

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تهران  
پردیس دانشکده‌های فنی  
دانشکده مهندسی متالورژی و مواد

# بررسی جوشکاری انفجاری کامپوزیت سه لایه برنج Ms90 / فولاد St14 / برنج Ms90

نگارش:  
البرز فتحی یونسی

استاد راهنما: دکتر سید علی اصغر اکبری موسوی

استاد مشاور: دکتر احمدعلی آماده

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد  
در رشته مهندسی مواد  
گرایش جوشکاری

مهر ۱۳۸۲

تقدیم به:

وجود پر مهر همسر

دستان گرم پدر

قلب رئوف مادر

نگاه پر امید برادر

## چکیده

در این پژوهش به بررسی شبیه سازی فرآیند و متالورژی فصل مشترک های حاصل از جوشکاری انفجاری سه لایه کامپوزیت برنج Ms90 / فولاد St14 / برنج Ms90 پرداخته شده است. اثر متغیرهایی مانند نسبت بار انفجاری (1/8، 1، 1/2 و 2) و همچنین فواصل توقف بالا و پایین (1 و 1/5 میلیمتر) و همچنین عملیات حرارتی تنش گیری بر روی هندسه و ریز ساختار، سختی موضع اتصال و استحکام برشی آن مورد بررسی قرار گرفت.

شبیه سازی فرآیند توسط نرم افزار ABAQUS و با استفاده از معادلات Johnson-Cook برای رفتار مکانیکی مواد انجام شد. برای مدل کردن رفتار ماده منفجره با سرعت پایین از معادلات حالت Williamsburg استفاده شده است. پارامتر های فیزیکی از قبیل فشار، تنش برشی، کرنش پلاستیک و پارامتر های عملی مانند سرعت صفحه پرنده و زاویه دینامیکی برخورد برای همه نمونه ها به دست آمده اند. نتایج شبیه سازی نشان داد که این پارامتر های عملی در مقایسه با روابط موجود تطابق مناسبی دارند و همه نمونه ها در پنجره جوشکاری رسم شده قرار دارند.

نتایج حاصل از مطالعات ریزساختاری نشان داد که با افزایش نسبت بارگذاری انفجاری و فاصله توقف، فصل مشترک اتصال، از حالت صاف به حالت موجی تبدیل شده و ادامه طول موج و دامنه امواج افزایش پیدا می کنند. در این حال به تدریج مراکز انجمادی در فصل مشترک ها نمایان شده و رشد پیدا می کنند تا به صورت لایه پیوسته ای در فصل مشترک قرار می گیرند.

بررسی های پراش پرتو ایکس نشان می دهد که علیرغم تشکیل فاز مذاب در فصل مشترک، ترکیب بین فلزی جدیدی به وجود نیامده است و فقط مذاب حاصله مخلوطی دو فازی از آهن و مس می باشد.

در همه نمونه ها فصل مشترک های بالا از فصل مشترک های پایین حالت موجی بیشتری از خود نشان داد که نشان دهنده انرژی جنبشی بیشتری بوده است که در فصل مشترک های بالا صرف شده است.

استحکام برشی فصل مشترک های اتصال با افزایش نسبت بار انفجاری ابتدا یک حد بیشینه از خود نشان می دهد و سپس افت پیدا می کند که علت این امر پدید آمدن فاز مذاب در فصل مشترک می باشد. اما همه نمونه ها استحکامی بالاتر از حد استاندارد از خود نشان دادند که نشان دهنده چقرمگی مناسب فاز مذاب می باشد. بررسی های سطوح شکست این موضوع را تایید می کند.

عملیات حرارتی تنش گیری، تبلور مجدد در آلیاژ فولادی و آنیل کامل را در آلیاژ مسی به وجود آورد. با افزایش زمان عملیات حرارتی بر میزان استحاله افزوده و از سختی موضع اتصال کاسته شد. البته عملیات حرارتی تنش گیری، تاثیر زیادی بر روی مراکز انجمادی نداشت.

## تقدیر و تشکر

بر خود واجب می دانم مراتب سپاس و امتنان خود را نسبت به استاد راهنمای ارجمندم جناب آقای دکتر سید علی اصغر اکبری موسوی که در تمام مراحل کار با تشویق ها و راهنمایی هایشان یاریم نمودند و استاد مشاور گرامی جناب آقای دکتر احمدعلی آماده که زحمت مشاوره این پایان نامه را بر عهده داشتند، ابراز نمایم.

از اساتید محترم جناب آقای دکتر غلامحسین لیاقت و نیز جناب آقای دکتر سید فرشید کاشانی بزرگ که قبول زحمت نموده و داوری این پایان نامه را پذیرفتند کمال تشکر را دارم. از مسئول آزمایشگاه متالوگرافی جناب آقای مهندس حسن آبادی صمیمانه تشکر می کنم. در نهایت زحمات دوستان عزیزم به ویژه آقایان مهندس علی طالبی و سید تیرداد نیک نژاد که در انجام آزمایش های XRD و SEM نهایت یاری را به بنده داشته اند، می ستایم.

## فهرست مطالب

### فصل اول

مقدمه ..... ۱

### فصل دوم

مروری بر منابع ..... ۳

۱-۲- مبانی جوشکاری انفجاری ..... ۵

۱-۱-۲- ماهیت اتصال در فصل مشترک ..... ۶

۲-۱-۲- پدیده تشکیل جت ..... ۶

۳-۱-۲- انواع فصل مشترک جوش ..... ۷

۴-۱-۲- مکانیزم های تشکیل موج ..... ۹

۱-۴-۱-۲- مکانیزم دندان زنی جت ..... ۹

۲-۴-۱-۲- نظریه دوم: مکانیزم ناپایداری جریان ..... ۱۱

۳-۴-۱-۲- مکانیزم امواج تنشی ..... ۱۵

۵-۱-۲- متغیرهای اصلی جوشکاری انفجاری ..... ۱۶

۱-۵-۱-۲- سرعت برخورد صفحه پرنده ..... ۱۷

۲-۵-۱-۲- سرعت جوشکاری ..... ۱۸

۳-۵-۱-۲- زاویه دینامیکی برخورد ..... ۱۸

۴-۵-۱-۲- انرژی ضربه ..... ۱۹

۶-۱-۲- بررسی پارامترهای موثر بر جوشکاری انفجاری ..... ۲۱

۱-۶-۱-۲- عوامل تاثیر گذار بر روی پارامترهای برخورد ..... ۲۳

۱-۶-۱-۲- هندسه فرایند ..... ۲۳

۲-۶-۱-۲- نوع ماده منفجره مورد استفاده ..... ۲۳

۳-۶-۱-۲- فاصله توقف ..... ۲۴

۴-۶-۱-۲- صفحه واسطه و نقش آن ..... ۲۵

۵-۶-۱-۲- صافی سطح ..... ۲۵

۶-۶-۱-۲- سندان ..... ۲۶

۲-۲- پنجره جوشکاری انفجاری ..... ۲۶

۱-۲-۲- حداقل و حداکثر زاویه دینامیکی ..... ۲۶



- ۱-۱-۴ حدافل و حداکثر زاویه دینامیکی ..... ۵۶
- ۲-۱-۴ تشکیل جت پلاسمایی ..... ۵۶
- ۳-۱-۴ ناحیه تغییر نوع فصل مشترک از صاف به موجی ..... ۵۶
- ۴-۱-۴ مرز بالای پنجره جوشکاری ..... ۵۶
- ۵-۱-۴ مرز بالای پنجره جوشکاری ..... ۵۷
- ۲-۴ نتایج شبیه سازی فرآیند جوشکاری انفجاری ..... ۵۹
- ۱-۲-۴ فشار وارد بر صفحات در حین برخورد ..... ۶۰
- ۲-۲-۴ مقدار تنش وان-میزر صفحات در حین برخورد ..... ۶۱
- ۳-۲-۴ مقدار تنش برشی صفحات در حین برخورد ..... ۶۲
- ۴-۲-۴ میزان کرنش پلاستیک ایجاد شده در هنگام برخورد ..... ۶۴
- ۵-۲-۴ زاویه دینامیکی برخورد ..... ۶۵
- ۶-۲-۴ سرعت برخورد ..... ۶۸
- ۷-۲-۴ مقایسه نتایج شبیه سازی با نتایج عملی ..... ۷۰
- ۳-۴ تحلیل مصرف انرژی جنبشی در هر فصل مشترک ..... ۷۲
- ۴-۴ بررسی های ریزساختاری ..... ۷۵
- ۵-۴ بررسی فصل مشترک به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی ..... ۸۵
- ۶-۴ مطالعات فازبندی فصل مشترک های اتصال توسط پراش پرتو ایکس ..... ۸۸
- ۷-۴ بررسی استحکام برشی اتصالات جوشکاری ..... ۹۰
- ۸-۴ بررسی مقادیر سختی مقاطع عرضی اتصالات ..... ۹۲
- ۹-۴ بررسی سطح شکست نمونه های تست برشی ..... ۹۵
- ۱۰-۴ عملیات حرارتی تنش زدایی ..... ۹۷
- ۱-۱۰-۴ تاثیر عملیات حرارتی بر ریز ساختار فصل مشترک ..... ۹۹
- ۲-۱۰-۴ تاثیر عملیات حرارتی بر روی پروفیل سختی ..... ۱۰۲

## فصل پنجم

- نتیجه گیری و پیشنهادها ..... ۱۰۸
- منابع و مراجع ..... ۱۱۲



## فهرست جداول

- جدول (۱-۳): آنالیز ترکیب شیمیایی ورق های مورد استفاده..... ۴۶
- جدول (۲-۳): خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژهای مورد استفاده..... ۴۶
- جدول (۳-۳): طراحی آزمایش های جوش های انفجاری..... ۴۸
- جدول (۴-۳): ثوابت مربوط به معادله جانسون-کوک برای آلیاژهای برنج و فولاد کم کربن..... ۴۹
- جدول (۵-۳): مشخصات نمونه های عملیات حرارتی..... ۵۴
- جدول (۱-۴) پارامترهای پیش بینی شده جوشکاری انفجاری به کمک شبیه سازی به همراه حداقل و حداکثر مقادیر مورد استفاده..... ۷۱
- جدول ۲-۴- نتایج مربوط به مقادیر مصرف انرژی در هر کدام از فصل مشترک های بالا و پایین به کمک روابط تئوری و نتایج شبیه سازی..... ۷۴
- جدول ۳-۴- طول موج و دامنه امواج برای نمونه هایی با نسبت بار انفجاری ثابت ۱ و فواصل توقف متفاوت..... ۸۲
- جدول (۴-۴): آنالیز ترکیب شیمیایی در نقاط مختلف شکل ۴-۲۰-د..... ۸۷

## فهرست شکل ها

- شکل (۱-۲): اثرات پاشش جت فلز بر روی یک صفحه فلزی ..... ۷
- شکل (۲-۲): نمونه ای از انواع فصل مشترک های احتمالی در پروسه جوشکاری انفجاری (الف) فصل مشترک صاف (ب) فصل مشترک با موج های کوچک (ج) فصل مشترک با موج های بزرگ (د) فصل مشترک موجی به همراه لایه های مذاب پیوسته (ه) فصل مشترک موجی به همراه بسته های مذاب منجمد ..... ۸
- شکل (۳-۲): تشکیل موج بر اساس نظریه بهرانی و دیگران ..... ۱۰
- شکل (۴-۲): مسیر گردابه های کارمن ..... ۱۲
- شکل (۵-۲): مرز های نظری و واقعی شکل گیری موج ..... ۱۳
- شکل (۶-۲): مکانیزم پیشنهادی کوالیک و هی ..... ۱۴
- شکل (۷-۲): مکانیزم انتشار امواج تنشی در فلزات ..... ۱۵
- شکل (۸-۲): دیاگرام سرعت برای دو چیدمان موازی (بالا) و مورب (پایین) ..... ۱۷
- شکل (۹-۲): جوشکاری انفجاری مس-مس و تشکیل مذاب در مرکز گردابه در اثر سرعت برخورد زیاد ..... ۲۰
- شکل (۱۰-۲): فصل مشترک Cu/SS در دو نسبت انفجار ..... ۳۱
- شکل ۱۱-۲: تصاویر SEM مربوط به دو فصل مشترک در نسبت های انفجار متفاوت ..... ۳۲
- شکل (۱۲-۲): (الف) آرایش اولیه صفحات و ماده منفجره برای اتصال (ب) هندسه فصل مشترک در نقاط مختلف بر اساس نسبت انفجار و فاصله از نقطه انفجار ..... ۳۳
- شکل (۱۳-۲): تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک های مس / فولاد با فاصله های توقف متفاوت ..... ۳۴
- شکل (۱۴-۲): دیاگرام تعادلی Fe-Cu ..... ۳۷
- شکل (۱۵-۲): ریز ساختار ریختگی Fe-40%Cu کوئچ شده با آب (الف) نمای کلی از دندریت های موجود در ریز ساختار (ب) مقطع عرضی از یک دندریت بعد از حکاکی توسط نایتال ..... ۳۷
- شکل (۱۶-۲): تصاویر SEM مربوط به ساختارهای متفاوت بسته های مذاب (الف) ساختار کاملاً همگن (ب) ساختاری با ذرات بسیار ریز درون آن ..... ۳۸
- شکل (۱۸-۲): ریز ساختار مذاب به وجود آمده در ذوب سطحی توسط پرتو الکترونی ..... ۳۹

- شکل (۲-۱۹): هیستوگرام مربوط به تعداد بسته های مذاب به عنوان تابعی از درصد آن در ترکیب شیمیایی ..... ۴۰
- شکل (۲-۲۰): تصاویر SEM مربوط به (الف) ترکیب شیمیایی با ۴۰ درصد مس (ب) ترکیب شیمیایی با ۶۰ درصد مس ..... ۴۱
- شکل (۲-۲۱): پروفیل سختی اتصال Cu/SS در دونسبت انفجار متفاوت ..... ۴۱
- شکل (۲-۲۲): پروفیل سختی در فصل مشترک جوشکاری انفجاری مس/ فولاد زنگ نزن در فواصل توقف متفاوت ..... ۴۲
- شکل (۲-۲۳): نتایج تست های استحکام برشی بر حسب نسبت انفجار در فواصل مختلف توقف ..... ۴۳
- شکل (۳-۱): شماتیک چیدمان اولیه صفحات قبل از انفجار ..... ۴۷
- شکل (۳-۲): شماتیک نمونه های استحکام برشی ..... ۵۲
- شکل (۳-۳): تعدادی از نمونه های آزمایش استحکام برشی ..... ۵۲
- شکل (۳-۴): نمایی از قید و بند به کار رفته در آزمایش استحکام برشی و همچنین نحوه قرار گیری نمونه ها در آن ..... ۵۲
- شکل (۴-۱): پنجره جوشکاری انفجاری برای اتصال برنج Ms۹۰ به فولاد St۱۴ به همراه داده های حاصل از شبیه سازی ..... ۵۸
- شکل (۴-۲): پیشرفت اتصال کامپوزیت سه لایه در زمان های مختلف از ابتدا تا انتهای فرآیند (الف) شروع فرآیند (ب) ۱۲ میکروثانیه (ج) ۲۰ میکروثانیه (د) ۳۲ میکروثانیه (ه) ۴۰ میکروثانیه ..... ۵۹
- شکل (۴-۳): پروفیل فشار در سطوح تماسی در طول زمان (الف) فصل مشترک بالا (ب) فصل مشترک پایین ..... ۶۰
- شکل (۴-۴): نمودار تنش وان- میزز در سطوح تماسی در طول زمان (الف) فصل مشترک بالا (ب) فصل مشترک پایین ..... ۶۱
- شکل (۴-۵): نمودار تنش وان میزز بر حسب نسبت بار انفجاری ..... ۶۲
- شکل (۴-۶): نمودار تنش برشی در سطوح تماسی در طول زمان (الف) فصل مشترک بالا (ب) فصل مشترک پایین ..... ۶۲
- شکل (۴-۷): نمودار تنش برشی بر حسب نسبت بار انفجاری ..... ۶۳
- شکل (۴-۸): نمودار کرنش پلاستیک سطوح تماسی در طول زمان (الف) فولاد در فصل مشترک بالا (ب) فولاد در فصل مشترک پایین (ج) برنج در فصل مشترک بالا (د) برنج در فصل مشترک پایین ..... ۶۴
- شکل (۴-۹): نمودار تنش برشی بر حسب نسبت بار انفجاری ..... ۶۵

- شکل (۴-۱۰): نمودار زاویه دینامیکی برخورد بین سطوح تماسی در طول زمان (الف) فصل مشترک بالا (ب) فصل مشترک پایین..... ۶۶
- شکل (۴-۱۱): نمودار زاویه دینامیکی برخورد براساس مقدار انرژی کینتیکی برخورد در هر دو فصل مشترک بالا و پایین..... ۶۷
- شکل (۴-۱۲): نمودار زاویه دینامیکی برخورد برحسب نسبت بار انفجاری..... ۶۷
- شکل (۴-۱۳): نمودار سرعت برخورد سطوح تماسی برحسب جابجایی (الف) فصل مشترک بالا (ب) فصل مشترک پایین..... ۶۸
- شکل (۴-۱۴): نمودار سرعت برخورد براساس مقدار انرژی سینتیکی برخورد در هر دو فصل مشترک بالا و پایین..... ۶۹
- شکل (۴-۱۵): نمودار سرعت برخورد برحسب نسبت بار انفجاری..... ۶۹
- شکل (۴-۱۶): ریز ساختار دو آلیاژ قبل از اتصال (الف) فولاد St1۴ (ب) برنج Ms۹۰..... ۷۵
- شکل (۴-۱۷): دیاگرام تعادلی مس-روی (خط چین ترکیب شیمیایی آلیاژ ۹۰ Ms را نشان می دهد)..... ۷۵
- شکل (۴-۱۸): ریزساختارهای فصل مشترک بالا در نسبت های انفجار (الف) ۰/۸ (ب) ۱ (ج) ۱/۲ (د) ۲..... ۷۶
- شکل (۴-۱۸): ریزساختارهای فصل مشترک های پایین در نسبت های انفجار (الف) ۰/۸ (ب) ۱ (ج) ۱/۲ (د) ۲..... ۷۷
- شکل (۴-۲۰): نمودار تغییرات طول موج بر حسب میزان انرژی مصرفی (الف) فصل مشترک پایین (ب) فصل مشترک بالا..... ۸۰
- شکل (۴-۲۱): ریزساختار فصل مشترک های بالا و پایین حاصل از جوشکاری انفجاری با نسبت بار انفجاری ۱ و فواصل توقف متفاوت..... ۸۱
- شکل (۴-۲۲): مقایسه فصل مشترک های بالا در نسبت های انفجار و فواصل توقف متفاوت..... ۸۴
- شکل (۴-۲۳): نمودار طول موج در فواصل توقف و نسبت های انفجار متفاوت..... ۸۴
- شکل (۴-۲۴): ریزساختار فصل مشترک های بالا توسط SEM (الف)  $R=0/8$  (ب)  $R=1$  (ج)  $R=1/2$  (د)  $R=2$ ..... ۸۵
- شکل (۴-۲۵): ریزساختار فصل مشترک های پایین توسط SEM (الف)  $R=0/8$  (ب)  $R=1$  (ج)  $R=1/2$  (د)  $R=2$ ..... ۸۶
- شکل ۴-۲۶: یکی از گردهای تشکیل شده در فصل مشترک اتصال انفجاری (فصل مشترک بالا نمونه شماره ۷)..... ۸۸

- شکل (۴-۲۷): الگوی پراش نمونه با نسبت بار انفجاری ۲ ..... ۸۹
- شکل (۴-۲۸): الگوی پراش نمونه با نسبت انفجار ۰/۸ ..... ۸۹
- شکل (۴-۲۹): نمودار استحکام برشی فصل مشترک های بالا بر حسب انرژی جنبشی اتصال در فاصله توقف ۱ میلیمتر ..... ۹۰
- شکل (۴-۳۰): نمودار استحکام برشی فصل مشترک های پایین بر حسب انرژی جنبشی اتصال در فاصله توقف ۱ میلیمتر ..... ۹۱
- شکل (۴-۳۱) الف) پروفیل سختی نمونه اتصال داده شده با نسبت بار انفجاری ۲ و فاصله توقف بالا و پایین ۱ میلیمتر (ب) تصاویر ریز ساختاری هر کدام از لایه های کامپوزیت سه لایه ..... ۹۴
- شکل (۴-۳۲): پروفیل سختی برای ۴ نمونه با نسبت های انفجار (الف) ۰/۸ (ب) ۱ (ج) ۱/۲ (د) ۲ ..... ۹۵
- شکل (۴-۳۳): نمودار سختی مرز مشترک ها در نسبت های انفجار مختلف ..... ۹۷
- شکل (۴-۳۴): سطوح شکست فصل مشترک بالای آزمایش استحکام برشی با نسبت های انفجار (الف) ۰/۸ (ب) ۱ (ج) ۱/۲ (د) ۱/۵ (ه) ۲ ..... ۹۸
- شکل (۴-۳۵) ریز ساختار های فصل مشترک بالا نمونه با نسبت بار انفجاری ۲ و فاصله توقف ۱ در شرایط مختلف عملیات حرارتی (الف) بدون عملیات حرارتی (ب) ۳۰ دقیقه در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  (ج) ۱ ساعت در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  (د) ۲ ساعت در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  (در تصاویر، لایه ریز دانه شده و تبلور یافته مشخص شده اند) ..... ۱۰۰
- شکل (۴-۳۶) ریز ساختار های فصل مشترک پایین نمونه با نسبت بار انفجاری ۲ و فاصله توقف ۱ در شرایط مختلف عملیات حرارتی (الف) بدون عملیات حرارتی (ب) ۳۰ دقیقه در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  (ج) ۱ ساعت در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  (د) ۲ ساعت در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  (در تصاویر، لایه ریز دانه شده و تبلور یافته مشخص شده اند) ..... ۱۰۱
- شکل (۴-۳۷): پروفیل های سختی در طول فصل مقاطع عرضی نمونه های عملیات حرارتی در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  بدون عملیات حرارتی (ب) ۳۰ دقیقه (ج) ۱ ساعت (د) ۲ ساعت ..... ۱۰۳
- شکل (۴-۳۸): نمودار بیشینه های سختی در فصل مشترک های بالا و پایین نسبت به زمان عملیات حرارتی ..... ۱۰۴

# فصل اول

## مقدمه

جوشکاری انفجاری فرآیندی از انواع فرآیندهای جوشکاری حالت جامد است که در آن دو یا چند ماده توسط نیروی کنترل شده حاصل از انفجار یک ماده منفجره به هم اتصال می یابند. کامپوزیت نهایی نتیجه پیوندهای متالورژیکی قوی بین مواد می باشد.

تاریخچه جوشکاری انفجاری به سال های جنگ جهانی اول باز می گردد، جایی که متخصصان مواد منفجره چسبیدن پوسته های بمب به مواد فلزی را پس از انفجار مشاهده کردند [۱]. اما در حقیقت اولین تلاش برای یافتن قابلیت های روش جوشکاری انفجاری مربوط به سال ۱۹۶۲ می باشد. در آن سال در مقاله ای که توسط فیلیپ کاک و بویز [۱] منتشر شد، به روش جدیدی از اتصال دو فلز به صورت نقطه ای در یک خط توسط انفجار اشاره شده است. در سال ۱۹۶۴ دپونت تلاش هایی را برای بررسی مکانیزم جوشکاری انفجاری انجام داد که حاصل آن اولین حق ثبت ابداع در این زمینه بود [۱]. در طول این ۴۰ سال محققین زیادی در زمینه پتانسیل های زیاد این روش برای صنعتی شدن و همچنین مکانیزم های مختلف اتصال دهی تحقیقات گسترده و وسیعی انجام داده اند.

درک مکانیزم های جوشکاری انفجاری نیازمند آگاهی از موضوعات مختلفی می باشد که از آن جمله می توان به مواردی مانند مواد منفجره، برهم کنش بین مواد منفجره و سطوح فلزی در تماس، رفتار فلزات در برابر ضربات شدید و متغیرهای که فرآیند را کنترل می کنند، اشاره کرد.

خواص فیزیکی و مکانیکی اتصال -مانند بقیه فرآیندهای جوشکاری- از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. به طور کلی با توجه به اینکه جوشکاری انفجاری در محدوده حالت جامد قرار دارد می توان گفت که نسبت به سایر فرآیندهای ذوبی با مشکلات متالورژیکی کمتری درگیر است. اما این فرآیند نیز مشکلات خاص خود را دارد که از جمله بر اثر موج های برگشتی و همچنین زمان کم پروسه و شدت ضربه بالا نشات می گیرد [۲].

جوشکاری انفجاری دارای مزیت بسیار خاصی در زمینه اتصال بین دو آلیاژ کاملاً ناسازگار از نظر ترکیب شیمیایی در مقایسه با سایر روش های جوشکاری ذوبی می باشد. اما از طرف دیگر دارای محدودیت بسیار بزرگی هم می باشد که آن هندسه و شکل های خاصی است که در این فرآیند می توانند ایجاد شوند. روکشکاری های گسترده برای ایجاد ورق های کامپوزیتی در ساخت مخازن تحت فشار و ورق های لوله ای شکل مورد استفاده در مبدل های گرمایی از موارد کاربرد جوشکاری انفجاری می باشد. اتصال لوله به لوله، اتصال رویهم دو ورق و ساخت کامپوزیت های تقویت شده نیز از دیگر کاربردهایی است که برای روش جوشکاری انفجاری مطرح می شود.

در این تحقیق، به بررسی اتصال انفجاری کامپوزیت سه لایه برنج Ms90 / فولاد St14 / برنج Ms90 پرداخته شده است. برای این منظور، نسبت بارگذاری انفجار و همچنین دو فاصله توقف موجود در آرایش اولیه به عنوان پارامترهای قابل تغییر در آزمایش های مختلف، انتخاب شده اند. قبل از انجام آزمایش های انفجار، شبیه سازی فرآیند جوشکاری انفجاری به کمک نرم افزار ABAQUS انجام گرفت و متغیرهای عملیاتی جوشکاری انفجاری انتخاب شد. پس از انجام آزمایش ها، ویژگی های مختلف ریزساختار و هندسه فصل مشترک مورد مطالعه قرار گرفت. برای اطمینان از کاربری مناسب کامپوزیت سه لایه بعد از تولید، خواص مکانیکی اتصال مانند سختی و استحکام برشی آن بررسی گردید. در نهایت برای مطالعه تاثیر عملیات حرارتی، عملیات تنش گیری بر روی اتصالات انجام گرفت و اثر آن بر روی ریزساختار و سختی مورد بررسی قرار گرفت.

در تحقیق حاضر فصل دوم به مروری بر تحقیقات گذشته پیرامون مبانی جوشکاری انفجاری و همچنین اتصالات فولاد و برنج به روش جوشکاری انفجاری پرداخته شده است. در فصل سوم شرح کارهای انجام شده و آزمایش های صورت گرفته در این پژوهش آمده است. در فصل چهارم، نتایج حاصل در قالب فصل نتایج و بحث مدون شده است. در فصل پنجم، نتیجه گیری از دستاوردهای حاصله انجام شده است و پیشنهادها در زمینه ادامه احتمالی تحقیقات در این زمینه، ارائه شده است.



## فصل دوم

### مروری بر منابع

## ۲-۱- مبانی جوشکاری انفجاری

مراحل انجام یک فرآیند جوشکاری انفجاری را می توان به سه بخش اصلی طبقه بندی نمود:

الف) انفجار ماده منفجره

ب) تغییر شکل و سرعت گیری صفحه پرنده هنگام گذر از فاصله توقف<sup>۱</sup>

ج) برخورد بین دو سطح فلزی تشکیل پیوند

معمولاً پس از گذشت فاصله ای از اولین نقطه برخورد، فرآیند به صورت پایدار ادامه خواهد یافت [۳]. همچنین شرایط لازم برای تشکیل یک پیوند متالورژیکی با کیفیت مناسب اتصال را نیز، می توان به صورت زیر خلاصه کرد [۴]:

الف) تشکیل جت در نقطه برخورد، متشکل از هر دو فلز مورد اتصال

ب) افزایش فشار تا مقدار و مدت زمان کافی، برای تشکیل پیوند های اتمی بین دو فلز.

میزان این فشار که در اثر تبدیل انرژی جنبشی در «نقطه برخورد» به وجود می آید، به «سرعت برخورد»<sup>۲</sup> یا «سرعت ضربه» دو فلز وابسته است، در حالی که مدت زمان اعمال آن به «سرعت جوشکاری» یا «سرعت گسترش جوش» بستگی دارد.

فرض اساسی تشکیل جت در نقطه برخورد دو فلز، بر این پایه استوار است که فشار تولید شده در این نقطه، از مقاومت برشی دو فلز بسیار بالاتر است، به نحوی که فلز در برابر آن همانند سیال رفتار خواهد کرد. لذا در صورت کم بودن سرعت برخورد دو فلز، فشار تولید شده در نقطه برخورد به مقدار مورد نیاز برای بروز رفتار سیال گونه نرسیده و در نتیجه جت تشکیل نگردد. حتی در صورت بروز این رفتار، ضروری است که ضخامت لایه ای از فلز که توسط جت از روی سطوح فلزات برداشته شده، به اندازه کافی باشد تا لایه اکسید و دیگر آلاینده ها را از روی سطوح فلزات، خارج کند [۳]. ضخامتی از ماده که به صورت جت خارج می شود که زاویه دینامیکی برخورد وابسته است. در این فصل دیدگاههای تئوریک توصیف کننده رفتار سیال گونه و همچنین پدیده تشکیل جت مورد بررسی قرار می گیرد.

<sup>1</sup> Stand-off distance

<sup>2</sup> Impact velocity

### ۲-۱-۱- ماهیت اتصال در فصل مشترک

جوشکاری انفجاری یک فرآیند جوشکاری فشاری است. در برخورد صفحه ها، تحت ضربه مایل با سرعت های زیاد در صورتی که زاویه و سرعت برخورد در محدوده جوش پذیری قرار بگیرند، حتی در فصل مشترک دو فلز شکل می گیرد. همچنین در صورت کافی بودن انرژی حاصل از انفجار و شتاب گیری صفحه پرنده، تغییر شکل پلاستیک در فصل مشترک اتفاق می افتد. در نتیجه سطوح کاملاً تمیز و عاری از هرگونه آلودگی در مقابل همدیگر قرار گرفته و کاملاً به همدیگر نزدیک می شوند و صفحات تحت نیروهای جاذبه و دافعه یکدیگر قرار می گیرند که در یک فاصله تعادل معین، این دو نیرو با هم برابر و بر یکدیگر غلبه خواهند کرد و انرژی پتانسیل به حداقل می رسد و در نتیجه پیوند متالورژیکی بین دو فلز شکل می گیرد. لذا برای پیدایش اتصال، بایستی صفحات در این فاصله تعادلی قرار گیرند و برای حصول این مهم، باید سطوح صفحات کاملاً عاری از هرگونه اکسید و آلودگی باشند. استحکام پیوند های فصل مشترک به خواص کریستالوگرافی فیزیکی هر دو فلز بستگی دارد. هنگامی که نیروهای بین اتمی جاذبه و دافعه در حال تعادل باشند، صفحات در فاصله تعادلی بین اتم ها قرار می گیرند و اتصال برقرار می شود.

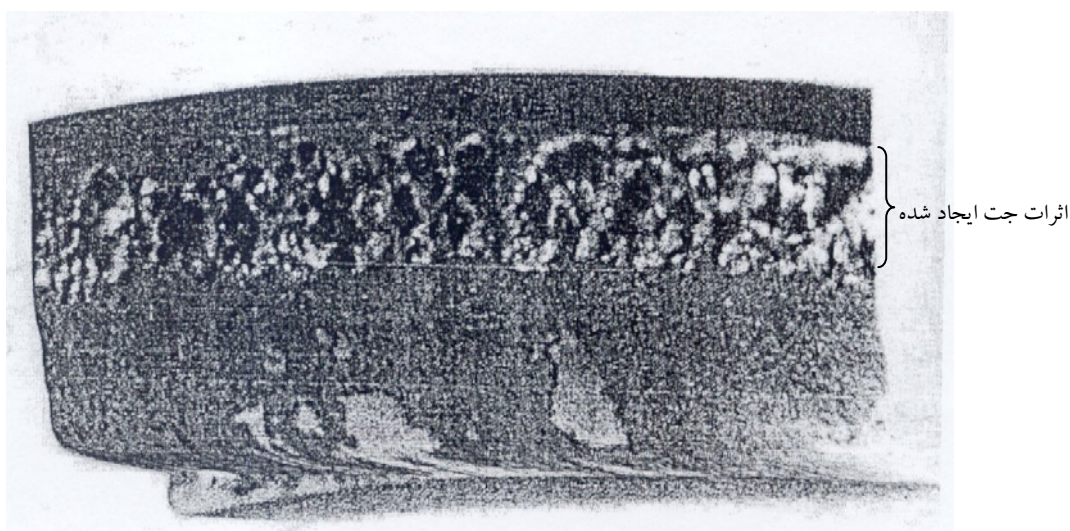
پدیده تشکیل جت از اهمیت ویژه ای در این فرایند برخوردار هستند که در ادامه به تشریح این پدیده پرداخته خواهد شد [۳].

### ۲-۱-۲- پدیده تشکیل جت

برگمن<sup>۱</sup> و همکاران [۳] با استفاده از یک دوربین و با پوشش الکتریکی کم مس، بر روی یک صفحه پرنده نیکلی که به یک صفحه فولادی جوش داده شده بود، فرآیند تشکیل جت را مطالعه کردند. عکس های گرفته شده از برخورد نشان دهنده پاشش ذرات فلزی به صورت قشر جهنده ای است که در خلا با سرعتی حدود دو برابر سرعت انفجار حرکت می کند. این جت متشکل از لایه های سطحی است که شامل اکسیدها، گازهای جذب شده و سایر آلودگی های سطحی می باشد که به شکل قشر جهنده ای در می آیند و به خارج از سیستم هدایت می شوند. اگر ضخامت کافی از سطوح برداشته شود، سطوح کاملاً تمیز در نقاط برخورد داخلی، که فشار اعمالی زیادی وجود دارد، کاملاً به همدیگر نزدیک شده و پیوند متالورژیکی شکل می گیرد.

<sup>1</sup> Bergman

می توان به طور شهودی به پدیده تشکیل جت - که به معنی خروج جرم از سیستم است - پی برد. به این معنا که می توان اثرات به جا مانده از پاشش ذرات فلز به محیط اطراف را به راحتی مشاهده نمود. یک نمونه از این پدیده در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. این قطعه فلز به عنوان یک صفحه هدف، در جلوی فاصله قرار یک چیدمان مسطح قرار داده شده است. توانایی در بدست آوردن یک جوش مطلوب با پدیده تشکیل جت ارتباط مستقیم دارد. از طرف دیگر تشکیل جت خود تابعی از متغیر های زیاد از جمله زاویه برخورد، سرعت برخورد، فشار ضربه، سرعت ضربه و خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی اجزا اتصال می باشد [۵].



شکل (۱-۲): اثرات پاشش جت فلز بر روی یک صفحه فلزی [۶]

### ۲-۱-۳- انواع فصل مشترک جوش

فصل مشترک جوش انفجاری، از یک فصل مشترک صاف و هموار تا یک فصل مشترک موجی همراه با لایه های مذاب پیوسته تغییر می کند و در ذیل به بعضی از انواع فصل مشترک که در حین فرایند احتمال تشکیل آن ها وجود دارد اشاره شده است [۳]. همچنین نمونه ای از هر کدام از آن ها در شکل ۲-۲ آورده شده است:

- ۱- فصل مشترک هموار مستقیم (شکل ۲-۲-الف)
- ۲- فصل مشترک با امواج کوچک (شکل ۲-۲-ب)
- ۳- فصل مشترک با امواج بزرگ (شکل ۲-۲-ج)