمونه ساطع کرد.

ب) پرتوهای الکترونی رابتوان در نقاط خاصی از نمونه (که مورد نظراست) متمرکز کرد.

پ) انرژی پرتوهای زیاد نباشد که باعث گرم شدن نمونه در مدت زمان کوتاهی شود.

ت) شدت جریان دستگاه پرتوهای زیاد باشد تا تعداد الکترونهاي برخوردکننده به سطح نمونه زیاد باشد.

در این تحقیق به دلیل عدم وجود دستگاه پرتوهای مناسب که بتوان چهار شرط فوق را توسط آن ایجاد کرد، سخت کردن ضربه‌ای در هیچ یک از نمونه‌ها ایجاد نشد.

### تشکر و قدردانی

بدین وسیله از ریاست محترم مرکز تحقیقات و کاربرد پرتو فرآیند یزد (سازمان انرژی اتمی) به خاطر حمایت مالی این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از همکاران گرامی دکتر حمید کاشانی، دکتر محمد حاج سعید، مهندس هوشنگ شکیبا تشکر و قدردانی می‌شود.

گردیده که علت آن ایجاد رسوب ریز و پخش یکنواخت آنها در زمینه است و به نقص های تشکیل شده در اثر پرتو دهی (مثل حلقه های نابجایی) بستگی ندارد. در HAZ نمونه جوشکاری شده ۵۰۱۰ دیده می شود که بعد از پرتو دهی، سختی افزایش قابل ملاحظه ای نداشته است.

۲ - پرتو دهی الکترونی در این تحقیق سبب ایجاد نقص هایی در شبکه بلوری مانند نقص فرانکل و حلقه های نابجایی شد، اما مقدار و نحوه توزیع این عیوب به حدی نبود که سختی رابه اندازه قابل ملاحظه ای بالا ببرد (بین نشین های ایجاد شده در اثر پرتو دهی در درجه حرارت های پایین حتی در ۱۰۰ درجه کلوین، دیفوزیون می کنند [۷]). به دلیل اینکه اولاً شدت جریان در دستگاه پرتو دهی کم بوده، در نتیجه تعداد الکترونهاي برخوردکننده به فلز کم بوده است. ثانیاً مدت زمان پرتو دهی و انرژی الکترونها زیاد بوده که باعث افزایش حرارت نمونه و از بین رفتن بسیاری از نقص های تشکیل شده در اثر پرتو دهی شده است. لذا تحت شرایط و متغیرهای بکار گرفته امکان سخت کردن ضربه ای میسر نمی گردد.

۳ - سخت کردن ضربه ای نواحی اطراف جوش آلیاژ آلومینیم کار سرد شده ۵۰۱۰ و آلیاژ پیرسخت شده ۶۰۶۳ توسط پرتوهای الکترونی به چند شرط انجام پذیر است:

### مراجع

- 1 - Esquivel, R. and Inal, O. T. (1995). "Characterization of shock - hardened Al - 8090 alloy." *Journal of Materials Science*, Vol. 30, P.5825.
- 2 - Fairand, B. P., Wilcox, B. A., Gallagher, W. J. and Williams, D. N. (1973). "Laser shock - induced microstructural and mechanical property changes in 7075 aluminum." *J. Appl. Phys.*, Vol. 43, P.3893.
- 3 - White, R. M. (1963). "Elastic wave generation by electron bombardment or electromagnetic wave absorption." *J. Appl. Phys.*, Vol. 34, P. 2123.
- 4 - Phillips, A. L. (1966). *Welding Handbook(AWS)*, Section 4, Macmillan & Co. LTD.
- 5 - Clauer, A. H., Fairand, B. P. and Wilcox, B. A. (1977). "Laser shock hardening of weld zones in Aluminum Alloy." *Metallurgical Transaction A*, December, Vol.8A, P. 1871.
- 6 - Dave, R., Goodman, D. L., Farnush, M., Eager, T. W. and Russell, K. C. (1993). "High energy electron beam(HEEB) processing of advanced material." *International Conference on Beam Processing of Advanced Materials*, Pennsylvania USA, P. 537.
- 7 - koutsky, J. and Jankocik. (1994). *Radiation damage of structural materials*, Amesterdam - London - New york - Tokyo, Nuclear Research Institute.



## واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Loop

2 - Gaussian

---