



بررسی تأثیر سرعت جوشکاری به روش SMAW و استحکام کششی و سختی فلز پایه (کربن استیل گرید B) در منطقه HAZ

امین جمال پور^۱، علی حیدری مقدم^{۲*}

چکیده

در این پژوهش، با استفاده از شبیه‌سازی عددی (نرم‌افزار آباکوس)، تغییر خواص فلز پایه (کربن استیل گرید B) در منطقه HAZ ناشی از جوشکاری و سرعت جوشکاری بر خواص ناحیه‌ی مذکور مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج حاصل از پژوهش بدین صورت می‌باشد؛ که با افزایش سرعت مقدار تنش در اطراف فلز پایه (کربن استیل گرید B) افزایش پیدا می‌کند و از طرفی با کاهش سرعت جوشکاری استحکام کششی افزایش می‌یابد، علاوه بر آن با افزایش سرعت سختی و انرژی ناشی از جوشکاری به روش SMAW به وجود آمده رو به کاهش است. با توجه به حداقل بودن سرعت (یعنی سرعت 2 mm/s) با تغییر جنس فلز پایه به طور میانگین استحکام کششی $84/78$ درصد تأثیرگذار می‌باشد و با بررسی بالاترین سرعت (یعنی سرعت 15 mm/s) با تغییر جنس فلز پایه به طور میانگین استحکام کششی $43/63$ درصد تأثیرگذار می‌باشد در نتیجه بررسی‌های صورت گرفته با توجه به تغییر سرعت تغییر جنس فلز پایه به طور میانگین استحکام کششی $61/12$ درصد تأثیرگذار می‌باشد از طرف دیگر با توجه به جنس ماده و حداقل بود مدول الاستیسیته در این تحقیق (مدول الاستیسیته 150 مگاپاسکال) با تغییر سرعت به طور میانگین در تنش $291/87$ درصد تأثیرگذار و با به حداقل رساندن مدول الاستیسیته با انتخاب نوع ماده (در این تحقیق مدول الاستیسیته 300 مگاپاسکال) با تغییر سرعت به طور میانگین در تنش $267/36$ درصد تأثیرگذار می‌باشد در نهایت می‌توان گفت که با بررسی‌های صورت گرفته با توجه به تغییر سرعت تغییر جنس فلز پایه به طور میانگین در تنش $274/85$ درصد تأثیرگذار می‌باشد و در مرحله بعد با بررسی‌های صورت گرفته بر روی فلز پایه با توجه به مدول الاستیسیته حداقل (150 مگاپاسکال) با تغییر سرعت به طور میانگین در انرژی $70/4$ درصد تأثیرگذار می‌باشد و با بررسی‌های صورت گرفته بر روی فلز پایه با توجه به مدول الاستیسیته حداکثر (300 مگاپاسکال) با تغییر سرعت به طور میانگین در انرژی $64/17$ درصد تأثیرگذار می‌باشد و در نهایت بررسی تأثیر سرعت جوش بر روی دما با بررسی‌های صورت گرفته و با تغییر سرعت جوشکاری $35/82$ درصد در افزایش دما قطعه تأثیرگذار است.

واژگان کلیدی: استحکام کششی و سختی، ناحیه متأثر از حرارت، سرعت جوشکاری، نوع فلز، نوع خواص، نرم‌افزار آباکوس

۱- گروه مهندسی ساخت و تولید، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

۲* - گروه مهندسی مواد و متالورژی، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
alheidarym@yahoo.com (عهده‌دار مکاتبات)

طی فرآیند جوشکاری، تغییرات متالورژیکی (تغییر در ساختار و فاز، تغییر در اندازه دانه‌بندی و تغییر در ترکیب شیمیایی) در اثر حرارت بالا در مواد به وجود آمده که این تغییرات باعث بروز عیوب متالورژیکی خواهند شد [۱]. تغییرات میکروساختاری باعث ایجاد نواحی مختلف جوش می‌شود. این نواحی شامل فلز پایه، ناحیه تحت عملیات ترمومکانیکی، ناحیه اغتشاش، ناحیه متأثر از جوش و ناحیه متأثر از حرارت می‌باشد [۲]. ناحیه‌ی متأثر از حرارت، از مهم‌ترین نواحی جوش بوده که تحت تأثیر تغییرات متالورژیکی گفته شده قرار دارد [۳]. ناحیه متأثر از حرارت، قسمتی از فلز جوش بوده که در آن اگرچه فلز پایه ذوب نشده، اما ساختار و دانه‌بندی آن در اثر حرارت ناشی از جوشکاری تغییر یافته است. حرارت ناشی از جوشکاری، شدیداً روی خواص منطقه متأثر از حرارت تأثیر می‌گذارد. به‌ویژه اینکه حرارت ورودی جوشکاری، رشد دانه در منطقه نزدیک خط ذوب را به مقدار زیادی افزایش می‌دهد. از طرفی ساختار دانه‌ها بر استحکام، چقرمگی، انعطاف‌پذیری و مقاومت خوردگی آلیاژها تأثیر می‌گذارد. در پایان فرآیندهای جوشکاری، به دلیل سرعت بالای سرد شدن، ساختارهای مارتنزیتی تشکیل می‌گردد. این نواحی مستعد ایجاد ترک در قطعه جوشکاری شده هستند [۴]. وقتی فلزات و آلیاژهایی که استحاله چندشکلی ندارند مانند مس، نیکل، آلومینیوم، جوش داده می‌شوند، ریزساختار در HAZ تغییر نمی‌کند. با این وجود که ممکن است تبلور مجدد یا رشد دانه در آن اتفاق بیفتد. این در حالی است که در فلزات و آلیاژهایی که استحاله چندشکلی دارند (مانند فولادها)، تغییرات ریزساختاری قابل ملاحظه‌ای در ناحیه متأثر از حرارت رخ داده که این تغییرات خواص مکانیکی و رفتار عملی اتصال جوش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو درک صحیح تغییر خواص فلز پایه در منطقه HAZ، اهمیت خود را نشان می‌دهد [۵].

رادفر در سال ۱۳۹۵، در تحقیقی، اتصال دو فولاد آستنیتی ۳۰۴ و فریتی ۳۳۰ به یکدیگر را با استفاده از دو فلز پرکننده آستنیتی L 308 L 316 با روش جوشکاری قوس- تنگستن با گاز محافظ منجر به تغییرات ریزساختاری در فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت HAZ داد. نتایج حاصل نشان داد که فلز جوش حاصل از فاز پرکننده L۳۱۶ سختی و مقاومت به ترک گرم بالاتری نسبت به جوش حاصل از فلز پرکننده L۳۰۸ دارد [۶]. وی^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۵، خواص ناحیه متأثر از حرارت ناشی از جوشکاری لیزری را مورد مطالعه قرار دادند. به این منظور تاریخچه حرارتی نواحی مختلف در HAZ ناشی از جوش لیزر به‌وسیله ترموکوپل اندازه‌گیری شده و سپس برای شبیه‌سازی گرمایی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که تاریخچه گرمایی در نواحی مختلف HAZ بسیار به فاصله از خط مرکزی جوش حساس هستند [۷]. سارکار^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۵، مطالعه‌ای روی تأثیرات حرارت ورودی جوش بر ابعاد منطقه‌ی متأثر از جوش و خواص مکانیکی فولاد AISI1518 انجام دادند. نتایج حاکی از این است که افزایش حرارت ورودی جوش می‌تواند موجب افزایش ابعاد HAZ و کاهش نرخ سرمایش در منطقه‌ی جوش شود. [۸]. وی^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۶، تأثیر جنس فلز پایه و سرعت جوشکاری را روی ریزساختار منطقه نفوذ و منطقه متأثر از حرارت را بررسی کردند. نتایج نشان داد که روند تبدیل شکل جوش از یک بطری بدون گردنه به یک سر ناخن با افزایش اندازه دانه‌های فلز پایه تغییر می‌کند و کمترین سختی و بیشترین مقدار کشیدگی در مرکز حوضچه‌ی جوش رخ می‌دهد. همچنین دیده شد که وقوع ترک خوردگی HAZ با شکاف مرز دانه‌ای رابطه‌ی مستقیم دارد [۹].

در این پژوهش، با استفاده از شبیه‌سازی عددی (نرم‌افزار آباکوس)، تغییر خواص فلز پایه در منطقه HAZ ناشی از جوشکاری و سرعت جوشکاری به روش SMAW بر خواص ناحیه‌ی مذکور مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بدین منظور در این پژوهش، ابتدا انواع تغییرات متالورژیکی ناشی از جوشکاری بر روی فلز پایه تشریح شده و نواحی به وجود آمده در فلز پایه ناشی از جوشکاری معرفی می‌شوند. سپس به‌طور خاص، منطقه‌ی متأثر از حرارت ناشی از جوشکاری در فلز پایه مورد توجه قرار گرفته و تغییر خواص این ناحیه تحلیل خواهد شد. در هر بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی، با نتایج بیان شده در مرجع [۲]، مقایسه و اعتبار سنجی خواهند شد. در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی به‌صورت کوپل غیرمستقیم حرارتی- تنش انجام شده است که شامل یک تحلیل حرارتی و یک تحلیل تنش است که از نتایج تحلیل حرارتی به‌عنوان ورودی تحلیل تنش استفاده می‌گردد. مش‌بندی اجزاء محدود نمونه شامل 12600 المان است. با در نظر گرفتن بیشینه دمای مربوط به نقاط روی نمونه به‌عنوان شاخص سنجش همگرایی جواب، این تعداد المان با اختلاف حدود 2% با تعداد المان بیشتر، پاسخ قابل قبولی را ارائه می‌نمایند. دقت می‌شود که نحوه مش‌بندی در هر دو تحلیل حرارتی و مکانیکی یکسان باشد تا نتایج تحلیل حرارتی به‌عنوان ورودی برای تحلیل مکانیکی قابل اعمال باشند. هدف ارائه این تحقیق از این جهت اهمیت دارد که راه‌های کاهش امکان ترک در منطقه HAZ را بررسی می‌کند و مورفولوژی انجماد و اندازه دانه فلز جوش را پیش‌بینی می‌کند.

1 Heat Affected Zone
2 Wei
3 Sarkar
4 Mei

۲- روش کار

پارامترهایی که در تحلیل حرارتی به عنوان داده‌های اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد، عبارت‌اند از گرمای ویژه، گرمای نهان، ضریب هدایت حرارتی، ضریب هدایت همرفت، ضریب صدور تابشی و چگالی. از این شش پارامتر، گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و ضریب هدایت همرفت، وابسته به درجه حرارت می‌باشند. ضریب هدایت همرفت و ضریب صدور تابشی جزء شرایط مرزی مسئله بوده و گرمای ویژه، گرمای نهان و چگالی برای به دست آوردن آنتالپی جسم، مورد استفاده قرار می‌گیرند. با افزایش دما، خواص مواد نظیر فولاد نرمه معمولی (فولاد نرمه در رده فولاد با کربن ملایم قرار دارد) تغییر می‌کند. بعد از TMAZ منطقه تحت تأثیر حرارت (HAZ) وجود دارد. این منطقه تحت تأثیر سیکل حرارتی قرار می‌گیرد ولی تغییر شکل پلاستیکی در آن رخ نمی‌دهد. ماهونی و همکارانش منطقه HAZ در آلیاژهای آلومینیم عملیات حرارتی‌پذیر را این‌گونه تعریف کرده‌اند که مواد در آن باید دمایی بالا را تجربه کنند. HAZ ساختار دانه‌ای همانند فلزات پایه را حفظ می‌کند. به هر صورت، اعمال دمای بالا تأثیر مهمی را روی ساختار رسوبات می‌گذارد رابطه همگن انتقال حرارت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] + Q(\phi) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه $K(\phi)$ ، $Q(\phi)$ و ϕ به ترتیب ضریب هدایت گرمایی، نرخ تولید گرمای داخلی و دما می‌باشند. در مسئله‌هایی نظیر انتقال حرارت و جریان سیال می‌بایست اثرهای گذرا بودن در نظر گرفته شود. به عنوان مثال ممکن است در یک تحلیل حرارتی، جریان حرارت ورودی وابسته به زمان باشد که در این صورت بایستی نرخ ذخیره شدن حرارت لحاظ شود. رابطه هدایت حرارتی گذرا با در نظر گرفتن ظرفیت حرارتی به صورت زیر درمی‌آید.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] + Q(\phi) = \rho c(\phi) \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

در این رابطه، c گرمای ویژه و ρ چگالی است.

شرط مرزی روی سطح‌های جسم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$K_x(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial x} L_x + K_y(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial y} L_y + K_z(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial z} L_z = q + q_c(\phi) + q_r(\phi) \quad (3)$$

در این رابطه L_x ، L_y و L_z کسینوس‌های هادی بردار عمود بر سطح می‌باشند. q شار حرارتی اعمال شده، q_c شار حرارتی ناشی از جابجایی و q_r شار حرارتی ناشی از تشعشع است. شارهای حرارتی جابجایی و تشعشعی به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$q_c = h_c(\phi)(\phi - \phi_e) \quad (4)$$

$$q_r = h_r(\phi)(\phi^4 - \phi_e^4) \quad (5)$$

h_c و h_r به ترتیب ضریب‌های انتقال حرارت جابجایی و تشعشعی بوده و ϕ_e دمای محیط خارج است. اگر خواص ماده مستقل از دما باشد مسئله یکنواخت خطی و اگر خواص مواد یا جریان حرارت مرزی وابسته به دما باشد مسئله ناخطی است. فرم اجزای محدود رابطه (۶) به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$C\dot{\Phi} + K\Phi + R = 0 \quad (6)$$

در این رابطه، C ماتریس گرمای ویژه، K ماتریس هدایت گرمایی و R بردار شار حرارتی است که به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$C = \int_V N^T \rho c(\phi) N dV \quad (7)$$

$$K = \int_V B^T k B dV \quad (8)$$

$$R = \int_V N^T Q dV \quad (9)$$

در روابط فوق N و B به ترتیب تابع‌های شکل و مشتق تابع‌های شکل می‌باشند. در رابطه هدایت حرارتی گذرا C ، K و Q به ϕ بستگی دارند و شرط‌های مرزی نیز تابعی از ϕ و t است. در نتیجه، حل رابطه مذکور نیاز به یک روش تکراری دارد. بنابراین به جای $\phi_{t+\Delta t}$ عبارت ϕ_t^i قرار داده می‌شود.

$$\Phi_{t+\Delta t}^i = \Phi_{t+\Delta t}^{i-1} + \Delta \Phi^i \quad (10)$$

$$C_{t+\Delta t}^i \dot{\Phi}_{t+\Delta t}^i + K_{t+\Delta t}^{i-1} \Delta \Phi^i = R_{t+\Delta t}^{i-1} - F_{t+\Delta t}^{i-1} \quad (11)$$

انتگرال گیری از نرخ دما، با استفاده از روش اولر پسرو انجام می گیرد و نرخ دما به صورت زیر تقریب زده می شود:

$$\dot{\Phi}_{t+\Delta t}^i = \frac{1}{\Delta t} [(\Phi_{t+\Delta t}^{i-1} + \Delta \Phi^i) - \Phi_t^i] \quad (12)$$

برای حل این رابطه روش های تکراری نیوتن-رافسون یا نیوتن-رافسون اصلاح شده مورد استفاده قرار می گیرد. رابطه های نهایی متناظر با این دو روش به ترتیب به صورت زیر بیان می شود.

$$\left[\frac{1}{\Delta t} C_{t+\Delta t}^i + K_{t+\Delta t}^{i-1} \right] \Delta \Phi^i = R_{t+\Delta t}^{i-1} - F_{t+\Delta t}^{i-1} - \frac{1}{\Delta t} C_{t+\Delta t}^i [\Phi_{t+\Delta t}^{i-1} - \Phi_t^i] \quad (13)$$

$$\left[\frac{1}{\Delta t} C_t^i + K_t^i \right] \Delta \Phi^i = R_{t+\Delta t}^{i-1} - F_{t+\Delta t}^{i-1} - \frac{1}{\Delta t} C_{t+\Delta t}^i [\Phi_{t+\Delta t}^{i-1} - \Phi_t^i] \quad (14)$$

برای حل رابطه حرارت مرتبط با فرآیند جوشکاری لازم است که منبع حرارتی (Q) و خواص مواد مورد نیاز در تحلیل حرارتی به نحوی مشخص گردد.

در عملیات جوشکاری، باید منبع حرارتی مدل سازی شود. منظور از مدل سازی منبع حرارتی، پیدا کردن راهی برای نشان دادن مقدار گرمای تولید شده در روند جوشکاری است. در تمام روش های جوشکاری، بخشی از گرمای ناشی از منبع حرارتی تلف می گردد و تمام انرژی به صورت کامل به ماده پرکننده انتقال داده نمی شود. بازده حرارتی نیز با توجه به روش های مختلف جوشکاری متفاوت است. بازده منبع حرارتی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta = \frac{Q}{Q_{nom.}} = \frac{Q}{EI} \quad (15)$$

بخشی از توان منبع حرارتی به قطعه کار منتقل می شود و قسمتی از آن توسط محیط اطراف هدر می رود. در رابطه (15)، Q گرمای ورودی $[W]$ ، E اختلاف پتانسیل الکتریکی قوس الکتریکی $[V]$ ، I شدت جریان و η بازده منبع حرارتی است که مقدار آن بستگی به روش جوشکاری دارد. برای توزیع شار حرارتی ناشی از جوشکاری، گولداک¹ یک توزیع گوسی را به صورت زیر معرفی نمود:

$$Q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3z^2}{c^2}} \quad (16)$$

در رابطه (16) با فرض این که در قسمت جلوی الکتروود شیب گرمایی بیشتر است، از یک ضریب اصلاحی (f) استفاده می شود. با استفاده از این ضریب، رابطه بالا به دو رابطه برای قسمت های جلو و عقب محل قرارگیری الکتروود تبدیل می گردد.

$$Q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f_f Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a_1^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3z^2}{c^2}} \quad (17)$$

$$Q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f_r Q}{a_2bc\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a_2^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3z^2}{c^2}} \quad (18)$$

در روابط (17) و (18)، Q از رابطه (19) به دست می آید. مقادیر ضرایب a_1 ، a_2 و b و c در شکل ۱ مشخص شده اند. ضرایب f به صورت زیر بیان می شوند.

$$f_f + f_r = 2 \quad f_r = \frac{2a_1}{a_1 + a_2} \quad f_f = \frac{2a_2}{a_1 + a_2} \quad (19)$$

در تمام فرآیندهای جوشکاری با قوس الکتریکی و الکتروود، قسمتی از حرارت ایجاد شده توسط قوس صرف ذوب کردن سیم جوش می‌شود. با معلوم بودن نرخ تغذیه سیم جوش و دمای قطرات سیم جوش ذوب شده به هنگام ورود به حوضچه مذاب، گرمای جذب شده از قوس الکتریکی توسط سیم جوش قابل محاسبه است. این گرما برابر با سطح زیر منحنی گرمای ویژه $(C_p - T)$ میان دمای اتاق و دمای قطرات مذاب الکتروود است به اضافه گرمای نهان ذوب که به خاطر رسیدن دما به مرحله تغییر فاز به آن اضافه می‌گردد. مقدار انرژی گرمایی گرفته شده از قوس الکتریکی توسط سیم جوش برابر است با:

$$Q_{EL} = \dot{m} (C_p \Delta T + L_f) \quad (20)$$

که در آن C_p گرمای ویژه، ΔT اختلاف دما، L_f گرمای نهان ذوب و \dot{m} نرخ ذوب شدن سیم جوش است که با معلوم بودن قطر سیم جوش و سرعت ذوب شدن آن از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$m = \rho \left(\frac{\pi}{4} d^2 \right) V \quad (21)$$

در این رابطه، d قطر سطح مقطع سیم جوش و V سرعت ذوب شدن آن است. در صورت بکار بردن سیستم واحد SI مقدار Q_{EI} برحسب (W) خواهد بود. انرژی خالصی که به صورت شار حرارتی به ورق و حوضچه مذاب داده می‌شود با کم کردن این مقدار از کل انرژی قوس الکتریکی، تعیین می‌گردد.

$$Q_{net} = Q_{Ar} - Q_{EI} \quad (22)$$

در اینجا Q_{Ar} گرمای تولیدی توسط قوس در یک روش جوشکاری خاص است که با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$Q_{Ar} = 60 EI \quad (23)$$

که در آن E اختلاف پتانسیل الکتریکی قوس برحسب ولت و I شدت جریان جوشکاری برحسب آمپر است. مقدار انرژی به دست آمده از رابطه (24) به صورت شار حرارتی با توزیع گوسی به سطح فوقانی ورق که در معرض قوس الکتریکی است داده می‌شود. توزیع گوسی را می‌توان به صورت رابطه زیر بیان کرد:

$$q(x, y, t) = q_0 \cdot \exp \left\{ \frac{-3 \left[(x - vt)^2 + y^2 \right]}{r_b^2} \right\} \quad (24)$$

که در آن:

$$q_0 = \frac{3Q_{net}}{\pi r_b^2} \quad (25)$$

در این رابطه‌ها r_b ، شعاع قوس الکتریکی است. r_b مشخصه تمرکز شدت قوس الکتریکی است و در تعیین توزیع گرمای ورودی، پارامتر بسیار حساسی است. تغییر مقدار شعاع قوس الکتریکی می‌تواند نتایج توزیع دمایی جوش را به مقدار زیادی تغییر دهد. باین حال اندازه‌گیری دقیق آن به صورت تجربی مشکل است.

v سرعت حرکت و در واقع همان سرعت جوشکاری است و Vt مسافتی است که پروفیل گوسی از آغاز جوشکاری تا لحظه t در روی محور x جابجا شده است. اگر از سیستم واحد SI استفاده شود، مقدار شار حرارتی به دست آمده از رابطه (25) برحسب $(\frac{W}{m^2})$ خواهد بود.

مشکل اصلی این روش بارگذاری در این است که در اینجا فرض می‌شود که همه گرما به صورت شار حرارتی از روی سطح منطقه جوش داده شده و اطراف آن وارد جسم قطعه می‌گردد، باینکه در عمل بخش زیادی از گرما از داخل شیار جوش و به وسیله ماده پرکننده جوش (فیلر) که در حالت مذاب است وارد جسم می‌گردد.

برای در نظر گرفتن نقش ماده پرکننده جوش در انتقال گرما از دستگاه جوشکاری به قطعه می‌توان از این روش استفاده کرد. در این روش فرض می‌شود که تمام گرمای ناشی از جوشکاری در داخل ماده پرکننده جوش تولید شده و به قطعه منتقل می‌گردد.

یعنی بارگذاری حرارتی به صورت گرمای حجمی در نظر گرفته می‌شود. اگر از سیستم واحد SI استفاده شود مقدار گرمای حجمی برحسب $(\frac{W}{m^3})$ خواهد بود. گرمای تولید شده، گذرا بوده و مقدار آن همراه با حرکت الکتروود بر روی خط جوش تغییر می‌کند. مقدار گرمای تولید شده به نوع جوشکاری بستگی دارد و مقدار آن از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$j = \frac{Q}{V} \times d \quad (26)$$

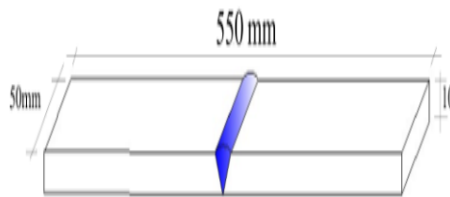
در این رابطه، J مقدار گرمای تولید شده برحسب ژول، d طول هر پاس جوشکاری و V سرعت جوشکاری است. مقدار Q از رابطه (۲۶) به دست می‌آید. J به دست آمده از رابطه (۲۷) را می‌توان با استفاده از رابطه زیر تبدیل به نرخ تولید گرما نمود.

$$H = \frac{J}{V_p \cdot t} \quad (27)$$

در این رابطه، H نرخ تولید گرما است که برحسب $(\frac{W}{m^3})$ است، V_p حجم ماده پرکننده جوش، که در هر پاس روی قطعه کار گذاشته می‌شود و t زمان یک پاس جوشکاری است. در حین جوشکاری انرژی حرارتی به منطقه‌ای شامل جسم جوش و قسمتی از قطعه کار اعمال می‌شود. مشکل اساسی این روش این است که در آن از انرژی حرارتی اعمال شده به قسمت‌های مجاور جسم جوش صرف نظر شده است.

۳- نتایج و بحث

به منظور اطمینان از مدل سازی در برنامه آباکوس و صحت نتایج جهت مطالعه پارامتریک با توجه به پژوهش انجام شده توسط کاظمی در سال ۱۳۹۵ [۲] که به صورت آزمایشگاهی به بررسی استحکام کششی قطعات جوشی که هدف از این پژوهش بررسی استحکام کششی می‌باشد.

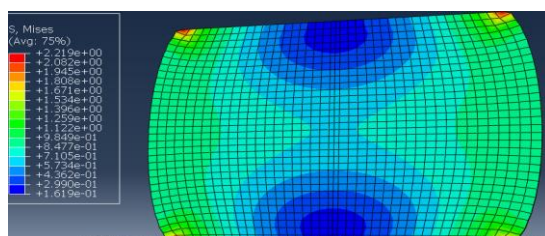


شکل ۱- نمونه طراحی انجام شده در نرم افزار

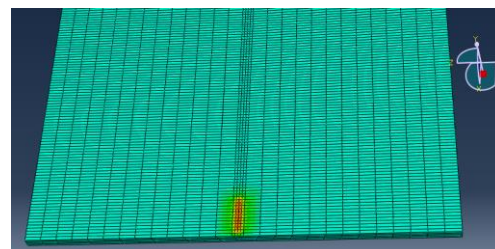
در این قسمت به مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی جهت اعتبارسنجی با پژوهش مورد نظر می‌پردازیم که با توجه به پژوهش آزمایشگاهی مقدار استحکام کششی در شکل (۱) نشان داده شده است.

۴- خروجی های گرافیکی

پس از بارگذاری و تحلیل سازه‌ها مورد بررسی به صورتی تحلیل حرارتی و مکانیکی که در فصل قبل بیان گردید، نمونه‌ای از تغییر تنش را در شکل (۲) و (۳) نشان داده شده است.



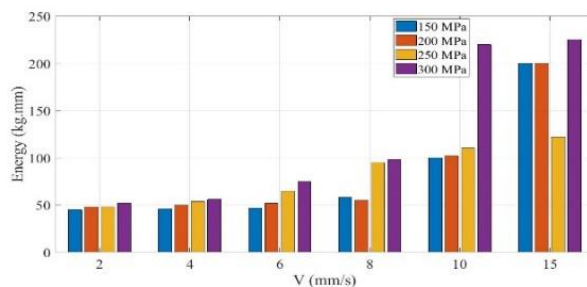
شکل ۳- تنش حاصل از تحلیل مکانیکی



شکل ۲- تنش حاصل از تحلیل حرارتی اطراف فلز پایه

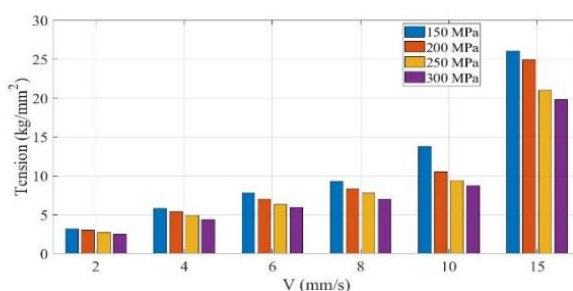
۵- نتایج شبیه سازی در نرم افزار

بدین منظور با توجه به اهداف پژوهش با تغییر سرعت جوش کاری از 2 mm/s تا 15 mm/s با تغییر جنس فلز پایه از 150 مگاپاسکال تا 300 مگاپاسکال پرداخته شده است، که با توجه به تحلیل حرارتی و مکانیکی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌دهیم در شکل ۴ نمودار میله‌ای مقایسه‌ای انرژی برای ۶ سرعت جوشکاری مختلف شامل سرعت‌های 2 ، 4 ، 6 ، 8 ، 10 و 15 میلی‌متر بر ثانیه در ۴ مدول الاستیسیته از 150 مگاپاسکال تا 300 مگاپاسکال نمایش داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که با افزایش سرعت جوشکاری از 2 تا 15 میلی‌متر بر ثانیه در هر مدول الاستیسیته، انرژی مورد نیاز بیشتر شده است. این موضوع نشان دهنده آن است که در حالت کلی سرعت جوشکاری بالاتر نیاز به انرژی بیشتری برای جوشکاری دارد.



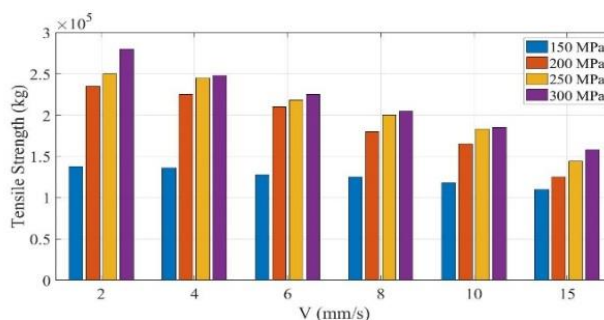
نمودار ۴: نمودار میله‌ای مقایسه‌ای انرژی

در شکل ۵ نمودار میله‌ای مقایسه‌ای تنش برای ۶ سرعت جوشکاری مختلف در ۴ مدول الاستیسیته نمایش داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که در تمامی سرعت‌های جوشکاری با افزایش سرعت جوشکاری میزان تنش بیشتر شده است. همچنین با افزایش مدول الاستیسیته در تمامی سرعت‌ها مقدار تنش کاهش پیدا کرده است. بنابراین کمترین میزان تنش مربوط به سرعت 2 میلی‌متر بر ثانیه با مدول الاستیسیته 300 مگاپاسکال و بیشترین میزان مربوط به سرعت جوشکاری 15 میلی‌متر بر ثانیه با مدول الاستیسیته 150 مگاپاسکال است.



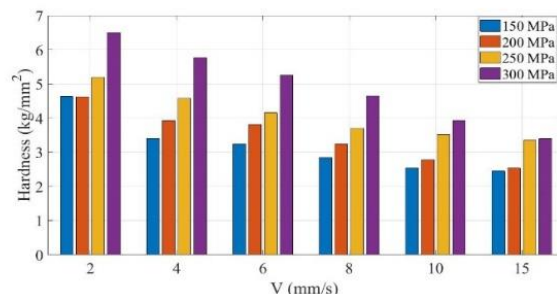
نمودار ۵: نمودار میله‌ای مقایسه‌ای تنش

در شکل ۶ نمودار میله‌ای مقایسه‌ای استحکام کششی برای ۶ سرعت جوشکاری مختلف نمایش داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که با افزایش سرعت جوشکاری در تمامی حالت‌ها، میزان استحکام کششی جوش کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش مدول الاستیسیته از 150 به 300 مگاپاسکال میزان استحکام کششی افزایش می‌یابد. بنابراین بیشترین میزان استحکام کششی مربوط به سرعت 2 میلی‌متر بر ثانیه با مدول الاستیسیته 300 مگاپاسکال و کمترین استحکام کششی مربوط به بالاترین سرعت جوش (15 میلی‌متر بر ثانیه) با کمترین مدول الاستیسیته (150 مگاپاسکال) است.



نمودار ۶: نمودار میله‌ای مقایسه‌ای استحکام کششی

در شکل ۷ نمودار میله‌ای مقایسه‌ای سختی جوش نمایش داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که مشابه نمودار استحکام کششی جوش با یک روند کلی با افزایش سرعت جوشکاری در تمامی حالت‌ها، میزان سختی جوش کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش مدول الاستیسیته از ۱۵۰ به ۳۰۰ مگاپاسکال میزان سختی افزایش می‌یابد. بنابراین مشابه بررسی استحکام جوش، بیشترین میزان سختی مربوط به سرعت ۲ میلی‌متر بر ثانیه با مدول الاستیسیته ۳۰۰ مگاپاسکال و کمترین میزان استحکام کششی مربوط به بالاترین سرعت جوش (۱۵ میلی‌متر بر ثانیه) با کمترین مدول الاستیسیته (۱۵۰ مگاپاسکال) است.



نمودار ۷: نمودار میله‌ای مقایسه‌ای سختی جوش

بدین صورت که با توجه به حداقل بودن سرعت (یعنی سرعت ۲mm/s) با تغییر جنس فلز پایه به‌طور میانگین استحکام کششی ۸۴/۷۸ درصد تأثیرگذار می‌باشد و با بررسی بالاترین سرعت (یعنی سرعت ۱۵mm/s) با تغییر جنس فلز پایه به‌طور میانگین استحکام کششی ۴۳/۶۳ درصد تأثیرگذار می‌باشد در نتیجه بررسی‌های صورت گرفته با توجه به تغییر سرعت تغییر جنس فلز پایه به‌طور میانگین استحکام کششی ۶۱/۱۲ درصد تأثیرگذار می‌باشد از طرف دیگر با توجه به جنس ماده و حداقل بود مدول الاستیسیته در این تحقیق (مدول الاستیسیته ۱۵۰ مگاپاسکال) با تغییر سرعت به‌طور میانگین در تنش ۲۹۱/۸۷ درصد تأثیرگذار و با به حداقل رساندن مدول الاستیسیته با انتخاب نوع ماده (در این تحقیق مدول الاستیسیته ۳۰۰ مگاپاسکال) با تغییر سرعت به‌طور میانگین در تنش ۲۶۷/۳۶ درصد تأثیرگذار می‌باشد در نهایت می‌توان گفت که با بررسی‌های صورت گرفته با توجه به تغییر سرعت تغییر جنس فلز پایه به‌طور میانگین در تنش ۲۷۴/۸۵ درصد تأثیرگذار می‌باشد و در مرحله بعد با بررسی‌های صورت گرفته بر روی فلز پایه با توجه به مدول الاستیسیته حداقل (۱۵۰ مگاپاسکال) با تغییر سرعت به‌طور میانگین در انرژی ۷۰/۴ درصد تأثیرگذار می‌باشد و با بررسی‌های صورت گرفته بر روی فلز پایه با توجه به مدول الاستیسیته حداکثر (۳۰۰ مگاپاسکال) با تغییر سرعت به‌طور میانگین در انرژی ۶۴/۱۷ درصد تأثیرگذار می‌باشد و در نهایت بررسی تأثیر سرعت جوش بر روی دما با بررسی‌های صورت گرفته و با تغییر سرعت جوشکاری ۳۵/۸۲ درصد در افزایش دما قطعه تأثیرگذار است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پژوهش بدین صورت می‌باشد، با افزایش سرعت مقدار تنش در اطراف فلز پایه افزایش پیدا می‌کند و از طرفی با کاهش سرعت جوشکاری استحکام کششی افزایش می‌یابد، علاوه بر آن با افزایش سرعت سختی و انرژی به وجود آمده رو به کاهش است.

منابع

1. Y.D. Hana, H.Y. Jing, "Welding Heat input Effect on the Hydrogen permeation in the X80 steel Welded joints", Materials Chemistry and Physics, Vol. 132, 2012, pp. 216-222.
2. کاظمی، س. ع. و میرزاآقایی، م.، (۱۳۹۵)، بررسی آزمایشگاهی تعداد دفعات جوشکاری تعمیری در محل اتصال بر روی استحکام کششی قطعه فولادی، فصلنامه آنالیز سازه- زلزله، دوره ۱۳، شماره ۳.
3. رضوانی توکل، مهدی و روح اله محمدی، ۱۳۹۵، بررسی ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) در جوشکاری و تأثیرات آن در ریز ساختار مواد جوشکاری شده، چهارمین کنفرانس ملی و دومین کنفرانس بین المللی پژوهش‌هایی کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، تهران
4. شمعیان، م.، ۱۳۸۹. متالورژی جوشکاری و جوشپذیری فولادهای زنگ‌نزن، تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی.

۵. خبازنوری، آر.ش. ۱۳۸۹. تاثیر حرارت ورودی جوشکاری بر روی خواص مکانیکی و ریز ساختار فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت جوش (HAZ) در جوشکاری زیرپودری فولاد کم آلیاژ استحکام بالا، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد- جوشکاری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
۶. رادفر، ح.، (۱۳۹۵)، بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی در منطقه اتصال غیرهمجنس فولادهای زنگ‌نزن، پنجمین همایش پژوهش‌های نوین در علوم و فناوری.
7. Wei, C., Zhang, J., Yang, S., Tao, W., Wu, F., & Xia, W. (2015). Experiment-based regional characterization of HAZ mechanical properties for laser welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(9-12), 1629-1640.
8. Sarkar, A., Dey, P., Kar, P., Rai, R. N., & Saha, S. C. (2015). A Study on the Effects of Heat Input on Size of Heat-Affected Zone (HAZ) and Mechanical Properties of AISI 1518 Grade Steel in Submerged Arc-Welding Process. *RIET-IJSET: International Journal of Science, Engineering and Technology*, 2(2), 158-170.
9. XU W.W., WANG Q. E8, PAN T.8, SU H.8, YANG C. (1972). E8 Effect of Welding Heat Input on Simulated HAZ Microstructure and Toughness of a V-N Microalloyed Steel. *Proceedings of Sino-Swedish Structural Materials Symposium 8220* [3] M.B. Bever, P.F. Duwez, *Mater. Sci. Eng.* 10:1-8.
10. Barbaro, F. J., Zhu, Z., Kuzmikova, L., Li, H., & Gray, J. M. (2013). Towards improved steel alloy designs for control of weld heat affected zone properties.
11. Barbaro, F., Kuzmikova, L., Zhu, Z., & Li, H. (2014). Control of Weld HAZ Properties in Modern High Strength Pipeline Steels. In 2014 10th International Pipeline Conference (pp. V003T07A029-V003T07A029). American Society of Mechanical Engineers.
12. Esmailzadeh, M., Shamanian, M., Kermanpur, A., and Saeid, T., (2013). "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Lean Duplex Stainless Steel", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 561, pp. 486-491.
۱۳. اهل‌سرمدی، س. م.، شمعانیان، م.، ادریس، ح.، عطاپور، م. و بهجت، ا.، (۱۳۹۶)، جوشکاری فولاد زنگ نزن سوپر دو فاز S32750 UNS به روش اصطکاکی اغتشاشی و ارزیابی ریزساختار، خواص مکانیکی و خوردگی آن، فصلنامه علمی پژوهشی مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۶، شماره ۱، صص ۹۷-۱۲۰.
۱۴. رضوانی‌توکل، م. و محمدی، ر.، (۱۳۹۵)، بررسی ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) در جوشکاری و تاثیرات آن در ریزساختار مواد جوشکاری شده، چهارمین کنفرانس ملی و دومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌هایی کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.
۱۵. رنجبرنوده، ا.، کوکبی، س. و سراج‌زاده، (۱۳۸۹)، بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری بر منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ نزن AISI ۴۰۹ به روش EBSD، نشریه علم مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، سال دوم، شماره ۱.
۱۶. شرفی، ش.، دهکردی، ا. و سرمست، غ. ر.، (۱۳۸۳)، بررسی و مقایسه ریزساختار و خواص مکانیکی فلز جوش آلیاژ مونل ۴۰۰ جوشکاری شده با روش‌های GTAW و SMAW، هشتمین کنگره سالانه انجمن مهندسين متالورژی ایران، تهران، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مواد.
۱۷. شکوهی، م. ح. و فرزادی، ع.، (۱۳۹۲)، شبیه‌سازی اثر سرعت و شدت جریان جوشکاری براندازه دانه و پهنای ناحیه متأثر از حرارت آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ به روش جوشکاری GTAW، اولین همایش ملی فلزات و آلیاژهای غیرآهنی (مواد و فناوری‌های نوین کاربردی).
۱۸. عامریان‌نژادفلاحیه، م. و دهملایی، ر.، (۱۳۹۲)، بررسی تأثیر حرارت ورودی و فرآیند جوشکاری بر گسترش ناحیه متأثر از حرارت در اتصال غیرمشابه هستلوی به فولاد مقاوم به حرارت، سومین همایش ملی نفت، گاز و پتروشیمی.
۱۹. غلامی، ع.، خلیج، غ. ر. و قاسمی، د.، (۱۳۹۴)، بررسی تأثیر سیکل عملیات حرارتی پس از جوش روی ریزساختار و خواص مکانیکی در منطقه متأثر از حرارت در فرآیند جوشکاری القایی فرکانس بالا فولاد API X60، مجله ریخته‌گری، سال ۴۴، شماره ۱۰۷، صص ۴۷-۵۴.
۲۰. محمودیان، ع. ر. و یعقوبی‌نژاد، ی.، (۱۳۸۷)، شبیه‌سازی ریزساختار منطقه متأثر از حرارت (HAZ) و پروفیل دمایی در جوشکاری GTAW فولاد زنگ نزن ۳۱۶، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، سال دوم، شماره هفتم.

Investigating the effect of welding speed and tensile strength and hardness of base metal (carbon steel grade B) in HAZ region

Amin Jamalpour, Ali Heidary moghadam

Abstract

Therefore, in this study, using numerical simulation (abacus software), the change of base metal properties (Carbon Steel Grade B) in HAZ region due to welding and welding speed on the properties of the area will be investigated. The results show that as the velocity increases, the amount of stress around the base metal (Carbon Steel Grade B) increases and at the same time increases as the welding speed decreases with increasing tensile strength and decreases, it is declining with increasing speed of hardness and energy due to SMAW welding.. Due to the minimum speed (ie mm / s2 speed) with changing the base metal material as an average tensile strength of 84.78% is effective and by examining the highest speed (ie mm15 mm / s speed) with changing the base metal material as the average tensile strength 63/63. 43% is effective as a result of studies based on changes in the rate of change of base metal as an average tensile strength is 61.12% effective. On the other hand, due to the material and minimum elasticity in this study (150 MPa modulus of elasticity) By changing the average speed in 291.87% stress and minimizing the modulus of elasticity by selecting the type of material (in this study the modulus of elasticity of 300 megapascals) by changing the average speed in 267.36% of the stress is effective, we can finally say According to the studies, due to the change in the rate of change of the base metal, it is effective on average in the stress of 274.85%, and in the next step, according to the studies performed on the base metal, according to the elastic modulus of minimum (150 MPa) with the change of speed Average energy is 70.4% It is effective and according to the studies performed on the base metal according to the maximum modulus of elasticity (300 MPa) with the change of speed, on average, it is effective in energy of 64.17% and finally the study of the effect of welding speed on temperature with the changes made and changed. Welding speed of 35.82% is effective in increasing the temperature of the part.

Keywords: Stretch strength and stiffness, Heat Affected Area, Welding Speed, Type of metal, type of properties, Abacus Software