

صلى الله عليه وسلم



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال فولاد St37- فولاد Ck60 به وسیله جوشکاری انفجاری

پایان نامه کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب و روش ساخت مواد

مجید یزدانی

استاد راهنما

دکتر محمدرضا طرقي نژاد



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش شناسایی و انتخاب و مواد آقای مجید یزدانی

تحت عنوان

بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال فولاد St37- فولاد Ck60 به وسیله جوشکاری انفجاری

در تاریخ ۱۳۹۳/۱۰/۲۴ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر محمدرضا طرقي نژاد

۱- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر مرتضی شمعیان

۲- استاد داور

دکتر مسعود عطاپور

۳- استاد داور

دکتر کیوان رئیسی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

تشر و قدردانی

نخستین سپاس و ستایش از آن خداوندی است که بنده کوچکش را در دریای بیکران اندیشه، قطره‌ای ساخت تا وسعت آن را از دریچه اندیشه‌های ناب آموزگارانی بزرگ به تماشا نشیند. لذا اکنون که در سایه‌سار بنده نوازی‌هایشان پایان نامه حاضر به انجام رسیده است، بر خود لازم می‌بینم از دلگرمی و تشویق همه کسانی که در نگارش این مجموعه مرا یاری نمودند قدردانی نمایم:

درو و سپاس قلبی خود را به پدر و مادرم، حامیان همیشگی زندگی زندگیم و برادر عزیزم و خواهران مهربانم تقدیم می‌نمایم که در تمامی مراحل زندگی مشوق، همراه و پشتیبان من بوده‌اند.

مراتب امتنان خودم را از استاد عزیز و ارجمندم، جناب آقای دکتر محمد رضا طرقی نژاد که همواره در انجام این تحقیق، از نقطه نظرات، همکاری‌ها و مساعدت ایشان بهره برده‌ام، ابراز می‌دارم.

و در پایان از برادر عزیزم، مهندس محسن یزدانی و دوستان عزیزم مهندس امیر توحیدی و مهندس آرمان دادخواه که در طول انجام این پایان نامه، بی هیچ منتی، همواره یاری بخش اینجانب بوده‌اند، بسیار سپاسگذارم.

از خداوند متعال، سلامتی و موفقیت روزافزون همه این عزیزان را خواستارم.

مجید یزدانی

دی ۱۳۹۳

تقدیم به مقدس ترین واژه‌ها در لغت نامه دلم:

پدرم، اول استادم که همواره چتر محبتش بر سرم است.

مادرم، بلند تکیه گاهم، که دامن پرمهرش یگانه پناهم است.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
۱	چکیده
	فصل اول: مقدمه
	فصل دوم: مروری بر مطالب
۵	۱-۲ فولادهای کربنی
۵	۱-۱-۲ فولاد ST37
۶	۲-۱-۲ فولادهای مقاوم به سایش
۸	۲-۲ شرح کلی جوشکاری انفجاری
۱۰	۳-۲ فصل مشترک جوشکاری انفجاری
۱۱	۴-۲ چگونگی ایجاد پیوند در جوشکاری انفجاری
۱۲	۵-۲ مکانیزم‌های اتصال فرایند جوشکاری انفجاری
۱۲	۶-۲ مکانیزم‌های تشکیل موج در فصل مشترک
۱۳	۱-۶-۲ مکانیزم فروروی جت
۱۳	۲-۶-۲ مکانیزم ناپایداری جریان
۱۴	۳-۶-۲ ناپایداری مبتنی بر جریان گردابی
۱۴	۷-۲ پارامترهای مؤثر بر فرایند
۱۵	۱-۷-۲ فاصله توقف
۱۵	۲-۷-۲ مقدار ماده منفجره
۱۷	۸-۲ آزمون‌های مکانیکی
۱۷	۱-۸-۲ آزمون تعیین استحکام برشی
۱۷	۲-۸-۲ استحکام اتصال یا آزمون خمش سه نقطه ای
۱۸	۳-۸-۲ آزمون ضربه
۱۸	۹-۲ بررسی‌های غیرمخرب
۱۹	۱۰-۲ عملیات حرارتی بعد از جوشکاری
۲۱	۱۱-۲ سایش
۲۴	۱۲-۲ جمع‌بندی و برنامه پژوهش حاضر
	فصل سوم: مواد و روش تحقیق
۲۶	۱-۳ مواد اولیه
۲۷	۲-۳ پرس کردن نمونه و ماشینکاری
۲۷	۳-۳ بازرسی التراسونیک

۲۷.....	۳-۴ عملیات حرارتی
۲۸.....	۳-۵ آزمون‌های مکانیکی
۳۰.....	۳-۶ بررسی‌های میکروسکوپی نوری و الکترونی روبشی
۳۰.....	۳-۷ اندازه‌گیری ریزسختی و سختی
۳۰.....	۳-۸ آزمون سایش

فصل چهارم: بحث نتایج

۳۱.....	۴-۱ بررسی‌های ریزساختاری
۳۱.....	۴-۱-۱ ریزساختار نمونه جوشکاری شده قبل از عملیات حرارتی
۳۵.....	۴-۱-۲ منطقه ذوب موضعی نزدیک فصل مشترک
۳۶.....	۴-۱-۳ تحولات ریزساختاری نمونه‌های جوشکاری شده در طی فرایند عملیات حرارتی
۳۷.....	۴-۱-۴ تحولات ریزساختاری طرف ST37 در طی فرایند عملیات حرارتی از قسمت سطحی صفحات کامپوزیتی
۳۸.....	۴-۱-۵ تحولات ریزساختاری بعد از انجام عملیات سخت گردانی
۴۳.....	۴-۲ نتایج ریزسختی سنجی
۴۳.....	۴-۲-۱ بررسی ریزسختی قبل از عملیات حرارتی
۴۳.....	۴-۲-۲ تغییرات ریزسختی در فصل مشترک اتصال با انجام عملیات حرارتی
۴۵.....	۴-۳ تغییرات ماکروسختی در صفحه پرنده با انجام عملیات سخت گردانی
۴۵.....	۴-۴ استحکام پیوند فصل مشترک
۴۵.....	۴-۴-۱ استحکام پیوند قبل از عملیات حرارتی
۴۷.....	۴-۴-۲ استحکام پیوند بعد از عملیات حرارتی
۵۰.....	۴-۴-۳ استحکام پیوند بعد از عملیات سخت گردانی
۵۱.....	۴-۵ نتایج آزمون خمش
۵۳.....	۴-۶ نتایج آزمون ضربه
۶۱.....	۴-۷ آزمون سایش
۶۱.....	۴-۷-۱ نتایج آزمون سایش
۶۴.....	۴-۷-۲ بررسی سطوح سایش
۶۸.....	۴-۷-۳ ضریب اصطکاک
۷۰.....	۴-۸ بحث کلی

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷۲.....	۵-۱ نتیجه‌گیری
۷۳.....	۵-۲ پیشنهادات
۷۴.....	فهرست مراجع

فهرست شکل ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۷	شکل ۲-۱. تغییرات سختی و دمای تمپر با محیط سردکنندگی آب.....
۷	شکل ۲-۲. تغییرات سختی و فاصله از انتهای کونچ شده در آب.....
۹	شکل ۲-۳. چیدمان موازی جوشکاری انفجاری.....
۱۱	شکل ۲-۴. انواع هندسه فصل مشترک موجی و خطی در فصل مشترک اتصال جوشکاری انفجاری.....
۱۳	شکل ۲-۵. فرایند تشکیل موج پیشنهادی توسط بهرانی.....
۱۴	شکل ۲-۶. فرایند تشکیل موج توسط مکانیزم ناپایداری مبتنی بر جریان گردابی.....
۱۶	شکل ۲-۷. تغییرات سرعت انفجار با توجه به ضخامت ماده منفجره.....
۱۷	شکل ۲-۸. نمونه برش و قید و بند مرتبط با آن براساس استاندارد ASTM A263.....
۱۸	شکل ۲-۹. شماتیک آزمون ضربه انجام شده توسط کاکار.....
۲۰	شکل ۲-۱۰. پروفیل ریزسختی برای اتصال فولاد زنگ نزن - فولاد کم کربن با نرخ بارگذاری ۱/۲.....
۲۳	شکل ۲-۱۱. تصویر میکروسکوپی الکترونی نمونه‌های عملیات حرارتی و تغییر در تیغه‌های مارتنزیت با تغییر دمای تمپر.....
۲۴	شکل ۲-۱۲. تغییرات میزان سایش فولاد Ck60 در سختی‌های مختلف.....
۲۷	شکل ۳-۱. چیدمان موازی مورد استفاده برای جوشکاری انفجاری.....
۲۹	شکل ۳-۲. آزمون برش به همراه قید و بند مربوطه.....
۲۹	شکل ۳-۳. نمونه آماده شده برای انجام آزمون ضربه.....
۳۲	شکل ۴-۱. فصل مشترک موجی صفحات جوشکاری شده Ck60-St37.....
۳۳	شکل ۴-۲. ریزساختار قسمت‌های مختلف نزدیک فصل مشترک و گردابه.....
۳۴	شکل ۴-۳. ریزساختار صفحه ساکن و پرنده دور از فصل مشترک.....
۳۴	شکل ۴-۴. ریزدانگی در بالای صفحه پرنده نزدیک به محل انفجار.....
۳۵	شکل ۴-۵. تصویر میکروسکوپی الکترونی منطقه ذوب موضعی در فصل مشترک.....
۳۶	شکل ۴-۶. تصاویر نوری فصل مشترک قبل و بعد از عملیات حرارتی.....
۳۸	شکل ۴-۷. ریزساختار نمونه عملیات حرارتی در دمای 700°C از سطح نمونه.....
۳۹	شکل ۴-۸. موجی بودن فصل مشترک بعد از انجام عملیات سخت گردانی.....
۳۹	شکل ۴-۹. ریزساختارهای بدست آمده بعد از انجام عملیات سخت گردانی.....
۴۰	شکل ۴-۱۰. تصاویر SEM در طرف Ck60 در حالات مختلف سخت گردانی.....
۴۱	شکل ۴-۱۱: تصاویر نوری طرف St37 بعد از سخت گردانی.....
۴۲	شکل ۴-۱۲. تبدیل منطقه ذوب موضعی به منطقه ریزدانه در نزدیکی فصل مشترک بعد از انجام سخت گردانی.....
۴۳	شکل ۴-۱۳. تغییرات ریزسختی برحسب فاصله از فصل مشترک در حالت قبل از عملیات حرارتی.....
۴۴	شکل ۴-۱۴. تغییرات ریزسختی در نزدیکی فصل مشترک در حالات مختلف عملیات حرارتی.....
۴۶	شکل ۴-۱۵. شکست نمونه بعد از انجام آزمون برش در حالت جوش داده شده (AW).....

- شکل ۴-۱۶. سطح شکست نمونه بعد از انجام آزمون برش در حالت جوش داده شده ۴۶
- شکل ۴-۱۷. تغییرات استحکام برشی با انجام عملیات حرارتی در دماهای مختلف ۴۷
- شکل ۴-۱۸. سطوح شکست در حالات مختلف عملیات حرارتی ۴۹
- شکل ۴-۱۹. تغییرات استحکام برشی با انجام سخت گردانی در حالات مختلف ۵۰
- شکل ۴-۲۰. سطوح شکست در حالات مختلف عملیات حرارتی ۵۱
- شکل ۴-۲۱. نمونه ها بعد از آزمون خمش الف) Ck60 تحت فشار ب) Ck60 تحت کشش ۵۲
- شکل ۴-۲۲. سطح شکست آزمون خمش در حالت جوش داده شده ۵۳
- شکل ۴-۲۳. نتایج میانگین آزمون‌های ضربه در دماهای مختلف عملیات حرارتی ۵۴
- شکل ۴-۲۴. سطوح شکست آزمون‌های ضربه در حالت جوش داده شده ۵۵
- شکل ۴-۲۵. سطوح شکست آزمون‌های ضربه نمونه SR650 ۵۷
- شکل ۴-۲۶. سطوح شکست آزمون‌های ضربه نمونه SR600 ۵۹
- شکل ۴-۲۷. سطوح شکست آزمون ضربه نمونه SR700 انجام شده در 25°C ۵۹
- شکل ۴-۲۸. منحنی مسافت لغزش - کاهش وزن برای حالات مختلف ۶۲
- شکل ۴-۲۹. منحنی مسافت لغزش - کاهش وزن برای حالات OQ، WQ و Temp200 و Temp400 ۶۲
- شکل ۴-۳۰. انواع منحنی‌های سایش بر حسب مسافت - سایش ۶۳
- شکل ۴-۳۱. سطوح سایشی در حالات Temp200 و Temp400 ۶۵
- شکل ۴-۳۲. کاهش وزن پین در آزمون سایش برای نمونه‌های عملیات حرارتی شده در شرایط مختلف ۶۵
- شکل ۴-۳۳. سطوح سایشی در حالات OQ و WQ ۶۶
- شکل ۴-۳۴. سطوح سایشی در حالات AW، Temp600، N و SR650 ۶۷
- شکل ۴-۳۵. نمودار مسافت - ضریب اصطکاک برای حالات با کاهش وزن کم ۶۹
- شکل ۴-۳۶. نمودار مسافت - ضریب اصطکاک برای حالات با کاهش وزن زیاد ۶۹
- شکل ۴-۳۷. نمودار مسافت - ضریب اصطکاک میانگین برای حالات با کاهش وزن کم ۷۰
- شکل ۴-۳۸. نمودار مسافت - ضریب اصطکاک میانگین برای حالات با کاهش وزن زیاد ۷۰

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۵.....	جدول ۲-۱. ترکیب شیمیایی متداول فولاد St37.....
۶.....	جدول ۲-۲. خواص مکانیکی فولاد St37.....
۷.....	جدول ۲-۳. ترکیب شیمیایی فولاد Ck60.....
۱۶.....	جدول ۲-۴. جرم ماده منفجره و سرعت صفحه پرنده وابسته به نسبت ماده منفجره.....
۲۴.....	جدول ۲-۵. مشخصات حالات مختلف عملیات حرارتی انجام شده توسط زیچاس و هایگک.....
۲۶.....	جدول ۳-۱. ترکیب شیمیایی فلزات جوش داده شده برحسب درصد وزنی.....
۲۸.....	جدول ۳-۲. حالت‌های مختلف عملیات حرارتی انجام شده، به همراه علامت اختصاری.....
۳۵.....	جدول ۴-۱. ترکیب شیمیایی در نقاط ۱، ۲ و ۳ مشخص شده در شکل ۴-۵ به وسیله آنالیز نقطه‌ای EDS.....
۴۵.....	جدول ۴-۲. تغییرات سختی صفحه پرنده در حالات مختلف سخت گردانی.....
۵۴.....	جدول ۴-۳. حالات انتخابی مورد بررسی برای سطوح شکست آزمون ضربه در حالات مختلف عملیات حرارتی.....
۶۱.....	جدول ۴-۴. حالات مختلف مورد بررسی در آزمون سایش.....

چکیده

در این پژوهش به بررسی متالورژیکی اتصال حاصل از جوشکاری انفجاری فولاد Ck60- فولاد St37 پرداخته شده است. نسبت بار انفجاری و فاصله توقف صفحه پرنده قبل از انفجار به ترتیب $R = 1/4$ و $d = 2t$ ضخامت صفحه پرنده (انتخاب گردیده است. در حالت جوش داده شده، با بررسی های ریزساختاری و همچنین آزمون های مکانیکی مانند برش، ضربه و تغییرات ریزسختی مورد مطالعه قرار گرفت. سپس به بررسی عملیات آزادسازی تنش در سه دمای مختلف پرداخته شد. به منظور مقایسه با حالت جوش داده شده، آزمون های مکانیکی روی نمونه های عملیات حرارتی شده انجام شد. در نهایت برای افزایش مقاومت به سایش اتصال دو فلزی تولید شده، عملیات سخت گردانی در شش حالت نرماله کردن، سرد کردن در روغن، سرد کردن در آب و سپس تمپر در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰°C انجام شد. سپس آزمون های سایش و برش روی نمونه های سخت شده انجام شد. مطالعات ریزساختاری که توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی صورت گرفت، نشان داد که نمونه جوش داده شده دارای فصل مشترک موجی به همراه بعضی مناطق ذوب موضعی است. با انجام عملیات آزادسازی تنش، مناطق ذوب موضعی حذف و مناطق ریزدانه ایجاد می گردند، همچنین درشت دانگی در دانه های نزدیک فصل مشترک بعد از انجام عملیات آزادسازی تنش در دماهای ۶۵۰ و ۷۰۰°C مشاهده شد. نتایج نشان داد که حتی با انجام عملیات سخت گردانی، باز هم هندسه موجی در فصل مشترک مشاهده می شود. همچنین در طرف Ck60 تغییرات ریزساختاری شدیدی رخ می دهد، به گونه ای که با سرد کردن در آب ریزساختار از حالت فریتی- پرلیتی به مارتنزیت تغییر می کند، اما در طرف St37 باز هم ساختار فریتی- پرلیتی مشاهده شد. نتایج حاصل از ریزسختی سنجی نشان داد، در حالت جوش داده پیک سختی در نزدیکی فصل مشترک رخ می دهد که با دور شدن از آن کاهش می یابد. زمانی که آزادسازی تنش در دمای ۶۰۰°C انجام شد مقادیر سختی کاهش یافت، اما پیک سختی به صورت کامل از بین نرفت. با انجام عملیات آزادسازی تنش در دماهای ۶۵۰ و ۷۰۰°C سختی در نزدیکی فصل مشترک به میزان بیش تری نسبت به مناطق دور از فصل مشترک کاهش یافت که منطبق با قسمت درشت دانگی در دو طرف فصل مشترک می باشد. نتایج حاصل از آزمون برش نشان داد، استحکام برشی بدست آمده در حالات جوش داده شده و آزادسازی تنش از عدد تعریف شده توسط استاندارد بیش تر می باشند، در نتیجه می توان به صورت ایمن از اتصال دو فلزی ایجاد شده استفاده کرد. با بررسی استحکام برشی بعد از انجام عملیات سخت گردانی مشاهده شد که اختلاف زیادی بین مقادیر بدست آمده برای حالات مختلف است، به طوری که حالت سرد شده در آب حداقل استحکام برشی و تمپر در ۶۰۰°C بیش ترین مقدار را دارد. نتایج حاصل از آزمون ضربه برای حالت جوش داده شده و عملیات آزادسازی تنش نشان داد، با انجام عملیات حرارتی انرژی جذب شده در هر سه دمای آزمون افزایش می یابد. همچنین به منظور بررسی استحکام پیوند، آزمون خمش به دو صورت که فولاد Ck60 یک بار تحت کشش و بار دیگر تحت فشار قرار گیرد، انجام شد. زمانی که Ck60 تحت فشار قرار گرفت، نمونه دوفلزی تولید شده به راحتی تا ۱۸۰° خم شد، اما زمانی که تحت کشش قرار گرفت در زوایای کمتر از ۴۵° اتصال تولید شده از سمت فولاد Ck60 شروع به ترک و نهایتاً موجب جدا شدن و شکستن قطعه گردید. همچنین آزمون سایش انجام شده نشان داد، نمونه تمپر شده در ۲۰۰°C بهترین مقاومت به سایش را داراست ولی نمونه سرد شده در آب، مقاومت به سایش کمتری نسبت به نمونه های تمپر شده در ۲۰۰، ۴۰۰°C و همچنین سرد شده در روغن دارد. در نهایت نشان داده شد، با توجه به در نظر گرفتن همزمان نتایج آزمون سایش و برش برای حالات مختلف سخت شده، نمونه تمپر شده در ۴۰۰°C و سرد شده در روغن جزء بهترین حالات می باشند و با توجه به اینکه سرد کردن در روغن دارای اعوجاج کمتری نسبت به آب است، بنابراین می تواند حالت بهینه باشد.

کلمات کلیدی: جوشکاری انفجاری، آزادسازی تنش، ریزساختار، مقاومت به سایش

فصل اول

مقدمه

امروزه با پیشرفت علم، نیاز به داشتن موادی با خصوصیات برتر همچون مقاومت به سایش و خوردگی افزایش یافته است. بنابراین، محققین پیوسته در حال تحقیق برای یافتن مواد جدید با چنین خصوصیت‌هایی هستند. این چالش به تدریج از بهینه‌سازی مواد حجمی جدید^۱ به تولید ترکیباتی که شامل اتصالات متالورژیکی می‌باشد، تغییر کرده است. چنین اتصالات متالورژیکی شامل طراحی ترکیبات فلزی جدید با داشتن خصوصیات ریزساختاری و مکانیکی بهینه می‌باشد. به منظور اتصال فلزات دارای خصوصیات مختلف بدون از دست رفتن ویژگی‌هایشان، فرایند جوشکاری حالت جامد مورد استفاده قرار گرفته است.

جوشکاری/روکش کاری انفجاری یکی از روش‌های اتصال‌دهی شامل فرایند جوش تک مرحله‌ای به صورت کنترل شده است که برای اولین بار در سال ۱۹۴۴ به عنوان یک فرایند حالت جامد شناخته شد، بدین گونه که دو صفحه تحت فشار زیادی به وسیله نیروی کنترل‌شده ناشی از انفجار به یکدیگر اتصال داده می‌شوند. این فرایند از سال ۱۹۶۰ میلادی به صورت تجاری در بسیاری از کاربردهای صنعتی و دفاعی مورد استفاده قرار گرفت. یکی از نکات بارز در مورد جوشکاری انفجاری و به عبارتی مزیت بزرگ آن نسبت به بقیه روش‌های جوشکاری این است که می‌توان فلزاتی با تفاوت چشمگیر در خواص فیزیکی و شیمیایی (همچون نقطه ذوب، هدایت حرارتی، ضریب انبساط حرارتی و غیره) را به یکدیگر جوش داد.

فلزات مشابه و غیرمشابه را می‌توان از طریق جوشکاری انفجاری به هم متصل کرد و این روش به دلیل توانایی برای اتصال مستقیم ترکیبات مشابه و غیرمشابه فلزی که اتصال آنها از طریق روش‌های دیگر قابل انجام نیست، معروف می‌باشد. تا به امروز فلزات مشابه زیادی مانند فولادهای کم کربن، آلومینیوم به آلومینیوم، فولاد زنگ‌نزن به فولاد کم کربن و فلزات غیرمشابه همچون فولاد و آلومینیوم، فولاد و تیتانیوم، نیکل و آلیاژهای آلومینیوم، آهن و مس، آلومینیوم و مس و منیزیم، تیتانیوم و مس و فولاد، آلومینیوم و مس به صورت موفقیت آمیزی از طریق این روش

¹ New bulk materials

جوش داده شده‌اند.

همچون همه روش‌های اتصال‌دهی، خصوصیات بین سطحی تعیین کننده رفتار مکانیکی و متالورژیکی نمونه‌های اتصال داده شده به وسیله جوشکاری انفجاری می‌باشد. بنابراین دانستن اثر پارامترهای جوشکاری انفجاری روی خصوصیات بین سطحی، می‌تواند در بدست آوردن خواص نهایی مورد نظر مفید باشد. تشکیل ترکیبات بین فلزی، ساختار بین سطحی، ذوب موضعی و استحکام چسبندگی خصوصیات بین سطحی مکانیکی و متالورژیکی هستند که رفتار صفحات اتصال داده شده را تعیین می‌کنند. به عنوان نتیجه برای هر مورد جوشکاری انفجاری، اثر پارامترهای جوشکاری روی خصوصیات بین سطحی به منظور پرهیز از خصوصیات نامطلوب در صفحه جوش داده شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین جوشکاری انفجاری برای تولید یک ورق سطحی نازک با کمترین کاهش در چقرمگی همراه است. جوشکاری انفجاری به دلیل استفاده از مواد منفجره برای اتصال یک روش خطرناک است، با این وجود بسیاری از ترکیبات دوفلزی را می‌توان به راحتی با این روش تولید کرد.

تقریباً در همه موارد، اتصال همراه با افزایش ناگهانی سختی در فصل مشترک است. این افزایش سختی می‌تواند دلایل متعددی داشته باشد که به طور کلی بر اثر نیروی شدید انفجار به وجود آمده‌اند. در هنگام انفجار صفحات با سرعت بسیار زیادی به هم برخورد می‌کنند. بر اثر شوک ضربه‌ای، کارسختی شدید و با نرخ کرنش بالایی در سطح تماس ایجاد می‌شود. در نتیجه می‌توان انتظار داشت چگالی بسیار بالایی از نابعایی‌ها در سطح ایجاد شود. همچنین در اثر این عملیات مکانیکی دانه‌ها در جهت انفجار کشیده می‌شوند و به علت تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده به وسیله سرعت بالای ضربه انفجار، ریزدانگی سطحی در فصل مشترک ایجاد می‌شود. در اثر فشار و انرژی بالای انفجار ممکن است بسته به نوع آلیاژ انواعی از رسوبات، ترکیبات ترد فلزی، محلول جامد و یا حتی بسته‌های مذاب در مرز مشترک دوفلز تشکیل شود که هر کدام از این عوامل سختی فصل مشترک را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. بعضی از محققین به بررسی اتصالات جوشکاری شده فولاد-فولاد به وسیله این روش پرداخته‌اند. محققین با بررسی اتصال فولاد کشتی نوع A و فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶L با نسبت‌های انفجاری مختلف مشاهده نمودند که فصل مشترک در نسبت‌های بار انفجاری کم‌تر ($R=1/5$) به صورت صاف و در نسبت‌های بار انفجاری بیش‌تر ($R=2/5$) و $R=2$ به صورت موجی می‌باشد. نتایج پژوهش بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری جوشکاری انفجاری فولاد زنگ نزن دوفلزی/ فولاد مخازن نشان داد، با وجود آن که بعضی مناطق ذوب بین سطحی وجود دارد، اما به صورت کلی فصل مشترک، خصوصیات حالت جامد را دارد. همچنین کشیدگی دانه‌ها در جهت ضربه به درجه بالای کارسختی نسبت داده شد.

یکی از موضوعات دیگری که بعد از انجام جوشکاری انفجاری مطرح می‌شود، بحث تنش‌های موجود در فصل مشترک است که به دلیل تغییر شکل پلاستیک شدید در محل اتصال رخ می‌دهد و حتی می‌تواند منجر به ایجاد مناطق ذوب موضعی و تشکیل ترکیبات بین فلزی گردد. بدین منظور بعضی از محققین به بررسی عملیات حرارتی اتصال دوفلزی تولید شده بعد از جوشکاری انفجاری پرداختند. به طور مثال برخی از محققین کشیدگی دانه‌های فریتی در نزدیکی فصل مشترک و برخی دیگر تغییرات در اندازه دانه بعد از انجام عملیات حرارتی را مشاهده کردند. با توجه به اینکه فرایند جوشکاری انفجاری دارای عمر کمی در ایران می‌باشد، تحقیق در قسمت‌های مختلف آن امری ضروری است. در این پژوهش به این موضوع توجه ویژه‌ای گردیده است. همچنین ایجاد ساختاری که به طور همزمان نیاز چقرمگی و مقاومت به سایش سازه را تأمین کند، یکی دیگر از اهداف این پژوهش است. متأسفانه، هیچ ماده‌ای به تنهایی نمی‌تواند این نیاز را برآورده سازد. بنابراین روش‌های اتصال، کلید حل این مشکل می‌باشند. جوشکاری انفجاری مسیر روشنی را برای این ایده نشان می‌دهد. هدف از این کار بررسی رفتار اتصال فولاد Ck60

به فولاد St37 می‌باشد. فولاد St37 دارای چقرمگی مناسبی است، اما دارای خصوصیات مقاوم به سایش ضعیفی است، به همین دلیل می‌توان با جوش دادن توسط فولاد Ck60 آن را مناسب برای استفاده در محیط سایشی کرد. بدین وسیله می‌توان مزایای این دو فلز را با هم ترکیب کرد. دلیل دیگر برای انجام کار این است که خصوصیات متالورژیکی و مکانیکی فلزات مختلف که از طریق این روش اتصال داده شده‌اند، به وسیله محققین زیادی بررسی شده است، اما هیچ گزارشی در مورد خواص متالورژیکی و مکانیکی اتصال فولاد Ck60 به St37 قبل و بعد از انجام عملیات حرارتی و همچنین سخت‌گردانی وجود ندارد. بنابراین خواص مکانیکی و متالورژیکی فلز اتصال داده شده به صورت دقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

ابتدا در فصل دوم این پایان نامه مروری بر منابع صورت گرفته سپس در فصل سوم چگونگی انجام آزمون‌ها و مواد و روش تحقیق آورده شده است. نتایج بدست آمده در فصل چهارم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند و در فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه شده است.

فصل دوم

مروری بر مطالب

۱-۲ فولادهای کربنی

فولادهای کربنی به آن دسته از فولادها اطلاق می‌گردد که کربن اصلی‌ترین عنصر آلیاژی آن باشد و عناصری نظیر منگنز، سیلیسیم و آلومینیوم به میزان کم در آن حضور داشته و فقط به منظور اکسیژن زدایی به آن اضافه می‌گردند. کربن نقش اساسی را در افزایش استحکام فولادها ایفا می‌کند و این استحکام تا حد زیادی به میزان کربن موجود در آلیاژ بستگی دارد. فولادهای کربنی کاربرد وسیعی در صنعت داشته و معمولاً در حالت آنیل و یا نرماله به کار می‌رود، ولی در موارد خاص در حالت سخت‌کاری و تمپر شده نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. فولادهای کربنی با خواص استحکامی متنوعی را می‌توان تولید کرد: با انتخاب ترکیب شیمیایی و عملیات حرارتی مناسب، مجموعه‌ای از خواص نظیر استحکام، سختی، انعطاف پذیری، مقاومت به خستگی و استحکام ضربه‌ای، قابل دسترس می‌باشد [۱].

۱-۱-۲ فولاد St37

ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد St37 به ترتیب در جداول ۱-۲ و ۲-۲ ارائه شده است.

جدول ۱-۲. ۱. ترکیب شیمیایی متداول فولاد St37 [۲]

Fe	N	Mn	Si	P	S	Cr	C
پایه	۰/۰۰۸	۰/۳۵-۰/۶۵	۰/۱۷-۰/۳۷	۰/۰۳۵	۰/۰۴	۰/۱۵	۰/۰۷-۰/۱۴

جدول ۲-۲. خواص مکانیکی فولاد St37 [۲]

انرژی شکست ضربه (J)	ازدیاد طول شکست (%)	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	ضخامت (mm)
میانگین ۲۷J	-	-	۲۳۵	$t \leq 16 \text{ mm}$
			۲۲۵	$t > 16 \text{ mm}$
	-	۵۱۰-۳۶۰	-	$t < 16 \text{ mm}$
		۴۷۰-۳۴۰		$t \geq 16 \text{ mm}$
	۱۶	-	-	بالای ۱/۵ mm
	۱۷			۱/۵۱ - ۲ mm
۱۸	۲/۰۱ - ۲/۵ mm			
۱۹	۲/۵۱ - ۲/۹۹ mm			
۲۴	$\geq 3 \text{ mm}$			

۲-۱-۲ فولادهای مقاوم به سایش

پیدایش آلیاژهای گوناگون مقاوم به سایش، به دلیل تنوعی است که در پدیده‌های سایش وجود دارد. از نظر چقرمگی و مقاومت در برابر سایش، می‌توان آلیاژهای فوق‌الذکر را به گروه‌های فولاد کم آلیاژ پرلیتی و مارتنزیتی، فولادهای هادفیلد و چدن‌های پرکربن تقسیم‌بندی نمود. نکته مهم این است که هر آلیاژ مقاوم به سایشی نمی‌تواند در برابر انواع سایش مقاوم باشد، که این امر تنها با شناخت دقیق نوع سایش و آگاهی داشتن به خواص آلیاژ مورد نظر امکان‌پذیر است. برای مثال فولادهای هادفیلد و فولادهای کم آلیاژ پرلیتی و مارتنزیتی، هر دو در مقابل سایش از نوع کندگی مقاوم می‌باشند، ولی اگر شدت ضربه‌های وارده به سطح در حال سایش زیاد باشد از فولادهای هادفیلد و اگر کم باشد از فولادهای کم آلیاژ پرلیتی و مارتنزیتی استفاده می‌گردد [۳].

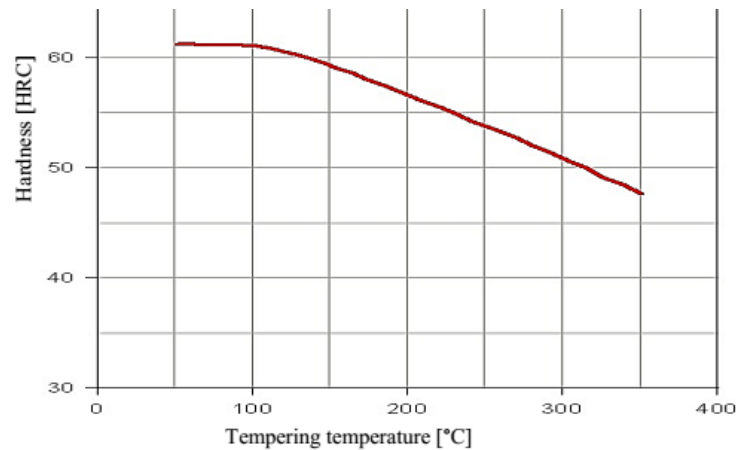
افزایش کربن برای قطعات آنیل، نرماله و یا نرماله-تمپر شده در صورتی که ساختار کاملاً پرلیتی باشد، مقاومت در مقابل سایش را زیاد می‌کند. فولادهای کونچ - تمپر شده که دارای ساختار مارتنزیت تمپر شده هستند، مقاومت در مقابل سایش بیشتری از خود نشان می‌دهند. وجود فریت برای مقاومت در مقابل سایش فولادها مضر است. قطعاتی که تحت سایش قرار می‌گیرند، علاوه بر مقاومت در برابر سایش، می‌بایستی در مقابل تنش‌های دینامیکی که نهایتاً منجر به شکست‌های ناگهانی می‌شود، نیز مقاومت کنند. قطعاتی که در معرض تنش‌های سنگین قرار می‌گیرند مشکل بزرگی را بوجود می‌آورند، به عبارت دیگر قطعه باید دو خاصیت متناقض را در کنار هم داشته باشد که شامل مقاومت به سایش و چقرمگی می‌باشد. مقاومت در مقابل شکست‌های ناگهانی در این قطعات خاصیت پیچیده‌ای است که علاوه بر چقرمگی، به شکل هندسی قطعه و نحوه توزیع تنش‌های باقی مانده نیز بستگی دارد. کربن مهم‌ترین عاملی است که تأثیر معکوس روی مقاومت به سایش و چقرمگی می‌گذارد. با افزایش میزان کربن مقاومت به سایش افزایش یافته ولی چقرمگی قطعه کاهش می‌یابد. انتخاب ترکیب شیمیایی با توجه به میزان کربن و عملیات حرارتی برای بهینه کردن مقاومت به سایش و چقرمگی از اهمیت خاصی برخوردار است. مارتنزیت و بعد از آن پرلیت ظریف از ساختارهای مناسب جهت مقاومت به سایش می‌باشند [۳].

فولاد Ck60 جزء فولادهای با کربن متوسط است که کاربرد زیادی به عنوان فولاد مقاوم به سایش دارد. ترکیب شیمیایی این نوع فولاد غالباً مطابق جدول ۲-۳ است.

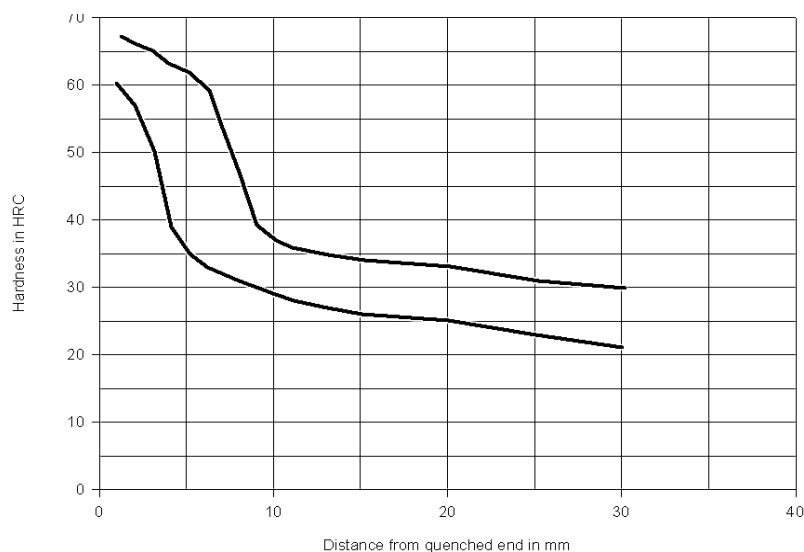
جدول ۲-۳. ترکیب شیمیایی فولاد Ck60 [۴]

Fe	Cr+Mo+Ni	Ni	Mo	Cr	Mn	Si	C
پایه	حداکثر ۰/۶۳	حداکثر ۰/۴	حداکثر ۰/۱	حداکثر ۰/۴	۰/۷۵	حداکثر ۰/۴	۰/۶۱

از کاربردهای این فولاد می‌توان به استفاده در شفتها، فنرها، ابزارهای دستی کشاورزی، ورق‌های نورد سرد شده و بوش‌ها اشاره کرد. همچنین این فولاد دارای مدول الاستیسیته ۲۱۰ GPa و چگالی $7/85 \text{ g/cm}^3$ می‌باشد. فرایند نرماله کردن در دمای $820-850^\circ\text{C}$ است. به منظور سخت کردن فولاد تا دمای $840-800^\circ\text{C}$ گرم شده سپس در آب یا روغن سرد می‌شود. در شکل ۲-۱ تغییرات سختی با دمای تمپر، زمانی که در آب سرد می‌شود نشان داده شده است. همچنین تغییرات سختی با فاصله از انتهای کونچ شده در شکل ۲-۲ نشان داده شده است [۴].



شکل ۲-۱. تغییرات سختی و دمای تمپر با محیط سردکنندگی آب [۴].



شکل ۲-۲. تغییرات سختی و فاصله از انتهای کونچ شده در آب [۴].

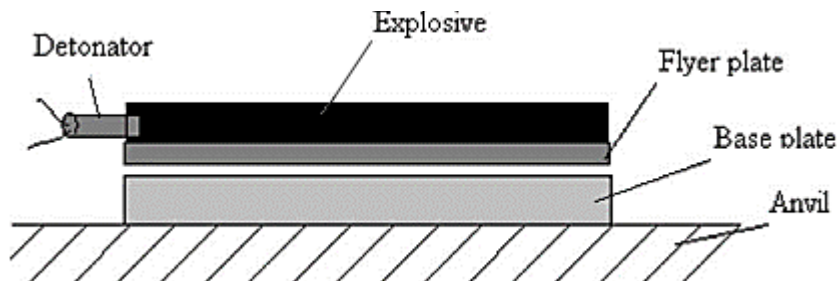
۲-۲ شرح کلی جوشکاری انفجاری

از جمله مشکلات جوشکاری ذوبی می‌توان به کاهش مقاومت خوردگی، ترک گرم، جدایش، توسعه ترکیبات بین فلزی و وجود حرارت شدید اشاره کرد که سبب شده با وجود مزایایی که این روش جوشکاری همچون ارزان بودن و قابل دسترس و انعطاف پذیر بودن دارد، تمایل صنایع به سمت فرایندهای حالت جامد برود [۵]. برای اتصال فلزات بدون از دست رفتن خصوصیات و اتصال فلزات دارای خصوصیات مختلف، روش جوشکاری حالت جامد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]. فرایند جوشکاری انفجاری به عنوان یک روش متغیر که به توانایی تولید سطح اثر بزرگ پیوند بین دو فلز حتی برای پیوند موادی که از لحاظ مکانیکی دارای خصوصیات مختلفی می‌باشند، مشهور می‌باشد. به دلیل آنکه هیچ گرمای خارجی برای بهبود پیوند مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، این فرایند به عنوان فرایند جوشکاری در حالت جامد شناخته می‌شود [۷ و ۸]. بیش از ۱۰۰ سال است که مواد منفجره برای تغییر شکل فلزات مورد استفاده قرار می‌گیرند. مواد منفجره معمولاً به منظور تخریب استفاده می‌شود تا کاربردهای ساختاری، اما جوشکاری انفجاری یک مثال از کاربردهای سازه‌ای است که از مواد منفجره به عنوان منبع ایجاد انرژی جهت اتصال متالورژیکی قطعات استفاده می‌شود. اولین بار جوشکاری انفجاری در جنگ جهانی اول و با مشاهده اتصال ترکش‌های ناشی از انفجار پوسته گلوله‌ها و بمب‌ها به پایه‌های فلزی و جنگ افزارها کشف گردید. البته در آن زمان این فرایند به عنوان یک روش ایجاد اتصال در حالت جامد لحاظ نشد و هیچ بررسی علمی روی آن صورت نگرفت. جوشکاری انفجاری، در ابتدا به عنوان روشی برای تولید اتصالاتی که ساخت آن‌ها با روش‌های متداول جوشکاری غیرممکن بود مطرح شد، اما خصوصیات بارز این روش و توانایی‌های آن در اتصال موجب رشد سریع و در نهایت اتصال بیش از ۲۶۰ ترکیب فلزی همجنس و غیرهمجنس تا اواخر دهه هفتاد میلادی گردید [۹-۱۱].

در شکل ۲-۳ چیدمان موازی جوشکاری انفجاری صفحات نشان داده شده است. صفحه فوقانی یا صفحه پرنده با یک فاصله از قبل تعیین شده یکنواخت که فاصله توقف (d) نامیده می‌شود، نسبت به صفحه زیرین (صفحه ساکن) قرار داده می‌شود. صفحه ساکن روی سندان از جنس صفحه ضخیم فلزی یا توده شنی قرار داده می‌شود. همچنین می‌توان به منظور جلوگیری از تماس مستقیم مواد منفجره و محصولات حاصل از انفجار با صفحه پرنده، سطح فوقانی آن با یک لایه ضربه‌گیر^۱ پوشانده شود (این لایه محافظ می‌تواند مثلاً قشر ضخیم رنگ باشد). سپس ماده منفجره مناسب با ضخامت یکنواخت و سرعت انفجار معین (V_d) روی صفحه پرنده گذاشته می‌شود. نسبت جرمی ماده منفجره به صفحه پرنده نسبت بار انفجاری (R) نامیده می‌شود که نقش مهمی در فرایندهای جوشکاری انفجاری دارد [۵ و ۱۲]. با منفجر شدن ماده منفجره، صفحه پرنده به سمت صفحه ساکن با سرعت V_p و فشار خیلی زیاد ناشی از انفجار که در حد چند گیگاپاسکال است، شتاب گرفته و منجر به ایجاد یک زاویه دینامیکی β بین دو صفحه در نقطه برخورد می‌گردد [۱۳]. برخورد اولیه می‌بایست دارای انرژی کافی جهت سیلان هیدرودینامیکی سطوح فلزات در نقطه برخورد باشد. برخورد مورب دو قطعه باعث ایجاد جت رو به خارج در رأس زاویه برخورد می‌شود. پدیده جت در حالت جوشکاری انفجاری صفحات فلزی تحت اثر گسترش ناپایداری برشی در مرز تماسی صفحات فلزی تشکیل می‌شود. جت تشکیل شده در هنگام اتصال توسط زدایش فیلم‌های اکسیدی سطحی و دیگر آلودگی‌ها منجر به تمیزکاری فیزیکی سطوح مجاور هم شده که متعاقب آن امکان رسیدن کلیه اتم‌های دو فلز به فاصله تعادلی جهت تشکیل پیوند را تحت اثر فشار ضربانی حاصل از انفجار در هنگام پیشروی جبهه انفجار در حین فرایند جوشکاری میسر می‌سازد. فشار در نقطه برخورد، حاصل از تبدیل انرژی جنبشی در هنگام فرایند جوشکاری، می‌بایست جهت

¹ Buffer

حصول به اتصالات بین اتمی پایدار برای مدت زمان کافی به یک سطح مناسب برسد. در نتیجه به دلیل فشار بالای ناشی از برخورد، دو فلز به یکدیگر فشرده شده و اتصال متالورژیکی در اثر تشکیل پیوند اتمی در فاز جامد در فصل مشترک تماس حاصل می‌شود. ترکیب فشار، حرارت و جریان می‌تواند موجب تولید یک پیوند قوی دارای استحکام برابر و یا حتی بزرگتر از دو فلز گردد [۸ و ۱۴-۱۷].



شکل ۲-۳. چیدمان موازی جوشکاری انفجاری [۷].

به علت استفاده از مواد منفجره، فرایند جوشکاری در کسری از ثانیه صورت می‌گیرد و برخلاف دیگر روش‌های جوشکاری متغیرهای آن را نمی‌توان در حین عملیات جوشکاری اصلاح نموده و یا تغییر داد. لذا دستیابی به یک اتصال با کیفیت، تنها با انتخاب صحیح متغیرهای فرایند (شامل آماده سازی سطوح، فاصله توقف، میزان بار و سرعت و انرژی انفجار) قابل حصول می‌باشد. انتخاب این متغیرها براساس خواص مکانیکی و فیزیکی فلزات اتصال و بر اساس یکسری روابط ریاضی صورت می‌گیرد [۱۱ و ۱۲].

جوشکاری انفجاری حدود چهل سال است که به منظور تولید صنعتی قطعات جوشکاری مشکل از بازه وسیعی از ترکیبات فلزی بکار می‌رود. مهم‌ترین استفاده از این روش در بخش‌های صنعتی چون کارخانه‌ها، ساخت ماشین‌آلات مختلف، هواپیما، خودرو و به ویژه در صنعت نفت می‌باشد. از دیر باز تاکنون ورق‌های جوش داده شده در صنایع نفت، گاز و نیز مجتمع‌های شیمیایی کاربرد وسیعی داشته‌اند. در صنعت نفت وجود یک لایه مقاوم در برابر ساییدگی و زنگ زدگی سبب عملکرد بهتر و طولانی‌تر قطعات می‌گردد. از دامنه این کاربردها، ساخت بسیاری از لوله‌های قطور، تانکرهای حمل مواد خورنده شیمیایی، مخازن تحت فشار، اتوکلاوها، مبدل‌های حرارتی خنک شونده با آب دریا، راکتورها و سایر تجهیزاتی که در سرویس پردازش آنها گاز ترش و دیگر مواد خورنده وجود دارند، می‌توان برشمرد. جوشکاری می‌تواند برای ایجاد یک لایه سطحی کاملاً جدید و یا ترمیم بخش‌های آسیب دیده مورد استفاده قرار گیرد. معمولاً هدف از اتصال‌دهی صفحات با صفحه ای از جنس دیگر، نیاز به مقاومت در برابر خوردگی و سایش، بهبود انتقال حرارت، بالابردن مقاومت یا استحکام قطعه، افزایش مقاومت در مقابل تنش‌ها، بهبود خواص الکتریکی و غیره است. همچنین برای فرایندهای شیمیایی به طور معمول از روکش‌های گران قیمت نظیر نیکل، فولاد زنگ نزن، تیتانیوم و غیره استفاده می‌شود که با استفاده از فرایندهای روکش کاری می‌توان ورق‌های ارزان‌تر را جایگزین ورق‌های گران قیمت پرآلیاژی کرد. همزمان که استحکام مکانیکی بالاتری دارند، مقاومت به خوردگی و سایش بهتری نیز دارا می‌باشند، بدان معنی که ضخامت دیواره پایین‌تر و قابلیت عملیات مکانیکی بهتر در مقایسه با ورق‌های پرآلیاژی دارند. به طور مثال برای استفاده از فولاد زنگ نزن در مخازن، در صورتی که به صورت یکپارچه ساخته شود، هزینه زیادی صرف می‌شود، در حالی که ساخت مخزن توسط لایه ای نازک از این فولاد به صورت پوششی روی فولاد معمولی و توسط جوشکاری انفجاری، هزینه را بسیار پایین می‌آورد [۱۱ و ۱۸].

بعضی از کاربردهای جوشکاری انفجاری به قرار زیر است [۱۱ و ۱۸-۲۱]:

- ۱- اتصال لوله‌ها و جوشکاری سطوح استوانه‌ای: الف) جوشکاری داخلی استوانه‌های هم مرکز ب) روکش‌دهی داخلی و خارجی استوانه‌ها ج) جوشکاری لوله به صفحه د) جوشکاری سر به سر لوله به لوله
- ۲- روکش‌دهی صفحات مسطح و جوشکاری خطی لب به لب صفحات مسطح
- ۳- جوشکاری مقاطع توخالی (رادیاتورها)
- ۴- روکش‌دهی سیم‌ها و مفتول‌ها
- ۵- استفاده گسترده از این روش برای مبدل‌های حرارتی و همچنین مخازن تحت فشار
- ۶- اتصال از راه دور در مکان‌های خطرناک
- ۷- اتصال پره‌های سرمایشی (فین)
- ۸- اتصال غیرمشابه فلزات مانند آلومینیوم به فولاد، آلیاژهای تیتانیوم به فولاد، مس به فولاد زنگ‌نزن، تنگستن به فولاد
- ۹- استفاده در مخازن فرایندهای شیمیایی، صنعت کشتی‌سازی و صنایع برودتی
از مزایای جوشکاری انفجاری می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۸ و ۱۹ و ۲۱]:
- ۱- توانایی اتصال فلزات غیرمشابه با هم و به صورت معمول فلزات غیرقابل جوش از طریق روش‌های دیگر جوشکاری
- ۲- ساده بودن فرایند
- ۳- توانایی اتصال سطوح بسیار بزرگ
- ۴- جوش دادن انواع ضخامت‌ها به یکدیگر
- ۵- استفاده کم از ماده منفجره
- ۶- عدم وجود منطقه تحت تأثیر حرارت در فلزات جوش خورده و در نتیجه جوش دادن صفحات خیلی نازک به یکدیگر
- ۷- کاهش هزینه‌های اتصال قطعات، به ویژه قطعات بزرگ
اما در برابر این مزیت‌ها یک سری محدودیت‌هایی نیز وجود دارد، که در زیر به آنها اشاره شده است [۱۸ و ۲۲]:
- ۱- انعطاف‌پذیری کافی (۱۰٪) و چقرمگی شکست (۳۰J) فلزات تحت تغییر شکل سریع
- ۲- به دلیل صدای زیاد و همچنین ترک‌زدن و انفجار نیاز به محافظت از اپراتور (محفظه‌های خلأ) می‌باشد و همچنین در شن یا آب انجام می‌شود.
- ۳- محدود شدن استفاده از مواد منفجره در محیط‌های صنعتی به دلیل ایجاد صدا و لرزش زمین ناشی از انفجار
- ۴- تنوع کم از نقطه نظر هندسی و محدود شدن به جوشکاری سطوح صاف و استوانه‌ای دارای تقارن محوری

۲-۳ فصل مشترک جوشکاری انفجاری

انواع فصل مشترک حاصل از اتصال در فرایند جوشکاری انفجاری به سه شکل زیر تقسیم می‌شود [۱۸]:

- فصل مشترک مستقیم یا صاف
- فصل مشترک موجی