

بررسی جوشکاری لیزر پالسی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ بر اساس پیش بینی مدل - های فیزیکی ایجاد ترک گرم

حسین ابراهیم زاده^۱، حسن فرهنگی^۲،* سید علی اصغر اکبری موسوی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار، عضو هیات علمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، تهران، ایران

۳- دانشیار، عضو هیات علمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، تهران، ایران

*مسئول مکاتبات: h.ebrahimzadeh@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۹)

چکیده: به وسیله مدل‌های فیزیکی ارتباط بین متغیرهای جوشکاری و ترک گرم برقرار می‌شود. این مدل‌ها در مقیاس‌های میکرو، میانه و ماکرو موجود هستند. در این پژوهش ورقی از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ به وسیله یک دستگاه لیزر پالسی Nd:YAG مورد جوشکاری قرار گرفت. برای اولین بار قطر بازوهای دندریتی در جوش لیزر آلومینیوم اندازه‌گیری و نتایج با مدل‌های انجمادی مقایسه شد. بر خلاف پیش‌بینی مدل‌های ایجاد ترک گرم افزایش قطر بازوهای دندریتی، کاهش سرعت انجماد و کاهش نرخ کرنش باعث کاهش ترک‌های گرم نشد. اگرچه بر اساس مدل‌های موجود پیش‌گرم می‌بایست از مقدار ترک‌های گرم بکاهد ولی برعکس مقدار ترک‌ها را به شدت افزایش داد. تصاویر دوربین‌های سرعت بالا و بررسی‌های سطح ترک به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که ایجاد ترک در جوشکاری لیزر پالسی سه مرحله‌ای است: (۱) شروع ترک، (۲) رشد ترک مرحله اول و (۳) رشد ترک مرحله دوم. رشد ترک در مرحله دوم در مرزخانه‌های ضعیف ولی منجمد شده انجام می‌گیرد. آنچه در نهایت به عنوان ترک در جوش ایجاد می‌شود مجموعه‌ای از ترک گرم و ترک دمای بالا است و بنابراین مدل‌هایی که برای جوشکاری پیوسته در نظر گرفته می‌شوند نیاز به اصلاح بر اساس شرایط ذوب و انجماد پالسی دارند و باید شکست مرزخانه‌های ضعیف بعد از انجماد نیز در نظر گرفته شوند.

واژه‌های کلیدی:

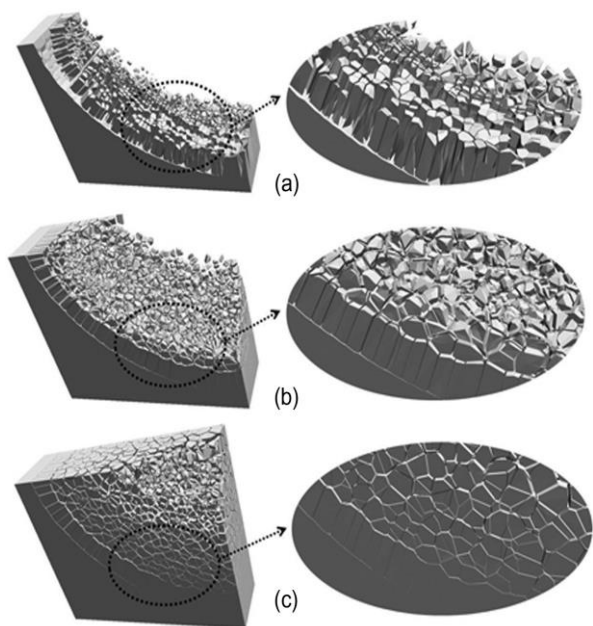
مدل‌های فیزیکی ایجاد ترک گرم، آلیاژهای آلومینیوم، جوشکاری لیزر پالسی، دوربین‌های سرعت بالا، شکست مرزخانه‌های ضعیف.

۱- مقدمه

کاهش ترک گرم، تحقیقات زیادی در زمینه جوشکاری با منابع با دانسیته انرژی بالا مانند پرتو لیزر انجام شده است [۳-۵]. از جمله لیزرهای مورد استفاده لیزرهای پالسی می‌باشند. در این نوع جوشکاری ذوب و انجماد مهره‌های جوش غیر پیوسته است. به دلیل هزینه بالای آزمایش‌های عملی، پژوهشگران به دنبال

در بسیاری از موارد کاربرد آلیاژهای آلومینیوم مستلزم اتصال به وسیله روش‌های ذوبی است. بالا بودن ضریب انبساط حرارتی، ایجاد ترکیبات با دمای ذوب پایین و فاصله زیاد دمای سالیدوس و لیکودوس احتمال ایجاد ترک‌های گرم در آلیاژهای سری XXXX را افزایش می‌دهد [۱-۲]. در سال‌های اخیر به منظور

(۲) مقیاس میانه^۳: در این نوع مدل فیزیکی کل دانه‌های حوضچه جوش یا قطعه ریخته‌گی در نظر گرفته می‌شود و مراحل رشد دانه‌ها و سیلان مذاب بین آن‌ها از لحظه شروع انجماد تا انتهای انجماد مورد بررسی قرار می‌گیرد. به عبارتی تغذیه مذاب، تنش، کرنش و نرخ کرنش در ارتباط با کل ساختار در حال انجماد در نظر گرفته می‌شود. در این میان به کارهایی که اخیراً توسط آقایان Zareie و Phillion انجام شده است، اشاره کرد [۲۰-۲۱]. شکل (۲) قسمتی از شبیه‌سازی کامپیوتری را در این رابطه نشان می‌دهد. بر خلاف مدل ایجاد ترک گرم در مقیاس میکرو در این مدل سیلان مذاب در کل ساختار در حال انجماد شبیه‌سازی می‌شود.



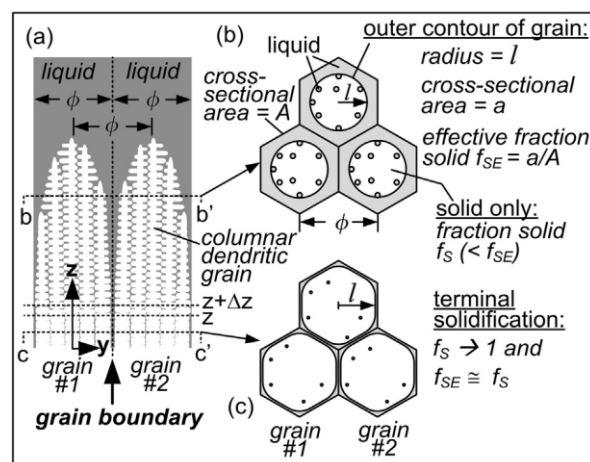
شکل (۲): مدل کامپیوتری رشد دانه‌ها حین انجماد و شبکه مذاب رسانی حول آن‌ها. این شبیه‌سازی بر اساس مدل‌های میانه انجام شده است [۲۰]

(۳) مقیاس ماکرو^۴: در این نوع مدل‌های فیزیکی عوامل ماکرو مانند کرنشی که ماده در محدوده دمایی ترد (BTR)^۵ می‌تواند تحمل کند یا فاصله دمایی BTR مبنای ایجاد ترک گرم قرار می‌گیرد و بر اساس آن معیارهای ایجاد ترک گرم استخراج می‌شود. اکثر مدل‌های قدیمی به این شکل هستند هر چند هنوز نیز کارایی خود را حفظ کرده‌اند [۲۲-۲۵]. در شکل (۳) کرنش‌هایی که یک

روش‌هایی برای پیش‌بینی رفتار مواد حین جوشکاری به وسیله شبیه‌سازی کامپیوتری هستند. جهت شبیه‌سازی به وسیله کامپیوتر باید مدل‌های فیزیکی برای برقراری ارتباط متغیرهای جوشکاری با شرایط ایجاد ترک گرم در دسترس باشند [۶-۱۹]. مدل‌های فیزیکی را به چند صورت می‌توان دسته‌بندی کرد که در ذیل به آن‌ها اشاره می‌شود. لازم به ذکر است که یک مدل فیزیکی ممکن است در هر کدام از دسته‌بندی‌های بر اساس قابل تعریف باشد:

• دسته بندی مدل‌ها بر اساس مقیاس:

(۱) مقیاس میکرو^۱: در یک کانال خاص از فضای بین دندریتی تغذیه مذاب، مصرف مذاب و نرخ کرنش را در نظر می‌گیرند. بدیهی است که اگر مذاب کافی در آن کانال برای جبران مصرف مذاب و تغییر شکل وجود نداشته باشد ترک گرم ایجاد می‌شود. از معیارهایی که بر اساس این نوع مدل فیزیکی ارایه شده‌اند می‌توان به معیار^۲ RDG، Prokhorov، Kou و Niyama و ... اشاره کرد. در شکل (۱) به صورت طرح واره مبنای این مدل فیزیکی نشان داده شده است. در این شکل شبکه مذاب در مقطع محدودی از ریز ساختار نشان داده شده است که دندریت‌ها و دانه‌ها را در بر گرفته است. بر اساس فرمول‌های مکانیک سیالات، نفوذ و انجماد می‌توان سیال رسانی و مصرف مذاب را محاسبه و به معیارهایی برای ایجاد ترک گرم دسترسی پیدا کرد.



شکل (۱): طرح واره شبکه مذاب حول دانه‌ها و دندریت‌ها حین انجماد [۱۳]

اساس این تئوری، مهم ترین معیار برای حساسیت به ترک گرم، شکل پذیری^۷ نیمه جامد است. هرگاه شکل پذیری نیمه جامد کمتر از کرنش ایجاد شده حین انجماد باشد، ترک گرم ایجاد می شود. این بررسی در دمای حساسیت به ترک گرم انجام می شود.

- معیارهایی بر اساس نرخ کرنش: علت استفاده از این معیار این است که در جوش های پیچیده کرنش به مرور زمان تغییر می کند باید مقدار کرنش در واحد زمان یا شیب نمودار کرنش-زمان مبنای عمل قرار گیرد. معیارهای Prokhorov و Rappaz بر این اساسند. اگر نرخ کرنش کم باشد دانه ها روی هم می لغزند و مذاب بین آنها جابجا می شود و ترک روی نمی دهد ولی در صورتی که نرخ کرنش زیاد باشد پارگی روی خواهد داد. اهمیت نرخ کرنش در آن است که بسیاری از مکانیزم هایی که می توانند انقباض ناشی از انجماد را جبران کنند به زمان وابسته هستند؛ مانند خزش به وسیله نفوذ، تغییر شکل پلاستیک، پر شدن حفره ها و ترک ها به وسیله مذاب و ...

- معیارهای بر اساس زمان انجماد: در این خصوص Clyne و Davies مدل فیزیکی را ارائه دادند. در این مدل زمانی که ماده در دمای BTR است به زمانی که تنش های کششی رها می شوند مبنای ایجاد ترک گرم قرار می گیرد [۱۱].

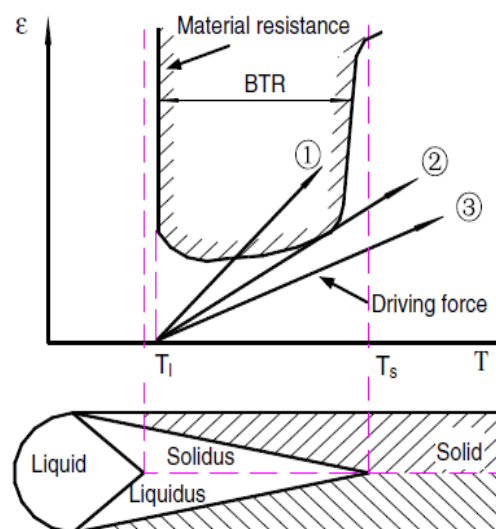
لازم به ذکر است در برخی موارد چندین مدل فیزیکی با همدیگر ادغام شده و بر اساس برآیند آنها معیاری برای ترک گرم یا پایه-ای برای شبیه سازی به دست می آیند [۲۶-۲۷].

• دسته بندی مدل های فیزیکی تشکیل ترک گرم بر اساس مکانیزم تشکیل

در این دسته بندی به جای شرایط لازم برای وقوع ترک مراحل ایجاد ترک و آنچه هنگام ایجاد ترک روی می دهد بررسی می شود.

۱) جوانه زنی ترک: برای جوانه زنی مواردی مانند فیلم مذاب، حفرات، اکسیدهای فلزی، مرز دانه ها، فصل مشترک مذاب/جامد و ... به عنوان مراکز تمرکز تنش و شروع ترک گرم در نظر گرفته می شوند. بررسی شرایط تشکیل موارد فوق شرایط شروع ترک

ماده در محدوده دمایی BTR می تواند تحمل کند نشان داده شده است.



شکل (۳): میزان کرنش قابل تحمل به وسیله ماده در محدوده دمایی BTR. اگر کرنش ها بیشتر از این مقدار باشند ترک گرم ایجاد می شود [۲۵]

در ذیل تعدادی از مدل های ماکرو به صورت خلاصه توضیح داده می شود:

- معیارهای بر اساس تنش: این معیارها بر اساس تنش انقباضی استوار هستند. شکست زمانی روی می دهد که تنش انقباضی بیشتر از تنش شکست باشد. در واقع در این معیارها رابطه های گریفیث بسط داده شده اند. در این تئوری یک ترک پر از مذاب به عنوان جوانه ترک در نظر گرفته می شود و تنشی که در آن جوانه رشد می کند تنش بحرانی نام گذاری شده است. این پدیده زمانی است که امکان ترمیم ترک وجود نداشته باشد. یعنی اگر تنش به اندازه کافی بزرگ نباشد که جوانه ترک را باز کند یا اینکه جوانه ترک باز شده به وسیله مذاب مجدداً پر شود، ترک گرم ایجاد نمی شود. بنابراین در این مدل دو عامل تنش های کششی و سیلان مذاب از اهمیت برخوردار هستند.

- معیارهای بر اساس کرنش: بر اساس مقدار کرنش تا شکست نیمه جامد^۸ و مقدار کرنش ناشی از انقباض بنا نهاده شده است. بر

مختلف اشاره شده است [۳۷، ۱۰]. در این پژوهش به وسیله تحلیل عددی ابعاد بازوهای دندریتی، بررسی نرخ کرنش، تصاویر دوربین‌های سرعت بالا و تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح ترک تناقضات مدل‌های موجود با نتایج حاصل از جوشکاری پالسی بیان می‌شود و تصحیحی برای مدل‌های فیزیکی ایجاد ترک در جوشکاری پالسی ارائه خواهد شد.

۲- مواد و روش انجام تحقیق

ورقی از جنس آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 با ترکیب شیمیایی جدول (۱) به ضخامت 0.8mm به وسیله لیزر پالسی Nd:YAG به صورت bead on plate مورد جوشکاری قرار گرفت. شکل پالس لیزر به صورت مربعی بود. پیش گرم به وسیله یک المنت مقاومتی انجام شد. متغیرهای جوشکاری در جدول (۲) آورده شده است. قطر اشعه در ناحیه تمرکز برای کلیه نمونه‌ها 0.5mm است. جهت مشاهده حوضچه در حال انجماد و مراحل ایجاد ترک از دوربینی با سرعت ۳۰۰۰ فریم بر ثانیه که طول موج‌های بین 0.435 تا 0.500 میکرومتر را ذخیره می‌کند مورد استفاده قرار گرفت.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 6061

Ni	Ti	Fe	Cr	Mn	Zn	Cu	Si	Mg	Al
Wt. %	Wt. %	Wt. %	Wt. %	Wt. %	Wt. %	Wt. %	Wt. %	Wt. %	Wt. %
0.01	0.05	0.43	0.16	0.05	0.06	0.22	0.69	0.91	Balance

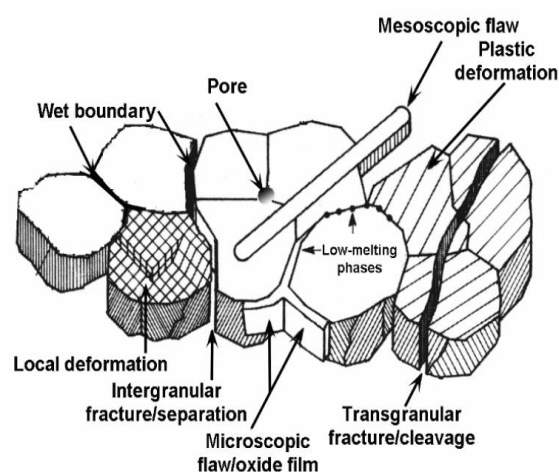
جدول (۲): متغیرهای جوشکاری لیزر پالسی

Preheat temp. (°C)	Welding speed (mm/s)	Duration time (ms)	Frequency (Hz)	Pulse energy (J)	Sample No.
-	0.50	6	4	4.8	1
-	0.50	10	4	4.8	2
-	0.12	10	1	4.8	3
100	0.50	6	4	4.8	4
300	0.50	6	4	4.8	5
100	0.50	10	4	4.8	6
300	0.50	10	4	4.8	7

شکل (۵) دستگاه لیزر Nd:YAG پالسی و دستگاه پیش گرم را نشان می‌دهد. ریزساختار و ایجاد ترک‌های گرم به وسیله

گرم را نتیجه می‌دهد. از جمله مدل‌های فیزیکی در این زمینه می‌توان به مدل‌های Patterson و همکاران، Campbell، Fredriksson و همکاران و ... اشاره کرد.

(۲) رشد ترک: مواردی مانند لغزش روی فیلم مذاب، پارگی فیلم مذاب، تردی فیلم مذاب، نفوذ جاهای خالی از جامد به ترک و ... به عنوان مکانیزم رشد ترک گرم در نظر گرفته می‌شود. از جمله مدل‌های فیزیکی در این زمینه Saveiko، Williams and Singer، Guven and Hunt و ... هستند. در شکل (۴) طرح واره‌ای از محل های شروع ترک و مکانیزم های رشد آن نشان داده شده است.



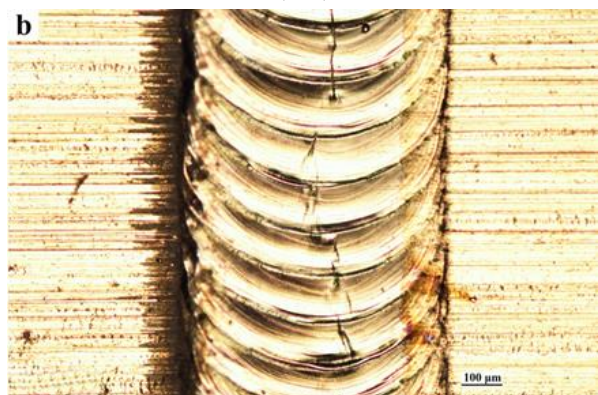
شکل (۴): طرح واره‌ای از محل های شروع ترک و مکانیزم های رشد آن [۶]

همان گونه که مشاهده شد کلیه مدل‌های فوق رفتار ماده را در زمانی که مذاب و جامد در کنار هم وجود دارند، بررسی می‌کنند. این امر باعث شده است تناقضاتی در پیش بینی و تحلیل ترک‌های گرم ایجاد شود. به عنوان مثال گاهی افزایش پیش گرم را دلیل افزایش ترک گرم [۲۸] و در مواردی عامل کاهش ترک گرم [۲۹-۳۱] دانسته‌اند. افزایش اندازه دانه گاهی دلیلی بر کاهش ترک گرم [۲۷] و گاهی دلیل افزایش آن [۳۲-۳۵] بوده است. افزایش سرعت انجماد در مواردی باعث افزایش حساسیت به ترک [۳۶] و در مواردی باعث کاهش حساسیت به ترک گرم [۱۹] عنوان شده است. در تحقیقات دیگری نیز به صورت مروری به مدل‌های مختلف و عدم توانایی آن‌ها در پیش بینی ترک گرم در شرایط

در دو پهنای زمانی ۶ و ۱۰ میلی ثانیه نشان داده شده است. ابعاد بازوهای دندریتی در جوش با پهنای زمانی پالس ۶ میلی ثانیه 0.8 میکرون و در جوش با پهنای زمانی پالس ۱۰ میلی ثانیه 0.94 میکرون است. با افزایش پهنای زمانی پالس، ابعاد بازوهای دندریتی افزایش پیدا کرده است.

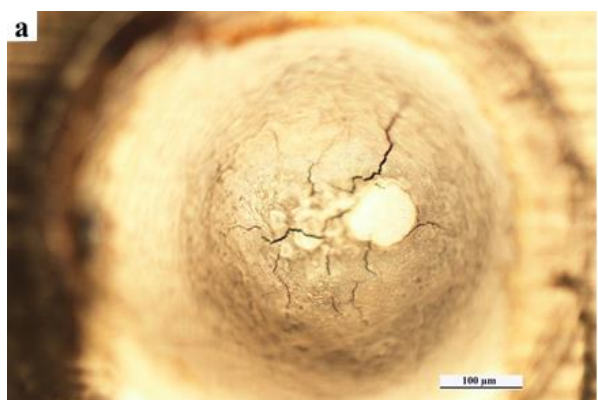


(الف)



(ب)

شکل (۶): تصویر: (الف): پالس آخر و (ب): خط جوش نمونه شماره ۱



(الف)

میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی (SEM و FESEM) مورد بررسی قرار گرفت. محلول مورد استفاده برای حکاکی کلر^۸ می‌باشد. جهت اندازه‌گیری اندازه دانه و فواصل بین دندریتی از نرم افزار Clemex Image Analysis استفاده شد.



(الف)



(ب)

شکل (۵): (الف): دستگاه پیش گرم و (ب): دستگاه جوشکاری لیزر

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی متغیرهای جوشکاری و تاثیر آنها بر ترک‌های گرم

(۱) تاثیر پهنای زمانی پالس

همان‌گونه که در شکل‌های (۶) و (۷) قابل مشاهده است با افزایش پهنای زمانی پالس، طول ترک هم در خط جوش و هم در پالس آخر کاهش پیدا کرده است. در شکل (۸) سطح مقطع جوش‌ها

کرنش از عوامل تاثیرگذار بر ایجاد ترک‌های گرم هستند. رابطه- ای که به صورت تقریبی نرخ کرنش را نشان می‌دهد در پایین آمده است:

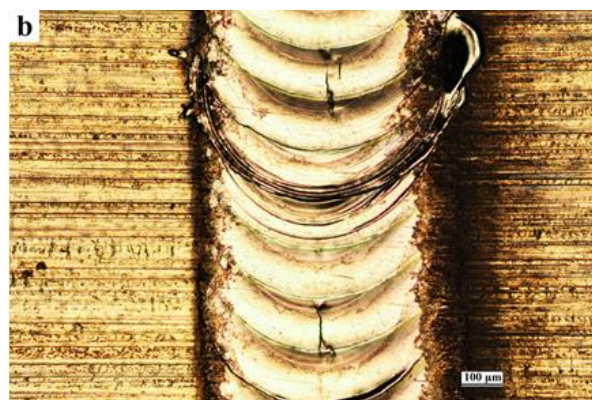
$$\dot{\epsilon} = -\beta_T \dot{T}_{SL} = \beta_T |G_{SL} R_{SL}| \quad (1)$$

که در آن β_T ضریب انقباض حرارتی ناشی از انجماد و کاهش حرارت، \dot{T}_{SL} سرعت سرمایش در فصل مشترک جامد و مذاب و G و R به ترتیب گرادیان دمایی و سرعت انجماد هستند. با افزایش $\dot{\epsilon}$ حساسیت به ترک گرم افزایش پیدا می‌کند. همچنین باید توجه کرد کاهش حاصل ضرب $G \times R$ باعث درشت‌تر شدن ساختار دندریتی و در نتیجه آسان‌تر شدن تغذیه مذاب می‌شود و حساسیت به ترک گرم را کاهش می‌دهد [۳۸]. طول ناحیه آسیب‌پذیر^۹ روی ایجاد ترک گرم موثر است. ناحیه آسیب‌پذیر بین دو ناحیه با دمای مماس شدن^{۱۰} (دمایی که بازوهای دندریتی همدیگر را لمس می‌کنند) و دمای اتصال^{۱۱} (دمایی که در آن دو بازوی دندریتی پیوند تشکیل می‌دهند) است. به عبارتی:

$$L = \frac{(T_b - T_{coh})}{G} \quad (2)$$

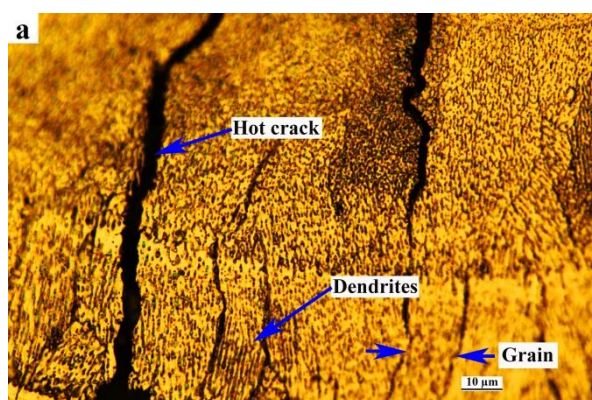
ناحیه آسیب‌پذیر بلندتر به ترک گرم حساس‌تر است [۳۹]. نسبت G/R روی طول ناحیه دو فاز مذاب و جامد تاثیر دارد. اگر نسبت G/R کم باشد طول ناحیه دو فاز و بنابراین طول ناحیه آسیب‌پذیر افزایش پیدا می‌کند و تغذیه مذاب فواصل بین دندریتی کاهش پیدا می‌کند. به طور خلاصه می‌توان گفت نسبت G/R و حاصل ضرب $G \times R$ روی محل پنجره امن برای جوشکاری تاثیرگذار هستند. زیرا روی طول ناحیه آسیب‌پذیر، نرخ کرنش، ابعاد بازوهای دندریتی و زمان تغذیه مذاب تاثیر می‌گذارند.

بر اساس تحقیقات He و همکاران، با افزایش پهنای زمانی پالس مقدار G و R کاهش پیدا می‌کند [۴۰-۴۱]. همچنین witzendorf و همکاران نیز نشان داده‌اند پالس‌هایی که پهن‌ترند دیرتر منجمد می‌شوند [۳۸]. بنابراین با افزایش پهنای زمانی پالس دو متغیر G و

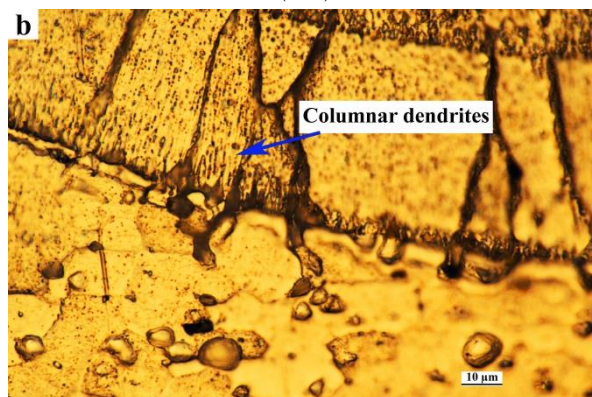


(ب)

شکل (۷): تصویر: (الف): پالس آخر و (ب): خط جوش نمونه شماره ۲



(الف)

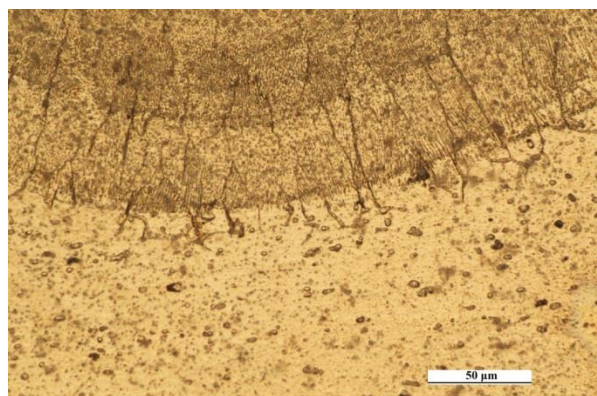


(ب)

شکل (۸): مقطع: (الف): نمونه شماره ۱ با پهنای زمانی پالس 6ms و (ب): نمونه شماره ۲ با پهنای زمانی پالس 10ms

مطابق با نتایج مدل‌های فیزیکی در مقیاس میکرو و میانه ابعاد ریزساختار انجمادی، سرعت انجماد، گرادیان دمایی و نرخ

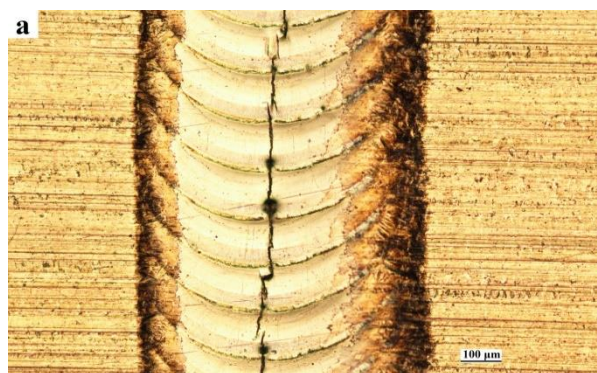
گرم افزایش پیدا می‌کند [۳۹]. بر خلاف مدل‌های پیش بینی ترک گرم در مقیاس میکرو، کاهش بسامد پالس لیزر باعث کاهش ترک گرم شده است.



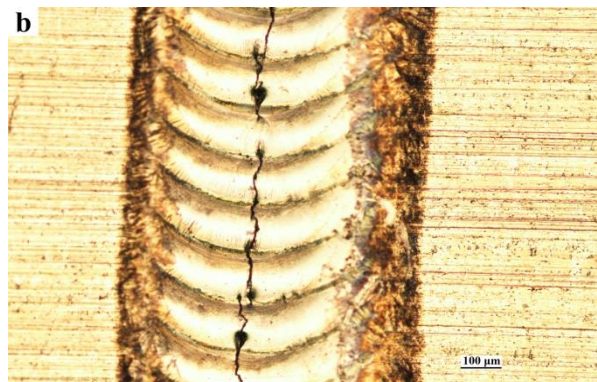
شکل (۱۰): سطح مقطع نمونه شماره ۳ جوشکاری شده در بسامد 1Hz و سرعت 0.12mm/s

۳) تاثیر پیش گرم

شکل (۱۱) تاثیر دمای پیش گرم را روی ترک‌های انجمادی نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

R کاهش پیدا می‌کنند. کاهش این دو متغیر باعث درشت تر شدن فواصل بین دندریتی می‌شود [۴۲]. با افزایش پهنای زمانی پالس، ریز ساختار درشت، نرخ کرنش کاهش، ناحیه آسیب پذیر کاهش یافته است و بنابراین مطابق مدل‌های ایجاد ترک گرم، مقدار ترک‌ها کاهش یافته است.

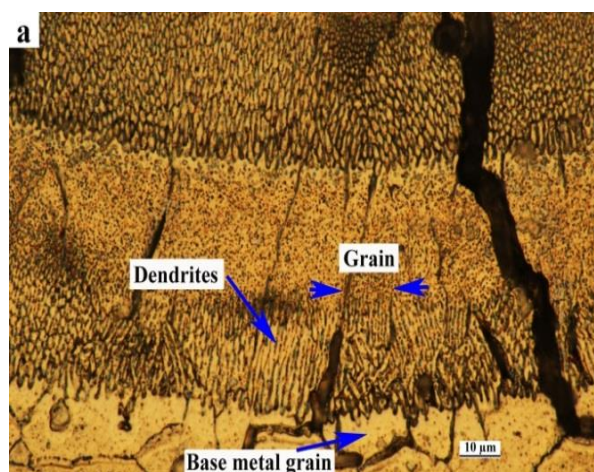
۲) تاثیر بسامد^{۱۲} پالس

نمونه‌های فوق در بسامد 4Hz و سرعت جوشکاری 0.5mm/s جوشکاری شدند. کاهش بسامد لیزر به یک هرتز و سرعت جوشکاری به 0.12mm/s در کاهش ترک‌های گرم جالب ترین تاثیر را داشتند. اگرچه حرارت ورودی نسبت به نمونه‌هایی که در ۴ هرتز و سرعت 0.5mm/s جوشکاری شده‌اند، تغییری نکرده است (زیرا سرعت و فرکانسی هر دو به یک چهارم کاهش پیدا کرده‌اند) ولی ترک‌ها به کلی حذف شدند (شکل (۹)).

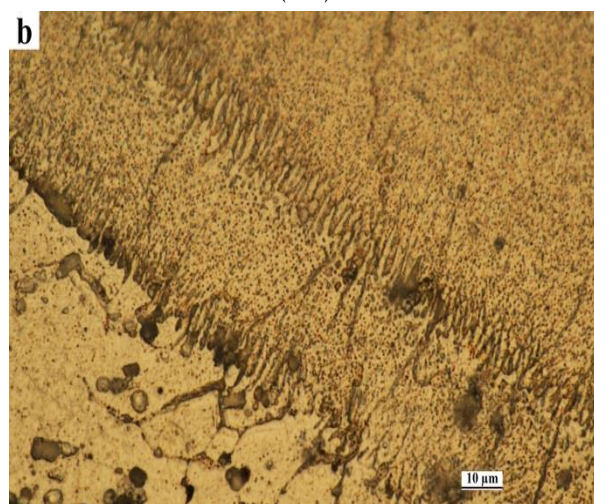


شکل (۹): خط جوش نمونه شماره ۳ با فرکانس 1Hz

شکل پروفایل خط جوش نشان دهنده اغتشاش حوضچه جوش در این نمونه است. سرد شدن هر کدام از مهره های جوش قبل از اعمال پالس بعدی (به دلیل زمان زیاد اعمال دو پالس متوالی) و در نتیجه ایجاد گرادیان دمایی بالا باعث افزایش نیروهای مارانگونی و شناوری^{۱۳} و افزایش اغتشاش حوضچه مذاب می‌شود [۴۳]. در بسامد پایین تر R و G بالاتر هستند و فاصله بازوهای دندریتی نیز کمتر است. در این مورد مقدار اندازه گیری شده برای بازوهای دندریتی 0.73 میکرون بود (شکل (۱۰)). همان گونه که قبلا اشاره شده بود شیخی و همکاران پیش بینی کرده بودند که با افزایش R و کاهش فواصل بین دندریتی حساسیت به ایجاد ترک

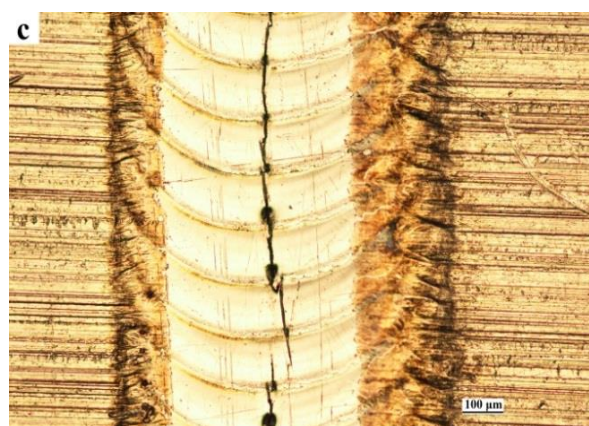


(الف)

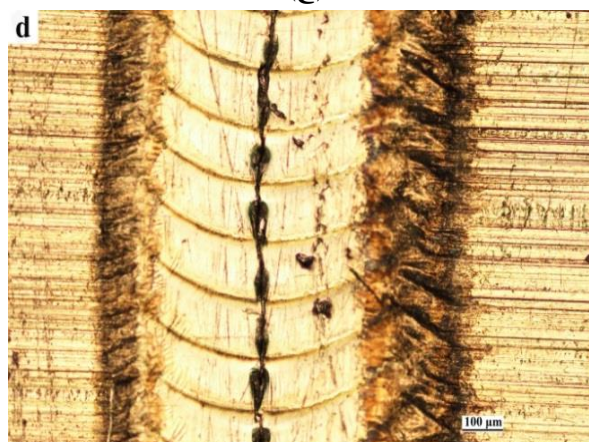


(ب)

شکل (۱۲): سطح: (الف): نمونه شماره ۴ با پهنای زمانی پالس 6ms و دمای پیش گرم 100°C و (ب): نمونه شماره ۵ با پهنای زمانی پالس 6ms و دمای پیش گرم 300°C



(ج)



(د)

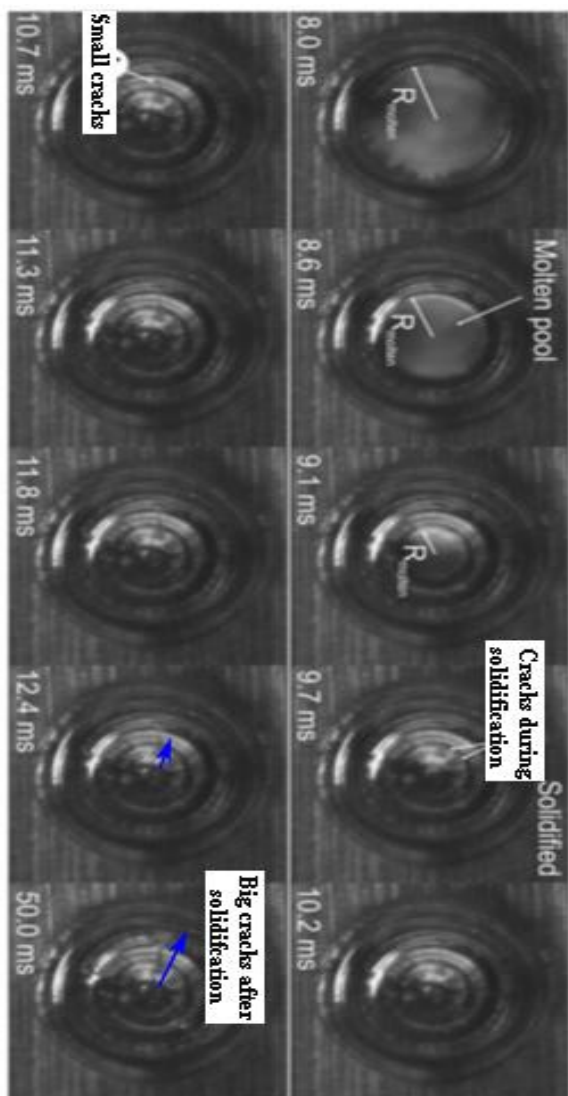
شکل (۱۱): (الف): نمونه جوشکاری شده در پیش گرم 100°C و پهنای زمانی پالس 6ms، (ب): نمونه جوشکاری شده در پیش گرم 100°C و پهنای زمانی پالس 10ms، (ج): نمونه جوشکاری شده در پیش گرم 300°C و پهنای زمانی پالس 6ms و (د): نمونه جوشکاری شده در پیش گرم 300°C و پهنای زمانی پالس 10ms. در همه نمونه‌ها پیش گرم باعث افزایش ترک‌های گرم شده

در نمونه پیش گرم شده سرعت انجماد کاهش پیدا می‌کند [۳۹] از طرف دیگر گرادیان دمایی که در انجماد مورد بحث است در واقع گرادیان دمایی از فصل مشترک مذاب و جامد به طرف مرکز حوضچه جوش است (شکل (۱۳)) [۴۴]. از آنجایی که دمای فصل مشترک مذاب و جامد برابر با دمای ذوب آلومینیوم است و دمای مرکز حوضچه جوش در زمان شروع انجماد به متغیرهای منبع حرارتی از جمله مقدار انرژی منبع و تمرکز انرژی بستگی دارد بنابراین با پیش گرم کردن نمونه تغییر چندانی نمی‌کند. مطابق مدل‌های فیزیکی با افزایش دمای پیش گرم و در نتیجه کاهش G

می‌توان مشاهده کرد که با اعمال پیش گرم ترک‌های گرم افزایش پیدا کرده‌اند. فاصله بازوهای دندریتی در نمونه‌های پیش گرم شده در دمای ۱۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتیگراد و پهنای زمانی پالس 6ms به ترتیب 1.03 میکرون و 1.19 میکرون بودند که در مقایسه با نمونه‌های بدون پیش گرم بالاتر است (شکل (۱۲)).

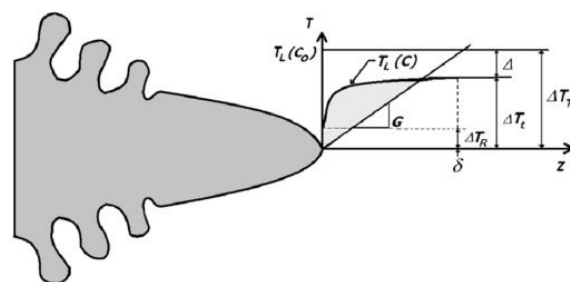
۲-۳- بررسی تصاویر دوربین‌های سرعت بالا

در شکل (۱۵) تصاویر حوضچه مذاب در زمان‌های مختلف پس از اعمال پالس لیزر نشان داده شده است. اگرچه در زمان 10.2ms بعد از اعمال پالس انجماد به صورت کامل به اتمام رسیده است ولی ترک‌هایی در 50ms بعد از انجماد ایجاد شده است. در این زمان تنش‌های ناشی از جوشکاری باعث ایجاد ترک در مرزانه‌های تازه انجماد یافته شده است. ترک‌های ایجاد شده بعد از انجماد در واقع رشد یافته ترک‌هایی هستند که حین انجماد ایجاد شده‌اند. برای این که ترکی در این مرحله ایجاد شود باید ترک اولیه‌ای وجود داشته باشد و ترک در مسیر آن‌ها رشد کند.

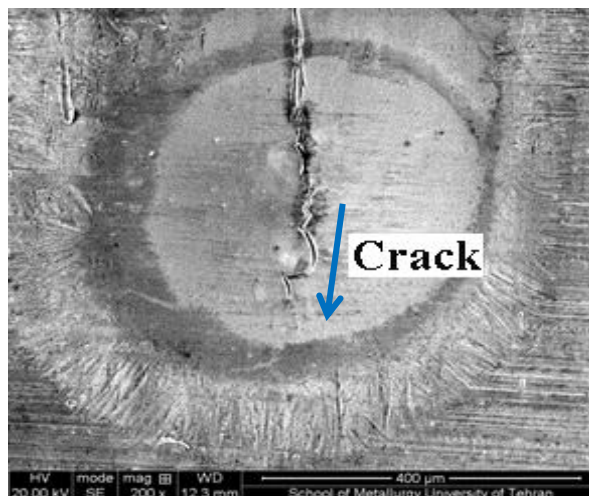


(الف)

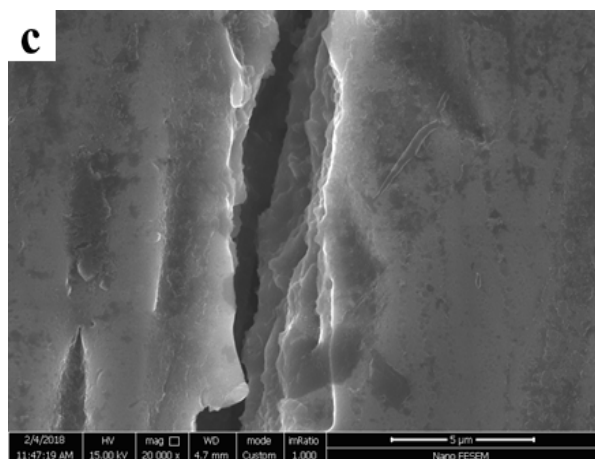
R و سرعت سرمایش و درشت شدن ساختار، می‌بایست ترک‌های گرم کاهش پیدا کنند [۲۸، ۳۹، ۴۵]. بر خلاف پیش بینی مدل‌های در مقیاس میکرو با افزایش دمای پیش گرم و افزایش اندازه دندریت‌ها و کاهش نرخ کرنش مقدار ترک‌های گرم افزایش پیدا کرده است. همچنین مدل‌های پیش بینی ترک در مقیاس ماکرو پیش بینی می‌کنند پیش گرم باعث کاهش تنش‌های کششی در محدوده دمایی BTR می‌شود و ترک گرم کاهش پیدا می‌کند [۴۶]. نتایج موجود خلاف پیش بینی مدل‌های مقیاس ماکرو است. نکته جالب در ترک‌های پالس انتهایی جوش است. ترک‌های موجود در این پالس کوچک‌تر از نمونه‌هایی است پیش گرم نشده‌اند (شکل (۱۴)).



شکل (۱۳): طرح واره‌ای که نشان می‌دهد گرادیان دمایی از مرز ماده در حال انجماد به سمت مذاب به عنوان گرادیان دمایی مورد استفاده در فرمول‌های انجماد در نظر گرفته می‌شود [۴۴]



شکل (۱۴): تصویر SEM پالس آخر نمونه شماره ۵ با پهنای زمانی پالس 6ms و دمای پیش گرم 300°C

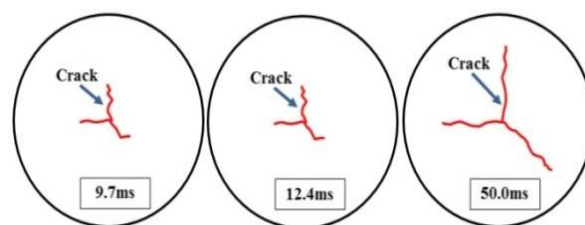


(ج)

شکل (۱۶): قسمت‌های مختلف ترک: (الف): ترک حین انجماد، (ب): ترک در اواخر انجماد و (ج): ترک بعد از انجماد. تغییر فرم زیاد سطح ترک در تصویر (ج) نشان دهنده شکست ماده منجمد شده است.

در شکل (۱۶-الف) سطح کاملاً صاف است. در این ناحیه دندریت‌ها قبل از این که با هم پیوندی ایجاد کنند از هم جدا شده‌اند. این قسمت از ترک حین انجماد ایجاد شده است. در شکل (۱۶-ب) روی سطح ترک برجستگی‌هایی وجود دارد. در این مرحله از ایجاد ترک دندریت‌ها در نقاطی به همدیگر وصل شده‌اند و بعداً در اثر تنش‌های جوشکاری از هم جدا شده‌اند. این قسمت نیز در مراحل نهایی انجماد ایجاد شده است. شکل (۱۶-ج) تغییر فرم شدید در سطح ترک را نشان می‌دهد. در این قسمت از ترک دندریت‌ها قابل تشخیص نیستند. این قسمت از ترک در زمانی بعد از انجماد به وجود آمده است. در مدل‌های مقیاس میکرو و میانه، برای رشد ترک یک مرحله در نظر می‌گیرند. بر اساس این مدل‌ها مرحله رشد در حین انجماد به وجود می‌آید و رشد مبتنی بر عوامل انجمادی مانند پاره شدن فیلم مذاب و عدم تغذیه مذاب است. بنابراین می‌توان گفت که مدل‌های بر اساس مکانیزم ایجاد ترک گرم، یک مرحله برای رشد ترک تعریف می‌کنند که در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدل‌های موجود اشاره می‌کنند که افزایش سرعت انجماد باعث افزایش ترک گرم می‌شود. از نظر فیزیکی چون پدیده نفوذ و تغذیه مذاب یک فرآیند زمان‌بر است، منطقی به نظر می‌رسد که

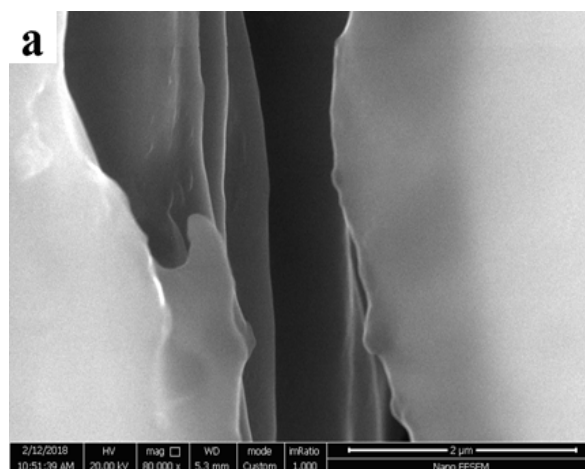


(ب)

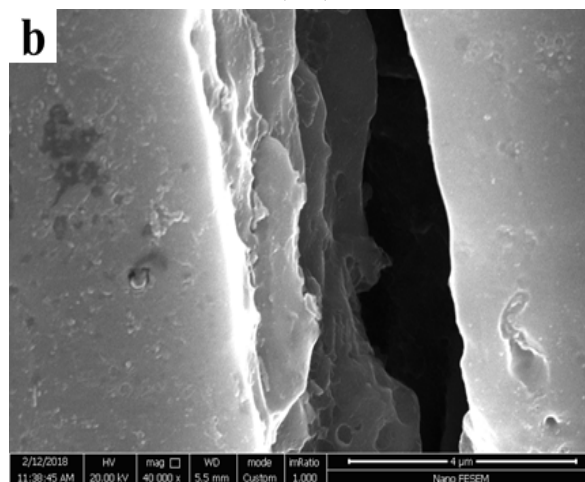
شکل (۱۵): تصویر حوضچه مذاب در زمان‌های متفاوت بعد از اعمال پالس: (الف): به صورت طرح واره و (ب): تصویر واقعی. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بعضی از ترک‌ها در زمان 50ms بعد از اعمال پالس یعنی بعد از انجماد کامل حوضچه مذاب تشکیل شده‌اند

۳-۳- بررسی سطح ترک‌های گرم

شکل (۱۶) تصویر SEM از داخل ترک را نشان می‌دهد. سه ناحیه مختلف از داخل ترک قابل تشخیص است.



(الف)



(ب)

در این پژوهش نتایج حاصل از جوشکاری لیزر پالسی با پیش بینی‌های مدل‌های فیزیکی ایجاد ترک گرم مقایسه شد. موارد ذیل قابل نتیجه‌گیری است:

۱- از آنجایی که در جوشکاری پالسی با ذوب و انجماد گسسته و همپوشانی پالس‌های متوالی مواجه هستیم، تناقضاتی در پیش بینی‌های مدل‌های انجمادی با نتایج جوشکاری پالسی مشاهده می‌شود. این مدل‌ها اگرچه در پالس‌های مجزا به خوبی طول ترک را پیش بینی می‌کنند ولی در خط جوش از دقت کمی برخوردار هستند.

۲- در مقیاس میکرو با افزایش ابعاد دندریت‌ها، در مقیاس میانه با افزایش ابعاد دانه‌ها، نرخ کرنش و سرعت انجماد، و در مقیاس ماکرو با افزایش دمای پیش گرم می‌بایست ترک‌های گرم کاهش پیدا کنند ولی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در مواردی با کاهش ابعاد بازوهای دندریتی و افزایش نرخ کرنش و کاهش سرعت انجماد ترک‌های گرم کاهش پیدا می‌کنند. همچنین در اندازه دانه ثابت و افزایش دمای پیش گرم ترک‌های گرم افزایش پیدا می‌کنند.

۳- علت تناقضات در مدل‌های یاد شده شکست ماده منجمد شده بعد از اتمام انجماد است. همه مدل‌های معرفی شده رفتار فلز در حال انجماد را در دمای BTR مورد بررسی قرار می‌دهند در حالی که در جوشکاری پالسی باید شکست ماده بعد از انجماد نیز در نظر گرفته شود. همچنین در مدل‌هایی که بر اساس مکانیزم ایجاد ترک است یک مرحله برای رشد ترک متصور هستند.

۴- مشاهدات نشان می‌دهد سه مرحله در ایجاد ترک گرم در جوشکاری پالسی وجود دارد: (۱) جوانه زنی، (۲) رشد ترک مرحله اول که به صورت گرم است و (۳) رشد ترک مرحله دوم که کمی بعد از انجماد صورت می‌گیرد و مربوط به شکست مرزخانه‌های ضعیف است.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از آقای دکتر ویتزندورف به خاطر راهنمایی‌هایشان و از آزمایشگاه متالوگرافی

با افزایش سرعت انجماد، ایجاد ترک گرم افزایش پیدا کند. با جوشکاری در بسامد ضربان 1Hz و همچنین جوشکاری بدون پیش گرم اگرچه سرعت انجماد بیشتر است ولی ترک‌های گرم کمتر هستند. نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان داد حتی با وجود افزایش ابعاد بازوهای دندریتی در نمونه‌های پیش گرم شده ترک‌های گرم افزایش پیدا کرده‌اند. اگرچه نمونه‌هایی که پیش گرم شده‌اند دارای ترک سرتاسری در خط جوش هستند اما ترک‌های موجود در پالس آخر خط جوش کوچک‌تر از نمونه‌هایی است که پیش گرم نشده‌اند. می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های فیزیکی ایجاد ترک گرم برای تک پالس پیش بینی نزدیک به واقعیت دارند. فیلم برداری از حوضچه جوش در حال انجماد ناشی از یک ضربان لیزر نشان می‌دهد چند ده میلی ثانیه بعد از انجماد کامل حوضچه جوش ترک‌هایی در ماده ایجاد می‌شوند. تصاویر از سطح ترک‌های گرم نشان می‌دهد این ترک‌ها در مراحل مختلفی از انجماد ایجاد شده‌اند. سطح قسمت‌هایی از ترک کامل صاف است و نشان می‌دهد که فیلم مذاب پاره شده است و قسمت‌هایی دیگر از ترک دارای برجستگی‌هایی است که نشان می‌دهد ماده بعد از انجماد دچار شکست شده است. با توجه به غیر پیوسته بودن ذوب و انجماد در جوشکاری پالسی رشد ترک از یک پالس به پالس بعدی باعث ایجاد ترک طولی می‌شود. با اعمال پالس‌های متوالی تنش کششی در خط جوش افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه امکان ترک مرحله دوم افزایش پیدا می‌کند. در نمونه‌های پیش گرم شده به دلیل این که مرزخانه‌ها دیرتر سرد می‌شوند و به استحکام می‌رسند به راحتی شکسته می‌شوند و ترک طولی ایجاد می‌شود ولی بر عکس در نمونه‌هایی که در بسامد یک هرتز جوشکاری شده‌اند به این دلیل که هر پالس سرد و مستحکم شده و پالس بعدی با فاصله زمانی بیشتری اعمال می‌شود، مرزخانه‌های مستحکم مانع از رشد ترک در مرحله دوم می‌شود.

۴- نتیجه گیری

- [8] C. E. Cross & N. Coniglio, "Weld Solidification Cracking: Critical Conditions for Crack Initiation and Growth", *Hot Cracking Phenomena in Welds II*, pp. 44-66, 2008.
- [9] M. WolfTh, Th. Kannengie & Th. ßer Böllinghaus, "Determination of critical strain rate for solidification cracking by numerical simulation", in *Hot Cracking Phenomena in Welds II: springer*, pp. 77-92, 2008.
- [10] D. G. Eskin & L. Katgerman, "A quest for a new hot tearing criterion", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 38, No. 7, pp. 1511-1519, 2007.
- [11] E. Gawronska, "Different techniques of determination of the cracking criterion for solidification in casting", *Procedia Engineering*, Vol. 177, pp. 86-91, 2017.
- [12] N. Hatami, R. Babaei, M. Dadashzadeh & P. Davami, "Modeling of hot tearing formation during solidification", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 205, No. 1, pp. 506-513, 2008.
- [13] S. Kou, "A criterion for cracking during solidification", *Acta Materialia*, Vol. 88, pp. 366-374, 2015.
- [14] M. Rappaz, J. M. Drezet & M. Gremaud, "A new hot-tearing criterion", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 30, No. 2, pp. 449-455, 1999.
- [15] N. Coniglio & C. E. Cross, "Mechanisms for solidification crack initiation and growth in aluminum welding", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 40, pp. 11, 2009.
- [16] M. Rappaz, "Modeling and characterization of grain structures and defects in solidification", *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 20, No. 1, pp. 37-45, 2016.
- [17] J. M. Drezet, M. S. Fernandes de Lima, J. D. Wagnière, M. Rappaz & W. Kurz, "Crack-free aluminium alloy welds using a twin laser process",
دانشکده متالورژی و مواد دانشگاه تهران و شرکت پرتو پردازش مواد تهران به خاطر همکاری صمیمانه‌شان تشکر می نمایند.
- ### ۶- مراجع
- [1] R. R. Ambriz, G. Mesmacque, A. Ruiz, A. Amrouche & V. H. López, "Effect of the welding profile generated by the modified indirect electric arc technique on the fatigue behavior of 6061-T6 aluminum alloy", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, 2010.
- [۲] ف. غروی، ا. ابراهیم زاده و ع. سهیلی، "ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لبه رویهم جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در سرعت های پیشروی متفاوت"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال دهم، شماره دوم، سال ۱۳۹۵.
- [3] D. Y. Kim & Y. W. Park, "Weldability evaluation and tensile strength estimation model for aluminum alloy lap joint welding using hybrid system with laser and scanner head", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, 2012.
- [4] A. Schneider, V. Avilov, A. Gumenyuk & M. Rethmeier, "Laser beam welding of aluminum alloys under the influence of an electromagnetic field", *Physics Procedia*, Vol. 41, 2013.
- [۵] م. جوکار، ف. مالک قاینی، م. ج. ترکمنی، ح. جغتایی و م. ص. عین الدین، "بررسی پارامترهای موثر بر دمش گاز محافظ در جوشکاری لیزر پالسی Nd:YAG"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال هشتم، شماره اول، سال ۱۳۹۳.
- [6] L. Katgerman & D.G. Eskin, "In search of the prediction of hot cracking in aluminium alloys", in *Hot Cracking Phenomena in Welds II*, T. Böllinghaus, H. Herold, C. E. Cross, and J. C. Lippold, Eds.: springer, 2008.
- [7] D. G. Eskin, Suyitno & L. Katgerman, "Mechanical properties in the semi-solid state and hot tearing of aluminium alloys", *Progress in Materials Science*, Vol. 49, 2004.

- [26] H. R. Zareie Rajani & A. B. Phillion, "3-D multi-scale modeling of deformation within the weld mushy zone", *Materials & Design*, Vol. 94, pp. 536-545, 2016.
- [27] H. R. Zareie Rajani & A. B. Phillion, "3D multi-scale multi-physics modelling of hot cracking in welding", *Materials & Design*, Vol. 144, pp. 45-54, 2018.
- [28] M. Sheikhi, F. Malek Ghaini & H. Assadi, "Solidification crack initiation and propagation in pulsed laser welding of wrought heat treatable aluminium alloy", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 19, No. 3, pp. 250-255, 2014.
- [29] M. Sheikhi, F. Malek Ghaini & H. Assadi, "Prediction of solidification cracking in pulsed laser welding of 2024 aluminum alloy", *Acta Materialia*, Vol. 82, pp. 491-502, 2015.
- [30] A. Eder, S. Jaber & N. Jank, "Using Simulation for Investigations of Hot Cracking Phenomena in Resistance Spot Welding of 6xxx Aluminum Alloys (AA6016 and AA6181)", in *Hot Cracking Phenomena in Welds II*, T. Böllinghaus, H. Herold, C. E. Cross, and J. C. Lippold, Eds.: Springer, 2008.
- [31] M. Mosallae pour, F. Bodaghi & M. Moshrefifar, "Surface modification of low carbon steel substrate by Al-rich clad layer applied by GTAW", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 206, 2011.
- [32] S. Kim, Y. Jeong, J. Park & Y. Lee, "Fundamental study on electron beam weld sections and strengths using AA6061-T6 aluminum alloy plate", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, 2013.
- [33] Z. Tang, T. Seefeld & F. Vollertsen, "Grain Refinement by Laser Welding of AA 5083 with Addition of Ti/B", *Physics Procedia*, Vol. 12, 2011.
- [34] N. S. Birdar & R. Raman, "Investigation of hot cracking behavior in transverse mechanically arc oscillated autogenous AA2014 T6 TIG welds", *Safety and Reliability of Welded Components in Energy and Processing Industry*, pp. 87-94, 2008.
- [18] R. P. Liu, Z. J. Dong & Y. M. Pan, "Solidification crack susceptibility of aluminum alloy weld metals", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 16, No. 1, pp. 110-116, 2006.
- [19] X. Wang, F. Lu, H. P. Wang, Z. Qu & L. Xia, "Micro-scale model based study of solidification cracking formation mechanism in Al fiber laser welds", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 231, pp. 18-26, 2016.
- [20] H. R. Zareie Rajani & A. B. Phillion, "A mesoscale solidification simulation of fusion welding in aluminum-magnesium-silicon alloys", *Acta Materialia*, Vol. 77, pp. 162-172, 2014.
- [21] M. Sistaninia, A. B. Phillion, J. M. Drezet & M. Rappaz, "Three-dimensional granular model of semi-solid metallic alloys undergoing solidification: Fluid flow and localization of feeding", *Acta Materialia*, Vol. 60, No. 9, pp. 3902-3911, 2012.
- [22] M. Bellet, G. Qiu & J. M. Carpreau, "Comparison of two hot tearing criteria in numerical modelling of arc welding of stainless steel AISI 321", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 230, pp. 143-152, 2016.
- [23] X. Wang, F. Lu, H. P. Wang, H. Cui, X. Tang & Y. Wu, "Mechanical constraint intensity effects on solidification cracking during laser welding of aluminum alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 218, pp. 62-70, 2015.
- [24] Y. Wei, Z. Dong, R. Liu & Z. Dong, "Modeling the Trans-Varestraint test with finite element method", *Computational Materials Science*, Vol. 35, No. 2, pp. 84-91, 2006.
- [25] Z. B. Dong & Y. H. Wei, "Three dimensional modeling weld solidification cracks in multipass welding", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 46, No. 2, pp. 156-165, 2006.

- [44] S. McFadden & D. Browne, "A generalized version of an ivantsov-based dendrite growth model incorporating a facility for solute measurement ahead of the tip", *Computational Materials Science*, Vol. 55, 2012.
- [45] J. P. Bergmann, M. Bielenin, M. Stambke, T. Feustel, P. V. Witzendorff & J. Hermsdorf, "Effects of diode laser superposition on pulsed laser welding of aluminum", *Physics Procedia*, Vol. 41, 2013.
- [46] Y. Danis, E. Lacoste & C. Arvieu, "Numerical modeling of inconel 738LC deposition welding: Prediction of residual stress induced cracking", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 14, pp. 2053-2061, 2010.
- [47] Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 43, 2012.
- [35] T. Yuan, S. Kou & Z. Luo, "Grain refining by ultrasonic stirring of the weld pool", *Acta Materialia*, Vol. 106, 2016.
- [36] P. Von Witzendorff, S. Kaierle, O. Suttman & L. Overmeyer, "In situ observation of solidification conditions in pulsed laser welding of AL6082 aluminum alloys to evaluate their impact on hot cracking susceptibility", *Metallurgical and Materials Transactions A, Journal Article*, Vol. 46, No. 4, pp. 1678-1688, 2015.
- [37] D. Suyitno, W. H. Kool & L. Katgerman, "Hot tearing criteria evaluation for direct-chill casting of an Al-4.5 Pct Cu alloy", *Metallurgical and Materials Transactions A*, pp. 1537-1546, 2005.
- [38] P. V. Witzendorff, S. Kaierle, O. Suttman & L. Overmeyer, "In situ observation of solidification conditions in pulsed laser welding of AL6082 aluminum alloys to evaluate their impact on hot cracking susceptibility", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 46, pp. 11, 2015.
- [39] M. Sheikhi, F. Malek Ghaini & H. Assadi, "Prediction of solidification cracking in pulsed laser welding of 2024 aluminum alloy", *Acta Materialia*, Vol. 82, pp. 12, 2015.
- [40] X. He, P. Fuerschbach & T. DebRoy, "Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 36, No. 12, pp. 1388, 2003.
- [41] X. He, J. Elmer & T. DebRoy, "Heat transfer and fluid flow in laser microwelding", *Journal of Applied Physics*, Vol. 97, No. 8, pp. 084909, 2005.
- [42] S. Kou, *Welding metallurgy*, Second ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [43] H. Ebrahimzadeh & S. A. A. A. Mousavi, "Investigation on pulsed Nd:YAG laser welding of 49Ni-Fe soft magnetic alloy", *Materials & Design*, Vol. 38, pp. 115-123, 2012.

۷- پی نوشت

- [1] Microscopic scale
 [2] Rappaz-Drezet-Gremaud
 [3] Mescoscopic scale
 [4] Macroscopic scale
 [5] Brittle temperature range
 [6] Semi-solid
 [7] Ductility
 [8] Keller's reagent
 [9] Vulnerable zone
 [10] Coherency temperature
 [11] Bridging temperature
 [12] Frequency
 [13] buoyancy

Investigation of aluminum pulsed laser welding based on the physical models for prediction of hot cracks

Hossain Ebrahimzadeh^{1,*}, Hassan Farhangi², Seyed Ali Asghar Akbari Mousavi³

1- Ph.D. Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Associated Prof., School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Associated Prof., School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

*Corresponding Author: h.ebrahimzadeh@ut.ac.ir

Abstract

It is necessary to use a physical model for the relationship between welding parameters and hot cracks. These models are available in micro, meso, and macro-scale. In this research, a sheet of 6061 aluminum alloy was welded by a Nd:YAG laser machine. For the first time, the diameter of the dendritic arm spacing in the aluminum laser weld was measured and the results were compared with the solidification models. Contrary to the prediction of hot crack models, increasing the dendritic arm spacing, decreasing the solidification rate, and the reduction of the strain rate did not reduce hot cracking. However, based on the pre-existing models, preheating should reduce hot cracks, but inversely increases the amount of cracks. The images of high speed cameras and the assessment of crack surface by a field emission scanning electron microscopy showed that in pulsed laser welding, hot cracks will be created in three steps: 1) initiation 2) the first step of propagation 3) the second step of propagation. Propagation in the second step will occur in the newly solidified weak grain boundary of the weld metal. What is finally seen as a crack in the weld seam is the solidification and high temperature cracks and therefore, the models that are considered for continuous fusion welding are required to be modified based on the conditions of the pulsed solidification and melting and the fracture of weak grain boundaries after solidification should also be taken into account.

Keywords: Hot Crack Physical Models, Aluminum Alloys, Pulsed Laser Welding, High Speed Camera, Fracture of Weak Grain Boundaries.

Journal homepage: ma.iaumajlesi.ac.ir

Please cite this article using:

Hossain Ebrahimzadeh, Hassan Farhangi, Seyed Ali Asghar Akbari Mousavi, Investigation of aluminum pulsed laser welding based on the physical models for prediction of hot cracks, in Persian, *New Process in Material Engineering*, 2019, 13(3), 49-63.