بسم الله الرحمن الرحيم
إنه من سليمان وإنه

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

رویه‌کاری فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی با استلایت ۶ و ارزیابی ساختار، رفتار سایشی و خوردگی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب و روش ساخت مواد

مارال احمدپور سامانی

اساتید راهنما

دکتر مرتضی شمعانیان

دکتر احمد ساعتچی

۱۳۸۸

شکر و سپاس پروردگار مهربان را که به ما توفیق کسب علم و دانش عطا فرمود. اکنون که با تأییدات الهی و زحمات بی‌دریغ دست اندرکاران تعلیم و تربیت، این مجموعه را به پایان رسانده، بر خود لازم می دانم که از کلیه اساتید، معلمان و کسانی که در آموزش و تعلیم اینجانب نقش داشته اند، خصوصاً از اساتید ارجمندم جناب آقای **دکتر شمعانیان** و جناب آقای **دکتر ساعتچی** که مسئولیت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده داشتند و در طول انجام این تحقیق از رهنمودهای علمی و عملی ارزشمندشان بهره مند شدم صمیمانه سپاسگزاری کنم.

از مدیریت محترم **شرکت پالایش نفت اصفهان** و ریاست محترم تحقیق و توسعه این شرکت، جناب آقای **مهندس ناظم** بدلیل همکاری‌ها و هماهنگی‌های ارزشمندشان و نیز از قسمت بازرسی فنی پالایشگاه، جناب آقایان **مهندس رهبر** و **مهندس طاهریان** بجهت مشاوره های پرثمرشان تشکر می‌کنم. همچنین از کارگاه پالایشگاه اصفهان جهت همکاری تشکر می‌نمایم.

از مسئولین محترم آزمایشگاه‌های متالوگرافی، SEM، شامتک، خوردگی، خواص مکانیکی و XRD و کارگاه آموزشی دانشگاه صنعتی اصفهان دانشکده مواد، بخاطر همکاری‌های ایشان نهایت تشکر را دارم.
از دوستان عزیزم سرکار خانم مهندس نسیم نجاری، سرکار خانم مهندس الهه موسوی و دیگر دوستان بخاطر همکاری‌ها و راهنمایی‌هایشان تشکر می‌کنم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

پدر و مادر

و خواهر عزیزم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده. ۱

فصل اول: مقدمه

مقدمه ۲

فصل دوم: مرور مطالعاتی

تعریف و مفهوم عملیات سخت کاری سطحی به روش جوشکاری..... ۵

۲-۱- مزایای سخت کاری سطحی به روش جوشکاری..... ۵

۲-۲- بازسازی به منظور بازیابی ابعادی و سخت کاری سطحی ۶

۲-۳- انتخاب آلیاژ سخت کاری سطحی ۶

۲-۴- روش‌های جوشکاری..... ۷

۲-۴-۱-جوشکاری قوس الکتریکی با الکترود پوشش دار..... ۸

۲-۴-۲-جوشکاری توپودری ۹

۲-۴-۳-جوشکاری زیر پودری ۹

۲-۴-۴-جوشکاری پرتو لیزر ۱۰

۲-۴-۵-جوشکاری تنگستنی با گاز خنثی..... ۱۱

۲-۵-رقت ۱۵

۲-۶-آماده سازی فلز پایه..... ۱۶

۲-۶-۱-تمیزکاری ۱۷

۲-۶-۲-آماده‌سازی سطح..... ۱۷

۲-۷-جوشکاری غیرمشابه فولادزنگ‌نزن..... ۱۷

۲-۸-فولادهای زنگ‌نزن ۱۹

۲-۸-۱-انواع فولاد زنگ‌نزن..... ۱۹

۲-۹- فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی..... ۱۹

۲-۹-۱-منطقه ذوب..... ۱۹

۲-۹-۲- فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ ..... ۲۰

۲-۱۰- فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی..... ۲۲

۲-۱۱- متالورژی جوشکاری آلیاژهای پایه نیکل ۲۴

۲-۱۱-۱-خصوصیات عمومی جوشکاری..... ۲۴

الف-هدایت حرارتی ۲۴

ب- مقاومت الکتریکی ۲۴

ج- انبساط حرارتی ۲۴

د- دمای لیکویدوس و سالیدوس..... ۲۴

۲-۱۱-۲- اینکونل ۶۱۷..... ۲۵

الف-کاربرد..... ۲۵

ب-خواص فیزیکی..... ۲۵

ج-خواص مکانیکی..... ۲۶

د-پایداری خواص ۲۶

ه -جوشکاری آلیاژ ۶۱۷..... ۲۶

۲-۱۲-استلایت ۲۷
۲-۱۲-۱-مقدمه ۲۷
۲-۱۲-۲-تاریخچه ۲۷
۲-۱۲-۳- متالورژی فیزیکی ۲۸
۲-۱۲-٤-کبالت ۳۰
الف-تغییر فرم با لغزش ۳۰
ب-نقص در چیده شدن ۳۰
ج-دوقلویی شدن ۳۰
د-استحاله مارتنزیتی ۳۰
۲-۱۲-۵-تاثیر عناصر آلیاژی ۳۱
الف-کروم ۳۱
ب-تنگستن و مولیبدن ۳۲
ج-نیکل و آهن ۳۲
د-کربن ۳۲
۲-۱۲-۶-استحکام محلول جامد ۳۲
۲-۱۲-۷-فازهای ثانویه ۳۳
الف-کاربیدها ۳۳
ب-ترکیبات بین‌فلزی ۳۵
۲-۱۲-۸- جوش پذیری آلیاژهای پایه کبالت ۳۷
۲-۱۲-۹-تاثیر عوامل جوشکاری بر روکش آلیاژهای پایه کبالت ۳۸
الف-تاثیر جریان ۳۸
ب-تاثیر پیشگرم ۳۸
۲-۱۳-رفتار آلیاژهای پایه کبالت در محیط‌های خورنده ۳۹
۲-۱۳-۱-خوردگی یکنواخت ۳۹
۲-۱۳-۲-خوردگی موضعی ۴۰
۲-۱۴-عوامل و مکانیزم‌های سایش ۴۴
۲-۱۴-۱- سایش خراشان ۴۴
الف-سایش سه جسمی ۴۴
ب-سایش دو جسمی ۴۴
۲-۱۴-۲-فرسایش ۴۶
الف- سختی ذره ۴۶
ب-شکل و اندازه ذرات ۴۷
۲-۱۴-۳-سایش ضربه‌ای ۴۷
۲-۱۴-۴- سایش چسبان ۴۷
۲-۱۴-۵-سایش دمای بالا ۴۷
۲-۱۴-۶-سایش خورنده ۴۸
۲-۱۴-۷-سایش اکسایشی ۴۹
۲-۱٤-۸- منحنی مشخصه سایش ۵۰

فصل سوم: مواد و روشهای آزمایش

۳-۱- مواد ۵۰
۳-۲- آماده سازی نمونه‌ها ۵۱
۳-۳- سخت‌کاری سطحی نمونه‌ها ۵۱
۳-٤- بررسی ریزساختار و رقت ۵۱
۳-۵- سختی‌سنجی ۵۲
۳-٦- آزمون خوردگی ۵۲
۳-٦-۱-روش‌های ارزیابی رفتار خوردگی و تعیین نرخ خوردگی ۵۲
۳-٦-۲- آماده سازی نمونه‌ها جهت آزمون خوردگی ۵۳
۳-٦-۳- سل مورد استفاده ۵٤
۳-٦-٤-آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک ۵٤
۳-٦-۵-آزمون پلاریزاسیون سیکلی ۵٤
۳-۷-آزمایش سایش ۵۵
۳-۷-۱-آماده سازی نمونه ۵۵
۳-۷-۲-اندازه‌گیری سایش و ضریب اصطکاک ۵۵
الف- روش انجام آزمایش سایش ۵۵
ب- اندازه‌گیری ضریب اصطکاک ۵٦
۳-۷-۳- بررسی مکانیزم سایش ۵۷

فصل چهارم: نتایج و بحث

٤-۱-بررسی ریزساختاری ۵۸
۴-۲-نتایج آزمایش پرتو ایکس ۶۸
۴-۳- رقت ۷۰
۴-۴-سختی سنجی ۷۴
۴-۵-ریز سختی سنجی ۷۶
۴-۶-بررسی تاثیر لایه‌میانی بر تنش‌پسماند در فلز جوش ۷۷
۴-۷-سایش ۷۸
۴-۷-۱-بررسی نتایج سایش ۷۸
۴-۷-۲-بررسی نمونه‌های سایش با میکروسکوپ الکترونی ۸۲
۴-۷-۳-فازشناسی در نمونه‌های سایشی ۸۸
۴-۷-۴-ضریب اصطکاک ۹۰
۴-۸-بررسی رفتار خوردگی ۹۳

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

نتیجه‌گیری ۱۰۲
پیشنهادات ۱۰۴

منابع و مراجع

منابع و مراجع ۱۰۵

چکیده

در این پژوهش به بررسی ریزساختار، فازشناسی، سختی، رفتار خوردگی و رفتار سایشی روکش حاصل از سیم‌جوش پایه کبالت از نوع استلایت ٦ در ۱، ۲ و ۳ پاس بر سطح فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ٤١٠ و ۱ پاس استلایت ٦ در حضور لایه میانی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۹ و یا اینکونل ٦١٧ پرداخته شده است. روکش‌کاری به روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز (GTAW) انجام شد. نمونه‌ها توسط آزمون‌های متالوگرافی نوری و الکترونی،پراش پرتو ایکس، طیف‌سنجی انرژی(EDS) و سختی سنجی مورد بررسی قرار گرفتند. یافته‌های پژوهشی نشان داد که در سطح نمونه‌ها ریزساختار دندریتی و شامل فاز زمینه کبالت γ (FCC) غنی از کروم و یوتکتیک غنی از کاربید کروم است. این کاربیدها شامل $M_{23}C_6$ و یا M_7C_3 (M فلز) غنی از کروم هستند. در فصل مشترک روکش و زیرلایه و در بین پاس‌ها رشد اپی‌تکسیال مشاهده شد. سختی از فصل مشترک به سمت سطح افزایش یافته است زیرا ساختار ریزتر شده است و رقت آهن در نزدیک فصل مشترک زیاد است. با اعمال لایه میانی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۹ رقت آهن از نمونه دو پاس استلایت کمتر و تقریباً شبیه نمونه ۳ پاس است و سختی سطح افزایش یافته است. سختی سطح روکش استلایت در حضور لایه میانی اینکونل ٦١٧ کمتر شده است. از نمونه‌های ۱ به ۳پاس استلایت۶ مقاومت به سایش بیشتر شده است، نمونه با لایه میانی ۳۰۹ بیشترین مقاومت به سایش را داشت و نرخ سایش نمونه با لایه میانی اینکونل ٦١٧ از دیگر نمونه‌ها بالاتر است و کاهش وزن بیشتری نیز مشاهده شده است. با توجه به سختی سنجی بر روی مسیر سایش یافته، مشاهده می‌شود سختی سطح پس از سایش افزایش یافته است. فاز عمده پس از سایش کبالت ε (HCP) بوده که مقایسه آن با نتایج قبل از سایش نشان داد که این فاز پس از سایش بوجود آمده است. ضریب اصطکاک روکش‌های استلایت در محدوده ۰/۲ تا ۰/۲۸ بود و در نمونه با لایه میانی اینکونل ضریب اصطکاک افزایش یافت. نمونه ۳پاس دارای سرعت خوردگی کم و منطقه پسیو بزرگتر بود و نمونه‌های همراه با لایه میانی سرعت خوردگی کمتری داشتند ولی منطقه پسیو آن‌ها کوچکتر بود.

کلمات کلیدی: استلایت۶، فولاد زنگ نزن مارتنزیتی، رفتار سایشی، رفتار خوردگی، اینکونل ٦١٧،لایه میانی، جوشکاری قوسی تنگستن-گاز

فصل اول
مقدمه

تجهیزات در صنایع پس از یک دوره کاری به‌منظور افزایش بازده و طول عمر احتیاج به تعمیر دارند. حفظ استحکام بالا ، مقاومت به خوردگی در دمای بالا و سختی مناسب از جمله خواص مهمی است که به‌منظور عمر و کارکرد بیشتر قطعات صنعتی در شرایط سرویس از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بدیهی است شرایط سطحی قطعات نقش مهمی در جلوگیری یا به تعویق انداختن آسیب‌های ناشی از عوامل مخرب دارد [۱]. عملیات سخت کاری سطحی می‌تواند موجب افزایش مقاومت به خوردگی، مقاومت به سایش، چقرمگی و کاهش اصطکاک در محل مورد نظر گردد. برخی از پوشش ها توسط فرایندهای جوشکاری گازی و قوسی اعمال می‌شوند وروش‌های دستی، نیمه اتوماتیک یا اتوماتیک را می‌توان برای هریک از فرایندها به کار برد. مواد پرکننده مناسب درشکل‌ها وانواع گوناگون نظیر سیم جوش، الکترودهای پوشش‌دار، خمیرها وپودرها موجود است. دراین حالت چسبندگی این مواد برروی فلزات پایه از طریق پیوندهای متالورژیکی صورت می‌گیرد. فرایند سخت کاری سطحی را همچنین می توان به منظور کنترل همزمان سایش وخوردگی به عنوان مثال در شیرها وپمپ‌هایی که در معرض مایعات خورنده قرار دارند بکار برد. سخت کاری سطحی به روش‌های مختلف جوشکاری قوسی، جوشکاری لیزر و روش اسپری انجام می‌شود [۲].
فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی زمانی که نیاز به استحکام کششی خوب ، استحکام خستگی و مقاومت به خزش و مجموعه‌ای از مقاومت به خوردگی و مقاومت به گرمای تا حدود $650^{\circ}C$ باشد کاربرد دارند. در صنعت فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی با کربن کم و متوسط بطور مثال نوع ۴۱۰ در توربین‌های بخار ، موتورهای جت و توربین‌های گازی استفاده می‌شوند. فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی اغلب در صنایع نفت و پتروشیمی کاربرد دارند. کاربردهای دیگر آن در نوع‌های با کربن بالاتر شامل وسایل دندانپزشکی ، جراحی ، فنر، شیرها ، دنده‌ها ، شافت و غیره است.
این نوع فولادها همچنین به طور گسترده جهت کاربردهای دما وفشار بالا استفاده می‌شوند. بر روی فولادهای زنگ‌نزن برای اینکه مقاومت به سایش به حد مطلوب برسد سخت کاری سطحی می‌شود. سخت کاری سطحی برای

جاهایی که دو قطعه بدون روانساز و یا با روانساز کم روی هم کشیده می‌شوند مثل شیرهای کنترلی قسمتهای تراکتورها و بیرینگ‌ها استفاده می‌شوند. مقاومت به ضربه فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی نسبت به فولادهای پرلیتی و آستنیتی ضعیف است. اما این امر تا حدودی با اعمال سخت کاری سطحی ولذا افزایش مقاومت به سایش جبران می‌شود [۲].

سطح داخلی شیرهای بخار تحت ضربات متناوب زیاد، دمای بالا، فرسایش در نتیجه گازهای خروجی دمای بالا و جریان‌های با سرعت زیاد هستند. در حال حاضر جلوگیری از این مشکل بکاربردن یک لایه با مقاومت به حرارت، مقاومت به خوردگی و مقاومت به سایش بر روی شیرهاست. یک پیشنهاد خوب استفاده از آلیاژهای پایه کبالت حاوی کاربیدهاست که مقاومت به سایش و خوردگی بالایی دارند [۴].

سوپرآلیاژهای پایه کبالت که یکی از معروفترین آنها استلایت است، به‌خاطر استحکام بالا ، مقاومت به خوردگی بالا ، مقاومت به سایش و فرسودگی خوب ، ضریب اصطکاک پایین، اتصال با زیر لایه ، مقاومت در برابر تغییر شکل، انرژی نقص در چیده شدن کم و تمایل به کار سختی زیاد دارای استفاده وسیعی در محیط‌های ساینده هستند [۴-۶]. همچنین دارای مقاومت خوبی در برابر ترک‌های انجمادی در منطقه ذوب می‌باشند [۷]. استلایت به طور گسترده به عنوان مواد سخت‌پوشی در تجهیزات موجود در شرایط محیطی سخت مثل پره‌های توربین، بیرینگ‌ها، هرزگرد ماشین‌تراش، برای تولید کارد و چنگال، پوشش‌های ضد سایش، قطعات پمپ‌ها، پلاگ‌ها و نشیمنگاه شیرها در صنایع نفت و گاز همچنین بطور معمول به عنوان ماده آب‌بند در گیت ولوهای صنایع هسته‌ای و هوا فضا استفاده وسیعی دارند [۵-۱۳]. سختی بالای این آلیاژها بدلیل تشکیل ترکیبات بین‌فلزی و کاربیدهای مخلوط غنی از کروم M_7C_3 ویا $M_{23}C_6$ (M فلز) در محلول جامد غنی از کبالت است همچنین استلایت دارای مقاومت به کویتاسیون، سایش چسبان، خراشان و ضربه‌ای است که بستگی به ضریب حجمی و اندازه و مورفولوژی این ذرات سخت دارد [۵،۸و۱۴].

استلایت‌ها دارای انواع مختلفی هستند، به عنوان مثال می‌توان به استلایت ۱، ۶، ۱۲ و ۲۱ اشاره کرد. تفاوت عمده این دسته از آلیاژهای پایه کبالت در میزان کربن آنها است، این امر باعث بروز تفاوت‌هایی در درصد حجمی کاربیدهای تشکیل شده، سختی آن‌ها در دمای اتاق ومیزان مقاومت در برابر سایش خراشان می‌شود[۱۵].

خیلی از خصوصیات این آلیاژها بخاطر طبیعت کریستالوگرافی کبالت است. عنصر کبالت می‌تواند متحمل تغییر فاز کریستالوگرافی مارتنزیتی، تشکیل نقص در چیده شدن و دوقلویی شدن شود. اگر به آهستگی سرد شود در دمای ۴۱۷°C (۷۸۲/۶°F) از FCC به HCP تغییر می‌یابد. بخاطر طبیعت آهسته استحاله، ساختار FCC در کبالت و آلیاژهای آن معمولاً تا دمای اتاق باقی می‌ماند که این موضوع اشاره به آن دارد که آلیاژ در موقعیت شبه‌پایدار است. تغییر فرم در دمای پایین می‌تواند استحاله را القا کند که مربوط به کم بودن انرژی نقص در چیده شدن شبکه و دمای استحاله است [۸،۱۵و۱۶]. اضافه کردن عناصر آلیاژی به کبالت بر انرژی نقص در چیده شدن تاثیر می‌گذارد، همچنین پیش‌بینی می‌شود که اضافه کردن عناصر آلیاژی روی دمای تغییر فاز FCC به HCP تاثیر بگذارد [۱۶]. کروم دارای دو نقش در استلایت است، تشکیل کاربید (بیشترین کاربیدها غنی از کروم هستند) و بیشترین عنصر آلیاژی مهم در زمینه است، که باعث افزایش استحکام به صورت محلول جامد ، مقاومت در برابر خوردگی و اکسیداسیون می‌شود [۵و۱۵]. کروم ساختار HCP کبالت زمینه را پایدار می‌کنند که برای بهبود خواص مکانیکی مهم است و باعث کاهش سایش خراشان می‌شود همچنین انرژی نقص در چیده شدن را کمتر می‌کند[۱۷].

استلایت وقتی که بصورت سخت‌کاری بر روی فولادها استفاده شوند، اختلاط و نفوذ آهن از زیرلایه به روکش سبب کاهش سختی، کاهش مقاومت به خوردگی آلیاژ استلایت در محیط‌های خورنده، کاهش مقاومت به سایش و

افزایش انرژی نقص در چیده‌شدن شبکه کبالت می‌شود. همچنین از رقت آهن و نیکل انتظار می‌رود که تردی کاهش یابد. پذیرش رقت بستگی به نیاز سرویس دارد و اینکه چقدر مقاومت به سایش و خوردگی نیاز است. بهر حال، یک عمل استاندارد طراحی ترکیبات برای سخت‌کاری این است که سطح نهایی کاری لایه سخت پوشی در دو یا سه لایه باشد[۱۸]، همچنین جوشکاری لایه‌های واسط و یا چند لایه از آلیاژ سخت سطحی معمولاً جهت به حداقل رساندن درجه رقت پیشنهاد می‌شود [۱۹].

مالایقلو[1] و همکاران تحقیقاتی روی رفتار خوردگی استلایت۶ ریختگی و HIP در دماهای مختلف انجام دادند. استلایت ۶ نوع HIP یک رفتار خوردگی فوق‌العاده نسبت به نوع ریختگی نشان داد. حضور کاربیدها به عنوان فاز ثانویه، اندازه آن‌ها، توزیع، مورفولوژی و گسترش این فازها برای پیشرفت خواص مکانیکی مورد نیاز و مقاومت به خوردگی در خیلی از آلیاژها مهم است. همچنین نتایج نشان داد استلایت۶ با افزایش دما برای خوردگی مستعدتر می‌شود[۵]. مولدا[2] و همکاران بر روی فصل مشترک استلایت و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی تحقیقاتی انجام دادند و مشاهده کردند که کربن استلایت در طول مرزدانه‌های آستنیت به زیرلایه نفوذ کرده و ایجاد رسوب کرده است. نتیجه این رسوب‌گذاری کاهش مقاومت به خوردگی فولاد زنگ‌نزن است[۲۰]. در زمینه اعمال پوشش‌هایی از نوع آلیاژهای پایه کبالت بر سطح فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی تحقیقاتی توسط گوجیان[3] و همکاران انجام شده و نشان داده شده است که اعمال این نوع پوشش‌ها به‌طور موثر باعث افزایش سختی و کاهش سرعت سایش می‌شود [۷].جنزجوسکی[4] و همکاران در رابطه با دما و تنش در حین جوشکاری تحقیقات انجام دادند و مشاهده کردند که تاخیر زمانی بین اعمال لایه‌ها باعث ایجاد ترک در پوشش می‌شود و پیشگرم فلز پایه باعث کاهش ترک‌ها می‌شود[۲۱]. این محققان بر روی تاثیر دمای پیشگرم بر روی رفتار خوردگی روکش استلایت بر روی فولاد زنگ‌نزن تحقیقاتی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش دمای پیشگرم و افزایش رقت آهن مقاومت به خوردگی کاهش می‌یابد[۲۲]. سان[5] و همکاران اثر رقت را بر سختی در روکش استلایت ۶ بر روی فولاد زنگ‌نزن که به روش لیزر سخت‌کاری شده بود، بررسی کردند و نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش رقت سختی بطور خطی کاهش می‌یابد [۲۳]. راوی[6] و همکاران تاثیر جریان و دمای پیشگرم را بر روکش استلایت بررسی کردند، با توجه به نتایج بدست آمده، دمای پیشگرم و جریان بالاتر باعث رقت بیشتر می‌شود. افزایش جریان و دمای پیشگرم باعث خشن شدن ساختار، کاهش سختی و کم شدن میزان کاربیدها در زمینه می‌شود. استفاده از پیشگرم به حذف ترک‌ها در پوشش کمک می‌کند و سختی در دمای پیشگرم کمتر، بالاتر است [۴].

اما در زمینه تأثیر اعمال لایه میانی و نقش آن بر بهبود کیفیت پوشش از نظر ایجاد پروفیل سختی مناسب ، ایجاد رقت مناسب و تاثیر لایه میانی بر خواص سایشی و خوردگی تحقیقاتی گزارش نشده است.

هدف از انجام این پژوهش بررسی ریزساختار، رقت، رفتار سایشی و خوردگی روکش از نوع استلایت ٦ بر روی فولاد زنگ‌نزن ٤١٠ و تأثیر لایه میانی از نوع فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۹ و اینکونل ٦١٧ بر این خواص است.

---

[1] Malayoglu
[2] Molleda
[3] Guojian
[4] Jendrzejewski
[5] Sun
[6] Ravi Bharath

فصل دوم
مرورمطالعاتی

تعریف و مفهوم عملیات سخت کاری سطحی به روش جوشکاری[1]

به طور کلی عملیات سخت کاری سطحی عبارت‌اند از یک روش با هزینه کم برای رسوب‌دهی یک ماده پر کننده مقاوم به سایش روی سطح قطعه کار جهت افزایش طول عمر قطعه در شرایط سرویس، ترمیم قسمت فرسوده یا خورده شده برای استفاده دوباره و یا به دست آوردن خواص یا ابعاد مورد نظر است. اصولاً ، سخت کاری سطحی بر روی قطعه نو قبل از اینکه در سرویس قرار بگیرد انجام می‌شود[۲۴-۲۶]. هر چه ضخامت لایه ایجاد شده بیشتر باشد خواص مقاومت به سایش آن نیز بهتر خواهد بود. این امر باعث افزایش عمر قطعه سخت کاری سطحی شده به میزان چندین برابر می‌شود.

۲-۱-مزایای سخت کاری سطحی به روش جوشکاری

برای افزایش طول عمر قطعات جدید و فرسوده، سخت کاری سطحی مزایای زیر را دارد:

۱. کاهش هزینه: سخت کاری سطحی قطعات فرسوده و رساندن آنها به ابعاد اصلی باعث صرفه جویی قابل توجهی در هزینه های ساخت، نگهداری، تعمیر و تعویض می‌شود. فلز پایه ارزانتر قابل استفاده است. نیاز به جایگزین کردن قطعات کم می‌شود. دیگر نیازی به ذخیره تعداد زیادی قطعه در انبار نبوده واین امر باعث کاهش هزینه‌های انبار داری می‌شود.

۲. افزایش عمر قطعات: سخت کاری سطحی قطعات در حین فرایندساخت، باعث افزایش عمر آنها می‌شود که میزان این افزایش به شرایط کاری حاکم بر آنها بستگی دارد.

---

[1] Hard facing

۳. افزایش کیفیت محصولات. سخت کاری سطحی قالب ها و ابزارها باعث افزایش کیفیت سطحی محصولات تولیدی می‌شود.
۴. افزایش بازده کاری: تعمیر قالب‌ها وابزارهای فرسوده نیاز به زمان کمتری در مقایسه با ساخت مجدد آنها دارد. بازده کاری افزایش می‌یابد زیرا مدت از کارافتادگی کم می‌شود [۲۴و۲۷]. عملیات سخت کاری سطحی می‌تواند موجب افزایش مقاومت به خوردگی، مقاومت به سایش، چقرمگی، یا خواص ضد اصطکاکی در محل مورد نظر گردد. برخی از پوشش ها توسط فرایندهای جوشکاری گازی و قوسی رسوب داده می‌شوند وروش‌های دستی، نیمه اتوماتیک یا اتوماتیک را می‌توان برای هریک از فرایندها به کار برد. مواد پرکننده مناسب درشکل‌ها وانواع گوناگون نظیر سیم جوش، الکترودهای پوشش‌دار، خمیرها وپودرها موجود است. دراین حالت چسبندگی این مواد برروی فلزات پایه از طریق پیوندهای متالورژیکی صورت می‌گیرد.

فرایند سخت کاری سطحی را همچنین می توان به منظور کنترل همزمان سایش وخوردگی به عنوان مثال در شیرها وپمپ‌هایی که در معرض مایعات خورنده قرار دارند به کار برد [۲۵و۲۶].

۲-۲-بازسازی به منظور بازیابی ابعادی[1] و سخت کاری سطحی

ترمیم قطعه فرسوده شامل مراحل زیر است:

۱. لایه میانی[2]: برای رسوبی که کربن و عناصر آلیاژی فلز پایه رقت خواهند داشت.
۲. بازسازی به منظور بازیابی ابعادی: مناطقی که بطور جدی فرسوده شده‌اند باید نزدیک به اندازه کاری دوباره ساخته شوند. برای استحکام، مقاومت به ترک مواد جوشکاری استفاده می‌شوند. به تعداد نامحدود لایه می‌توان رسوب داد.
۳. سخت کاری سطحی: رسوب دادن سطوح مقاوم به سایش بر روی فلز پایه یا بر سطح بازسازی شده، برای افزایش عمر کاری قطعه سخت کاری اغلب به یک، دو یا ۳ لایه محدود می‌شود [۲۴].

۲-۳-انتخاب آلیاژ سخت کاری سطحی

انتخاب آلیاژ سخت کاری سطحی با توجه دو عامل اصلی میزان سایش وهزینه صورت می‌گیرد. اگر چه عوامل مهم دیگری مانند نوع فلز پایه، فرایند رسوب دهی، ضربه، خوردگی، اکسیداسیون ونیز باید در نظر گرفته شود.

به طور معمول آلیاژهای سخت کاری سطحی به صورت پودر یا میله بدون روپوش، میله پوشیده شده با فلاکس، سیم جوش‌های توپر وسیم جوش‌های توپودری با طول زیاد به کار می‌روند.

به طور کلی، مقاومت به ضربه آلیاژهای سخت کاری سطحی با افزایش میزان کاربید، کاهش پیدا می‌کند. در مواقعی که مقاومت در برابر ترکیبی از سایش وضربه مورد نظر باشد، با توجه به نوع محیط کاری، یکی از این دو عامل اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در کاربردهایی که مقاومت در برابر ضربه اهمیت زیادی دارد، از فولادهای آستنیتی منگنزدار می‌توان جهت بازسازی قطعات استفاده کرد [۲۷].

در بسیاری از فرایندهای شیمیایی یا صنایع پتروشیمی، سایش همراه با خوردگی ناشی از محلول‌های اسیدی ویا قلیایی است. در چنین محیط‌هایی تعداد کمی از آلیاژهای سخت کاری سطحی پایه آهنی مقاومت لازم در برابر خوردگی

---

[1] Build up
[2] Buttering

را تأمین می‌کند ولی با استفاده از آلیاژهای پایه کبالت یا نیکل می توان به مقاومت مورد نظر در برابر ترکیب سایش و خوردگی دست پیدا کرد.

آلیاژهای پایه آهنی در برابر اکسیداسیون وخوردگی داغ نیز مقاومت کمی دارند. آلیاژهای پایه نیکل حاوی براید نیز به دلیل ناکافی بودن میزان کرم در زمینه، مقاومت خوبی در برابر اکسیداسیون ندارند. بنابراین آلیاژهای پایه نیکل یا کبالت حاوی ترکیبات بین فلزی لاوه یا حاوی کاربید در شرایطی که به مقاومت به سایش همراه با مقاومت در برابر اکسیداسیون وخوردگی داغ مورد نیاز باشد، توصیه می‌شوند.

حفظ استحکام یک آلیاژ در کاربردهای دمای بالا، به منظور مقاومت در برابر سایش از اهمیت ویژه ای برخوردار است. آلیاژهای پایه آهنی با ساختار مارتنزیتی، در دماهای بالا سختی خود را از دست می‌دهند[۲۶].

بطو کلی انتخاب مواد جوشکاری به سه فاکتور مهم بستگی دارد:

۱. **فلز پایه:** در ابتدا بر انتخاب مواد بازسازی تاثیر می‌گذارد.

۲. **نوع سایش:** نوع سایش در شرایط سرویس به عنوان یک راه ابتدایی برای انتخاب لایه‌های سخت‌پوشی نهایی به حساب می‌آید، که شامل:

- سایش فلز به فلز: فرسودگی بخاطر سایش قسمت‌های فولادی برخلاف هم با روانساز کم یا بدون روانساز
- ضربه‌های سخت: فرسودگی بخاطر ضربات شدید که باعث له کردن، شیاردار کردن و ترک سطحی می‌شود. فولادهای منگنزدار رسوب داده می‌شوند،که در سرویس سخت می‌شوند و بالاترین مقاومت به سایش ضربه‌ای را دارند.
- سایش خراشان[1] به علاوه ضربه: سایش از مواد شن‌دار که همراه ضربات سنگین است که باعث لب پریده شدن یا ترک، سایش سطح می‌شوند.
- سایش خراشان سخت: فرسودگی بخاطر مواد شن‌دار که باعث سایش و فرسودگی سطح می‌شود. سایش خراشان سخت اغلب همراه ضربات متراکم و معتدل است. روکش سخت برای مقاومت به سایش خراشان لازم است ولی اغلب برای مقاومت به ضربه لازم است.
- سایش خراشان فلز به زمین: فرسودگی از زمین مثل موادی که همراه با ضربات معتدل هستند.
- خوردگی: حملات شیمیایی

در خیلی از موارد، فرسودگی تحت تاثیر یک یا ترکیبی از دو یا تعداد بیشتر از پدیده‌های از پدیده‌های بالا می‌باشد[۲۴].

۲-۴-روش‌های جوشکاری

تقریباً از تمامی فرایندهای جوشکاری می‌توان برای سخت کاری سطحی استفاده کرد. متداول‌ترین فرایندهای جوشکاری مورد استفاده در این زمینه عبارتند از[۲۷]:

۱. جوشکاری قوس الکتریکی با الکترود های پوشش دار[2]
۲. جوشکاری قوس الکتریکی تو پودری[3]

---

[1] Abrasion
[2] Shielded metal arc welding
[3] Flux cored arc welding

۳. جوشکاری قوس الکتریکی زیر پودری[1]
۴. جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ[2]
۵. جوشکاری لیزر[3]

البته از فرایند های جوشکاری دیگری از قبیل اکسی استیلن، پلاسما و پاشش فلز[4] نیز برای سخت کاری سطحی استفاده می شود، اما سرعت رسوب کم این فرایندها کاربرد آنها را به موارد خاصی محدود کرده است. در ادامه مزایا، معایب و موارد کاربرد تعدادی از فرایندهای جوشکاری مورد استفاده برای سخت کاری سطحی به اختصار بیان می‌شوند. فرایندهای مختلف سخت کاری سطحی در جدول ۲-۱ با هم مقایسه شده‌اند.

جدول ۲-۱ مقایسه خواص عمده فرایندهای مختلف سخت کاری سطحی[۲۸]

فرایند سخت کاری سطحی	ضخامت رسوب	رقت تک لایه	انرژی ورودی به قطعه	اعوجاج قطعه
جوشکاری قوسی با الکترود پوشش‌دار (SMA)	≥۳/۲mm	۱۰-٪۲۵	کم	زیاد
زیر پودری (SAW)	≥۳/۲mm	۲۰-٪۳۰	کم	زیاد
توپودری (FCAW)	۲/۵mm	تا ٪۳۰	متوسط	زیاد
جوشکاری تنگستنی گاز خنثی (TIG)	۱/۶-۵mm	۵-٪۱۰	متوسط	زیاد
جوشکاری فلزی با گاز (MIG/MAG)	۲/۵mm	تا ٪۳۰	متوسط	زیاد
اکسی استیلن	۱/۶-۵mm	تا٪۵	زیاد	زیاد
پاشش پلاسمایی	تا۱/۲۵mm	ناچیز	خیلی کم	ناچیز
جوشکاری قوس پلاسما (PAW)	٪۲۵-۶/۴mm	٪۵	زیاد ولی متمرکز	زیاد

۲-۴-۱-جوشکاری قوس الکتریکی با الکترود پوشش دار

این فرایند ساده ترین و در دسترس ترین فرایند جوشکاری است. انرژی ورودی در این فرایند زیاد بوده و با توجه به اعوجاج زیاد حاصله از جوشکاری، استفاده از آن برای قطعات نازک و کوچک توصیه نمی‌شود. الکترود های مورد استفاده دراین فرآیند به ویژه در مورد سخت کاری سطحی فولادهای پر کربن و آلیاژی باید از نوع الکترودهای کم هیدروژن(مانند الکترودهای قلیایی) بوده وقبل از آغاز جوشکاری باید به مدت زمان کافی در دمای مناسب پخته شود.مزایا و معایب این روش را به صورت زیرمی‌توان خلاصه کرد[۲۷].

مزایا

۱. عرضه اکثر آلیاژهای سخت کاری سطحی به صورت الکترودهای پوشش دار به بازار
۲. عدم وجود محدودیت خاصی از لحاظ اقتصادی وعملی برای جوشکاری قطعات مختلف
۳. عدم وجود محدودیتی از لحاظ حالات جوشکاری

[1] Submerged arc welding
[2] Gas shielded arc welding
[3] Laser Beam Welding
[4] Metal spray

۴. قابلیت جوشکاری مناطق دور از دسترس و عمیق
۵. قابلیت جوشکاری در هوای آزاد

معایب

۱. برخورداری از انرژی ورودی ودر نتیجه رقت بالا (نیاز به حداقل۲یا۳پاس)
۲. کم بودن بازدهی رسوب ودر نتیجه سرعت جوشکاری (۰/۴۵-۳/۱۷ kg/hr)
۳. نیاز به آموزش جوشکاری برای جلو گیری از باقی ماندن سربازه میان پاس ها ولایه‌های جوش
۴. عدم امکان خودکار شدن فرایند

۲-۴-۲-جوشکاری توپودری

بسیاری از آلیاژهای سخت کاری سطحی در قطر های کم به صورت لوله های مغزدار ارائه می‌شوند. در حقیقت فرم پذیری کم بعضی از آلیاژهای سخت کاری سطحی مانند استلایت‌ها و عدم امکان تهیه آنها در شکل سیم، باعث شده است تا عناصر آلیاژی و روانکار[1] آنها به صورت پودر در داخل لوله تعبیه شوند[۲۹].
مزایا ومعایب این روش را به صورت زیر می توان خلاصه کرد[۲۷]:

مزایا

۱. امکان تهیه اکثر آلیاژهای سخت کاری سطحی به صورت توپودری
۲. زیادبودن بازدهی رسوب و در نتیجه سرعت جوشکاری(۱/۳۵-۱۱/۲۵kg /hr)
۳. تشکیل جوش‌های بی عیب ونقص
۴. قابلیت جوشکاری در هوای آزاد
۵. قابلیت جوشکاری نقاط دور از دسترس
۶. سهولت جوشکاری و عدم نیاز به زمان برای آموزش کار
۷. امکان خودکارشدن فرآیند

معایب

۱. برخورداری از انرژی ورودی و در نتیجه رقت بالا(نیاز به حداقل سه پاس)
۲. محدودیت از لحاظ حالات جوشکاری

۲-۴-۳-جوشکاری زیر پودری

این فرآیند از کاربردهای صنعتی خاصی برخوردار بوده و بهترین واقتصادی‌ترین فرآیند برای بازسازی و سخت کاری سطحی قطعات بزرگ می‌باشد.در این فرآیند قوس الکتریکی در زیر توده ای از پودر فلزی زده می‌شود.جوش‌های تولید شده توسط این فرآیند بسیار یکنواخت و سالم می‌باشند.مزایا ومعایب این فرآینددر زیرخلاصه شده اند[۲۷]:

[1] Flux

مزایا

۱. زیاد بودن باز دهی رسوب و در نتیجه سرعت جوشکاری
۲. تولید جوش‌های یکنواخت، تمیز و سالم
۳. سهولت جوشکاری و عدم نیاز به آموزش جوشکار
۴. امکان خودکار شدن فرایند
۵. عدم پاشش مواد زاید از قوس به اطراف

معایب

۱. محدودیت آلیاژهای عرضه شده به صورت پودر
۲. برخورداری از انرژی ورودی و در نتیجه رقت بسیار بالا(نیاز به جوشکاری چندین پاس)
۳. محدود شدن به اشکال هندسی وحالات جوشکاری خاص(قطعات استوانه ای وحالت تخت)
۴. نیاز به تجهیزات جانبی
۵. اعوجاج بالای قطعات و در نتیجه عدم امکان جوشکاری قطعات نازک و پیچیده توسط آن[۲۷]

۲-۴-۴-جوشکاری پرتو لیزر

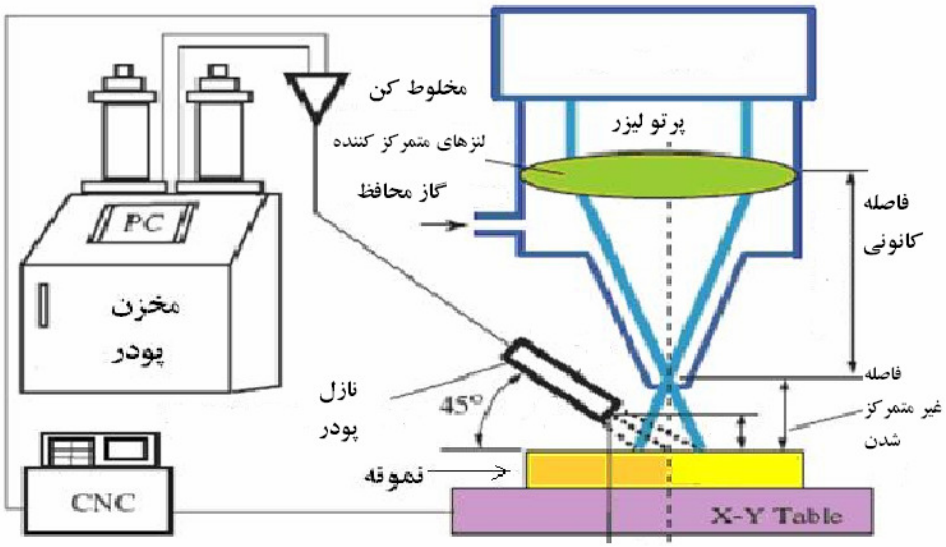
جوشکاری پرتو لیزر فرایندی است که در آن ذوب و اتصال فلز توسط حرارت حاصل از پرتو لیزر صورت می‌گیرد. در پوشش‌دهی با لیزر وقتی‌که برای ایجاد یک لایه پوشش آلیاژی، مواد مختلف و آلیاژها بر روی زیر لایه رسوب داده می‌شوند، فقط سطح زیرلایه آلیاژسازی می‌شود. در شکل ۲-۱ شماتیک جوشکاری پرتو لیزر نشان داده شده است.

مزایا

۱. قابل استفاده بودن مخلوط پودرهای مختلف
۲. رقت کم، رقت می‌تواند با کنترل سرعت پوشش دهی، نرخ تغذیه‌کردن[1] و توان لیزر تعیین شود.
۳. پیچیدگی کم
۴. عمر طولانی
۵. حرارت ورودی در روش لیزر کمتر از TIG است، بنابراین ریزساختار ظریف‌تر است، G/R کم و انجماد دندریتی غالب می‌شود.
۶. پهنای HAZ کمتر
۷. سختی بالاتر
۸. نرخ سایش کمتر
۹. فاصله بین دندریتی[2] کمتر است.

بنابراین به وسیله پوشش‌دهی لیزر لایه پوشش با کیفیت بالا بدست می‌آید[۷].

[1] Feeding
[2] DAS



شکل ۲-۱- شماتیک جوشکاری پرتو لیزر[۷]

معایب

۱. هزینه تجهیزات بسیار زیاد است
۲. به تنظیم دقیق اتصال نیاز است
۳. انعکاس بسیار زیاد پرتو لیزر توسط سطح فلز[۷]

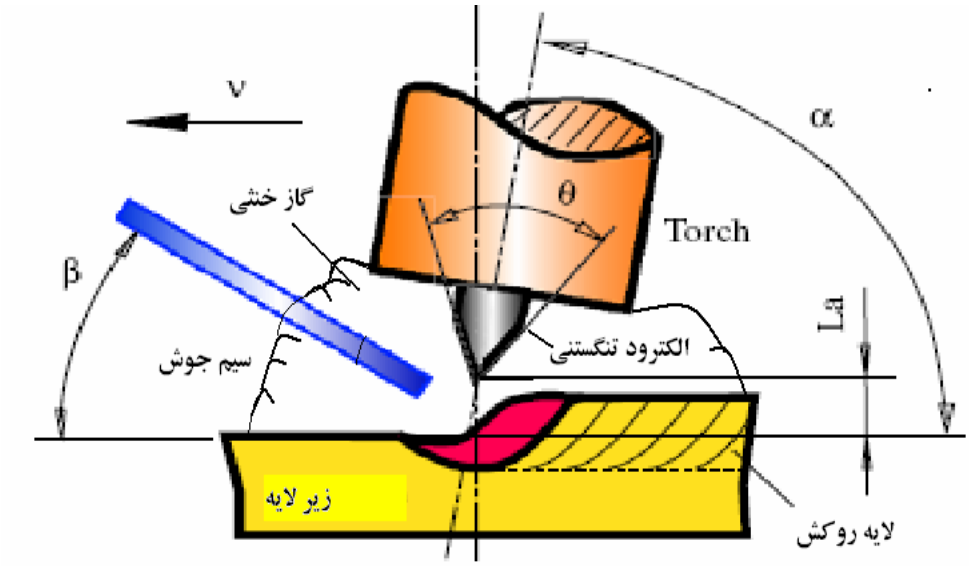
۲-۴-۵-جوشکاری تنگستنی با گاز خنثی

در این روش که برای جوشکاری فلزات پایه بسیار حساس مناسب می‌باشد، جوش بسیار تمیزی ایجاد می‌شود. گاز محافظ مورد استفاده معمولاً آرگون، هلیوم یا مخلوطی از هر دو است. میزان رقت در این روش از فرایند اکسی استیلن و لیزر بیشتر بوده، اما از سایر روش‌های مذکور کمتر است [۲۷و۲۹]. در حقیقت انرژی ورودی در این روش بیشتر از روش اکسی استیلن ولیزر وکمتر از روش های دیگر می‌باشد. البته انرژی ورودی در این روش متمرکزتر از روش اکسی استیلن است. در حقیقت این روش جایگزین بسیار مناسبی برای روش اکسی استیلن به منظور جوشکاری قطعات بزرگ و فلزات پایه سخت می‌باشد. در شکل۲-۲ طرح شماتیک این فرآیند نشان داده شده است.
مزایا ومحدودیت‌های این روش برای سخت کاری سطحی را به صورت زیر می‌توان خلاصه کرد[۲۷]:

مزایا

۱. تولید جوش‌های بسیار تمیز
۲. برخورداری از انرژی ورودی زیاد اما متمرکز
۳. امکان جوشکاری قطعات نازک وپیچیده به خاطر کم بودن میزان اعوجاج ناشی از آن
۴. میزان رقت پایین
۵. امکان کنترل دقیق پارا مترهای جوشکاری
۶. عدم پاشش مواد زائد از قوس به اطراف
۷. عدم وجود محدودیتی از لحاظ حالات جوشکاری

۸ امکان خودکار شدن فرایند



شکل۲-۲-تصویر شماتیک جوشکاری TIG [۷]

معایب

۱. کم بودن بازدهی رسوب ودر نتیجه سرعت جوشکاری
۲. عدم قابلیت جوشکاری مناطق دور از دسترس و عمیق
۳. امکان آلودگی حوضچه مذاب توسط تنگستن
۴. لزوم آموزش جوشکار
۵. غیر اقتصادی بودن در مورد جوشکاری مقاطع ضخیم
۶. عدم قابلیت جوشکاری در هوای مرطوب و آزاد

منابع تغذیه[۱] مورد استفاده در جوشکاری TIGمعمولا از نوع جریان ثابت[۲] با منحنی ولتاژ-آمپر نزولی می‌باشند. در این منابع معمولا از سیستم های یکسو ساز[۳] یا مبدل‌های جریان مستقیم به متناوب[۴] استفاده می‌شود.منابع تغذیه مجهز به مبدل‌های جریان را در حالت ولتاژ ثابت[۵] نیز می‌توان تنظیم کرد. به همین دلیل این منابع چند منظوره بوده و در مقایسه با سیستم های مجهز به یکسوسازی سیلیسیومی معمولی[۶]،از پایداری و حساسیت بیشتری برخوردارند[۳۰].
نازل‌های دستگاههای TIG تاشدت جریان ۲۰۰آمپر توسط گاز خنک می‌شوند.اما در صورت استفاده از این دستگاهها برای جوشکاری پیوسته و مداوم یا افزایش شدت جریان جوشکاری به بیش از این مقدار ،لازم است سیستم خنک کننده آنها آبگرد باشند.قطر داخلی نازل،باید حداقل چهار برابر قطر الکترود تنگستنی باشد. الکترود های تنگستنی مورد استفاده در این روش، می‌توانند خالص بوده یا دارای مقادیر کمی (حداکثر۲٪) اکسیدهای فلزی از

[1] Power Supply
[2] Constant-currcnt type
[3] Thyristor conrrol
[4] Inverter conrrol
[5] Constant-voltage type
[6] Silicon controlled rectifier (SCR)