

**شرکت پترو پولاد پارس**  
**((سازنده سازه های سبک و سنگین فلزی))**



Petro Poulad Pars.Co

**فرآیندهای برشکاری و روشهای آماده سازی لبه**

## فهرست مطالب

۱- مقدمه .....	۱
۲- برشکاری و شیار کاری قوسی .....	۱
۱-۲- برشکاری قوس پلاسما .....	۳
۱-۱-۲- شرح فرآیند .....	۳
۲-۱-۲- برشکاری قوس پلاسما تحت پوشش آب / گاز .....	۷
۱-۲-۱-۲- برشکاری قوس پلاسما تحت پوشش گاز .....	۷
۲-۲-۱-۲- برشکاری قوس پلاسما تحت پوشش آب .....	۸
۳-۱-۲- برشکاری قوس پلاسما با تزریق آب .....	۸
۴-۱-۲- قابلیت های فرآیند برشکاری قوس پلاسما .....	۹
۱-۴-۱-۲- برشکاری مکنیزه سرعت بالا .....	۹
۵-۱-۲- اثرات متالورژیکی .....	۱۰
۶-۱-۲- عرض برش .....	۱۱
۷-۱-۲- برشکاری دستی پلاسما .....	۱۲
۸-۱-۲- خنک کردن با آب .....	۱۲
۹-۱-۲- سرعت برشکاری بهینه .....	۱۳
۱۰-۱-۲- نازل های برشکاری .....	۱۳
۱۱-۱-۲- الکترودها .....	۱۴
۱۲-۱-۲- کنترل ارتفاع تورچ در برش پلاسما .....	۱۴
۱۳-۱-۲- اجزای مختلف THC .....	۱۶
۱۴-۱-۲- فاصله تورچ تا قطعه کار (فاصله استنداف) .....	۱۷
۱۵-۱-۲- انتخاب گاز در برش پلاسما .....	۱۹
۱۶-۱-۲- گازهای پلاسما .....	۲۰
۱۷-۱-۲- نکات ایمنی در برشکاری قوس پلاسما .....	۲۳
۲-۲- برشکاری قوسی هوا-کربن .....	۲۷
۱-۲-۲- شرح فرآیند .....	۲۷
۲-۲-۲- تجهیزات .....	۲۸
۳-۲-۲- تورچ برشکاری .....	۲۸

۲۹	۴-۲-۲- الکترودها
۳۰	۵-۲-۲- منبع توان
۳۱	۶-۲-۲- تغذیه هوا
۳۱	۷-۲-۲- کاربردها
۳۲	۸-۲-۲- روشهای آزمایشگاهی
۳۳	۳-۲- رویه برداری
۳۵	۴-۲- برشکاری قوسی با الکتروده پوشش دار
۳۵	۱-۴-۲- اصول
۳۵	۲-۴-۲- تجهیزات
۳۵	۳-۴-۲- کاربردها
۳۶	۵-۲- برشکاری قوس - اکسیژن
۳۶	۱-۵-۲- اصول
۳۷	۲-۵-۲- اثرات متالورژیکی
۳۸	۳-۵-۲- تجهیزات
۳۸	۴-۵-۲- تکنیکهای برشکاری
۳۹	۵-۵-۲- کاربردها
۳۹	۶-۲- برشکاری قوسی تنگستن - گاز
۳۹	۱-۶-۲- اصول کلی
۴۰	۲-۶-۲- تجهیزات
۴۱	۷-۲- برشکاری قوس با الکتروده فلزی و گاز
۴۲	۱-۷-۲- کاربردها
۴۲	۸-۲- برشکاری قوسی کربنی
۴۲	۳- برشکاری با لیزر
۴۳	۱-۳- انواع لیزر
۴۶	۲-۳- زمینه های کاربرد لیزر
۴۹	۳-۳- تجهیزات
۵۰	۴-۳- خصوصیات برشها
۵۰	۱-۴-۳- عرض شیار برش

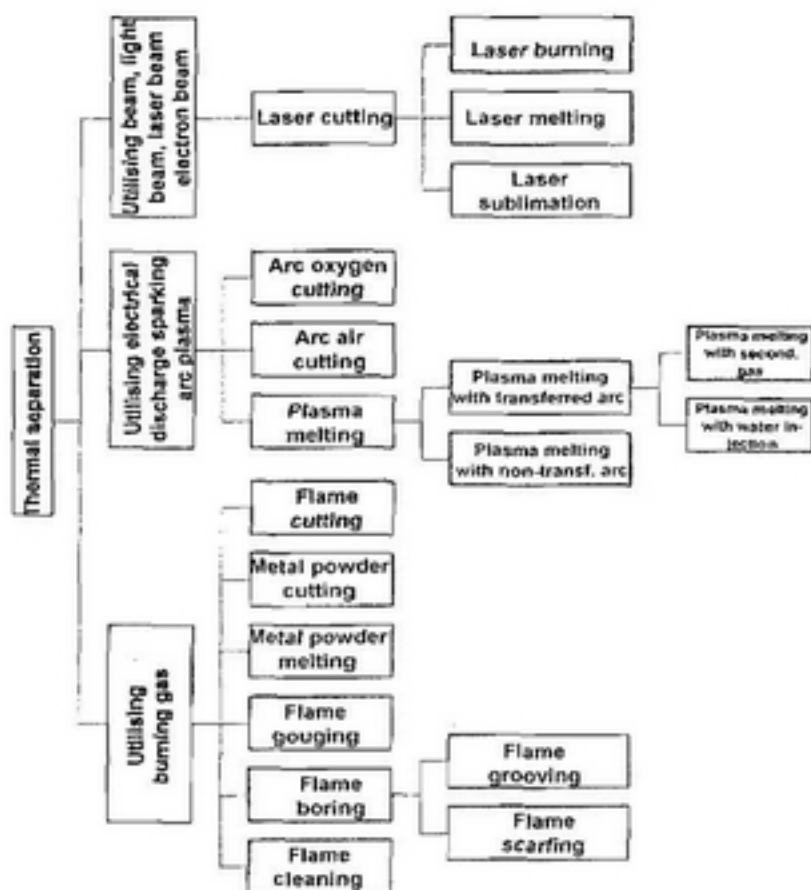
۵۰	۳-۴-۲- زبری
۵۱	۳-۴-۳- سرباره
۵۱	۳-۵- دقت ابعادی
۵۲	۳-۶- فلزات برشکاری شونده
۵۵	۳-۷- غیر فلزات
۵۶	۳-۷-۱- مواد غیرآلی
۵۶	۳-۷-۲- مواد آلی
۵۷	۴- سوراخ کردن با لیزر
۵۹	۴-۱- قوانین و خصوصیات فرآیند
۶۰	۴-۲- کیفیت برش
۶۰	۴-۳- ایمنی در برشکاری لیزری
۶۱	۵- برش با جت آبی
۶۱	۵-۱- مقدمه
۶۳	۵-۲- مصارف و مزایا
۶۳	۵-۳- محدودیت ها
۶۴	۵-۴- اصول
۶۴	۵-۵- متغیرهای فرآیند
۶۵	۵-۶- تجهیزات
۶۶	۵-۷- مواد مصرفی
۶۶	۵-۸- کاربردها
۶۷	۵-۹- مسائل ایمنی
۶۸	۶- برش مکانیکی برای آماده سازی جوش
۶۸	۶-۱- قیچی برش
۷۰	۶-۲- دستگاههای برش تیغه مستقیم
۷۱	۶-۳- برش های مکانیکی
۷۳	۷- برشکاری حرارتی
۷۴	۷-۱- برشکاری شعله ای
۷۴	۷-۱-۱- برشکاری دستی



۷۵	۲-۱-۷- برشکاری ماشینی
۷۶	۳-۱-۷- برشکاری اکسی گاز
۷۹	۴-۱-۷- مواد نامناسب برای برشکاری شعله ای
۷۹	۵-۱-۷- برش پذیری آلیاژهای فولادی
۷۹	۶-۱-۷- ابزار آلات برش
۸۰	۷-۱-۷- نازل های برشکاری شعله ای
۸۲	۸-۱-۷- سرعت برش
۸۴	۹-۱-۷- ابزار برشکاری
۸۷	۱۰-۱-۷- سخت شوندگی سطح برش
۸۸	۱۱-۱-۷- کیفیت برش شعله ای
۸۸	۱۲-۱-۷- عوامل موثر بر کیفیت سطح برش
۹۰	۱۳-۱-۷- عیوب برش و علل آن
۹۷	۸- برشکاری با تزریق پودر آهن
۹۹	۹- برشکاری با تزریق فلاکس
۹۹	۱۰- آماده سازی اتصال جوشکاری براساس DIN ۸۵۵۱
۱۰۰	۱۱- معیار دسته بندی سطوح برش بر اساس DIN ۲۳۱۰ Part ۱
۱۰۲	مراجع



هر کدام از این روش ها به نوبه خود مزایا و معایبی دارند . در هنگام انتخاب هر کدام از این روش ها باید به عواملی چون هزینه، حجم کار، تجهیزات، مهارت کاربر و ... توجه کرد [۱].

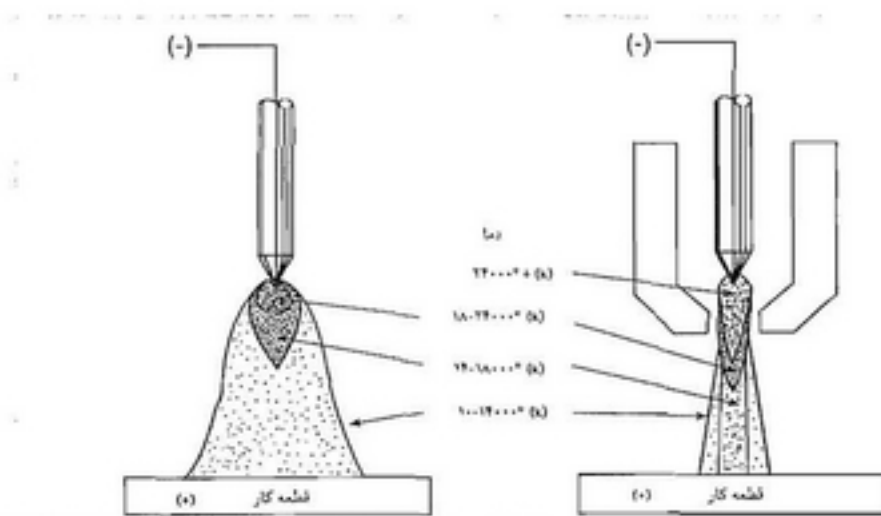


شکل ۱: روش های مختلف برشکاری حرارتی [۱]

## ۱-۲- برشکاری قوس پلاسما

### ۱-۱-۲- شرح فرآیند

در فرآیند برش قوس پلاسما، فلز در منطقه‌ای محدود توسط حرارت قوس متمرکز ذوب می‌شود و جریان سریع و داغ گاز یونیزه که از منافذ نازل خارج می‌شود، فلز مذاب را از آنجا می‌راند. در اوایل دهه ۱۹۵۰، کشف شد که خصوصیات قوس باز، همانند قوس GTAM را می‌توان تا حد بسیار زیادی تغییر داد. با عبور از نازل مسی آبگرد که میان الکترود (کاتد) و قطعه کار (آند) قرار دارد، قوس فشرده می‌شود. به جای واگرایی به قوس باز، چنین قوس‌هایی توسط نازل در یک مقطع عرضی فشرده می‌شوند. این کار باعث افزایش نیروی قوس، ولتاژ و درجه حرارت قوس می‌شود. قوسی که در حال عبور از نازل می‌باشد، سرعت بالایی گرفته، به شدت داغ شده در راستای معینی قرار می‌گیرد. در شکل (۲) استفاده از قوس همراه آرگون را در ۲۰۰ آمپر مشاهده می‌کنید.



شکل ۲: استفاده از قوس همراه آرگون [۶]

جریان سریع پلاسما توسط نازلی با قطر ۰/۱۸۷۵ اینچ (۴/۸ میلی‌متر)، کمی فشرده می‌شود اما در ولتاژی دو برابر ولتاژ قوس باز کار می‌کند و دارای پلاسمای بسیار داغتری می‌باشد. به علت وجود جریان قوی گاز، رسیدن به دماهای بالاتر نیز امکان دارد. این جریان، باعث ایجاد یک لایه نسبتاً سرد

از گاز یونیزه در داخل روزنه نازل و در ادامه باعث افزایش فشاردگی قوس می‌شود. با حرکت چرخشی گاز، ضخامت این لایه افزایش می‌یابد؛ بدین ترتیب که حرکت چرخشی، گاز یونیزه سرد را به سمت بیرون هدایت می‌کند و به تبع آن یک لایه ضخیم تر شکل می‌گیرد.

با تغییر در نوع گاز، سرعت جریان، جریان قوس و اندازه نازل می‌توان خصوصیات جریان پلاسما را تا حد بسیار زیادی تغییر داد. بعنوان مثال، اگر از گازی با سرعت کمتر استفاده شود، نیروی جنبشی جریان گاز کمتر می‌شود. این نوع جریان پلاسما، باعث ایجاد یک منبع گرمایی با تمرکز بالا می‌شود که برای جوشکاری ایده آل است. بالعکس اگر جریان گاز، تا حد مناسبی افزایش یابد، نیروی جنبشی جریان پلاسما برای بیرون راندن فلز مذاب ایجاد شده توسط گرمای قوس پلاسما به اندازه کافی بالا خواهد بود و برشکاری انجام می‌گیرد.

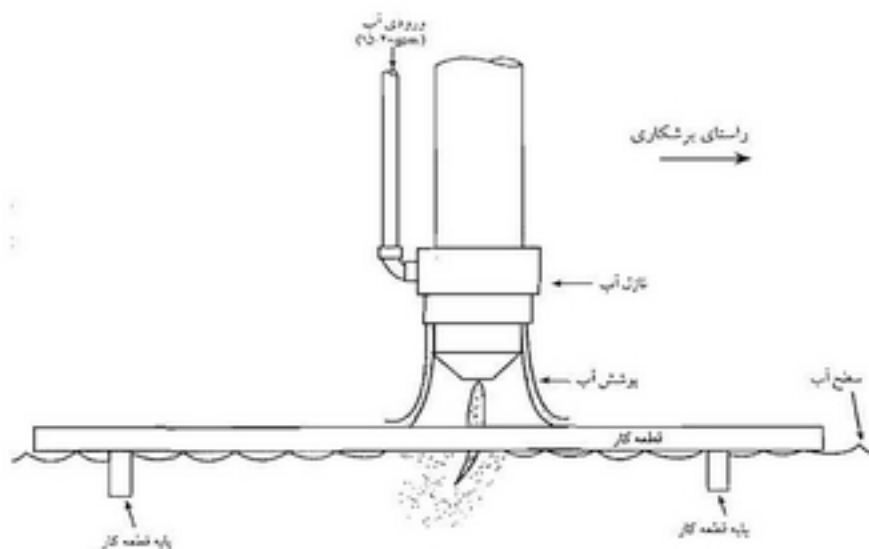
#### • گازها و بخارات

تولید گازها و بخارهایی که برای سلامتی نیز خطرناک هستند، در برشکاری، اجتناب ناپذیر است. ترکیب و سرعت تولید این گازها و بخارات به عوامل زیادی بستگی دارد. این عوامل عبارتند از: جریان الکتریکی قوس، سرعت برشکاری، جنس صفحه برش، منافذ خروج گاز و ...

گازها و بخارات تولیدی معمولاً شامل اکسیدهایی از ذرات فلز برش، ازن، و اکسیدهای نیتروژن می‌باشند. بخارها را باید از محل کار دور کرد یا در بدو تولید آنها را از محیط خارج کرد. این کار را می‌توان با استفاده از هواکش و سیستم های تهویه انجام داد.

در بعضی از حالات، در صورت لزوم، مواد باید قبل از خارج کردن مورد عمل تصفیه قرار گیرند. در کاربردهای مکانیزه برشکاری، روش های متعددی را می توان بجای تهویه به کار برد. یکی از این سیستم ها شامل دو بخش است: یک مسیر برش که دارای مخزن آب است که با قسمت تحتانی قطعه کار تماس دارد و یک نازل حلقوی شکل که پوشش سنگین از آب در اطراف قوس ایجاد می کند.

این نازل روی بدنه تورچ نصب می‌شود (شکل ۳) آب با سرعت  $15-20 \frac{gal}{min}$  تا  $75/7 \frac{lit}{min}$  تا ۵۶/۸ از میز برشکاری به سمت نازل پوشش پمپاژ می‌شود.



شکل ۳: کنترل الودگی [۶]

در سیستم دیگر از مخزن آب استفاده می شود. لیکن به جای اینکه سطح آب تنها با قسمت تحتانی قطعه کار تماس داشته باشد، تمام قطعه کار در آب غوطه ور می شود. بنابراین روی سطح قطعه کار تا عمق ۲/۵ تا ۳ اینچ زیر آب قرار می گیرد. در این سیستم که به آن برشکاری قوسی زیر آب اطلاق می شود. به نازل پوشش آب نیازی نیست، اما لازم است برای بارداری و بی بار شدن قطعه کار و همچنین تثبیت موقعیت تورچ گاه گاهی سطح آب پایین برده شود. در این سیستم اپراتور نمی تواند صفحه برش را در طول کار ببیند، لذا توصیه می شود، همراه این فرآیند از سیستم های کنترل الکترونیکی استفاده شود.

#### • صدا

مقدار صدای تولیدی این فرآیند بستگی به جریان اولیه دارد. بعنوان مثال تورچی که با ۴۰۰ آمپر کار می کند، در فاصله ۱/۸ متری، ۱۰۰ دسی بل صدا تولید می کند. صدا معمولاً در محدوده



فرکانسی ۲۰۰۰۰-۵۰۰۰۰ HZ قرار دارد که این سطح صدا می تواند باعث آسیب سیستم شنوایی انسان شود.

هنگامی که سطح صدا از سطوح مجاز فراتر می رود باید از وسایل حفاظتی گوش استفاده شود. این مقادیر که حتی در یک محل معین نیز ثابت نیستند برای بیشتر محیط های صنعتی، توسط استانداردهای OSHA تعریف شده اند.

بنابر استاندارد OSHA 1978، حداکثر سطح مجاز صدا ۹۰ dBA برای ۸ ساعت متوالی، ۹۵ dBA برای ۴ ساعت متوالی و ۱۰۰ dBA برای دو ساعت متوالی می باشند.

تکنیک برشکاری تحت پوشش آب که در بخش های بعدی توضیح داده خواهد شد، شیوه ای است که بطور گسترده برای کاهش صدا در کاربردهای برشکاری مکانیزه از آن استفاده می شود. پوشش آب بطور مؤثر، عایقی صدا گیر در اطراف نازل تورچ ایجاد می کند. آبی که مستقیماً زیر صفحه قرار دارد مانع از تراوش صدا از دهانه شکاف می شود. کاهش صدا حدود ۲۰ دسی بل است و این کاهش صدا برای انجام عملیات مطابق استاندارد OSHA کافی است. این تکنیک را نباید با تزریق آب با شیوه تحت محافظت آب اشتباه گرفت. هیچ یک از این دو فرآیند دارای جریان آب کافی برای کاهش صدا نیستند. کاهش صدا در برشکاری پلاسمای زیر آب نسبت به هنگامی که پوشش از آب در اطراف نازل ایجاد می شود، بیشتر است چون قوس و تمام نوک تورچ کاملاً در آب غوطه ور هستند.

#### • تشعشعات

همانند تمام قوس های برشکاری، قوس پلاسمای نیز تشعشعات مرئی و غیر مرئی شدیدی (مانند اشعه فرابنفش و مادون قرمز) از خود ساطع می کند.

تشعشعات علاوه بر خطرات بالقوه برای چشم و پوست، باعث تولید ازن و اکسیدهای نیتروژن نیز می شوند. هنگامی که ناگزیر به قرار گرفتن در معرض تشعشعات هستید، حتماً از وسایل حفاظتی پوست و چشم استفاده کنید. با استفاده از مواعی چون دیوارها یا پرده های برشکاری، می توان تا حد زیادی احتمال قرار گرفتن در معرض تشعشعات را کاهش داد.

ایراتور باید از وسایل محافظ چشمی برای محافظت از چشم در مقابل تشعشعات استفاده کند. هنگامی که به میز آب مقداری رنگ اضافه شود، پوشش آب نیز بعنوان یک محافظ جذب کننده نور عمل می کند. اگر قصد استفاده از رنگ را دارید، برای اطلاع از نوع و غلظت رنگ با متخصصین تماس بگیرید. حتی هنگامی که از این رنگ ها استفاده می شود، به علت احتمال ایجاد وقفه در جریان آب، ایراتور باید از وسایل محافظتی چشم استفاده کند. بخاطر عمق آبی که قوس در آن در حال برش

است. برشکاری قوسی زیر آب نیز باعث کاهش تشعشعات می شود، لذا اضافه کردن رنگ به آب ضرورتی ندارد.

جدول ۱- لنزهای مناسب PAC

آمبراژ	حداقل تیرگی لنز	تیرگی مناسب
کمتر از ۳۰۰ آمپر	۸	۹
۳۰۰ تا ۴۰۰ آمپر	۹	۱۲
بیش از ۴۰۰ آمپر	۱۰	۱۴

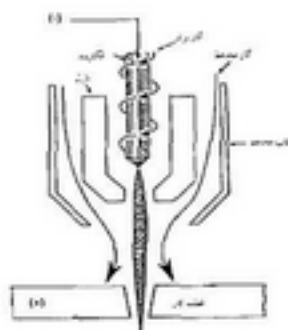
#### • حرارت

در PAC حرارت بسیار زیادی از جرقه های آهن و ترشحات داغ ایجاد می شود. در صورت عدم رعایت نکات ایمنی در اطراف محیط کار، موقعیت مناسبی برای آتش سوزی فراهم است. پرسنل باید از وسایل محافظ شخصی برای جلوگیری از سوختگی استفاده کنند. علاوه بر خطر آتش سوزی، خطر انفجار ناشی از گازهای برشکاری مانند ترکیبات هیدروژنی نیز وجود دارد. در استاندارد ۵۱B انجمن ملی پیشگیری از آتش سوزی، پیشگیری از آتش سوزی هنگام استفاده از فرآیندهای جوشکاری و برشکاری نکات ایمنی بیشتری ذکر گردیده اند.

### ۲-۱-۲- برشکاری قوس پلاسما تحت پوشش آب / گاز

#### ۲-۱-۲-۱- برشکاری قوس پلاسما تحت پوشش گاز

به غیر از پوششی از گاز کمکی که در اطراف نازل قرار می گیرد، سایر مشخصه های این شیوه مانند برشکاری قوس پلاسمای مرسوم است ( شکل ۴ ). معمولاً گاز برش نیتروژن است و گاز محافظ با توجه به نوع فلز برش، انتخاب می شود. گازهای کمکی مصرفی عبارتند از: دی اکسید کربن ( $CO_2$ )، هوا، آرگون، هیدروژن، آرگون و اکسیژن.



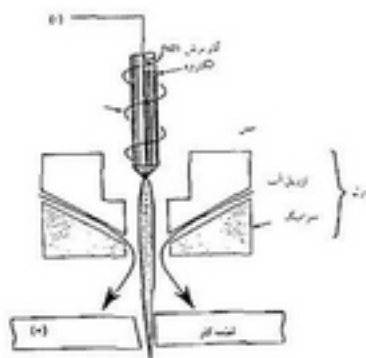
شکل ۴: برشکاری قوس پلازما تحت پوشش آب گاز [۶]

#### ۲-۲-۱-۲- برشکاری قوس پلازما تحت پوشش آب

تنها تفاوت این شیوه با روش قبلی، جایگزینی آب به جای گاز است، ضمن اینکه ظاهر برش و عمر نازل نیز بدلیل اثرات خنک کنندگی آب بهبود می یابد.

#### ۲-۱-۲- برشکاری قوس پلازما با تزریق آب

در این شیوه، آب معمولاً یا به حالت اسپری یا به حالت مماس، به اطراف قوس تزریق می شود (شکل ۵). برخورد آب به اطراف قوس، باعث بوجود آمدن قوسی متراکم تر از سایر فرآیندها می شود. صرفه نظر از نوع فلز برش، این عمل باعث بهبود ظاهر لبه های برش و افزایش سرعت برش می شود. به علت خنک کنندگی حاصل از تزریق آب می توان از قطعه های سرامیکی بین نازل و قطعه کار استفاده کرد. این کار باعث افزایش عمر نازل و ارتقاء قابلیت های سوراخ کنندگی تورچ می شود و از ایجاد انصالی بین نازل و قطعه کار ممانعت بعمل می آورد.



شکل ۵: برشکاری قوس پلازما با تزریق آب [۶]

## ۲-۱-۴- قابلیت های فرآیند برشکاری قوس پلازما

انتخاب تکنیک برشکاری قوس پلازما باید مطابق کاربرد مورد نظر انجام گیرد. ملاحظات اقتصادی، تجهیزات موجود، ضخامت و طرح قطعه کار، کیفیت برش و سرعت تولید را نیز باید مد نظر قرار داد.

به طور کلی، بیشتر کاربردها در سه دسته قرار می گیرند که عبارتند از: برشکاری های مکانیکی با سرعت بالا، برشکاری های مکانیکی سرعت پایین و برشکاری های دستی، تعداد بسیار کمی از کاربردهای این فرآیند نیز در دسته چهارمی به نام برشکاری با جریان قوی قرار می گیرند.

## ۲-۱-۴-۱- برشکاری مکانیزه سرعت بالا

### • فولاد نرم

قبل از دهه ۱۹۹۰، اغلب صفحات فولاد نرم، با فرآیند برشکاری با گاز سوختنی بریده می شدند. برای این کار نیز دو دلیل وجود داشت، اول این بود که اگر چه فرآیند های برشکاری قوس پلاسمای مرسوم، دارای سرعت بالاتری هستند اما در این میان کیفیت کار قربانی سرعت می شود؛ دلیل دوم و مهمتر این بود که خیلی از ماشین های قالب بر نمی توانستند بطور مطلوب خود را با سرعت های برشکاری قوس پلازما وفق دهند. خوشبختانه امروزه کیفیت برش های قوس پلازما بطور چشمگیری بهبود یافته است. ورود سیستم کنترل های الکترونیکی ماشین های برش به بازار باعث رواج

فرآیندهای برش پلاسما سرعت بالا شد. به همین دلیل با گسترده شدن کاربرد برشکاری قوس پلاسما، تولید انواع تورچ برش فولاد نیز بسیار افزایش یافت. سرعت بالای برش که در فرآیند برشکاری قوس پلاسما و کنترل عددی ماشین های برش، حاصل می شود کاربرد را در افزایش بهره‌وری توانا می‌سازد، هزینه برش صفحات کمتر از ۱ اینچ (۲۵/۴ میلیمتر) معمولاً ۰/۵ تا ۰/۲۵ هزینه برشکاری با گاز سوختنی<sup>۱</sup> می‌باشد.

### • فولاد زنگ زن و آلومینیوم

برای برش فولاد ضد زنگ و فلزات غیر آهنی، فرآیند برشکاری قوس پلاسما ترجیح داده می‌شود. البته برای برش قطعات نازکتر می‌توان از کاربردهای دیگری چون ماشین‌های ورق بری یا قیچی کردن فلز استفاده کرد که باعث افزایش سرعت تولید نیز می شوند. برای فلزات ضخیم تر (۱۵۲-۱/۶ میلی‌متر) که نیاز به انعطاف پذیری بیشتری دارند می‌توان از فرآیند برشکاری قوس پلاسما استفاده کرد.

### ۲-۱-۵- اثرات متالورژیکی

منطقه متأثر از حرارت (H.A.Z) در برش‌های قوس پلاسما، بسیار باریکتر از برش‌های با گاز سوختنی است. هنگامی که فلز باید بطور متناوب جوشکاری یا پرداخت کاری شود، این فاکتور مهم است.

معمولاً ضخامت منطقه تحت تأثیر گرما در فولاد ضد زنگ آستنیتی ۰/۱۰ اینچ (۰/۲۵ میلی‌متر) و در فولاد کربن ۰/۰۲۰ اینچ (۰/۵۰ میلی‌متر) است. ضخامت این منطقه در فولادهای کربنی نیز ۰/۰۳۰ - ۰/۰۱۵ اینچ (۰/۸ - ۰/۴ میلی‌متر) است. در برش آلومینیوم، این منطقه دارای ضخامتی بین ۰/۰۴۰ تا ۰/۱۰۰ اینچ (۲/۷ - ۱/۱ میلی‌متر) است. هنگام برش فولادهای ضد زنگ آستنیتی، سرعت بالای برش و اثر کوئینچ (سرد شدگی) فلز پایه، باعث می‌شود که سطح برش سریعاً از درجه حرارت ۱۵۰۰ - ۱۲۰۰ درجه فارنهایت (۶۵۰ درجه سانتی‌گراد) فراتر رود. از این رو، رسوبی از کاربید کرم در طول فرات مرزی و کاهشی در مقاومت در برابر خوردگی دیده نمی‌شود. نمونه برداری و بررسی خصوصیات مغناطیسی فولاد ضد زنگ از نوع ۳۰۴، دلالت بر این دارند که نفوذ ناپذیری مغناطیسی در برشکاری قوسی بی‌تأثیر می‌شود. آلیاژهای آلومینیومی حرارتی، مانند

<sup>۱</sup> Oxyfuel Gas

انواع ۲۰۱۴ و ۷۰۷۵ در مقابل ترک خوردگی حساس هستند و افزایش سرعت برش و ضخامت صفحه باعث افزایش احتمال ترک خوردن آنها می شود. آلیاژهای خاص آلومینیم، مانند آلیاژ ۵۴۵۶، در طول برشکاری ترک نمی خورند. در فولاد کربن، منطقه متأثر از گرمای برش قوس پلاسما، سخت خواهد شد. مقدار سخت شدن را می توان از قبل گرم کردن کار کاهش داد. از پیشگرم کردن باعث کاهش اثر کوئینچ روی توده فلزی که پشت سطح برش قرار گرفته می شود.

هنگام شکل گیری قطعات فولادی برش قوس پلاسما، توصیه می شود که لبه بالایی برش روی قسمت تحت فشار خمیدگی قرار گیرد. چنانچه لبه تیز تحتانی، روی قسمت تحت فشار خمیدگی قرار داشته باشد، احتمال ایجاد ترک وجود دارد. سنباده زدن به حالت شعاعی روی لبه زیرین برش می تواند باعث کم شدن مشکلات شود.

## ۲-۱-۶-عرض برش

عرض برش در برش پلاسما ۱/۵ تا ۴ برابر، بزرگتر از برش های اکسی فول می باشد. بنابراین، مانند سایر شیوه های برشکاری، برای ایجاد شکل مطلوب برش، باید از یک شیار اضافه نیز استفاده نمود. در خیلی از موارد، این شیار اضافه به میزان ۰/۵ عرض برش اصلی، بصورت اتوماتیک توسط ماشین های قالب گیری، ایجاد می شوند.

تعیین کمیت مقدار اضافه مورد نیاز مشکل است. هر تغییری در سیستم برش پلاسما، روی عرض شکاف تأثیر گذار است. تأثیرگذارترین فاکتور روی عرض شیار، ضخامت صفحه است. می توانید از اطلاعات جدول (۲) نیز استفاده کنید. البته احتمال دارد که نتایج عملی با آنچه در جدول قید شده است، تا حدی متفاوت باشد.

جدول ۲- ضخامت صفحه و عرض برش [۵]

عرض شیار		ضخامت صفحه	
میلی متر	اینچ	میلی متر	اینچ
+ ۲/۴	+ $\frac{3}{32}$	۳/۲ - ۲۵/۴	$\frac{1}{8}$ - ۱
+ ۴/۸	+ $\frac{3}{16}$	۲۵/۴ - ۵۱/۰	۱ - ۲
+ ۸/۰	+ $\frac{5}{16}$	۵۱/۰ - ۱۲۷/۰	۲ - ۵



## ۲-۱-۷- برشکاری دستی پلاسما

از تورچ های برش پلاسمای دستی، برای فلزات غیر آهنی و فولاد ضد زنگ استفاده می شود. در فولاد نرم از آنها در کارهای مشابهی که با تورچ های دستی اکسی فول انجام می شود نیز می توان استفاده کرد. تفاوت اصلی تجهیزات دستی و مکانیزه برشکاری پلاسما، این است که تورچ دستی به گونه ای طراحی شده است که باید با دست نگهداشته شود. همچنین منبع تغذیه ای این فرآیند نیز حداکثر دارای ۳۰۰ ولت، ولتاژ مدار باز است، در حالیکه این میزان در فرآیندهای مکانیزه ۴۰۰ ولت است. این محدودیت، برای کاهش خطرات الکتریکی اعمال شده است. جریان قوس معمولاً ۴۰۰ آمپر یا کمتر است، چون جریان قوس بالاتر باعث ایجاد تشعشعات حرارتی خطرناک برای اپراتور می شود. سیستم های برشکاری دستی پلاسما، دارای کیفیتی تقریباً مشابه برش های دستی اکسی فول هستند و معمولاً سرعت های آنها نیز کمی بیشتر است. در بیشتر موارد کیفیت برش تا حد بسیار زیادی به مهارت اپراتور و قابلیت تجهیزات بستگی دارد.

## ۲-۱-۸- خنک کردن با آب

قبلاً گفته شد که اغلب تورچ های برشکاری قوس پلاسما با آب خنک می شوند. بسیار مهم است که کاربردهای تجهیزات پلاسما، دقیقاً از توصیه های تولید کننده، در مورد سایر مناسب شیلنگ ها و فشار آب پیروی کنند. هر گونه نارسایی در سیستم خنک کنندگی یا منبع آب می تواند سبب آسیب دیدن تجهیزات شود. برای تورچ های مکانیزه سرعت بالا، به حدود ۲ گالن آب در دقیقه با فشاری در حدود (۱/۲ - ۰/۵ Mpa) ۸۰-۱۷۵ psi نیاز است. اگر سازنده، فشار مورد نظر را ۱۷۵ psi تعیین کرده است، استفاده از سیستم در فشاری پایین تر از این سطح به هیچ وجه صلاح نیست. دمای آب ورودی نیز فاکتور مهمی است، برای اطلاع بیشتر از جزئیات، از دستور العمل های شرکت سازنده استفاده کنید.

رایج ترین دلیل ناکارآمدی سیستم های خنک کننده آبی، استفاده از شیلنگ هایی با قطر بسیار کم است. این مشکلات اغلب وقتی روی می دهد که دو یا چند تورچ وظیفه تأمین آب و چرخش آب یا خطوط آب کدر را برعهده دارند. در این مورد، لازم است که از شیلنگی با قطر بیشتر برای لوله های آب کدر استفاده شود.

در صورت استفاده از لوله آبی که طول بسیار زیادی دارد، حتی هنگامی که از یک تورچ استفاده می شود نیز لازم است که از شیلنگی با قطر بیشتر استفاده شود.

ایمن ترین راه، اندازه گیری جریان برای هر دستگاه تازه نصب شده می باشد. برخی سازندگان تجهیزات، ترجیح می دهد از آب شیر برای خنک کردن استفاده کنند و آب مصرف شده را از طریق مجاری خروجی خارج می کنند. برخی دیگر ترجیح می دهند که از سیستم چرخشی آب استفاده کنند. در این حالت آب توسط فن با رادیاتور مانند سیستم خنک کننده اتومبیل، خنک می شود. از چیلرهای آبی مورد مصرف در سیستم های تبرید (خنک کننده) نیز استفاده می شود.

## ۹-۱-۲- سرعت برشکاری بهینه

برای انتخاب بهترین سرعت برشکاری، معمولاً از دو روش استفاده می شود.

- روش اول انجام برش های آزمایشی در سرعت های مختلف و انتخاب مناسبترین سرعت (با توجه به کیفیت برش) می باشد.

جهت قرار گرفتن رگه های برش روی سطح کار، نشانه خوبی برای قضاوت در مورد سرعت برش می باشد. برشکاری با سرعت پایین باعث ایجاد رگه های عمودی روی سطح کار و برشکاری با سرعت بالا باعث ایجاد رگه های اریب به شکل S روی سطح کار می شود.

اپراتور می تواند با بررسی جهت قرار گرفتن این رگه ها، لزوم افزایش یا کاهش سرعت برشکاری را تشخیص دهد. اپراتورهای زیادی به محض مشاهده اولین علائم وجود تفرافه در کار، سرعت برش را کاهش می دهند، در صورتی که اغلب افزایش سرعت برشکاری ضرورت داشته است.

- روش دوم مشاهده قوس از پشت لنز ایمنی جوشکاری در طول برش و تغییر پیوسته سرعت برشکاری جهت دستیابی به مناسبترین سرعت می باشد. برای این کار به زاویه قوس، هنگام خروج از لبه تحتانی قطعه کار دقت کنید. اگر از هوا بعنوان گاز پلاسما استفاده می کنید، قوس باید در حالت عمودی از قسمت تحتانی لبه کار خارج شود. اگر گاز پلاسما، نیتروژن یا آرگون - هیدروژن است. قوس، کمی به سمت عقب منحرف می شود. بهترین سرعت برشکاری، زمانی است که قوس با کمی انحراف به سمت جلو از قطعه کار خارج شود.

## ۱۰-۱-۲- نازل های برشکاری

دهانه در نازل به گونه ای طراحی شده است که قوس در آن بدون تماس با نازل و تا رسیدن به قطری مشخص، فشرده می شود. گاز پلاسما لایه ای نازک از گاز سرد بین قوس و نازل ایجاد می کند.

اگر سطح جریان خیلی بالا باشد و یا سرعت گاز، پایین باشد، احتمال تماس قوس با نازل و ایجاد پدیده قوس دوبله که به نازل آسیب می‌رساند وجود دارد. بنابراین و به دلیل تمرکز ناکافی قوس، فشرده سازی به خوبی انجام نگرفته و کیفیت برش افت زیادی پیدا می‌کند.

اگر سطح داخلی یا خارجی نازل آسیب دیده است و یا اگر دهانه فرسوده و از حالت دایره‌ای شکل خارج شده باشد، باید سریعاً نازل را تعویض نمود. با آسیب دیدن نازل، کیفیت برش رو به زوال می‌گذارد. آسیب دیدن سطح داخلی نازل به معنای جریان بسیار بالا و با سرعت ناکافی کار می‌باشد. برشکاری و سوراخکاری با سرعت بسیار بالا نیز باعث آسیب دیدن سطح خارجی نازل می‌شود.

## ۲-۱-۱۱- الکترودها

هر بار برقرار شدن قوس الکتروود، موجی سریع و بزرگ از جریان الکتریکی دریافت می‌کند که در یک فاصله زمانی بسیار کوتاه، الکتروود سرد را تا حد زیادی داغ می‌کند. گاز پلاسمای یونیزه اطراف الکتروود هم سرشار از ذرات باردار می‌باشد. این ذرات باردار، اتم‌ها را از سطح داغ الکتروود کنار می‌زنند و باعث ایجاد حفره روی سطح الکتروود می‌شوند. تعداد شروع<sup>۱</sup> و توقف<sup>۲</sup> قوس، بیش از زمان حقیقی برشکاری روی طول عمر الکتروود تأثیر گذار است.

باید همواره مراقب تجهیزات مصرفی خود باشید تا بتوانید زمان تعویض آنها را به موقع تشخیص دهید. در مورد الکتروود، با بررسی حفره‌های روی الکتروود می‌توان این کار را انجام داد. این حفره‌ها نباید از ۲/۵ میلی‌متر در هوا و اکسیژن و ۳/۲ میلی‌متر در نیتروژن یا آرگون-هیدروژن تجاوز کنند. برای جلوگیری از آسیب تورچ، الکتروود را بموقع تعویض کنید.

## ۲-۱-۱۲- کنترل ارتفاع تورچ در برش پلاسما

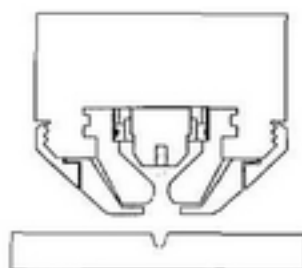
کنترل اتوماتیک ارتفاع تورچ (THC)، یکی از مهمترین ارکان برشکاری مکانیزه پلاسما می‌باشد که اغلب در برشکاری از آن بنحو احسن استفاده نمی‌شود. در بسیاری کارگاهها، مشاهده می‌شود که اکثر اپراتورها بصورت دستی تورچ را هدایت می‌کنند؛ در حالیکه چشم به تورچ دارند و انگشت خود را روی سوئیچ تورچ قرار داده‌اند. در این کارگاهها اکثراً یا THC سالم نیست تا از آن استفاده شود و یا

۱- Start

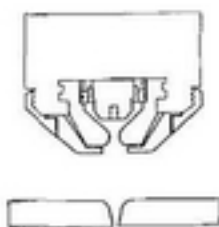
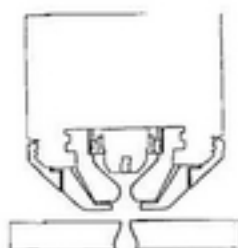
۲- Stop

کاربران باندازه کافی برای استفاده از آن آموزش ندیده‌اند. در هر صورت این کارگاه‌ها از تجهیزات خوب، نمی‌توانند بهره کافی ببرند و راندمان کار پایین می‌آید.

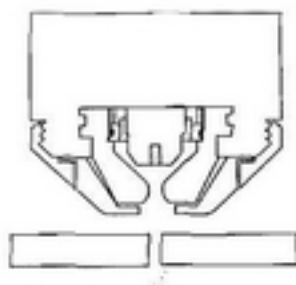
اگر چه هر یک از این کنترل‌های اتوماتیک، دارای عملکرد و خصوصیات متفاوتی هستند، اما از تمام آنها برای کنترل موقعیت تورچ نسبت به قطعه کار استفاده می‌شود. فاصله تورچ تا کار یا عبارت دیگر فاصله استنداف، روی کیفیت برش و عمر قطعات تأثیر مستقیم دارد (شکل‌های ۶، ۷ و ۸).



شکل ۶: ارتفاع اولیه بسیار پایین [۶]



شکل ۷: ارتفاع برش بسیار پایین و بسیار بالا [۶]



شکل ۸: ارتفاع مناسب [۶]

## ۲-۱-۱۳- اجزای مختلف THC

### • موقعیت دهنده ( تثبیت کننده موقعیت تورچ ) با موتور محرکه

این وسیله در پاسخ به سیگنال هایی که از کنترل دریافت می دارد، تورچ را به بالا و پایین حرکت می دهد. برای حرکت تورچ از پیچ محرک، میله و چرخ دنده و تسمه استفاده می شود.

### • کنسول کنترل

کنسول کنترل، مغز متفکر سیستم می باشد. این کنسول، فرمان های ورودی را از ریموت کنترل دریافت کرده و فرمان های خروجی را به پوریشنر تورچ می فرستد. ضمن اینکه سیگنال های ولتاژ و موقعیت فیدبک را نیز نمایش می دهد.

### • سطح مشترک سیستم پلاسما

این قسمت معمولاً شامل یک کارت تقسیم کننده جریان می باشد که درون منبع تغذیه پلاسما نصب شده است. این کارت تقسیم کننده جریان ولتاژ منبع تغذیه هنگام برشکاری را نمایش می دهد، کارت تقسیم ولتاژ، سیگنال ولتاژ را تقسیم نموده و آن را به یک ولتاژ سیگنال کوچکتر در کنسول کنترل می فرستد.

• ديموت گنتول

ریموت کنترل عبارتست از تشریک مساعی انسان و ماشین ، چرا که اپراتور ۲ پارامتر مهم فرایند را شخصاً تنظیم می نماید: ارتفاع اولیه و ولتاژ قوس : این وسیله می تواند داخل کنترل CNC و یا در یک قاب محذا قرار گیرد.

IHS پارامتری قابل تنظیم است که ارتفاع تورچ را در زمان آغاز برشکاری تعیین می کند برای تنظیم ارتفاع اولیه، THC باید در ابتدا موقعیت صفحه برش را تشخیص دهد، برای اینکار از دامنه گسترده ای از ادوات مختلف استفاده می شود : از وسایل مکانیکی ساده گرفته، تا تکنولوژی موتور استال، انواع سنسورها و مدارات الکتریکی که اتصال نازل را تشخیص می دهند، علی رغم تمام این ملاحظات، کماکان مهمترین مسئله این است که تورچ صفحه برش را پیدا کند و با دقت زیاد، ارتفاع برش را صرفه نظر از اینکه صفحه برش نازک است یا ضخیم، تمیز است یا آلوده و روی آب است یا زیر آب تنظیم نماید.

دقیق بودن ارتفاع سوراخکاری بسیار مهم و ضروری است. اگر سرعت تورچ خیلی کم باشد، قطعات مصرفی آسیب جدی می بینند (اولین دلیل برای خرابی تورچ و از کار افتادگی زود رس قطعات). اگر سرعت تورچ خیلی زیاد باشد نیز قوس منتقل نشده و خاموش می گردد. از نظر تجربی، بهترین حالت سوراخکاری با ارتفاع ۲-۱/۵ برابر برش می باشد؛ سوراخکاری با ارتفاع بالا، برشکاری با عمق کم.

۲-۱-۱۴- فاصله نور چ تا قطعہ کار ( فاصله استنداف)

فاصله تورچ تا قطعه کار در طول برشکاری با نمایش و کنترل ولتاژ قوس تنظیم می شود. ( ولتاژ قوس همان ولتاژ خروجی منبع تغذیه می باشد). منابع تغذیه پلاسما در طول برشکاری جریان بسیار یکنواختی تولید می کنند، اما از سوی دیگر ولتاژ تولیدی با توجه به فاصله کاند ( الکترو د داخل تورچ) و آند ( قطعه کار) متغیر است. با توجه به قانون اهم، ولتاژ با مقاومت ارتباط مستقیم دارد:  $V = I \times R$  مقاومت در قوس نیز با فاصله مرتبط است هر چه فاصله تورچ تا قطعه کار کم شود، ولتاژ کاهش می یابد. در طول برشکاری ، کنترل ارتفاع تورچ (THC) برای تثبیت فاصله بین تورچ و قطعه کار ، از ولتاژ قوس بهره می برد. این امر به سیستم کمک می کند تا ارتفاع مناسب تورچ، صرف نظر از تغییرات قطعه کار مانند پستی و بلندی های صفحه برش، در طول کار تغییر نکند. ایاتور ،



ولتاژ قوس را توسط ریموت کنترل و با توجه به توضیحات راهنمای دستگاه تنظیم می نماید. ولتاژ قوس معمولاً بین ۲۰۰-۱۰۰ VDC متغیر است.

پس از آنکه کنترل ارتفاع تورچ (THC)، ارتفاع تورچ را تنظیم نمود و تورچ صفحه کار را سوراخ کرد. دستگاه برش فعال شده و حرکت تورچ آغاز می گردد. با آغاز برشکاری THC شروع به نمونه برداری از ولتاژ قوس در منبع تغذیه نموده و آنرا با ولتاژ هدف که اپراتور تنظیم نموده، مقایسه می کند. این کار، حرکات رو به بالا و پایین تورچ را تنظیم می کند تا ولتاژ مناسب برقرار شود.

هر تنظیم ولتاژی با یک ارتفاع مشخص مرتبط است و بدینوسیله خصوصیات قوس برای انجام برشی مستقیم و با کیفیت تنظیم می شود. ارتفاع تورچ عمده ترین تاثیر را روی زاویه اریب برش پلازما دارد. بالا بودن بیش از حد ولتاژ، باعث می شود مواد بیشتری از روی سطح فوقانی شیار نسبت به سطح زیرین آن زدوده شود. این امر سبب بیش از حد مدور شدن سطح فوقانی و اریب مثبت می شود. بیش از حد پایین بودن ولتاژ نیز سبب میشود مواد بیشتری از سطح زیرین صفحه زدوده شود. این امر باعث سوختگی کناره یا اریب منفی می شود.

THC های امروزی، خصوصیات و قابلیت های متعددی دارند اما مهمترین نکته، تنظیم ارتفاع اولیه تورچ و کنترل ولتاژ قوس می باشد. سوراخکاری در ارتفاع صحیح، باعث صرفه جویی در هزینه ها می گردد. برشکاری در ارتفاع صحیح نیز باعث ایجاد برشی با کیفیت و به حداقل رسانیدن لزوم اجرای عملیات ثانویه هزینه بر می شود. در صورت استفاده مناسب از THC، هزینه های آن در کوتاه ترین مدت جبران می شود.

جهت حصول کیفیت خوب در برشکاری کنترل دقیق فاصله استنداف بسیار ضروری است. اگر این فاصله خیلی زیاد باشد، زاویه برش، اریب خواهد شد و اگر این فاصله خیلی کم باشد، زاویه برش گود رفته می شود.

برشکاری قوس پلازما را بدون کنترل اتوماتیک ارتفاع نیز می توان انجام داد. در بیشتر کارگاه ها، به علت عدم توازن در میز کار و حالت ناب دار بیشتر صفحات قطعه کار همیشه در حالت تخت قرار ندارند. به علت اینکه کوچکترین تغییری در ارتفاع تورچ باعث ایجاد تغییرات بزرگی در وضعیت داغ ترین نقطه قوس نسبت به صفحه می شود، با کنترل ارتفاع تورچ، می توان کیفیت برش را تا حد قابل توجهی افزایش داد.

موجه ترین وسیله برای کنترل اتوماتیک فاصله استنداف، برقراری ولتاژ قوس از پیش تعیین شده است. انواع وسایل کنترلی ولتاژ قوس از سازنده های مختلف در بازار موجود می باشد.

## ۲-۱-۱۵- انتخاب گاز در برش پلاسما

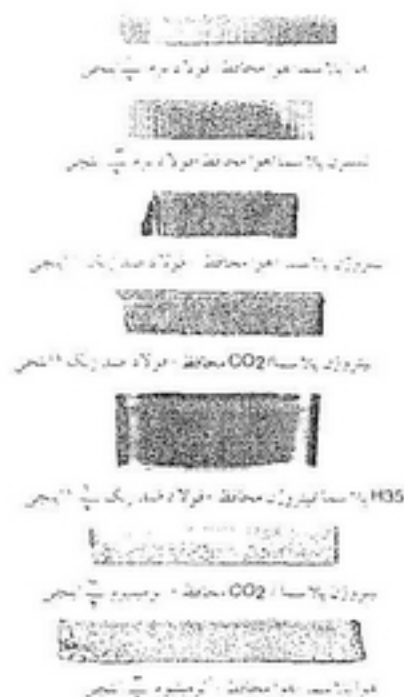
### • انتخاب بهترین گاز برای تورچهای چندگازی

تعداد زیادی از کاربران، سیستمهای پلاسمای دوگازی را انتخاب می کنند، این بدان معناست که از انواع گازهای محافظ و پلاسما در کاربردهای مختلف می توان استفاده کرد. تورچ های چندگازی با قابلیت انعطاف زیاد، جهت استفاده در کارگاه هایی که برشکاری انواع مختلف فلز انجام می شود مناسب می باشند. برای ایجاد تعادل بین بهترین کیفیت برش، عمر قطعات، بازده کافی و هزینه کل، بسته به نوع و ضخامت مواد برش، از چندین گاز مختلف می توان استفاده کرد. دفترچه های راهنمای سیستمهای پلاسما، با انواع توصیه ها و نمودارهایی که در بر دارند، اغلب باعث سر در گمی اپراتور می شوند. انتخاب گاز مناسب بستگی به ملاحظات زیر، چون: کیفیت برش، بهره وری، توجیهات اقتصادی و دارد.

- برای برشکاری فولاد نرم، استفاده از اکسیژن بعنوان گاز پلاسما و هوا بعنوان گاز محافظ، باعث ایجاد برش با بهترین کیفیت، کمترین سطح پاشش و مواد زائد، حداقل عملیات ثانویه (پرداخت کاری و...) حداکثر قابلیت جوش و بالاترین سرعت برشکاری می شود.

- برای ایجاد بهترین کیفیت هنگام برش قطعات فولاد ضد زنگ و آلومینیوم با ضخامت کمتر از ۰/۵ اینچ از نیتروژن بعنوان گاز پلاسما و هوا بعنوان گاز محافظ استفاده کنید. استفاده از  $CO_2$  بعنوان گاز محافظ، کیفیت و سرعت برش را کمی بهبود می بخشد. اگر توان و شرایط سیستم اجازه می دهد، از آب استفاده کنید، زیرا لبه های برش دارای بالاترین کیفیت خواهند بود.

- برای حصول بهترین کیفیت روی قطعات ضخیم آلومینیوم و فولاد ضد زنگ از «آرگون-هیدروژن» بعنوان گاز پلاسما و نیتروژن به عنوان گاز محافظ استفاده کنید.



شکل ۹: گازهای پلاسما [۶]

## ۲-۱-۱۶- گازهای پلاسما

امروزه رایج ترین گازهای مصرفی پلاسما عبارتند از: هوا، اکسیژن، نیتروژن و ترکیب «آرگون-نیتروژن».

### • هوا

تطبیق پذیرترین گاز پلاسما می باشد که برشی با کیفیت و سرعت بالا روی فولاد نرم، فولاد ضد زنگ و آلومینیوم ایجاد می کند. از آنجا که نیازی به خرید گاز نیست، لذا هزینه اجرای فرآیند نیز کاهش می یابد. با همه این موارد، باز هم استفاده از هوا بعنوان گاز پلاسما، رایگان تمام نمی شود. مثلاً هوای کارگاه باید از نظر وجود ذرات معلق، گرد و غبار، رطوبت و چربی تصفیه شود. بهترین روش انجام این کار استفاده از یک کمپرسور هوای مناسب با اندازه مطلوب، یک خشک کن و یک مخزن فیلتر جهت زدودن ذرات معلق، چربی و رطوبت می باشد. مورد قابل توجه دیگر در برشکاری

پلازما با هوا، قابلیت جوش خوردن لبه های برش می باشد. به دلیل پلاسمای هوا، مقداری نیتروژن و اکسیژن روی سطح برش رخ می دهد. این موارد می تواند باعث بروز تخلخل در جوش شوند. معمولاً این مسئله را می توان به راحتی و با استفاده از سیم جوش های با کیفیت به همراه دی اکسید و دی نیتريد کننده ها بر طرف نمود. هوا، به دلیل سرعت خوب، سطح پاشش پایین و عمر بالای قطعات ( تا ۶۰۰ بار استارت)، گزینه بسیار مناسبی جهت کاربردهای کارگاهی می باشد. هنگام اجرای فرآیند با پلاسمای هوا، استفاده از هوا بعنوان گاز محافظ، بهترین حالت می باشد.

#### • اکسیژن

از آنجا که اکسیژن در میان سایر گازهای پلازما باعث ایجاد بالاترین سرعت جوش و حصول بهترین کیفیت می باشد، این گاز به گاز استاندارد صنعتی برای برش پلازما فولاد کربنی تبدیل شده است. هنگام برشکاری فولاد، اکسیژن با فولاد کربنی واکنش داده و چون قطرات فلز مذاب کشتش سطحی پایین تری دارند باعث پخش بهتر فلز مذاب می شود (برشکاری فولاد ضد زنگ یا آلومینیم یا اکسیژن توصیه نمی شود).

این اسپری مذاب به راحتی از شیار برش خارج می شود. معایب استفاده از اکسیژن بعنوان گاز پلازما، هزینه بالای گاز و عمر کم قطعات مصرفی می باشد. البته دستگاه های ویژه ای نیز طراحی و تولید شده اند که در استارت برش از گازهای خنثی ( مثل نیتروژن) به همراه پلاسمای اکسیژن استفاده می نمایند و بدین وسیله عمر قطعات تا میزان سیستمهای هوا یا نیتروژن افزایش می یابد. در این سیستمها عمر قطعات می تواند تا ۱۵۰۰-۸۰۰ استارت نیز بالا رود، معمولاً با کاهش ضرورت انجام عملیات ثانویه برای زدودن مواد خارجی و ضایعات و جرقه ها و همچنین پرداخت نمودن قطعات اریب، هزینه بالای گاز و مواد مصرفی در اینگونه سیستمها جبران می شود. لازم بذکر است پلاسمای اکسیژن اغلب با پوشش محافظ هوا استفاده می شود.

#### • نیتروژن

این گاز در تورچ های اولیه پلازما مورد مصرف قرار می گرفت و هنوز هم بهترین گزینه برای برشکاری آلومینیم و فولاد ضد زنگ در حجمی انبوه می باشد. کیفیت برش و طول عمر قطعات نیز عالی میباشد. ( بیش از ۱۰۰۰ استارت). هنگام کار روی قطعات ضخیم (معمولاً بیش از ۵/۸ اینچ)، در بالاترین ظرفیت سیستم پلازما، سیستم را به «آرگون- هیدروژن» تغییر دهید. لازم بذکر است که هوا بهترین گاز ثانویه هنگام استفاده از پلاسمای نیتروژن می باشد.  $CO_2$  در مقایسه با هوا، خصوصیات

نسبتاً بهتری در زمینه سطح نهایی کار، سرعت برشکاری و عمر قطعات داراست، اما قیمت  $CO_2$  از هوا بیشتر است و استفاده از آن، نیازمند نصب تجهیزات سیلندرهای مایع‌دو و یا سیستمهای حجمی جهت تامین جریان مورد نیاز می باشد. در صورت جواب گویی سیستم، از آب نیز می توان به همراه پلاسمای نیتروژن استفاده کرد. سطح برش در آلومینیوم و فولاد ضد زنگ کاملاً براق و صیقلی خواهد بود. هنگام استفاده از آب، ضروری است از میز آب استفاده شود.

جدول ۳ - راهنمای انتخاب گاز پلاسما [۶]

گاز پلاسما / گاز محافظ	فولاد نرم	فولاد خدزنگ	آلومینیوم
هوا	کیفیت و سرعت خوب برش اقتصادی	کیفیت و سرعت خوب برش اقتصادی	کیفیت و سرعت خوب برش اقتصادی
اکسیژن ( $O_2$ ) / هوا	کیفیت و سرعت عالی، مقدار کمی پاشش و ضایعات	توصیه نمی شود	توصیه نمی شود
نیتروژن $CO_2 / N_2$	کیفیت برش متوسط، مقدار کمی ضایعات پاشش، عمر قطعات عالی	کیفیت برش خوب، عمر قطعات عالی	کیفیت برش خوب، عمر قطعات عالی
نیتروژن / هوا	کیفیت برش متوسط، مقدار کمی ضایعات پاشش، عمر قطعات عالی	کیفیت برش خوب، عمر قطعات عالی	
نیتروژن ( $N_2$ ) آب ( $H_2O$ )	کیفیت برش عالی، عمر قطعات عالی	کیفیت برش خوب، عمر قطعات عالی	کیفیت برش خوب، عمر قطعات عالی
از گون - هیدروژن $N_2$	کیفیت برش عالی، عمر قطعات عالی	عالی روی قطعات با ضخامت بیش از ۱۰۲ اینچ	عالی روی قطعات با ضخامت از ۱۰۲ اینچ

### • آرگون - هیدروژن

۳۵٪ هیدروژن و ۰/۶۵ آرگون (H۲۵): گاز انتخابی و بسیار مناسب جهت برشکاری قطعات ضخیم فولاد ضد زنگ و آلومینیوم با ضخامت های بیشتر از ۰/۵ اینچ می باشد. ترکیب «آرگون - هیدروژن»، ضمن ایجاد داغ ترین گاز پلاسما، باعث به حداکثر رسیدن بهره وری و قابلیت فرایند می شود. (از آرگون - هیدروژن در تورچ های آب تزریق تا حداکثر ۱۰۰۰ آمپر و برای برش فولاد ضد زنگ تا حداکثر ۶ اینچ استفاده می شود). در تورچ های چند گازی، استفاده از ترکیب «آرگون - هیدروژن» روی قطعات فولاد ضد زنگ باعث ایجاد برشی مستقیم و سطحی صیقلی می شود. البته احتمال قرار گرفتن تفاله برش بصورت دندانه دندانه روی لبه زیرین برش نیز وجود دارد. معمولاً از نیتروژن بعنوان گاز محافظ ترکیب «آرگون - هیدروژن» استفاده می شود. قیمت بالا، از معایب این ترکیب می باشد.

### ۲-۱-۱۷- نکات ایمنی در برشکاری قوس پلاسما

دستگاه برشکاری قوس پلاسما، همانند چاقوی داغی که از میان کره عبور می کند، هر گونه ماده رسانای الکتریکی را سریعتر از سایر روش های متداول برشکاری مانند اره کشی، قیچی کردن یا تورچ های اکسی - استیلن، برش می دهد. اگر چه بیش از ۵۰ سال از معرفی تکنولوژی برش پلاسما به دنیای صنعت می گذرد، اما این فرآیند در اواسط دهه ۹۰، بدلیل کوچکی، قابلیت حمل و نقل آسان و قیمت مناسب دستگاه با استقبال شگفت انگیز کاربران روبرو شد. امروزه بسیاری از صنعتگران، کشاورزان، دامداران، تابلو سازها، تعمیرکاران، مونتاژ کارها، سازندگان قطعات فلزی و ... بطور گسترده ای از این تکنولوژی بهره می برند. اما هنوز بسیاری از کاربران، به خاطر ناآشنایی این فرآیند از نکات ایمنی آن اطلاع دقیقی ندارند. خوشبختانه نکات ایمنی فرآیند بسیار آسان هستند و به راحتی می توان آن ها را به کاربرد.

### • خطر آتش سوزی

- قوس پلاسما، مخصوصاً هنگام ایجاد اولین سوراخ روی فلز، باعث می شود مقادیر زیادی ذرات داغ فلزی و جرقه به اطراف پرتاب شود. این قوس همچنین باعث داغ شدن قطعه کار و تورچ برشکاری نیز می شود که همه اینها می توانند عامل ایجاد حریق و آتش سوزی شوند. برای محافظت از چشمان خود هنگام انجام برشکاری از عینک های ایمنی که کاملاً اطراف چشم را می پوشانند استفاده



کنید. برای افزایش ایمنی به همراه عینک محافظ، از یک کلاه ایمنی و یا پوشش محافظ صورت نیز استفاده کنید.

- برای محافظت از بدن خود در مقابل ذرات داغ فلزی و جرقه همیشه لباس ها و دستکش های خشک، سالم، و ضد آتش بپوشید. بهتر است از لباسهایی با جنس چرم، پشم یا کتان استفاده کنید. دکمه یقه، پیراهن، دستکش و جیب های خود را ببندید تا مانع از جذب جرقه شوند. از نگهداری فندک یا کبریت در جیب های خود خودداری کنید. کفش های ساق بلند یا چکمه های چرمی نیز به بهترین وجه از پاهای شما محافظت می کنند.

- قوس پلاسما به شدت داغ و نیرومند است و به سرعت به دستکش و دست آسیب می رساند. برای جلوگیری از بروز جراحت و صدمه، دست خود را در مسیر برش قرار ندهید. قوس پیلوت نیز می تواند سبب سوختگی شود. لذا هنگامی که کلید استاندارد تورچ را فشار می دهید، مراقب باشید هیچیک از اعضای بدنتان نزدیک به سر تورچ قرار نرفته باشند. هنگام استارت قوس، تورچ را در جهت قطعه کار قرار دهید.

- از آنجا که حرارت و جرقه ها می توانند باعث احتراق مواد قابل اشتغال شوند، لذا هر گونه ماده قابل اشتغال تا حداقل تا فاصله ۳۵ فوتی، از محل برشکاری دور کنید و یا روی آنها را با روکش های ضد آتش بپوشانید. درزها و شکاف های موجود روی روکش های آنها را به دقت خاصی بررسی کنید چرا که جرقه ها به راحتی از میان این درزها و شکاف ها عبور کرده، باعث آتش سوزی می شوند. هرگز ظروف در بسته یا تحت فشار مانند تانکرها را برش ندهید.

- فقط در صورت تشخیص و تأیید کارشناسان مربوطه می توانید ظروف حاوی مواد قابل احتراق، سمی یا واکنشی را برش دهید. در صورت عدم تشخیص یا حضور کارشناسان از انجام هر گونه برشکاری در این زمینه جداً خودداری کنید. هنگام برشکاری روی سقف، زمین، دیوار، تیغه و ... به خاطر داشته باشید که موارد قابل اشتغال پنهان در درز این مکان ها، سریعاً باعث آتش سوزی می شوند، لذا کاملاً نکات ایمنی مربوطه را رعایت کنید. به طور کلی هرگز در مجاورت گازها، بخارات، مایعات و ذرات قابل اشتغال و مکان هایی که احتمال انفجار در آن ها وجود دارد، برشکاری نکنید.

#### • اتصالات مناسب

- معمولاً تورچ های PAC، دارای سیستم های همبند ایمنی هستند و در صورتی که اپراتور کاپ محافظ را شل کند یا اگر نوک تورچ، یا الکترود داخل نازل اتصال برقرار کند، دستگاه برشکاری بطور اتوماتیک خاموش می شود. نکته قابل توجه اینکه در مقایسه با جوشکاری قوس پلاسما، در برشکاری قوس پلاسما ولتاژ بیشتری (در حدود ۴۰۰-۱۱۰۰ VDC) مورد نیاز است تا قوس استارت

کرده و برقرار شود، اتصالات ضعیف و نقاط لخت (بدون عایق) روی کابل ها خطر شوک الکتریکی را افزایش می‌دهند. این موارد را به صورت روزانه بازدید و در صورت مشاهده هر گونه اشکال قطعات را تعویض نمایید. از تعمیر کابل های فرسوده یا اتصالات معیوب جداً خودداری کنید.

- از آنجا که آب، رسانای جریان الکتریسته می‌باشد، لذا از کار کردن در محیط های مرطوب بشدت اجتناب کنید. حتی عرق بدن نیز می‌تواند باعث کاهش مقاومت بدن در مقابل الکتریسته شود. با ایستادن روی یک زیر پایی لاستیکی یا تخته چند لایه خشک بین بدن خود با زمین و قطعه کار، عایق برقرار کنید. این عایق باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا بطور کامل تمام بدن شما را از زمین یا قطعه کار جدا نگهدارد. مراقب باشید که حتی لاستیک و چوب هم می‌توانند آتش بگیرند. اگر ماده‌ای خشک و ضد آتش در اختیار دارید از آن استفاده کنید.

هنگامی که تجهیزات برشکاری قوس پلاسما به درستی و مطابق دستور العمل NFPA ۷۰ و استانداردهای OSHA نصب شده باشند، یک ولتاژ ایمنی بین الکترود و قطعه کار برقرار می‌شود که انجام برشکاری را ممکن می‌سازد.

- اپراتورها باید متناوباً اتصال با زمین را بررسی کنند. قطعه کار باید بطور مناسبی با زمین اتصال داشته باشد. قاب تمام دستگاههای الکتریکی را به سونچ قطع جریان، دو شاخه یا سایر وسایل مناسب متصل کنید. همیشه تجهیزات را دوباره بررسی کرده و از اتصال به زمین مناسب مطمئن شوید. هرگز از زنجیر، طناب سیمی، جرثقیل، بالابر و آسانسور به عنوان اتصال به زمین استفاده نکنید.

#### • کم کردن تشعشعات

- تشعشعات قوسی باعث ایجاد نورهای مرئی و نا مرئی (اشعه فرا بنفش و مادون قرمز) می‌شوند. این نورها می‌توانند باعث سوختگی چشم و پوست شوند. پوشیدن لباس های مناسب از پوست محافظت می‌کند، اما محافظت از چشم مستلزم استفاده از وسایل محافظتی دیگری نظیر کلاه ایمنی، عینک ایمنی با لنز مناسب و محافظ صورت می‌باشد. برای تعیین لنز مناسب، باید از امپراز دستگاه برشکاری خود، مطمئن باشید. برای محافظت از دیگران در مقابل نورهای شدید و تشعشعات خیره کننده، حصار و پرده‌های مخصوص این کار را در محل برشکاری نصب کنید. قبل از ایجاد قوس پلاسما، به کسانی که اطراف شما قرار دارند، اخطار بدهید.

#### • تهویه هوا

- برش دادن هر نوع فلزی باعث ایجاد و انتشار بخارات و گازهای خطرناکی می شود که تنفس آنها همراه با خطراتی برای سلامتی می باشد. همیشه سر خود را خارج از مسیر این بخارات قرار دهید و هرگز آنها را تنفس نکنید.
- برای بهتر دیدن قوس پلاسما، سر خود را در طرفین قوس قرار دهید، از قرار دادن سر خود در راستای تورچ خودداری کنید.
- در مکان های محبوس تنها در صورتی برشکاری نمایید که با از وسایل کمکی تنفسی استفاده می کنید و یا تهویه مطبوع در آن مکان مطابق استاندارد ANSI، صورت می گیرد.
- هنگام برشکاری فلزات روکش دار مانند فولاد گالوانیزه یا فولاد با روکش سرب یا کادمیم، در صورت امکان روکش فلزات فوق را از محدوده برشکاری دور نمایند. اینگونه روکش ها و یا هر گونه فلزی که دارای این اجرا باشد، باعث انتشار بخارات سمی در برشکاری قوس پلاسما می شوند (همیشه برگه اطلاعات فنی مواد MSDS را مطالعه کنید). هنگام برش فلزات روکش دار، تهویه هوای محدوده برشکاری باید بخوبی صورت پذیرد، برای حفظ سطح استاندارد منطقه تنفسی از هود تهویه یا سیستمهای ساکشن ( مکش) در محل استفاده کنید. در صورت نیاز از دستگاه های تنفس مصنوعی استفاده کنید.

#### • سیستمهای گازی

- برای اجرای فرآیند PAC اغلب در هوای کارگاه و گاهی از گازهای فشرده ( معمولاً نیتروژن) استفاده می شود. هنگام استفاده از سیلندرها، آنها را کاملاً به یک پایه ساکن و عمودی ببندید تا از افتادن سیلندر در طول کار جلوگیری شود. هنگام حرکت یا نگهداری از یک سیلندر، بست محافظ کلاهک را به قسمت بالای سیلندر ببندید. این عمل والو را در مقابل ضربات احتمالی حفظ می کند.
- در صورت بروز نقص، سریعاً رگلاتور معیوب را جهت انجام تعمیرات از سیستم خارج کنید. هرگز سعی نکنید شخصاً رگلاتور معیوب را تعمیر نمایید بلکه آنرا به مراکز مجاز بفرستید. تنها از بست های فلزی یا کلاهک های مناسب برای اتصال شیلنگ ها با اتصالات استفاده کنید.
- هرگز از سیم های معمولی استفاده نکنید. شیلنگ ها را روی زمین نگذارید تا زیر پا نمانند. از شیلنگ های بسیار طولیل استفاده نکنید، چرا که احتمال گیر کردن و پیچ خوردگی شیلنگ وجود دارد. بطور متناوب شیلنگ ها را از نظر نشتی، پوسیدگی و شل شدن اتصالات بررسی کنید.

شیلنگ های معیوب یا پوسیده را تعویض کنید و بجای آن قطعه‌ای سالم قرار دهید. هرگز شیلنگ ها را با نوار چسب به هم وصل نکنید، چرا که تضمینی بابت آب بندی کامل اتصالات و درزها در این مورد وجود ندارد.

## ۲-۲- برشکاری قوسی هوا-کربن<sup>۱</sup>

### ۲-۱-۲- شرح فرآیند

برشکاری قوسی هوا-کربن CAC-A ، یکی از فرآیندهای برشکاری قوسی کربنی است که در آن بوسیله جت هوا<sup>۲</sup> فلز مذاب، برش می‌خورد. در این فرآیند حرارت شدید قوس، بین الکترود کربن- گرافیت و قطعه کار، قسمتی از فلز (قطعه کار) ذوب می‌شود. به طور همزمان، هوای فشرده با حجم و سرعت کافی از میان قوس عبور می‌کند تا فلز مذاب را از منطقه برش دور کند. فلز جامد بی‌حفاظ، بوسیله حرارت قوس ذوب شده و برش به همین صورت ادامه می‌یابد.

این روش برشکاری را می‌توان برای فولادهای کربنی، فولادهای زنگ‌نزن، تعداد زیادی از آلیاژهای مس و چدن‌ها به کار برد.

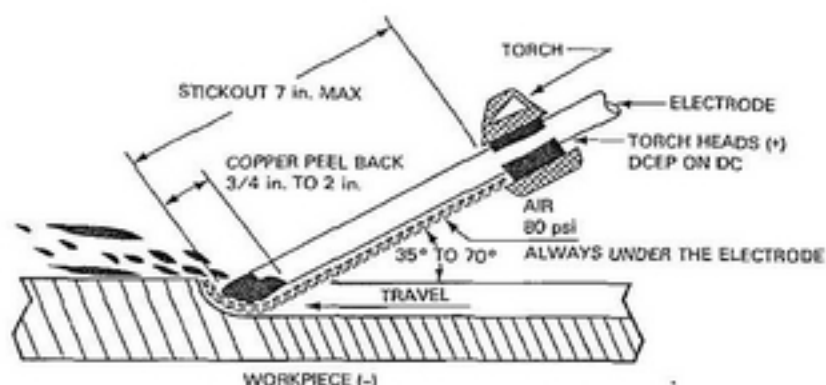
سرعت ذوب تابعی از جریان و نرخ برداشته شدن<sup>۳</sup> فلز مذاب است که وابسته به نرخ ذوب شدن می‌باشد. هوا باید قادر به خنک کردن فلز مذاب و تمیز کردن ناحیه قوس قبل از انجماد باشد. فرآیند به طور شماتیک در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

۱- Air Carbon arc Cutting

۲-Jet of air

۳-Blow away

t-Remove



شکل ۱۲: برشکاری قوسی هوا-کربن CAC-A [۲]

برشکاری قوسی هوای کربنی، در دهه ۴۰ بعنوان زیر شاخه ای از برشکاری قوس کربن، ابداع شد. برشکاری قوس کربنی (CAC) باید در موقعیت‌های عمودی یا بالای سر انجام شود هوا در CAC، قادر است تا فلز ذوب شده را در همه موقعیت‌ها بردارد<sup>۱</sup> در CAC نیاز به دو کاربر است. کاربر اول تورچ CAC را برای ذوب فلز ننگه می‌دارد و کاربر دوم یک نازل با هوای فشرده را بر روی حوضچه مذاب به صورت مستقیم نگه می‌دارد. اولین تورچ تجاری CAC-A در سال ۱۹۴۸ تولید شد.

## ۲-۲-۲- تجهیزات

این فرآیند به یک نگهدارنده الکتروود، الکتروودهای برشکاری، یک منبع توان و یک منبع تأمین (تغذیه) هوا، نیاز دارد. در برشکاری مکانیزه به یک کنترل کننده و حامل نیز نیاز است.

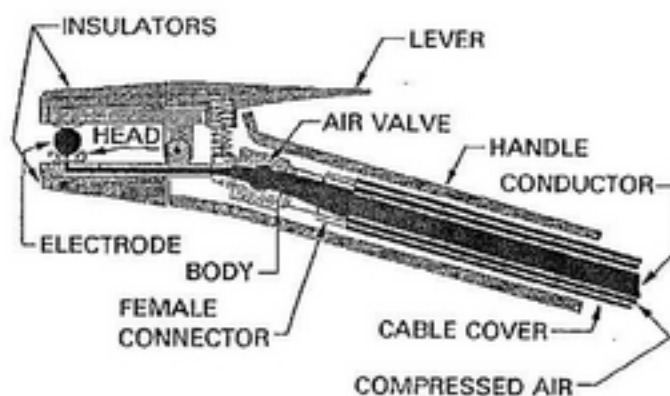
## ۲-۲-۳- تورچ برشکاری

نگهدارنده‌های الکتروودهای دستی برشکاری در CAC-A شبیه نگهدارنده‌های الکتروود در جوشکاری هستند.

۱-Overhead

۲-Remove

الکتروده بوسیله یک سر قابل چرخش نگه داشته می شود. همانطور که در شکل ۱۴ دیده می شود یک شیر هوا برای قطع یا برقرار کردن جریان هوا نیز در تورچ وجود دارد.



شکل ۱۴: مقطع عرضی تورچ برشکاری قوسی هوا-کربن [۲]

البته نگهدارنده های مکانیزه الکتروده نیز وجود دارد که برای آماده سازی لبه ها و کاربردهای تولید انبوه استفاده می شوند.

## ۲-۲-۴- الکترودها

سه نوع الکتروده برای CAC-A استفاده می شود:

- ۱- الکتروده DC پوشش داده شده بوسیله مس
- ۲- الکتروده DC Plain
- ۳- الکتروده AC پوشش داده شده بوسیله مس

در بیشتر موارد (کاربردها) از الکترودهای گرد استفاده می شود. الکترودهای تخت یا الکترودهای نیمه گرد برای ایجاد شیارهای قائم<sup>۱</sup> استفاده می شوند.

<sup>۱</sup>-Rectangular



#### • الکتروود DC پوشش داده شده بوسیله مس

این نوع از الکتروودها بیشترین کاربرد را دارند که این مسئله بدلیل عمر کاری بالا، خصوصیات قوس پایدار و یکنواختی شیار است.

این الکتروودها از ترکیب ویژه‌ای از کربن و گرافیت ساخته می‌شوند. این ترکیب، الکتروود شده و در نهایت الکتروودهایی فشرده و همگن با مقاومت الکتریکی کم تولید می‌شود. این الکتروودها سپس بوسیله ضخامت کنترل شده‌ای از مس، پوشش داده می‌شوند. قطر الکتروودهای تولیدی در محدوده ۳/۲ mm تا ۱۹/۱ mm است.

#### • الکتروودهای DC Plain

این الکتروودها بوسیله مس پوشش داده نمی‌شوند و لذا در هنگام برشکاری، این الکتروودها سریعتر از الکتروودهای پوشش داده شده مصرف می‌شوند.

الکتروودهای صفحه‌ای در محدوده اندازه قطر ۳/۲mm تا ۲۵/۴ mm در دسترس هستند. اما قطر ۹.۵mm بیشترین مصرف را دارد.

#### • الکتروودهای AC پوشش داده شده

این الکتروودها از ترکیبی از کربن و گرافیت برای تأمین کردن پایداری قوس برای برشکاری با یک جریان متناوب، ساخته می‌شوند.

این الکتروودها با مس پوشش داده می‌شوند و در محدوده قطرهای ۴/۸ mm تا ۱۲/۷ mm در دسترس هستند.

### ۲-۵- منبع توان

بیشتر منابع توان جوشکاری می‌توانند در فرآیند برشکاری (ACA) استفاده شوند. ولتاژ مدار باز باید به طور موثری بیشتر از ولتاژ قوس باشد. ولتاژ قوس در برشکاری قوسی هوای کربنی از  $35^{(۷)}$  تا  $55^{(۷)}$  است. ولتاژ مدار باز حداقل  $60^{(۷)}$  است.

ولتاژ قوس در برشکاری قوسی کربنی با توجه به اندازه الکتروود و کاربرد قابل کنترل است.

با سازنده منبع توان درباره استفاده در CAC-A، باید مشورت صورت گیرد زیرا بعضی از انواع منابع تغذیه تنها برای جوشکاری استفاده می شوند و از آنها در برشکاری CAC-A نمی توان استفاده کرد.

جدول ۴: ولتاژ منبع در برشکاری قوسی هوا-کربن [۲]

Type of Current	Type of Power Source	Remarks
dc	Constant current motor-generator, rectifier, or resistor grid unit	Recommended for all electrode sizes.
dc	Constant potential motor-generator or rectifier	Recommended for 8.4mm (1/4 in.) and larger diameter electrodes only. May cause carbon deposit with small electrodes. Not suitable for automatic torches with voltage control.
ac	Constant current transformer	Recommended for ac electrodes only.
ac or dc	Constant current	DC supplied from three phase transformer-rectifier supplies is satisfactory, but dc from single phase sources gives unsatisfactory arc characteristics. AC output from ac/dc units is satisfactory provided ac electrodes are used.

## ۲-۲-۶- تغذیه هوا

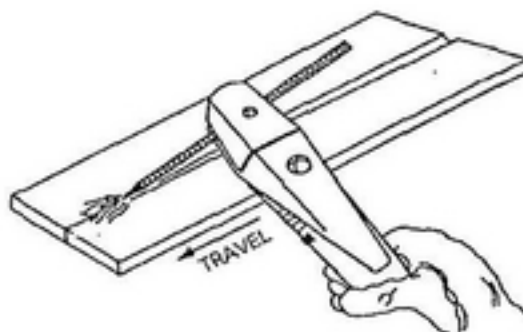
هوای فشرده با فشار در محدوده ۵۶۰ تا ۷۰۰ Kpa، عموماً برای رویه برداری برش قوسی هوای کربنی، توصیه می شود. نیروژن فشرده شده یا گاز خنثی جایی که هوای فشرده در دسترس نیست، استفاده می شود. اکسیژن نباید در نگهدارنده الکتروود CAC-A استفاده شود. جریان هوا باید دارای حجم و سرعت کافی باشد تا بتواند فلز ذوب شده را از محل بریده شده، بردارد.

دهانه تورچ قوس هوا-کربن طوری طراحی شده است که بتواند جریان هوای کافی برای رویه برداری را تأمین و تنظیم کند. اما اگر فشار هوا کم، یا حجم شیلنگ حامل کوچک، یا سایر عوامل موثر به طور دقیق تنظیم نشده باشد، ممکن است رویه برداری به صورت کامل انجام نگیرد. قطر داخلی شیلنگ ها و سایر ابزار باید به اندازه ای بزرگ باشد که هوا بتواند به راحتی به نگهدارنده الکتروود برسد. حداقل قطر درونی شیلنگ برای کاربردهای عمومی ۹/۵ mm می باشد. نگهدارنده های اتوماتیک باید با ابزار و شیلنگ هایی با حداقل قطر داخلی ۱۲/۷mm مجهز باشند.

## ۲-۲-۷- کاربردها

فرآیند CAC-A می تواند در مورد فولادهای زنگ نزن، فولادهای کم آلیاژ و فولادهای کربنی به کار رود.

چدن و آلیاژهای آلومینیم، منیزیم، مس و نیکل نیز قابل برش با این فرآیند هستند از این روش برای رویه برداری و آماده سازی ورق ها و لبه لوله ها برای جوشکاری، استفاده می شود. دو لبه می تواند به صورت سر به سر به هم وصل شوند و یک شیار در امتداد اتصال، ایجاد شود. (شکل ۱۵)



شکل ۱۵: عملیات دستی رویه برداری قوسی هوا-کربن در موقعیت تخت [۲]

## ۲-۲-۸- روش های آزمایشگاهی

الکترودهای برشکاری قوسی هوای کربنی (CAC-A)، برای حالات AC و DC یا هر دو «بسته به مواد مورد برشکاری»، طراحی شده اند. جدول (۵) الکترودها و انواع جریان را برای برشکاری بعضی از انواع آلیاژها نشان می دهد. جریان الکتریکی واقعی بستگی به اندازه الکترودها، به شرایط کاری مانند مواد برشکاری شوند، نوع برش، سرعت برش، موقعیت برش و کیفیت برش دارد.

جدول ۵: الکترودها و جریان های برشکاری قوسی هوا-کربن [۲]

Alloy	Electrode Type	Current Type	Remarks
Carbon, low alloy, and stainless steels	dc	dcrp	
	ac	ac	Only 50% as efficient as dcrp
Cast irons	ac	dcrp	At middle of electrode current range
	ac	ac	
	dc	dcrp	At maximum current only
Copper alloys: copper 60% or less copper over 60%	dc	dcrp	At maximum current
	ac	ac	
Nickel alloys	ac	ac	
	ac	dcrp	
Magnesium alloys	dc	dcrp	Before welding, surface must be cleaned.
Aluminum alloys	dc	dcrp	Electrode extension should not exceed 4 in. (100 mm). Before welding, surface must be cleaned.

محدوده جریان برای الکترودهای (CAC-A) رایج، در جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول ۶: محدوده جریان برای الکترودهای (CAC-A) رایج [۲]

Electrode Diameter		DC Electrode with DCEP, A		AC Electrode with ac, A		AC Electrode with DCEN, A	
in.	mm	min	max	min	max	min	max
5/32	4.0	90	150	--	--	--	--
3/16	4.8	150	200	150	200	150	180
1/4	6.4	200	400	200	300	200	250
5/16	7.9	250	450	--	--	--	--
3/8	9.5	350	600	300	500	300	400
1/2	12.7	600	1000	400	600	400	500
5/8	15.9	800	1200	--	--	--	--
3/4	19.1	1200	1600	--	--	--	--
1	25.4	1800	2200	--	--	--	--

## ۲-۳- رویه برداری<sup>۱</sup>

همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است در این حالت الکتروده باید محکم بر روی سطح نگاه داشته شود و فاصله تورچ برشکاری با سطح نمونه حداکثر باید ۱۷۸mm باشد، البته برای مواد

۱-Gouging

غیر آهنی، این فاصله کمتر است. قبل از جرقه زدن قوس، فشار هوا باید جریان پیدا کند و تورچ برشکاری باید مطابق با شکل ۱۵ بر روی سطح نگاه داشته شود.

مواد زائد بوسیله فشار هوای پشت الکتروود در جهت حرکت تورچ، دور می شود. در شرایط کاری مناسب، فشار هوا، زیر الکتروود را جاروب می کند و مواد مذاب را از منطقه برش دور می سازد. برقراری قوس از طریق تماس کوتاه مدت الکتروود با سطح قطعه کار آغاز می شود.

تکنیک شیار کاری با جوشکاری قوسی متفاوت است زیرا در شیارکاری فلز برداشته می شود اما در جوشکاری فلز رسوب می کند<sup>۱</sup>. در شیارکاری، قوسی کوتاه باید بوسیله حرکت با سرعت کافی و یکنواخت در جهت برشکاری ایجاد شود و فلز بصورت یکنواخت برداشته شود. در هنگام استفاده از الکتروودهای کربنی، جهت برقراری قوس باید از الکتروودهایی با سر کند (پخ خورده) استفاده کرد.

در هنگام شیارکاری یک قطعه در موقعیت عمودی، عملیات شیارکاری باید به صورت سرشیبی انجام شود این مسئله باعث می شود نیروی جاذبه زمین به برداشتن و دور کردن فلز مذاب کمک کند. در موقعیت افقی، برشکاری می تواند در جهت چپ یا راست اما همیشه در جهت جلو (حرکت روبه جلو) انجام می شود.

در برشکاری به سمت چپ، تورچ برشکاری باید مطابق شکل ۱۵ نگه داشته شود. در هنگام برشکاری در بالای سر، تورچ و الکتروود باید در جهتی نگه داشته شوند که مواد مذاب بر روی اپراتور ریخته نشود. عمق شیار که ایجاد می شود، بوسیله سرعت حرکت تورچ کنترل می شود. سرعت پائین حرکت، باعث ایجاد یک شیار عمیق می شود و سرعت حرکت بالا، یک شیار سطحی را ایجاد می کند. اما ایجاد شیارهای عمیق نیاز به مهارت بیشتری دارد.

عرض شیار بوسیله اندازه الکتروود مصرفی تعیین می گردد و معمولاً ۲-۳ میلی متر از قطر الکتروود بیشتر است. شیارهای عریض تر بوسیله حرکت دادن الکتروود به صورت دایره ای یا موجی ایجاد می شود. در بیشتر کاربردها برشکاری، زاویه جلو راندن الکتروود با سطح قطعه کار ۲۵ درجه است.

سرعت حرکت مناسب الکتروود بستگی به اندازه الکتروود، نوع فلز، آمپر (جریان) برشکاری و فشار هوا دارد.

صدای آرام و یکنواخت قوس، نشان دهنده سرعت مناسب الکتروود و کیفیت خوب برشکاری است.

## ۲-۴- برشکاری قوسی با الکتروود پوشش دار<sup>۱</sup>

### ۲-۴-۱- اصول

برشکاری قوسی فلز محافظ SMAC یکی از فرآیندهای برشکاری قوسی است که در آن از الکتروودهای پوشش داده شده، استفاده می شود. یک منبع نیرو یا جریان ثابت (جریان مستقیم) ترجیح داده می شود.

کار اصلی الکتروودهای پوشش داده شده در برشکاری، عمل کردن بعنوان یک عایق الکتریکی و اجازه لایه گذاری الکتروود در شکاف برش، است و پوشش بعنوان یک پایدار کننده قوس عمل می کند. انواع الکتروودهای E۶۰۲۰، E۶۰۱۲، E۶۰۱۰ عمدتاً استفاده می شوند.

### ۲-۴-۲- تجهیزات

اگر چه دستگاه جوشکاری DC (جریان ثابت) برای SMAC ترجیح داده می شود، اما منبع توان جریان متناوب AC نیز می تواند مورد استفاده قرار داده شود. برای SMAC در هوا از نگهدارنده الکتروود با قطر ۰/۱۸۷۵ اینچ و الکتروودهای بزرگ باید استفاده شود. اما برای SMAC زیر آب، استفاده از نگهدارنده الکتروود کاملاً عایق شده، اجباری است. یک منبع توان پلاریته برای حفاظت نگهدارنده و اجزای فلز از خوردگی الکترولیتی نیز باید در نظر گرفته شود.

### ۲-۴-۳- کاربردها

SMAC برای برش راه گاه و زائده ها در ریخته گری فلزات غیر آهنی و برش قراضه های غیر آهنی برای ذوب دوباره، استفاده می شود.

<sup>۱</sup>-Shielded Metal Arc Cutting



## ۲-۵- برشکاری قوس- اکسیژن<sup>۱</sup>

### ۲-۵-۱- اصول

برشکاری قوس اکسیژن AOC یک فرآیند برشکاری با اکسیژن است که در آن قوس بین قطعه کار و الکترود لوله ای شکل مصرف شدنی برقرار می شود و اکسیژن به طور مستقیم به قطعه کار می رسد.

در غیاب اکسیژن با بالا رفتن حرارت تا نقطه خمیری بوسیله قوس در فولاد کربنی متوسط<sup>۲</sup>، عمل برش اتفاق می افتد.

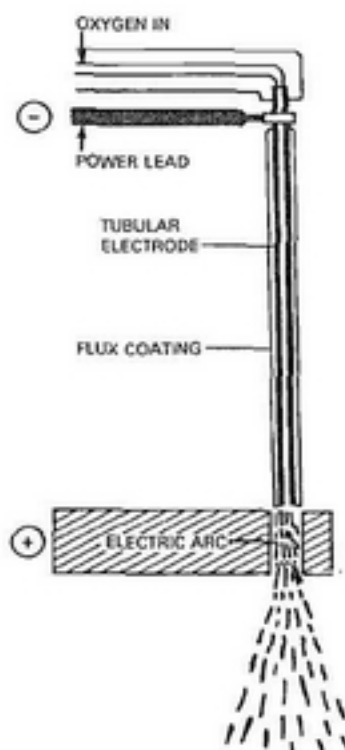
واکنش احتراق، واکنشی خود تغذیه<sup>۳</sup> است و انرژی آن به اندازه ای است که حرارت کافی در دو طرف خط برش، برای رسیدن به نقطه خمیری تأمین کند. انرژی پیشگرم ضروری اولیه بوسیله قوس الکتریکی تأمین می شود. تصویری شماتیک از این فرآیند را در شکل ۱۶ می بینید.

در مورد فلزات مقاوم در برابر اکسیداسیون، مکانیزم برش، بیش از یک عمل ذوب است. در این فلزات، پوشش روی الکترود، یک فلاکس را که به جریان افتادن فلز از محل برش کمک می کند، ایجاد می کند.

۱- Oxygen Arc Cutting

۲- Mild

۳- Self-Sustaining



شکل ۱۶: شماتیک الکترود قوس اکسیژن [۲]

## ۲-۵-۲- اثرات متالورژیکی

روش برشکاری قوس اکسیژن، اثرات متالورژیکی در منطقه متأثر از حرارت (HAZ)، در مقایسه با جوشکاری قوسی فلز محافظ (SMAW)، ایجاد می کند.

توان ورودی در این فرآیند برشکاری، نزدیک به توان ورودی در فرآیند جوشکاری قوسی فلز محافظ (SMAW) است اما نفوذ حرارت عموماً در برشکاری قوسی اکسیژن (AOC) به اندازه (SMAW) نیست، زیرا سرعت حرکت مشعل بیشتر است. این مسئله اثرات نسبتاً چشمگیری در هنگام سریع سرد شدن به جای می گذارد.

فلزاتی که نیاز به عملیات پس گرم بعد از جوشکاری ندارند، بوسیله این فرآیند برش، بدون اثرات زیان آور، قابل برشکاری هستند. درجه های مختلف فولادهای زنگ نزن، که به خوردگی حساس

هستند، هنگامی که تحت جوشکاری (SMAW) قرار می‌گیرد، در برابر این فرآیند برشکاری حساس می‌گردد.

برش‌های قوس اکسیژن در چدن، فولادهای کربن متوسط و فولادهای کم‌کربن، مستعد به توسعه ترک در سطح برش خورده هستند. مقدار و تعداد این ترک‌ها بستگی به سختی‌پذیری و ترکیب فولاد دارد.

## ۲-۵-۳- تجهیزات

برشکاری قوس اکسیژن بوسیله منابع توان AC یا DC با ظرفیت‌های مختلف، می‌تواند انجام گیرد.

جریان DC برای برشکاری‌های با سرعت بالا، ترجیح داده می‌شود. نگهدارنده الکتروود در برشکاری قوس اکسیژن، دارای طراحی‌های خاصی است. این نگهدارنده‌ها نه تنها باید جریان الکتریکی را به الکتروود منتقل کنند بلکه باید اکسیژن را نیز به منطقه برش، انتقال دهند. این مهم، مستلزم آوردن اکسیژن به نگهدارنده الکتروود و عبور کردن آن از دهانه سیلندر به منطقه قوس است.

برای برشکاری در هوا، نگهدارنده الکتروود کاملاً عایق شده، طراحی می‌شود. در برشکاری زیر آب، نگهدارنده کاملاً عایق، مجهز به یک توقف‌گر قطع و وصل شونده، لازم است. الکتروودهای فولادی لوله‌ای شکل به قطر ۵ تا ۸ mm و طول ۴۶ mm با قطر دهانه تقریباً ۱/۶ mm در این نوع برشکاری استفاده می‌شود. الکتروودهای برشکاری زیر آب، لوله‌های فولادی با پوشش ضدآب، هستند.

## ۲-۵-۴- تکنیک‌های برشکاری

در روش برشکاری قوس اکسیژن، الکتروود همواره در تماس با فلز پایه است. پوشش، مغز فلز قطعه کار را ایزوله (عایق) می‌کند و به طور اتوماتیک طول قوس را تنظیم می‌کند. شروع عملیات برشکاری و سوراخ کاری، همزمان است. نوک الکتروود در سطح قطعه کار در منطقه برش قرار می‌گیرد، سپس قوس برقرار می‌گردد پس از لحظاتی دریچه اکسیژن باز می‌گردد.

عملیات نفوذ سریعاً آغاز می‌شود، الکتروود به ورق فشار وارد می‌کند و یک سوراخ در سطح فلز شکل می‌گیرد. در طی برشکاری، الکتروود باید با سرعت مشخصی در سطح ورق در منطقه برش حرکت داده شود. زاویه شیب الکتروود و سرعت حرکت الکتروود باید طوری باشد که برش بیشترین کیفیت را داشته باشد. در برش‌های خط مستقیم، لبه‌های صاف باید به طور دقیق در کنار هم محکم شوند. در برشکاری در هوا، الکتروود در طول خط در نظر گرفته برای برش، با اعمال کمی فشار، حرکت داده می‌شود. در برشکاری زیر آب، بدون در نظر گرفتن ضخامت فلزی که باید بریده شود، فشار مثبت در فلزی که باید بریده شود، اعمال شود. در مجموع، قوس و اکسیژن سطح ورق را ذوب می‌کنند و فلز مذاب بوسیله نیروی فشار اکسیژن از روی فلز برداشته می‌شود.

## ۲-۵-۵- کاربردها

الکتروودهای برشکاری قوس اکسیژن، در ابتدا برای برشکاری زیر آب طراحی شدند و بعد از آن برای برشکاری در هوا، توسعه یافتند. در هر کاربردی، الکتروودهای قوس اکسیژن، در هر موقعیتی می‌توانند فلزات غیرآهنی و آهنی را برش دهند. این روش برشکاری در فلزات آهنی و غیرآهنی، فولادهای زنگ نزن، چدن، فولادهای کم آلیاژ، به کار می‌رود. لبه‌هایی که بوسیله تورچ قوس اکسیژن، بریده می‌شوند، نسبتاً غیر صاف و غیر یکنواخت هستند و همواره نیاز به کمی آماده سازی سطحی جهت جوشکاری دارند.

## ۲-۶- برشکاری قوسی تنگستن- گاز<sup>۱</sup>

### ۲-۶-۱- اصول کلی

برشکاری قوسی تنگستن- گاز (GTAC) برای برش فلزات غیرآهنی و فولادهای زنگ نزن در ضخامت‌های بالا ۰/۵ اینچ به کار می‌رود. در این روش برش از تجهیزات جوشکاری قوس تنگستنی، استفاده می‌شود.

<sup>۱</sup>-Gas Tungsten Arc Cutting

فلزاتی چون آلومینیوم، منیزیم، مس، برنز، نیکل، آلیاژهای مس-نیکل و انواع مختلفی از فولادهای زنگ نزن با این روش برشکاری می‌شوند. این روش برشکاری به صورت دستی یا اتوماتیک (مکانیزه) قابل انجام است. سیستم (مدار) الکتریکی این روش برش شبیه جوشکاری است. برای بریدن ورق یا ضخامت مشخص که باید جوشکاری شود، نیاز به جریان بالایی است، با برقراری جریان گاز ورودی، ذوب ورق و عمل جداسازی (برش) انجام می‌شود. ترکیبی از تقریباً ۶۵٪ آرگون و ۳۵٪ هیدروژن با نرخ (سرعت) ۶۰ Cfh در تورچ برشکاری جریان می‌یابد. از نیتروژن نیز می‌توان استفاده کرد اما کیفیت برشکاری به خوبی استفاده از ترکیب آرگون-هیدروژن، نیست. بهترین کیفیت برش زمانی بدست می‌آید که از جریان DC استفاده شود. استفاده از جریان AC همراه با فرکانس بالا نیز می‌تواند یک برش مطلوب بر روی مواد تا ضخامت ۶.۴ mm ایجاد کند.

شروع قوس می‌تواند با یک جرقه فرکانس بالا یا بوسیله کشیدن الکترود به روی قطعه کار، ایجاد شود. فاصله الکترود تا قطعه کار ۱/۶ mm تا ۳/۲ mm است. هنگامی که تورچ بر روی ورق حرکت می‌کند، بخش کوچکی از ورق بوسیله حرارت قوس ذوب می‌شود سپس مواد مذاب بوسیله جریان گاز با فشار به طرف خارج منطقه برش، رانده می‌شود تا یک بریدگی ایجاد شود. در پایان برش، تورچ از قطعه کار دور می‌شود تا قوس قطع شود. روی سطح برش معمولاً ناخالصی وجود ندارد، ناخالصی‌ها معمولاً در طرفین قطعه کار خارج از منطقه برش تجمع می‌کنند.

## ۲-۶-۲- تجهیزات

تورچ‌های جوشکاری قوسی با الکترود تنگستن، برای برشکاری نیز می‌توانند استفاده شوند. همانطور که در جدول ۷ دیده می‌شود، جریان برش تا ۶۰۰ A نیز می‌رسد. تورچ‌های جوشکاری برای برشکاری در جریان‌های تا ۱۷۵٪ از مقدار اسمی، استفاده می‌شوند زیرا حرارت کمی از عملیات برشکاری منعکس می‌شود.

جدول ۷: شرایط برشکاری گاز-تنگستن [۲]

Material	Thickness in.	Travel Speed, ipm	Current dcsp amps	Type of Gas
Stainless Steel	1/8	20	350	80% A + 20% H(2)
Stainless Steel	1/4	20	500	85% A + 35% H(2)
Stainless Steel	1/2	15	800	85% A + 35% H(2)
Aluminum	1/8	30	200	80% A + 20% H(2)
Aluminum	1/4	20	300	85% A + 35% H(2)
Aluminum	1/2	20	450	85% A + 35% H(2)

برای مثال، از تورچ ۲۰۰ A جوشکاری برای برشکاری با جریان ۵۰۰ A در یک دوره کوتاه می‌توان استفاده کرد.

برای برشکاری می‌توان از منبع نیرو DC با جریان ثابت و یا ژنراتور با حداقل ولتاژ مدار باز ۷۰ V یا رکتیفایر استفاده کرد.

در برش‌های ایجاد شده با منبع نیرو AC، محدوده ضخامت ورق ۶/۴ mm است.

## ۷-۲- برشکاری قوس با الکتروود فلزی و گاز<sup>۱</sup>

برشکاری قوس با الکتروود فلزی و گاز GMAC فرآیندی است که در آن از یک الکتروود مصرف شدنی و گاز محافظ استفاده می‌شود.

GMAC به صورت تجاری بعد از فرآیند جوشکاری قوسی با الکتروود فلزی، توسعه یافت. GMAC در ابتدا در طی عملیات جوشکاری به صورت کاملاً تصادفی رخ داد، هنگامی که سرعت تغذیه الکتروود خیلی بالا باشد، این مسئله باعث ایجاد سوراخ در ورق می‌گردد. لذا در حالی که تورچ حرکت می‌کند، برش ایجاد می‌شود.

اصلی‌ترین ایراد استفاده از روش GMAC، مصرف بالای الکتروود و جریان‌های برشکاری بالا (تا ۲۰۰۰ A) می‌باشد.

۱-Gas Metal Arc Cutting



## ۲-۷-۱- کاربردها

GMAC، درباره فلزات آلومینیم و فولاد زنگ نزن به کار می رود. با استفاده از تجهیزات معمولی جوشکاری و الکترودهای فولاد کربنی به قطر ۲/۴ mm فولادهای ننگ نزن تا ۱/۵ in ضخامت و آلومینیم تا ضخامت ۲ in قابل برش است.

## ۲-۸- برشکاری قوسی کربنی<sup>۱</sup>

برشکاری قوسی کربنی (CAC)، قدیمی ترین روش برشکاری است و امروزه کمتر استفاده می شود. این فرآیند از قوس بین یک الکتروده کربنی «گرافیتی» و فلز پایه، برای ذوب سطح قطعه استفاده می کند.

از آن جاییکه این فرآیند وابسته به جاذبه برای جدا کردن (برداشتن) فلز مذاب است، لذا تنها در موقعیت های عمودی یا بالای سر می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

در این فرآیند باید از نیروی قوس برای فشار به فلز مذاب جهت خروج از منطقه برش با استفاده از آمپراژ بالاتر، استفاده کرد. برش ایجاد شده به این روش نیاز به پاکسازی از ناخالصی ها و اکسیدها دارد.

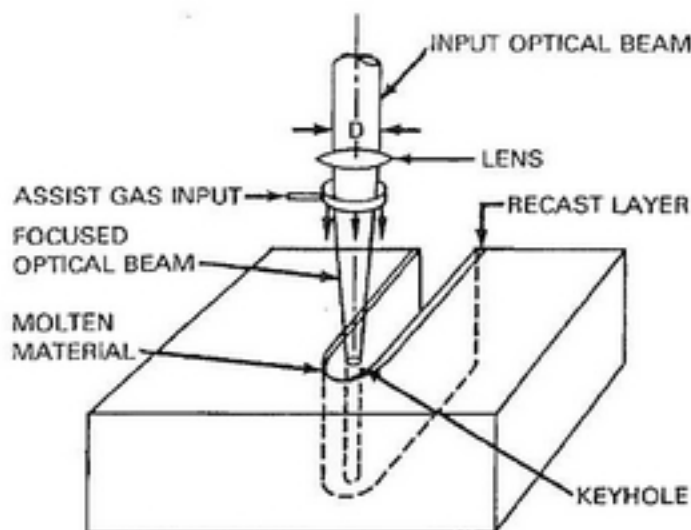
## ۳- برشکاری با لیزر<sup>۲</sup>

در این فرآیند برشکاری حرارتی، پرتو لیزر بوسیله لنزهای آبگرد، به صورت کاملاً متمرکز و شدید، بر روی سطح فلز تابانده می شود به طوری که یک دانستیه توان بیشتر از ۵ MW/cm<sup>2</sup> در نقطه کانونی حاصل گردد.

در این روش مواد مذاب، به صورت پیوسته در طی عملیات برشکاری از طریق ستونی گاز از برش بیرون رانده می شود. عموماً در هنگام برشکاری از اکسیژن نیز استفاده می شود که این مسئله به منظور ایجاد (تولید) انرژی اضافی در نتیجه انجام واکنش اکسیداسیون گرمازا است. در برشکاری مواد قابل احتراق از یک گاز خنثی (عموماً نیتروژن) استفاده می شود.

۱-Carbon Arc Cutting

۲-Laser Cutting



شکل ۱۷: تصویر شماتیک برشکاری با لیزر [۲]

عموماً در برشکاری با لیزر از گاز یا فشار و سرعت بالا استفاده می شود که علل آن بقرار زیر است:

- ۱- کمک به برداشته شدن و بیرون راندن مواد اضافی از محل برش
- ۲- محافظت لنزها از جرقه های خروجی از منطقه برش
- ۳- کمک به فرآیند سوختن

### ۳-۱- انواع لیزر

- ۱- لیزر نیمه هادی
- ۲- لیزر جامد
- ۳- لیزر یاقوتی (اکسید آلومینیم و کروم)
- ۴- لیزر YAG (ایتیریم و آلومینیم)
- ۵- لیزر گازی
- ۶- لیزر (نوعی گازی  $Ar+Kr$ )
- ۷- لیزر مولکولی ( $Co_2+N_2+He$ )

### • لیزرهای جریان آرام

قدیمی ترین لیزرهای صنعتی  $CO_2$  مشکل از لوله های شیشه ای با آینه هایی که در هر دو انتهای آن ها می باشد. لیزر از طریق لوله جریان یافته در حالیکه جریان الکتریسته در نزدیکی هر آینه اعمال می شود. این دستگاه ها بسیار ساده و قابل اطمینان هستند اما طول تخلیه آن ها به  $50 \frac{watt}{meter}$  محدود است زیرا راهی برای سرد کردن گاز وجود ندارد. این روش به این علت امروزه بکار می رود که اشعه لیزر خروجی با کیفیت بالا و ثابت بدست می آید و حجم بالای واسطه فعال باعث توسعه مقدار پاس می شود.

### • لیزرهای جریان مغناطیسی

لیزر جریان معکوس برای تولید توانی بالا در بسته ای<sup>۱</sup> کوچک ایجاد شد. این کار با چرخش گاز لیزر در منطقه تخلیه با سرعت بالا و سرد کردن آن با مبدل حرارتی صورت می گیرد بطوری که بتوان از آن مجدداً استفاده کرد. لیزرهای جریان تقاطعی حالت متقارن دارند زیرا خواص جریان تخلیه این گونه است با وجود این محدودیت ها، دستگاه های جریان تقاطعی به عنوان لیزرهای برشی موفق عمل کرده اند. جدیدترین طراحی لیزری مورد استفاده امروزه، نوع جریان محوری سریع است. این حالت یکی از حالت های لیزر جریان آرام است که در آن از پمپ برای به چرخش درآوردن گاز استفاده شده است. لیزرهای محوری سریع کوچک، نیرومند و ارزان هستند و در بسیاری از سیستم های لیزری از این نوع استفاده می شود، بیشتر مدل ها با مشکلات بزرگی بخاطر ناپایداری اشعه خروجی مواجه هستند. به این ترتیب سطح قطعات بریده شده با لیزر زیر خواهد بود.

### • لیزرهای YAG

YAG لیزر استاندارد سوراخ کننده در صنعت است. برخی برش های کاتوری نیز برای خواص آن مناسبند. یک لیزر YAG شامل یک میله کریستالی است که دور آن لامپ های زنون یا کریپتون قرار دارند. این میله کریستال ایتیریم آلومینیم (YAG) است که با نئودیمیم تقویت شده است. نور لامپ ها، اتمهای نئودیمیم را به حالت برانگیخته در می آورد و نوری با طول موج  $1064 \text{ mm}$  ایجاد می شود. آب در جریان اطراف میله اتمها را سرد می کنند تا به سطح انرژی اولیه برسند. لیزرهای صنعتی YAG معمولاً در حالت پالسی برای برش یا سوراخ کردن بکار می روند نرخ تکرار معمولاً زیر  $500 \text{ Hz}$  است. کنترل نیروی ورودی به لامپ ها باعث می شود شکل و مدت پالس

لیزر کنترل شود. واسطه جامد لیزر غلظت بالایی از اتمهای ساطع کننده نور دارد پس پیک توان مواد می تواند بسیار زیاد باشد. پالس های با انرژی بالا و دامنه کم، برش یا سوراخ کردن را انجام می دهند. میله های لیزر حرارتی در مرکز حرارت ایجاد می کنند و در خارج سرد می شوند. هر وقت نیروی جایگزین ایجاد شود یک گرادیان دمایی در قطر میله ایجاد می شود. این گرادیان موجب تغییر اندیس نوری میله می شود و عملکرد نوری لیزر را کاهش می دهد. لیزرهای نیرو بالای YAG خروجی های چند حالت با دیورژانس بالا دارند که توانایی سیستم را در متمرکز کردن میله در یک نقطه کاهش می دهند و لازم است سر لیزر به قسمت مورد نظر نزدیک باشد.

#### • لیزرهای شیشه ای

لیزرهای شیشه ای شباهت زیادی با لیزرهای YAG دارند. میله لیزر به جای کریستال از شیشه تقویت شده یا نتودیمیم تشکیل شده است. وقتی به جای YAG از شیشه به عنوان زمینه استفاده می شود غلظت بیشتری از اتمهای نتودیمیم در میله لیزر قرار می گیرد. به این ترتیب پالس های قوی تر از لیزرهای YAG ایجاد می شود پس لیزر شیشه ای برای سوراخ کردن عمیق مناسب تر خواهد بود. عیب شیشه این است که هدایت حرارتی کم آن، نرخ تکرار پالس را تا حدود ۱ pps کاهش می دهد و باعث می شود برای برش های مرنی مناسب نباشد.

#### • لیزرهای یاقوتی<sup>۱</sup>

یاقوت اولین ماده ای بود که تشعشع لیزر در آن مشاهده شد. لیزر یاقوتی دستگاهی با لامپ فلاش و حالت جامد مانند YAG و لیزرهای شیشه ای است اما نور مرنی ساطع می کند با وجودی که روش های دیگر تا حد زیادی جایگزین این روش شده است، هنوز برای سوراخکاری با خواص مشابه لیزرهای شیشه Nd مناسب است.

#### • لیزرهای Excimer

لیزرهای Excimer لیزرهای گازی فشار بالای پالسی هستند که در طول موج های ماورای بنفش عمل می کنند. عبارت Excimer مخفف کلمه Excited dimer است. دایمر معمولاً به مولکولی گفته می شود که فقط در حالت برانگیخته وجود دارد، مثل فلورید کریپتون (KrF). این مولکول ها وقتی

<sup>۱</sup>-RUBY

تشکیل می شوند که مخلوط مناسب گازی در تخلیه الکتریکی پالسی برانگیخته شود. وقتی مولکول برانگیخته به حالت غیر برانگیخته بر می گردد، لیزر ایجاد می شود.

### ۳-۲- زمینه های کاربرد لیزر

۱- ساخت مواد صنعتی

۲- پزشکی

۳- شیمی

۴- فیزیک

۵- میکروالکترونیک

۶- آنالیز مواد

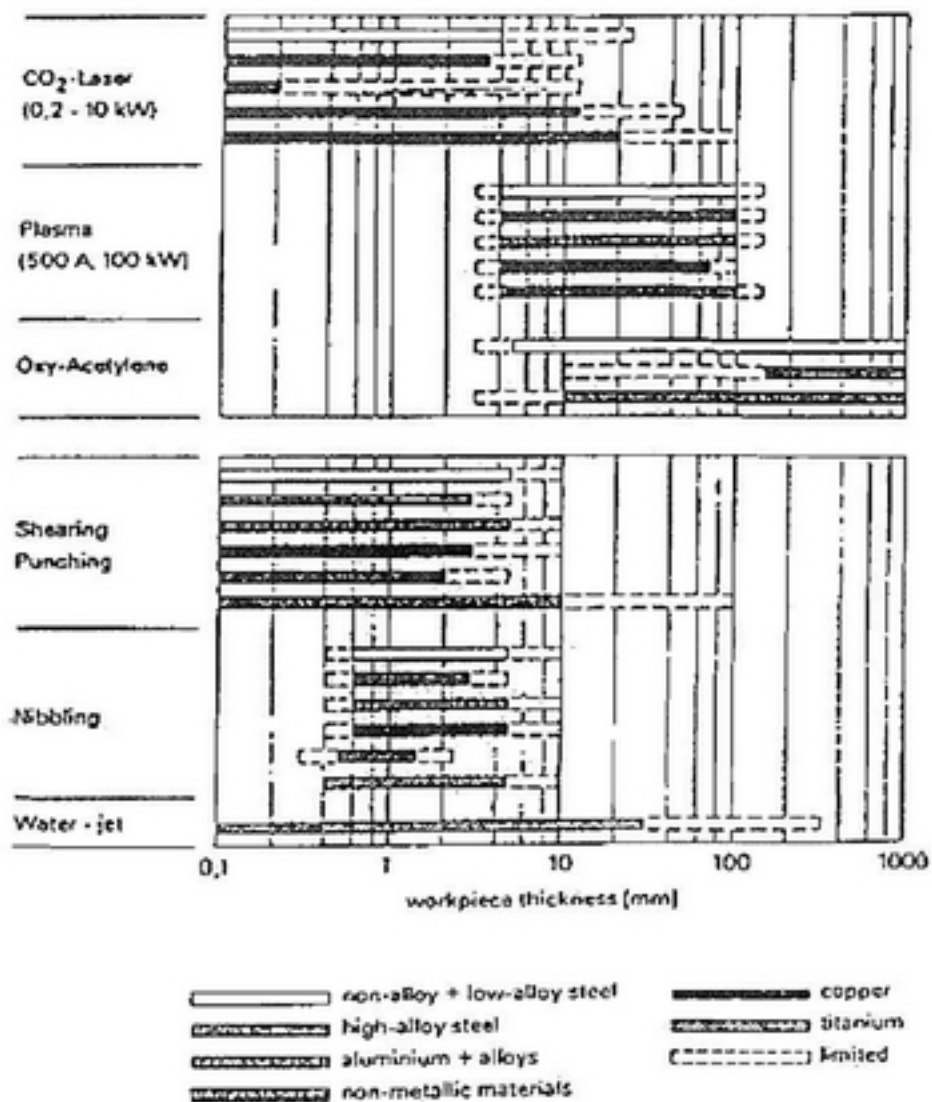
۷- تکنیک های اندازه گیری

۸- مهندسی ارتباطات

برای جوشکاری و برشکاری لیزر دی اکسیدکربن (CO<sub>2</sub>-Laser) ترجیح داده می شود. این نوع لیزر ترکیبی از CO<sub>2</sub> ۴/۵٪ و N<sub>2</sub> ۱۳/۵٪ و He ۸۲٪ است.

مواد قابل برش توسط لیزر عبارتند از: مواد فلزی، پلاستیک ها، چوب و سرامیک ها.

شکل ۱۸ و جدول ۸ محدوده برشکاری لیزری را برای مواد مختلف نشان می دهد.



شکل ۱۸: محدوده برشکاری بوسیله لیزر برای مواد مختلف [۱]



جدول ۸: مشخصه های برشکاری برای مواد مختلف [۱]

Material	d mm	v mm/min	s mm	q
Plastics				
Hostyren N 4000	4	3200	0.4	25
Hostyren B 6600	4	3400	0.4	27
Hostalt Z 2060/3210	4	8000	0.3	48
Hostalt Z 2060/3210	17	500	0.6	17
Hostalen PPH 9060	4	4000	0.3	32
Hostalen PPH 2250	10	900	0.5	18
Hostalen PPH 2250	15	500	1.0	16
Hostalen PPH 2250	20	240	1.2	10
Hostalform C 9021 TF	4	4400	0.1	35
Hostalform C 9021 M	4	3600	0.2	29
Hostadur A Typ 4000	4	4400	0.3	35
Hostadur A VP 6022	6	2200	0.3	25
Glass fibre reinforced plastic, polyester 73% glass	3	200	0.2	1.2
Perspex (Plexiglass)	5	4000	0.3	40
Perspex (Plexiglass)	10	1600	0.3	32
Perspex (Plexiglass)	20	700	0.5	28
PVC, soft	3	5600	0.3	40
PVC, soft	10	2000	0.5	40
PVC, rigid, dark grey	16	1100	1.0	25
PVC Vinoflex 413	5	5000	0.3	50
PVC Vinoflex 413	15	1500	1.0	45
PVC Vinoflex 413	20	1000	1.5	40
PP Novolen KR 1319	2	6000	0.2	24
PE Lupolen 5052 C	5	2800	0.4	28
PE Lupolen 5052 C	12	1000	0.6	24
PE Lupolen 5052 C	20	350	1.2	15
Teflon (PTFE)	4	5000	0.3	40
Deep drawing sheet	1	5000	0.1	10
Deep drawing sheet	2	2500	0.15	10
Deep drawing sheet	3	1600	0.2	9
Structural steel ST 37	4	900	0.3	7
Chrome nickel steel	1	4000	0.1	8
Chrome nickel steel	2	1500	0.15	6
Spring steel				
C 60 Primaflex	2	3000	0.1	12
Titanium *	6	4000	1.2	160
Lead	3	3600	0.2	22
Galvanised steel sheet	1.5	2000	0.1	6
Plastic coated steel sheet	1	3500	0.1	7
Beating material				
Klingent ITC Royal	1	6000	0.2	12
Rubber	5	3600	0.3	26
Hard paper HP 22051	3	1200	0.2	7
Asbestos cement	5	1200	0.1	12
Quartz glass	2	1200	0.2	5
Aluminium oxide	1	6000	0.4	25
Cotton fabric (multi-layer)	15	2000	0.5	40
Wood (MultiFlex)	18	700	0.6	25

\* Laser power P = 200 W

d Material thickness in mm

v Cutting speed in mm/min with CO<sub>2</sub> laser beam power of 500 W in the workplace

s Cutting kerf width in mm

q  $q = v \cdot d \cdot P$  Cutting characteristic used for calculating the maximum cutting speed  $v = q \cdot P/d$ ; where by P is the laser power at the workplace in W.

اندازه سوراخ ایجاد شده بوسیله لیزر را از رابطه زیر می توان محاسبه کرد:

$$ds = 2.21 \text{ KF/D} \quad [\text{AWS}]$$

- ds: قطر سوراخ ایجاد شده بوسیله لیزر ( $\mu mm$ )
- K: ضریب ثابت
- F: فاصله کانونی لنزها (mm)
- D: قطر دهانه پرتو در آینه متمرکز کننده (mm)
- در بیشترین کاربردهای برشکاری سطح توان بین ۴۰۰ w تا ۱۵۰۰ w است. [AWS]
- جدول ۹ تاثیر نوع اشعه بر قابلیت تمرکز را نشان می دهد.

جدول ۹ : تاثیر نوع اشعه بر قابلیت تمرکز [۲]

Type of Laser Beam	K
1. Uniform Wavefront	1.0
2. Gaussian Beam	0.86
3. Unstable Resonator*	
a. $M=2^{**}$	4.0
b. $M=4$	3.5

\* Magnifications 'M' most used

\*\*  $M$ , Magnification ratio of an annular beam,  $= \frac{\text{Beam OD}}{\text{Beam ID}}$

### ۳-۳- تجهیزات

لیزر دی اکسید کربن ( $CO_2$ ) منبع اشعه استاندارد برای کاربردهای برشی است. زیرا قدرتمندترین و قابل اطمینان ترین نوع لیزر در استفاده های عمومی است. لیزر  $CO_2$  یک نوع تخلیه گاز است؛ توسط فرستادن جریان الکتریکی از طریق گاز عمل می کند. لیزرهای صنعتی با بازدهی بالا با استفاده از مخلوطی از هلیوم، نیتروژن و دی اکسید کربن بدست می آید. انرژی الکتریکی با گازها کوپل می شود و نیتروژن این انرژی را به مولکولهای  $CO_2$  منتقل می کند و درصد بالای از آنها را به تراز انرژی بالا می برد. تشعشع لیزر در  $10/6$  میکرون در قسمت مادون قرمز وقتی رخ می دهد که این مولکولها به تراز پایین تر سقوط می کنند. در برخورد  $CO_2$  با هلیوم، سطح انرژی دوباره پایین می رود و فرایند می تواند دوباره آغاز شود. گاز معمولاً از طریق یک مبدل حرارتی منتقل می شود و قبل از بازیابی سرد می شود.

لیزر  $\text{CO}_2$  می تواند با موج پیوسته (cw) یا حالت پالسی عمل کند. فرکانس پالس ها می تواند تا 10 KHZ نیز برسد. دانسیته کم و نفوذ پذیری حرارتی بالای واسطه گازی لیزر، توانایی آن در تغییر جهت نور وارده را کاهش می دهد. به این ترتیب حتی لیزرهای  $\text{CO}_2$  با نیروی زیاد نیز خواص نوری خوبی خواهند داشت. این اشعه ها را می توان با تجمع نور متمرکز کرد و نقطه ای با ابعاد  $0.04 \text{ in}$  را به راحتی می توان با لیزرهای متمرکز کننده لیزر  $\text{CO}_2$  بدست آورد.

### ۳-۴- خصوصیات برشها

لیزر برای برش مورد استفاده قرار می گیرد زیرا کیفیت برش حاصله خوب است. عرض شیار برش باریک بوده، سطح نهایی صاف، لبه ها تمیز و دقت ابعادی بالاست.

#### ۳-۴-۱- عرض شیار برش<sup>۱</sup>

عرض شیار برش ایجاد شده با روش لیزر  $\text{CO}_2$  از  $0.04 \text{ in}$  تا  $0.04 \text{ in}$  تغییر می کند. معمولاً هدف این است که عرض شیار تا حد ممکن باریک باشد تا مقدار ماده حذف شده به حداقل برسد. این کار دو مزیت دارد، حرارت ورودی کاهش می یابد و دقت بالا می رود. لیزرهایی که نقطه تمرکز آنها کوچک است برای ایجاد شیارهای باریک بکار می روند. با افزایش ضخامت نمونه، عرض شیار بیشتر می شود. شیارهای باریک در مواد ضخیم باعث می شود خارج کردن ماده بریده شده مشکل شود.

#### ۳-۴-۲- زبری<sup>۲</sup>

یکی از معیارهای کیفیت برش، زبری سطح است. توانایی تولید قطعات نهایی به صافی قابل قبول بستگی دارد. می توان ورق فولاد کربنی  $0.036 \text{ in}$  را با زبری متوسط ( $R_a$ ) کمتر از  $32 \mu m$  برش داد. این روش برای بیشتر اهداف مناسب است. پایداری لیزر، صافی سیستم حرکتی و دقت انتقال اشعه باید برای رسیدن به این نتایج بهینه شود. با ضخیم تر شدن فولاد، زبری لبه ها افزایش می یابد. بهترین نتیجه حاصله روی صفحه  $0.11875 \text{ in}$  در حدود  $250 \mu m$  است. در جوش یا گاز خنثی که برای بسیاری فلزات برای دستیابی به لبه های آماده جوش بکار می رود، از فشار بالای گاز برای برش

1-Kerf

2-Roughness

استفاده می شود. تلاطم ایجاد شده با این فشار، زبری سطح را تا حدود  $63 \mu m$  روی ماده با ضخامت  $0.6 \text{ in}$  افزایش می دهد.

دیگر مواد خواص متفاوتی دارند. پلاستیک اکریلیک که در حین برش تبخیر می شود، می تواند دارای زبری  $8 \mu m$  روی مقطع  $1 \text{ in}$  باشد به شرطی که جریان گاز کمکی به اندازه کافی کم باشد تا تلاطم ایجاد نشود. پلاستیکهایی مثل پلی کربنات، که در اثر اشعه تجزیه می شوند، بسیار زبرتر هستند. تولید زبری سطح کمتر از  $250 \mu m$  در آنها ممکن نیست.

### ۳-۴-۳- سرباره<sup>۱</sup>

برش لیزری با کمک گاز در قطعات فلزی توسط راندن مواد مذاب به خارج از کانال باریکی که توسط اشعه لیزر ایجاد شده انجام می شود. تحت شرایطی مقداری از این ماده به کف لبه برش می چسبد. این سرباره همیشه نامطلوب است و معمولاً قابل قبول نیست. در مورد فولادهای کربنی، سرباره وقتی ظاهر می شود که تمرکز صحیح نباشد، فشار گاز بسیار کم باشد، یا سرعت حرکت خیلی زیاد باشد. در برش های فولادهای زنگ نزن و آلومینیم احتمال چسبندگی ماده وجود دارد و معمولاً به فشار گاز بسیار زیاد برای حذف آن نیاز خواهد بود. حتی در مقاطع نازک، پوشش های ضد پراکندگی مثل گرافیت را می توان برای کاهش چسبندگی ماده منجمد شده به کف ورق برش لیزری بکار برد.

### ۳-۵- دقت ابعادی

دقت بدست آمده در برش لیزری قطعات تابع عوامل زیر است:

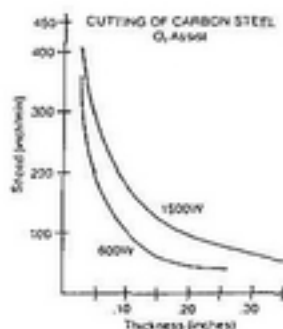
- ۱- دقت طراحی
- ۲- توانایی CNC در طی نمودن مسیر برنامه ریزی شده
- ۳- پایداری اشعه لیزر
- ۴- تغییر شکل ایجاد شده در قطعه طی فرایند برش

دستگاه هایی که برش دقیق ایجاد می کنند باید سرعت حرکت محدودی داشته باشند تا خطاهای ناشی از حرکت به حداقل برسد. وقتی طراحی و کنترل آن قادر به طی مسیر برنامه ریزی شده باشند، یک سیستم انتقال اشعه بکارگرفته می شود. به علاوه تغییرات موقعیت کانونی یا اندازه نقطه تمرکز، اندازه موثر برش را تحت تاثیر قرار می دهد و ابعاد قطعه تغییر می کند. خود قطعه آخرین منبع خطای ابعادی است. اگر قطعه به علت انبساط حرارتی در حین برش حرکت کند، قطعات بریده شده از آن با مسیر ابزار همخوانی نخواهد داشت. از آنجا که دقت برش دهنده های لیزری  $0.0001$  in است، اثر حرارتی بیشتر نمایان می شود. تنها راه حل این مشکل در حال حاضر تغییر شکل در جهت مخالف است.

### ۳-۶- فلزات برشکاری شونده

#### • فولادهای کربنی

فولادهای معمولی تا ضخامت  $110$  mm به خوبی می توان بوسیله اکسیژن همراه با لیزر برشکاری نمود. برش ایجاد شده باریک (برای مواد نازک  $0.1$  mm) است، و لذا منطقه متاثر از حرارت (HAZ) در این حالت قابل صرف نظر کردن می باشد (بویژه برای فولادهای کم کربن و کربن متوسط). لبه های برش در این نوع فولادها بسیار تمیز، صاف و چهار گوش است. حضور گوگرد و فسفر در فولادهای کربن متوسط می تواند باعث سوختن لبه های برش شود. لذا استفاده از فولادهای با ناخالصی کم ( به عنوان مثال فولادها نورد سرد شده) باعث ایجاد برش های با کیفیت بهتر نسبت به فولادهای نورد گرم شده، می شوند. شکل ۱۹ منحنی برشکاری فولاد های کربنی را بر حسب ضخامت نشان می دهد.

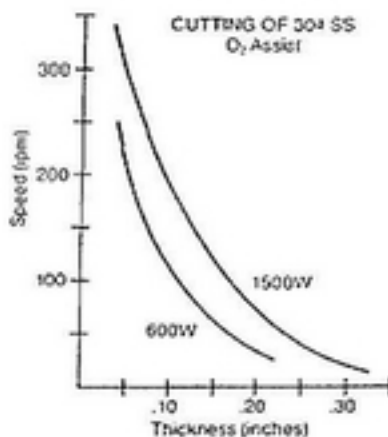


شکل ۱۹ : منحنی برشکاری فولاد کربنی [۱]

### • فولادهای زنگ نزن<sup>۱</sup>

از لیزر بعنوان ابزار مناسب برای برش ورقه های ساخته شده از جنس فولاد زنگ نزن استفاده می شود. با توجه به اینکه در برشکاری بوسیله لیزر حرارت ورودی کنترل شده است، منطقه SHAZ در لبه برش، بسیار کوچک خواهد بود و در نتیجه مقاومت به خوردگی هوا تغییرات چندانی نمی کند. از آن جاییکه فولادهای زنگ نزن با اکسیژن واکنش شدیدی نمی دهند، سرعت برشکاری در این آلیاژ نسبت به فولادهای کربنی با ضخامت یکسان، کمتر است. اگر در این حالت نخواهیم سرعت برشکاری را ۵۰٪ افزایش دهیم باید از یک گاز خنثی استفاده شود تا یک برش عاری از اکسید و آماده برای جوشکاری بدست آید. برشکاری بوسیله لیزر در فولادهای زنگ نزن فریتی یا مارتنزیتی بسیار تمیز خواهد بود. اما فولادهای زنگ نزن آستینی حاوی نیکل، در برشکاری، عنصر نیکل به منطقه برش منتقل شده و به قسمت پشتی منطقه برش می چسبد.

شکل ۲۰ منحنی برشکاری فولاد زنگ نزن را بر حسب ضخامت نشان می دهد.



شکل ۲۰: منحنی برشکاری فولاد ۳۰۴ SS [۱]

۱- Stain Less Steel

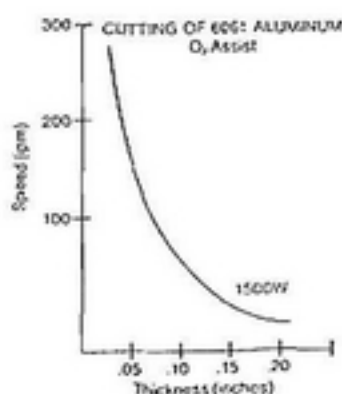


### • آلیاژهای آلومینیم

بواسطه هدایت حرارتی بالا و قابلیت انعکاس بالای طول موج پرتو لیزر دی‌اکسید کربن<sup>۱</sup>، برشکاری آلومینیم نیاز به دانستیه انرژی لیزر بالاتر جهت شروع فرآیند برشکاری در مقایسه با فولاد دارد که این مسئله خود به معنی نیاز به یک واحد خروجی جهت ایجاد کیفیت بسیار بالای پرتو لیزر و توانایی حداقل ۵۰۰ وات دانستیه توان علاوه بر کنترل دقیق تمرکز پرتو لیزر است. حتی پرتوهای لیزر با قدرت ۱ تا ۲ کیلووات تنها قادر به برش آلیاژهای آلومینیم با ضخامت زیر ۳/۸ mm هستند.

در طی عملیات برشکاری، گاز کمکی باعث خروج و پیرون رانده شدن فلز مذاب از منطقه برش می‌شود. فلز مذاب تمایل دارد که در طول لبه برش سیلان کند و به قسمت پشتی منطقه برش بچسبد. که این مسئله می‌تواند باعث ایجاد ترک‌های بین دانه‌ای در سطح برش در بعضی آلیاژهای آلومینیم شود به همین علت در برشکاری آلیاژهای آلومینیم که در صنایع حساس مانند هواپیماسازی استفاده می‌شود، لیزر کاربرد زیادی ندارد.

شکل ۲۱ منحنی برشکاری آلیاژ آلومینیم را نشان می‌دهد.



شکل ۲۱: منحنی برشکاری آلومینیم ۶۰۶۱ [۱]

<sup>۱</sup>-CO<sub>2</sub> Laser's wavelength

#### • مس

برش مس با نفوذ پذیری و انعکاس دهندگی بیشتر از آلومینیم، یا لیزرهای کم توان<sup>۱</sup> بسیار مشکل است. با این وجود مس به راحتی با لیزرهای چند کیلوواتی CO<sub>2</sub> بریده می شود به شرطی که اشعه مستقیماً روی قطعه متمرکز شود. لیزرهای YAG با نیروی پالس بالا و طول موج کم، مس را بدون هیچ اشکالی می برند. نتایج برش روی آلیاژهای مس مثل برنج مشابه آلومینیم است.

#### • آلیاژهای پایه نیکل

بیشتر آلیاژهای پایه برای کار در شرایط سخت صنعتی مانند دمای بالا یا محیط های خورنده مورد استفاده قرار می گیرند. با وجودی که برش لیزری این فلزات راحت است، معمولاً لازم است نقصهای متالورژیکی مانند ترکهای ریز و رشد دانه مورد آزمایش قرار گیرد تا قطعه درست کار کند. تستهای با برش لیزری گاز خنثی بر روی این آلیاژها کیفیت بهتری نسبت به برش با اکسیژن داشته است.

#### • تیتانیم

تیتانیم و آلیاژهای آن با اکسیژن و نیتروژن ترکیبات شکننده ای در لبه جوش تشکیل می دهند که معمولاً مطلوب نیست در نتیجه لازم است از آرگون به عنوان گاز کمکی برای برش تیتانیم استفاده شود. آرگون تحت شرایط برش لیزری به راحتی یونیزه می شود که ممکن است موجب تشکیل پلاسما در بالای قطعه شود. وقتی این اتفاق می افتد، خروجی لیزر باید بررسی شود تا نتایج دقیقی بدست آید.

### ۳-۷- غیر فلزات

یکی از مزایای لیزر این است که می تواند مواد مختلفی را بدون توجه به سختی یا هدایت الکتریکی آنها برش دهد. می توان مواد را به دو دسته فلز و غیر فلز تقسیم نمود و غیر فلزات را نیز به دو دسته آلی و غیرآلی.

<sup>۱</sup>Low Power

### ۳-۷-۱- مواد غیر آلی

مواد غیر فلزی غیرآلی مانند شیشه دارای فشار بخار و هدایت حرارتی کمی می باشند. این خواص به علاوه قابلیت جذب نور با طول موج  $1516 \mu m$  شرایط مناسبی را برای استفاده از لیزر برای برش این مواد فراهم می آورد، اما متأسفانه بسیاری از انواع متداول این مواد، نقطه ذوب بسیار بالا و مقاومت به شوک حرارتی کمی دارند. به همین علت کار با آنها مشکل تر از فلزات خواهد بود.

- آلومینا ( $Al_2O_3$ ) نیز معمولاً توسط لیزر بریده می شود. برش با استفاده از پالسهای با نیروی بالا برای تبخیر ماده صورت می گیرد زیرا انجماد ماده ذوب شده مشکل ساز خواهد بود. نقطه ذوب بالای آلومینا، در کنار نیروی متوسط کم لیزرهای عمل کننده، موجب کاهش سرعت برش می شود.

#### • کوارتز

فرآیندهای مربوط به کوارتز شباهت زیادی با فلزات دارد زیرا مقاومت بالایی در برابر شوک حرارتی دارد. برای این منظور از اشعه پیوسته  $CO_2$  استفاده می شود زیرا کوارتز در مقابل نور  $1106 \mu m$  لیزرهای YAG شفاف است. کرنش های ایجاد شده توسط تنش های حرارتی معمولاً باید توسط آنیل کردن قطعات پس از برش آزاد شوند.

#### • شیشه

برش لیزری شیشه به علت مقاومت به شوک حرارتی کم شیشه ها محدود است. به همین علت قطعات پیچیده شیشه ای بعد از برش ترک بر می دارند. همچنین در شیشه روی لبه برش مذاب منجمد شده شکل می گیرد، زیرا نقطه ذوب کاملاً مشخصی ندارد.

### ۳-۷-۲- مواد آلی

مواد آلی عموماً توسط نور لیزر تجزیه می شوند. انرژی مورد نیاز برای این تجزیه، معمولاً بسیار کمتر از انرژی لازم برای ذوب مواد غیر آلی است و به همین علت برش را می توان با سرعت بالا یا لیزرهای با نیروی کمتر انجام داد. حجم زیاد مواد تجزیه شده مشکلاتی را بوجود می آورد، گازها از شیار برش<sup>۱</sup> توانایی خروج ندارند، لذا سرعت فرآیند محدود بوده و کیفیت لبه ها کاهش می یابد. به علاوه

<sup>۱</sup>-Kerf

بسیاری مواد آلی دارای ترکیبات حاوی مس می باشند که در حین برش با لیزر آزاد می شوند. اثرات و مضرات این مواد بر اپراتور و محیط باید بررسی شود.

#### • پارچه

از آنجا که پارچه بسیار نازک است مشکلات کمی در برش آن بوسیله لیزر وجود دارد. بیشتر مشکلات مربوط به ساخت سیستم هایی است که قادر به حرکت سریع برای استفاده از کل ظرفیت برش لیزر باشند.

#### • پلاستیکها

انواع مختلف پلیمرها توسط لیزر برش داده می شود. اشعه موجب ذوب، تبخیر و تجزیه مواد می شود پلاستیک های حرارتی مثل پلی پروپیلن و پلی استیرن با پرش ماده مذاب بریده می شوند در حالی که ترموست هایی مانند فنول ها یا اپوکسی ها توسط تجزیه بریده می شوند. موادی که در اثر اشعه تجزیه می شوند، مقداری کربن در لبه های برش بر جا می گذارند. این اضافات معمولاً باید توسط عملیاتی چون ساچمه زنی قبل از استفاده از قطعه، برداشته شوند. حاصل تجزیه برش لیزری پلیمرها مضر بوده و باید پرسنل عملیات در مقابل آن ایمن شوند.

#### • کامپوزیتها

کامپوزیتها موادی هستند که از دو یا چند جزء جداگانه تشکیل شده اند. معمولاً یک جزء فیبری است و دیگری زمینه را تشکیل می دهد. با انتخاب زمینه های مناسب و عناصر تقویت کننده به ماده می توان خواص مهندسی بهینه برای مصارف خاص را بخشید. از لحاظ برش لیزری، تفاوت های اصلی بین کامپوزیتها، آلی بودن زمینه، فیبر، یا هر دو است.

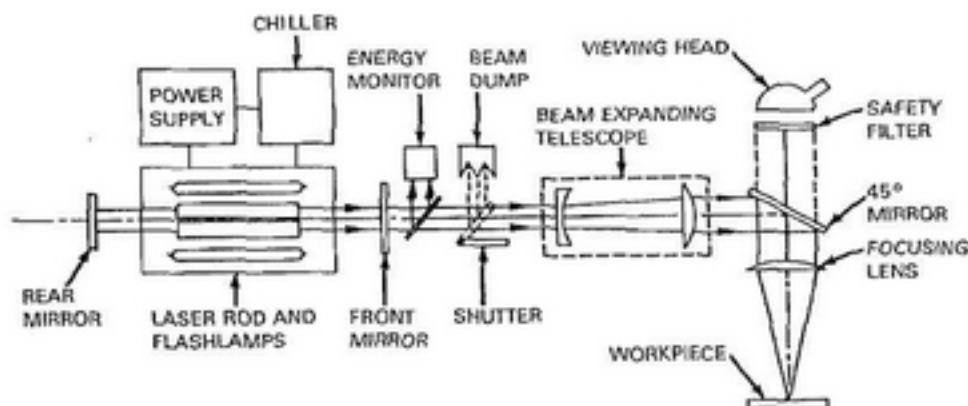
### ۴- سوراخ کردن با لیزر<sup>۱</sup>

قطر سوراخ ایجاد شده توسط لیزر معمولاً از حدود ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۶ اینچ (۰/۰۲۵ تا ۱/۵mm) است. عمق بدست آمده معمولاً کمتر از ۱ in است زیرا محدودیت تمرکز اشعه وجود دارد. مثلهایی از سوراخ کردن با لیزر بر روی تیغه های موتور جت و اجزاء روتور وجود دارد.

<sup>۱</sup>-Laser Drilling

طی این فرآیند سوراخ‌های تمیز با لایه‌های بسیار کوچک ایجاد می‌شود. وقتی سوراخ‌های بزرگ مورد نیاز باشد از یک روش چرخشی استفاده می‌شود که طی آن اشعه یک دایره را با قطر مورد نظر برش می‌دهد. سوراخ کردن با لیزر قسمت عمده مزایای برش لیزری را دارد. به خصوص مزیت آن زمانی است که قطر سوراخ مورد نیاز کمتر از  $0.02$  in باشد و نیز وقتی که سوراخ‌ها باید در قسمت‌هایی ایجاد شود که در دسترس تجهیزات عادی نیست. زاویه ورود اشعه می‌تواند بسیار نزدیک به صفر باشد، حالتی که اغلب تجهیزات مکانیکی در معرض شکستن قرار می‌گیرند. خروجی پالسی، با شدت بالا در لیزرهای حالت جامد، با طول موج کوتاه‌تر مثل Nd:YAG، Nd:glass و یاقوتی بیشتر برای سوراخ کردن مناسب هستند. اجزاء یک لیزر Nd:YAG بصورت شماتیک در شکل ۲۲ نشان داده شده است. لیزرهای CO<sub>2</sub> معمولاً برای سوراخ کردن مواد غیر فلزی مثل سرامیک‌ها، کمپوزیت‌ها، پلاستیک‌ها و لاستیک بکار می‌روند.

دو عیب اصلی استفاده از لیزر، هزینه بالای تجهیزات و ترس کارکنان از "تکنولوژی بالای" فرآیند است، که نیازمند مهارت بالای اپراتور و دانش بالای وی در مورد مواد لیزری است. بازار صنعتی لیزر در حال حاضر دارای ۲۰٪ نرخ رشد سالانه است و قیمت‌های سیستم‌های برش لیزری تا چند سال آینده هر سال چند درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۲۲: تصویر شماتیک اجزاء لیزر Nd:YAG [۲]

بسته های نرم افزاری جدید و برنامه نویسی ساده باعث استفاده بیشتر از برش لیزر می گردد. سیستم های رویت های لیزری و کامپیوترهای که ارتباط با آنها ساده است، کنترل بهتر متغیرهای عملیاتی و سیستم های لیزری را مقدور می سازد. لیزرهای CO<sub>2</sub> با اندازه و وزن کمتر و لیزرهای پالسی چندین کیلو واتی با کیفیت اشعه بهتر، لیزرهای YAG تک حالت و خروجی های لیزر YAG تا ۱/۵ کیلو وات، پیشرفت هایی است که بدست آمده است. طرح های سیستم های پیشرفته موجب دقت بالا و قابلیت تکرار فرآیند می شود.

#### ۴-۱- قوانین و خصوصیات فرآیند

برش اشعه لیزر (LBC) و سوراخ کردن با لیزر (LBD) دو فرآیند کاملاً متفاوت برای برداشتن مواد هستند. این فرآیندها بطور گسترده ای هم از لحاظ آزمایشی و هم تئوری بررسی شده اند تا مکانیزم فرآیند درک شود. هر دو فرآیند را می توان بصورت پالسی یا پیوسته به همراه لیزر بعنوان منبع اولیه انرژی بکار برد. بسیاری عوامل که در جدول ۱۰ نشان داده شده است در سوراخ کردن و برش لیزری موثر هستند. قوانین مهندسی مربوط به خود لیزر، نور، دینامیک سیالات و مواد می باشند.

جدول ۱۰ : عوامل موثر بر برشکاری و سوراخ کاری با لیزر [۲]





## ۲-۲- کیفیت برش

برش های لیزری با کیفیت بالا را می توان با روش های مناسب بدست آورد دانسیته بالای انرژی قابل دسترس در این فرآیند، باعث می شود مواد با حداقل ورودی حرارتی و حداقل تغییر سطح برش جدا شوند. یک عامل کلیدی در بدست آوردن کیفیت خوب یا حداقل ورودی حرارتی، حالت لیزر است. حالت <sup>۱</sup> لیزر توزیع انرژی در اشعه را تعیین می کند. حالت بهینه لیزر توزیع گوسی دارد. این توزیع گوسی باعث می شود اشعه لیزر بتواند روی کوچکترین نقطه متمرکز شود. کوچکتر شدن نقطه تمرکز<sup>۲</sup> موجب حداقل شدن حرارت ورودی و حداکثر شدن نرخ تغذیه می گردد.

طول کانونی لنز نیز کیفیت را تحت تاثیر قرار می دهد. معمولاً با افزایش ضخامت قطعه، طول کانونی نیز باید در ازای قطر اشعه ثابت افزایش یابد. هر چه طول کانونی لنز بیشتر باشد، عمق میدان بیشتر شده و دانسیته نیروی مناسب برای برش ماده حفظ می شود. موقعیت کانونی در ماده، برای حفظ دقت نتایج مهم است. معمولاً این تنها متغیر کنترل شده در زمان حقیقی در روش های تمرکز خودکار است. در روش متداول تمرکز خودکار استفاده از حسگرهای مکانیکی و خازنی (ظرفیتی) است. روش مکانیکی با مکانیزم فنری عمل می کند که ماده مورد برش را برای حفظ تمرکز مناسب به حرکت در می آورد. این روش بیشتر در برش ورق تخت بکار می رود. روش حسگر ظرفیتی برای مواد هادی بکار می رود. ترکیب مناسب متغیرهای مذکور، موجب بهبود کیفیت در بسیاری از مواد می شود.

## ۳-۴- ایمنی در برشکاری لیزری

ملاحظات ایمنی در برش لیزری را می توان به دسته های زیر تقسیم کرد:

- ۱- ایمنی کلی
- ۲- منابع نیروی ولتاژ بالا
- ۳- قرارگیری در معرض نور مستقیم
- ۴- فومهای ایجاد شده از مواد برش داده شده

۱-Mode

۲-Focus Point

هر یک از این ملاحظات بطور جداگانه در بخش های آتی مورد بررسی قرار میگیرد. بخش ایمنی کلی حاوی تعاریف و عبارات مورد استفاده در این راهنما است. راهنماهای ایمنی لیزر باید توسط تمامی افرادی که در ارتباط با آن کار می کنند مطالعه و فهمیده شود.

استاندارد مورد استفاده در آمریکا برای طراحی یک وسیله لیزری ۱۳۶/۱ ANSLZ "استفاده ایمن از لیزر" می باشد. در این استاندارد جزئیات و معیارهای مورد نیاز ساخت تجهیزات لیزری ذکر شده و مسائل متداول در ایمنی لیزر تعریف شده است با وجودی که تجهیزات جدید نباید مشکلی برای برطرف کردن این نیازها داشته باشند، باید به خاطر داشت که تغییر دادن تجهیزات فعلی نیز باید این شرایط را دارا باشد.

۱۳۶/۱ ANSLZ همچنین دسته بندی خطرات ناشی از لیزر را نیز ارائه می کند. ۴ دسته تعریف شده است که فقط لیزر دسته ۴ (نیروی بالا) برای برش بکار می رود. با این وجود در برخی سیستم های برش لیزری از نور مرئی "کم نیرو" لیزر هلیوم - نئون نیز استفاده می شود. علائم هشدار دهنده مناسب باید در مناطقی که لیزر وجود داشته باشد تعبیه شود. باید به خاطر داشت که یک اشعه نیروی بالا که متمرکز یا تعدیل شده، در فواصل دورتر، خطرناک تر از اشعه متمرکز شده است. برخی لیزرها ممکن است صدای زیادی تولید کنند، بخصوص اگر در محیط بسته مورد استفاده قرار گیرند، باید ایمنی گوش نیز رعایت شود و از یک متخصص برای روش های مناسب حفاظتی در مقابل این صداها مشاوره گرفته شود.

## ۵- برش با جت آبی<sup>۱</sup>

### ۵-۱- مقدمه

برشکاری جت آب که به آن برشکاری هیدرودینامیک هم گفته می شود روشی برای برش انواع مواد، اعم از فلزی و غیر فلزی است که در آن از جت آبی با سرعت بالا استفاده می شود. این جت از طریق رانش آب از یک منفذ با قطر ۰/۰۰۴ تا ۰/۰۲۴ اینچ (۰/۱ تا ۰/۶ میلی متر) با فشار بالا (۳۰۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ psi) ایجاد می شود. سرعت جت از ۱۷۰۰ تا  $\frac{ft}{s}$  ۳۰۰۰ متفاوت است. در این سرعتها و فشارها، آب مانند یک تیغ اهر عمل می کند و بسیاری مواد را به راحتی می برد. جریان آب با نرخ ۰/۱ تا ۵ گالون در دقیقه معمولاً از طریق یک روبات یا یک سیستم جرقه ای ایجاد می شود.

<sup>۱</sup>Water Jet Cutting

اما قطعات کوچک بصورت دستی از محل جت آب عبور داده می شوند. فاصله محل خروج آب تا قطعه ۰/۰۱ تا ۱ in بوده و مقدار ۰/۲۵ اینچ ارجحیت دارد.

فلزات و دیگر مواد سخت با اضافه کردن یک ماده ساینده بصورت پودر به آب، بریده می شوند. با این روش، که به آن برشکاری هیدروسایشی یا برشکاری جتی سایشی گفته می شود، ذرات ساینده (از جنس سنگ لعل) توسط آب شتاب می گیرند و عمل برش را انجام می دهند. نرخ بیشتری از جریان آب برای شتاب دادن به ذرات ساینده مورد نیاز خواهد بود.

در این روش مواد با سرعتی بیش از اره های تسمه ای، به صورت تمیز و بدون لبه دادن یا حرارت بریده می شوند. یک شکاف باریک و صاف (۰/۰۳ تا ۰/۱ in) ایجاد می شود. در این روش مشکل ورقه ورقه شدن، تغییر شکل یا مشکل حرارتی پیش نمی آید و غبار نیز تولید نمی شود. سیستم های جت آبی و ساینده، قابل رویت با فرآیندهای مشعل اره تسمه ای، چاقوی رفت و برگشتی، برش شعله ای، پلاسما و برش لیزری هستند. به این روش می توان موادی که حرارت برای آنها مضر است یا ابزار مکانیکی برش برای آنها مشکل ساز است را برش داد.

بازه بسیار وسیعی از موادی را که می توان به این روش برید در جدول ۱۱ آمده است. ماشین کاری آب و جت ساینده معمولاً بعنوان سیستم های فراوری ورق شناخته می شوند، اما لزوماً اینطور نیست. نمونه هایی از برش های روی فولاد کربنی با ضخامت ۷/۵ in، آلومینیم ۷۰۷۵-T۶ با ضخامت ۳in، گرافیت-اپوکسی ۴۷۰ لایه با ضخامت ۲/۵ in و تیتانیوم با ضخامت ۱۰ in انجام شده است.

جدول ۱۱: سرعت برشکاری جت آبی در مواد مختلف [۴]

Material	Thickness		Travel Speed	
	in.	mm	in./min.	mm/s
ABS Plastic	0.080	2.0	80	34
Cardboard	0.055	1.4	240	102
Corrugated cardboard	0.250	6.4	120	51
Circuit board	0.103	2.6	100	423
Leather	0.063	1.6	3800	1600
Plexiglass	0.118	3.0	35	15
Rubber	0.050	1.3	3600	1500
Rubber-backed carpet	0.375	9.5	6000	2500
Wood	0.125	3.2	40	17

## ۵-۲- مصارف و مزایا

بازه وسیع کاربرد و نبود حرارت از مزایای برش جت آبی هستند. گستردگی فرآیند با برش هایی که روی فولاد کربنی، برنج، آلومینیم و فولاد زنگ نزن زده شده مشخص می گردد. یک جت ساینده برای برش لایه های مواد مختلف، مثل لایه های ساندویچی فلزات و غیر فلزات مفید است. از آنجا که جت سایشی قادر به سوراخ کردن اکثر فلزات است، سوراخ کردن قبلی فلز ضروری نبوده و برش می تواند جهت دار باشد. شکل های متعددی را می توان برید که به محدودیت های سیستم کنترلی و اندازه قطعه بستگی دارد. باریک کردن شکاف معمولاً مشکل نیست مگر این که سرعت برش بسیار زیاد و قطعه بسیار ضخیم باشد یا منافذ گرفتگی داشته باشند. به صاف کردن لبه ها نیازی نیست و کنترل روباتی فرآیند امکان پذیر است. دقت به نوع تجهیزات و ماده و ضخامت قطعه بستگی دارد و می تواند تا  $\pm 0.004$  in از لحاظ ابعاد و  $\pm 0.002$  in از لحاظ محل باشد. در مقایسه، دقت در برش لیزری بیشتر است. در برش جت آبی ساده، عرض شکاف معمولاً  $0.005$  in یا بیشتر است در برش جت آبی ساینده این مقدار به  $0.022$  in می رسد. جت آبی با خروج از منفذ پخش می شود و در نتیجه شکاف در زیر عریض تر از بالا است.

به جز در سیستم های پیچیده هوا و فضا برنامه ریزی بیشتر سیستم های CNC جت آبی وساینده، ساده است.

## ۵-۳- محدودیت ها

سرعت برش به نسبت کم، بزرگ ترین محدودیت سیستم برش جت آبی است. دیگر محدودیت این است که باید وسیله ای برای خروج آب اضافی سیستم تعبیه شود. هزینه سرمایه اولیه زیاد است زیرا پمپ ها و محفظه های فشار برای راندن سریع و مستقیم جت آب مورد نیاز هستند. ماده ای که بریده می شود باید نرم تر از ساینده مورد استفاده باشد. فلزات نازک چکشوار بر اثر جت سایشی دچار تنش خمشی شده و لبه ای می شوند. در سرامیک هایی که به این روش برش داده می شوند کاهش استحکام پس از پخت ایجاد می شود. منافذ باید هر ۲ یا ۴ ساعت در سیستم های جت آبی سایشی تعویض شوند. ماسه سنگ ساینده باعث فرسایش منفذ شده و جت آب تقارن خود را از دست داده و باعث بد شدن کیفیت برش می شود. آب مورد استفاده باید بصورت بهینه یون زدایی شده و توسط صافی فیلتر و ذرات بزرگتر از  $0.5$  میکرون جدا شود تا هزینه های نگهداری دستگاه کم شود. در

بسیاری سیستم ها از فیلترهای خطی ساده روی ورودی آب استفاده می شود. آب اضافه و دوغاب حاصل از عملیات برش باید به درستی تخلیه شود.  
عمر خستگی لبه های برش جت آبی سایشی در سازه های بحرانی هوا و فضا می تواند کمتر از لبه برش خالص در ماسه سنگ درشت ۶۰ باشد. کاهش اندازه ذرات به ۱۵۰ موجب افزایش ۵۰ درصدی عمر خستگی و کاهش سرعت برش می شود.

#### ۵-۴- اصول

آب ورودی اول از یک پمپ فشار عبور می کند و فشار آن به ۱۹۰ psi می رسد و فیلتر می شود سپس پمپ افزایشده فشار آب ۳۰۰۰۰ psi تا ۶۰۰۰۰ psi با نرخ جریان تا  $\frac{3}{5} \frac{\text{galon}}{\text{min}}$  ایجاد می کند. جریان با عبور از منفذ، جت آبی تولید می کند سرعت جت به فشار آب بستگی دارد. در برش ماشینی مواد ساینده خشک از طریق یک کیف به محفظه اختلاط وارد می شوند. سپس فشار آب ذرات را تا سرعتهای مافوق صوت شتاب می دهد. دوغاب با سرعت بالا تنظیم می شود و سپس از منفذی با قطر ۰/۰۲ تا ۰/۰۹ in خارج می شود. جتهای آبی را میتوان با قطر تا ۰/۰۳ in برای برش کاغذ نیز تنظیم کرد. جت های سایشی معمولاً کوچکتر از ۰/۰۹ in ساخته نمی شوند.  
بسته به خواص ماده مورد نظر، برش واقعی نتیجه فرسایش، نیروی برشی و یا شکست تحت تغییر ناگهانی میدان های تنش می باشد. در این فرآیند تغییر شکل های مکانیکی یا حرارتی ایجاد نمی شود. کار سختی کمی در فلز در سطح برش ایجاد می شود. بعد از شکاف، آب یا آب و ماده سایشی در یک محفظه یا جمع کننده جمع می شود.

#### ۵-۵- متغیرهای فرآیند

عمق برش و خواص سطحی برش با پارامترهای زیر تغییر می کند:

- ۱- فشار جت آب و قطر آن
- ۲- اندازه، نوع و نرخ جریان ماده سایشی
- ۳- سرعت حرکتی
- ۴- زاویه برش
- ۵- تعداد دفعات



با افزایش فشار، افزایش قطر جت و کم کردن سرعت حرکت، ضخامت و دانسیته قطعه ای که می توان برش داد افزایش می یابد. افزایش نرخ جریان آب، ماده ساینده، یا هر دو و افزایش اندازه ماده سایشی، سرعت برش جت سایشی را افزایش می دهد. استفاده از ذرات سایشی ریزتر و سرعت برش کمتر باعث بهبود کیفیت لبه برش ها می شود.

افزایش فشار آب در برش جت سایشی موجب افزایش ضخامت صفحه قابل برش می شود زیرا سرعت ذرات افزایش می یابد. فشار بهینه ۳۰۰۰ تا ۴۵۰۰ psi باقی می ماند زیرا فشار بالاتر موجب افزایش هزینه نگهداری دستگاه ها می شود در حالی که مزیت کمی در فرآیند دارد. ذرات سایشی ریز، زیر ۱۵۰ مش، نسبتاً بدون اثر هستند موثرترین اندازه برای برش فلزات برای مصارف عمومی ۶۰ یا ۸۰ مش است. برای سرامیکهای بسیار سخت گاهی از کربید بور بعنوان ماده ساینده استفاده می شود.

نرخ جریان با سایش بالا موجب افزایش هزینه برش می شود. نرخ جریان اسمی  $2 \frac{lb}{min}$  یا  $\frac{0.12\$}{lb}$  هزینه ای معادل  $14/4 \$$  در ساعت در برخواهد داشت که هزینه تمیزکاری و تخلیه را شامل نمی شود به این ترتیب روش پر هزینه می باشد. نرخ جریان بالا موجب فرسایش سریع منافذ اختلاط نیز می شود. در حالی که بسیاری از عملیات ها در یک دور تکمیل می شوند، برای برش بهینه فلزات ضخیم ممکن است به چند دور برش نیاز باشد به این ترتیب فاصله انحراف در هر دور زیاد است و به همین علت لازم است سرعت حرکت کم شود.

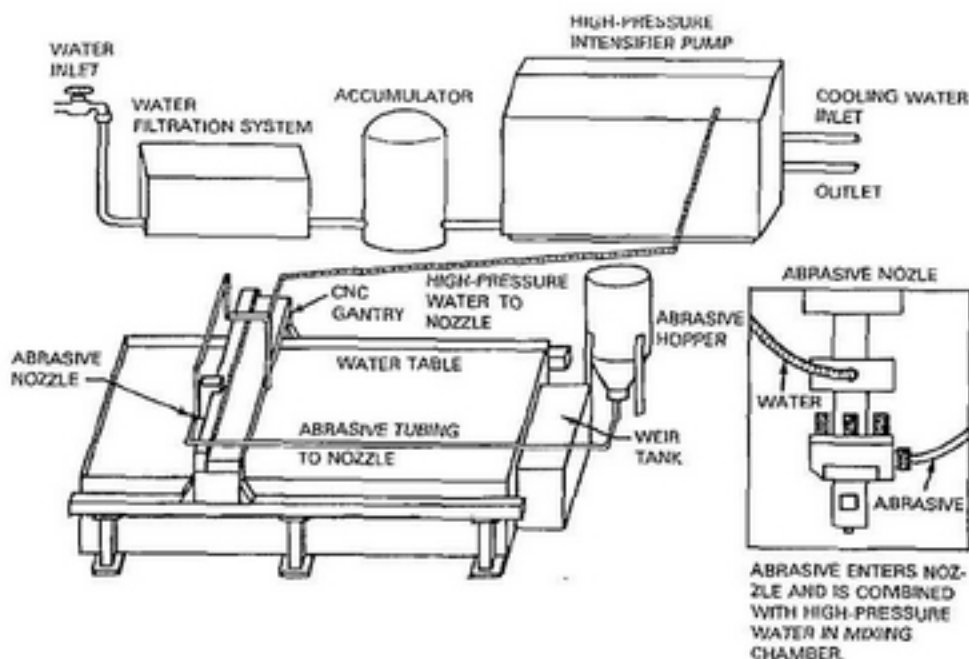
## ۵-۶- تجهیزات

قطعات کلیدی تجهیزات جت آبی یا سیستم جت آبی فرسایشی عبارتند از:

- ۱- پمپ مخصوص فشار بالا یا شدت دهنده مورد استفاده برای تامین جریان آب
- ۲- لوله ها و مخزن لازم برای آب
- ۳- روبات ها یا هر سیستم انتقالی برای عبور و هدایت جت آب
- ۴- واحد نصب منفذ که جت را تشکیل می دهد.

در حالت جت های آبی فرسایشی، دارای یک سیستم فرسایشی شامل یک قیف، یک شیر اندازه گیری و یک واحد اختلاط هستند که ذرات سایشی را با جریان آب مخلوط می کنند (شکل ۲۳).





شکل ۲۲: سیستم برشکاری جت آبی با مواد ساینده [۲]

نمونه های متعددی از دستگاه های برش شعله ای وجود دارد که به برش جت آبی تبدیل شده اند.

## ۵-۷- مواد مصرفی

ماده مصرفی و آسیب پذیر اصلی در تجهیزات جت آبی منفذ خروجی آب و در سیستم های سایشی، منفذ خروجی آب و کربور سایشی است در سیستم های جت آب خالص یک دستگاه دست ساز می تواند تا ۷۰ ساعت کار کند. در سیستم های سایشی منافذ کربور سایشی فقط ۲ تا ۴ ساعت عمر می کنند. آب، ماده سایشی و برق دیگر مواد مصرفی هستند.

## ۵-۸- کاربردها

در حال حاضر صدها کارخانه در ده ها کشور عملیات برشکاری را با جت آبی انجام می دهند که شامل بیش از ۱۰۰ روبات مجهز به جت آبی می باشد. صنایعی چون خودروسازی، هوا فضا، و نیروهای

دفاعی، مورد مدارها، ریخته گری، صنایع غذایی، شیشه، معدن، نفت و گاز، بسته بندی، کاغذ، لاستیک، کشتی سازی و مراکز خدمات فولاد از این تکنولوژی جهت برش استفاده می کنند. برش دایره ای تیغ اره ای با استفاده از ماشینکاری هیدروسایشی در شکل ۲۴ نشان داده شده است.



شکل ۲۴: برش دایره ای تیغ اره با استفاده از برشکاری هیدروسایشی [۲]

کاربردهای هوافضا شامل برش جت سایشی سازه های کامپوزیتی پیشرفته، تیتانیوم، نیکل، کبالت و برش فلزات و فایبرکلاس است. برشکاری جت آبی سایشی بخصوص برای برش کامپوزیت ها مناسب است زیرا لایه لایه شدن و آسیب حرارتی وجود ندارد. از جت های سایشی برای حذف ماسه از قطعات آهنی و پوشش های سرامیکی تک پوسته ای در ریخته گری دقیق استفاده می شود.

#### ۵-۹- مسائل ایمنی

از آنجا که جت آبی یا جت سایشی به راحتی قادر به بریدن گوشت و استخوان است، ایمنی لازم برای اپراتور ضروری است. صدای تولید شده در حین برش معمولاً ۸۰ تا ۹۵ دسی بل است اما ممکن

است به ۱۲۰ دسی بل هم برسد. مسائل ایمنی اپراتور برای صداگیری انجام شده اما اپراتور باید از گوشی هم استفاده کند.

برسنتل، باید در کار با تجهیزات فشار بالا و خط آب آموزش دیده باشند. هر سیستم برش باید دارای محافظ برای جلوگیری از تخلیه آب با فشار بالا در صورت خرابی هر یک از لوله ها باشد. حسگرهای فشاری برای توقف سیستم در صورت خرابی لوله ها وجود دارد.

## ۶- برش مکانیکی برای آماده سازی جوش

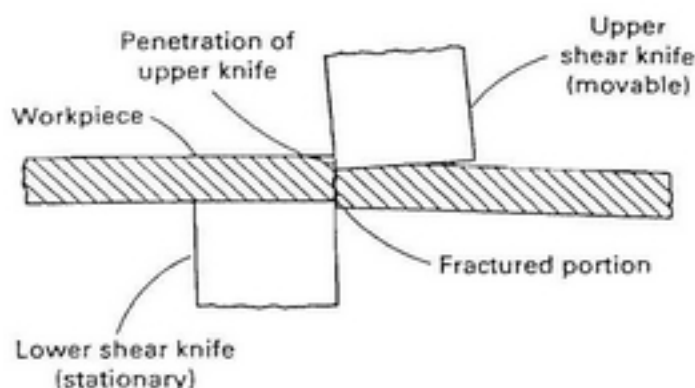
برش سوخت اکسیژنی<sup>۱</sup> و پلاسما متداول ترین فرآیندهای مربوط به آماده سازی مواد برای برشکاری می باشند، با این وجود روش های برش مکانیکی نیز کاربرد وسیعی در صنایع ساخت فلزات دارند. متداول ترین وسیله های مورد استفاده برای برش مکانیکی عبارتند از: قیچی برش، آهن بر، گیره و اره تسمه ای.

### ۶-۱- قیچی برش

قیچی های برش معمولاً برای آماده سازی مواد بزرگ و نسبتاً نازک بکار می روند (ضخامت کمتر از ۲۵ mm تا ۱ in) و آنها را به ابعاد نهایی برش می دهند. اگر دستگاه های برش به خوبی نصب و تنظیم شده باشند، لبه های تمیز و صاف بدست می آید برای مقاطع نازک، آماده سازی لبه ها که توسط shearing تامین می شود، می تواند تنها مورد لازم برای عملیات جوشکاری باشد. این قانون وجود دارد که موادی که دارای ضخامت ۱۰ mm (۳/۸ in) یا بیشتر هستند، نیازمند آماده سازی بیشتر خواهند بود. صاف بودن لبه بریده شده علت اصلی استفاده از دیگر تجهیزات خواهد بود. دو نوع اصلی قیچی های برش، نوع تیغه مستقیم و نوع چرخان می باشد. نوع تیغه مستقیم کاربرد بیشتری دارد.

در قیچی تیغه مستقیم، قطعه بین یک تیغه پایینی ثابت و یک تیغه بالایی متحرک قرار می گیرد. با پایین آمدن تیغه بالایی، تیغه نا کسری از ضخامت قطعه در آن فرو می رود سپس قسمتی که فرو رفتگی در آن ایجاد نشده می شکند و قطعه جدا می شود (شکل ۲۵).

<sup>۱</sup>Oxyfuel



شکل ۲۵: تصویر شماتیک از دستگاه برش تیغه مستقیم [۲]

مقدار فرورفتن تیغه به چکش خواری و ضخامت فلز مورد نظر بستگی دارد. تیغه از ۳۰٪ تا ۶۰٪ ضخامت قطعه در فولادهای کم کربن فرو می رود که به ضخامت آن بستگی دارد. برای فلزات چکشخوارتر مثل مس، این فرورفتگی بیشتر خواهد بود. برعکس در فلزاتی که سخت تر از فولاد کم کربن هستند فرورفتگی کمتر است. لبه بریده شده را می توان از روی صافی قسمت فرورفته و زبری نسبی قسمت شکسته شده تشخیص داد. لبه های بریده شده قابل مقایسه با لبه های ماشین کاری شده نیستند ولی وقتی تیغه ها تیز نگه داشته شوند و تنظیم آنها صحیح باشد می توان لبه های بریده شده ای بدست آورد که برای بسیاری کاربردها مناسب باشد. کیفیت لبه های بریدگی معمولاً با کاهش ضخامت قطعه افزایش می یابد.

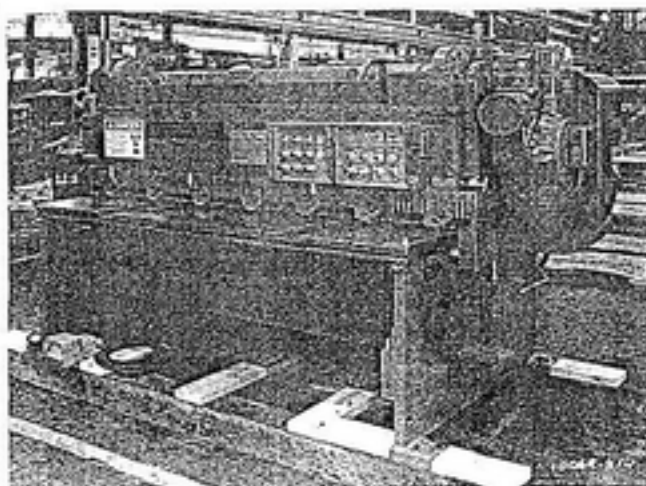
قابل قبول بودن برش تیغه مستقیم اقتصادی ترین روش برش قطعات با لبه صاف با ضخامت کمتر از ۵۰ mm (۲ in) می باشد. این فرآیند کاربرد گسترده ای نیز در برش ورقهایی دارد که بعداً شکل دهی یا کشش روی آنها انجام می شود. از آنجا که سنجه های برش را می توان تا  $\pm 0.13 \text{ mm}$  ( $\pm 0.005 \text{ in}$ ) تنظیم کرد، فرآیند برش معمولاً به  $\pm 0.14 \text{ mm}$  محدود می شود. این بازه دقت با افزایش ضخامت افزایش می یابد. برش تیغه مستقیم به ندرت برای برش فلزاتی سخت تر از ۲۰ HRC بکار می رود. وقتی فلزات بسیار نرم و چکشخوار بریده می شوند، لبه های فلز گرد شده و صدای زیادی نیز تولید می شود. با افزایش سختی قطعه، عمر تیغه برای ضخامت ثابت فلز کاهش می یابد.

بطور کلی در عمل می توان تا ضخامت ۲۸ mm را با برش مربعی برش داد. برش های مربعی تا طول ۹ m نیز وجود دارد و در برخی از انواع فاصله وجود دارد که اجازه می دهد برش قطعه بلندتر از تیغه برش باشد.

## **۶-۲- دستگاههای برش تیغه مستقیم**

گاهی برای برش تعداد کم قطعات یا مواردی که تجهیزات مناسب تری موجود نباشد، از پرس پاتچ استفاده می شود. با این وجود برش معمولاً در دستگاه هایی صورت می گیرد که برای همین عملیات طراحی شده باشد.

ماشین های برش مربعی معمولاً برای برش ورق یا صفحه مشخص بکار می روند (شکل ۲۷). این ماشین ها در اندازه و طرح های مختلف موجود هستند. در برخی انواع می توان قطعه را تا مقدار تعیین شده ای در جهت موازی لبه برش تیغه حرکت داد. ورق یا صفحه توسط قسمت های نگه دارنده محکم نگه داشته می شود و تیغه بالایی حرکت کرده و از تیغه پائینی عبور میکند. بیشتر ورقها یا صفحه ها در حالتی بریده می شوند که تیغه بالایی دارار زلویه باشد. موقعیت یک تیغه را می توان تنظیم کرد تا فاصله بین تیغه ها بصورت بهینه حفظ شود. برش های مربعی را می توان بصورت مکانیکی، هیدرولیکی یا نیوماتیک انجام داد.



شکل ۲۶: دستگاه برش مریخی [۳]

### ۳-۶- برش های مکانیکی

برش مکانیکی از موتور، چرخ طیار، محور کرمی، که توسط چرخ طیار با دنده حرکت می کند، یک کلاچ، که دنده کرمی را به محور وصل می کند، و اتصالات مربوطه تشکیل می شود. تحت بیشتر شرایط عملیاتی، برش مکانیکی می تواند به دفعات بیشتری در دقیقه، نسبت به برش هیدرولیکی انجام شود. برخی سیکل های برش مکانیکی با سرعت ۱۰۰ spm نیز انجام می شوند.

دیگر مزیت برش مکانیکی این است که به خاطر انرژی ذخیره شده در چرخ طیار، می توان از موتور کوچکتری برای برشهای منقطع استفاده کرد. به عنوان مثال دستگاه برش مکانیکی با سرعت آزاد ۶۵ spm می تواند حدود ۶ دور برش با ظرفیت کامل (حداکثر ضخامت و طول برش) در حالت سریع انجام دهد. برای چنین برش سریعی، زمان کافی بین برش های موتور کوچکتر، برای بازیابی سرعت چرخ طیار وجود ندارد. مزیت دیگر برش مکانیکی این است که تیغه متحرک، سریعتر از تیغه متحرک برش هیدرولیک عمل می کند. در برخی موارد سرعت تیغه بیشتر باعث کاهش خمش، تا شدن یا برآمده شدن قطعه می شود. برش هیدرولیک توسط یک پمپ موتوری انجام می شود که روغن را از طریق یک سیلندر در مقابل یک پیستون به حرکت در می آورد؛ حرکت پیستون به میله نگهدارنده تیغه بالایی انرژی می دهد. یک برش هیدرولیک می تواند دارای دوره های طولانی تر نسبت



به برش مکانیکی باشد. بطور کلی برش های طولانی و برشهای فولادهای کم کربن با ظرفیت بالای ۱۲/۷mm تقریباً همگی هیدرولیک هستند.

برش های هیدرولیک را می توان با ظرفیت بار ثابت طراحی کرد. به این ترتیب اپراتور نخواهد توانست موادی را برش دهد که بیش از ظرفیت باشند و از آسیب های پرهزینه به سازه دستگاه جلوگیری خواهد شد. این یکی از مزایای اصلی برش هیدرولیک است. بار کلی که در حین برش اعمال می شود به زاویه گیرش، تمیزی تیغه ها، خواص مکانیکی ماده، نوع ماده، فاصله تیغه و عمق قطعه عقبی بستگی دارد. اگر فاصله صحیح نباشد، تیغه تیز نباشد و یا قطعه پستی زیادی عمیق باشد، می توان برش را متوقف کرد. به این صورت برش هیدرولیک از آسیب های ناشی از بار اضافی در امان خواهد بود. برش مکانیکی دارای سیستم جلوگیری از بار اضافی نبوده و در تمام شرایط برش ادامه می دهد.

بیشتر برش های مکانیکی دارای نیروی کافی برای حفظ سرعت چرخ طیار بعد از هر برش هستند، اما این نیروها به فاصله تیغه، زاویه گیرش و عمق قطعه پستی بستگی دارند. برای جلوگیری از توقف برش هیدرولیک در هنگام برش قطعات با سطح زیاد بخصوص وقتی که حداکثر ظرفیت ضخامت مورد استفاده قرار می گیرد، باید فاصله تیغه ها افزایش یابد.

ظرفیت بیشتر دستگاه های برش بر اساس اندازه مقطع فولاد کم کربنی که می توانند برش دهند، سنجیده می شود. استحکام تنشی صفحه ای ورق فولاد کم کربن بیشتر از ۵۲۰MPa و استحکام تسلیم آن بیشتر از ۲۵۰MPa نیست. برش ها برحسب توانایی برش فولاد کم کربن با استحکام کششی

۴۱۴ MPa و استحکام تسلیم ۲۷۶ MPa سنجیده می شوند. استفاده از دستگاه برای برش دیگر مواد، به رابطه استحکام کششی و چکش خواری فولاد کم کربن با فلز مورد نظر بستگی دارد. فلزاتی که استحکام کششی بیش از فولاد کم کربن دارند، تقریباً همیشه ظرفیت دستگاه را کاهش می دهند. به عنوان مثال ظرفیت دستگاه برای برش فولادهای کم کربن با استحکام بالا به حدود  $\frac{2}{3}$  یا  $\frac{3}{4}$  ظرفیت فولاد کم کربن می رسد. بر عکس برای برش آلیاژهای آلومینیم ظرفیت دستگاه می تواند برابر ظرفیت برای فولاد کم کربن باشد.

در جدول ۱۲ ظرفیت برشی فلزات مختلف با ظرفیت فولاد کم کربن مقایسه شده است. ضخامت فلزات که در جدول ۱۲ آمده است بر پایه ضخامت فولاد کم کربنی است که میتواند با همان ظرفیت برش بریده شود. به عنوان مثال نیرویی که برای برش فولاد کم کربن با ضخامت ۶/۴mm لازم است،

طبق جدول ۱۲ نشان می دهد که همان نیرو فقط می تواند فولاد زنگ نزن ۳۰۲ با ضخامت ۴/۸ mm را برش دهد، اما می تواند آلومینیم با ضخامت ۹/۵ mm را برش دهد.

جدول ۱۲: ظرفیت های برشی فلزات مختلف در فولاد کم کربن [۲]

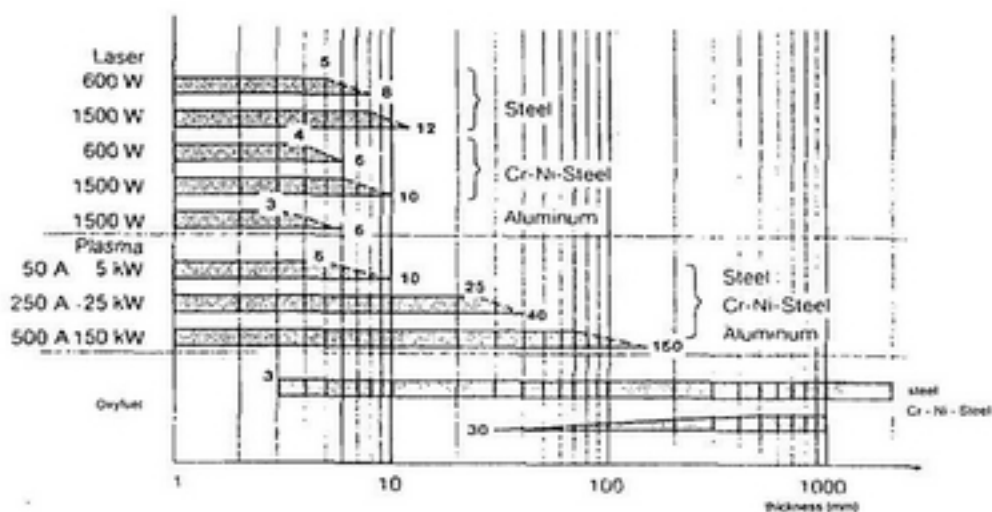
Thickness that can be sheared with same force as for low-carbon steel							
Thickness of low-carbon steel(a)		AISI type 303 stainless steel(b)		Full-hard steel strip		Aluminum alloys	
mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.
1.52	0.060	0.91	0.036	1.22	0.048	1.90	0.075
1.90	0.075	1.22	0.048	1.52	0.060	3.05	0.120
3.05	0.120	1.52	0.060	1.90	0.075	3.40	0.134
3.40	0.134	1.90	0.075	2.67	0.105	4.8	$\frac{3}{16}$
4.8	$\frac{3}{16}$	3.40	0.134	3.9	$\frac{3}{16}$	5.6	$\frac{3}{16}$
6.4	$\frac{1}{4}$	4.8	$\frac{3}{16}$	4.8	$\frac{3}{16}$	6.4	$\frac{1}{4}$
7.9	$\frac{5}{16}$	5.6	$\frac{3}{16}$	5.6	$\frac{3}{16}$	9.5	$\frac{3}{8}$
9.5	$\frac{3}{8}$	6.4	$\frac{1}{4}$	6.4	$\frac{1}{4}$	11.1	$\frac{7}{16}$
11.1	$\frac{7}{16}$	7.9	$\frac{5}{16}$	7.9	$\frac{5}{16}$	12.7	$\frac{1}{2}$
12.7	$\frac{1}{2}$	9.5	$\frac{3}{8}$	9.5	$\frac{3}{8}$	15.9	$\frac{5}{8}$
15.9	$\frac{5}{8}$	11.1	$\frac{7}{16}$	11.1	$\frac{7}{16}$	19.0	$\frac{3}{4}$
19.0	$\frac{3}{4}$	12.7	$\frac{1}{2}$	12.7	$\frac{1}{2}$	25.4	1
22.2	$\frac{7}{8}$	15.9	$\frac{5}{8}$	15.9	$\frac{5}{8}$	31.8	1 $\frac{1}{8}$
25.4	1	19.0	$\frac{3}{4}$	19.0	$\frac{3}{4}$	38.1	1 $\frac{1}{2}$
31.8	1 $\frac{1}{8}$	25.4	1	25.4	1	50.8	2

(a) Also applicable to soft to half-hard strip steel, alclad steel, and copper and copper alloys. (b) Also applies to most other austenitic stainless steels, non-austenitic alloy steels such as 4130 or 3630, annealed high-carbon steels, and annealed tool steels.

چکش خواری که توسط افزایش طول قطعه اندازه گیری می شود نیز می تواند ظرفیت دستگاه را تحت تاثیر قرار دهد. به عنوان مثال مس آنیل شده به خاطر افزایش زیاد طول همان مقدار نیروی برش فولاد کم کربن را نیاز دارد، با وجودی که استحکام کششی مس بطور قابل توجهی کمتر است. بطور مشابه فولادهای کربنی با کربن بسیار کم ( $C \leq 0.1\%$ ) و افزایش طول بیش از حد، ظرفیت دستگاه را کاهش می دهند.

## ۷- برشکاری حرارتی

برشکاری حرارتی به دو روش برشکاری شعله ای و برشکاری ذوبی تقسیم می شود. هر دو فرآیند برای آماده سازی درزهای جوش بر روی ورق ها پروفیل ها و لوله ها به کار می روند. در شکل ۲۷ کاربردهای برشکاری حرارتی برای فلزات و آلیاژهای مختلف آمده است.



شکل ۲۷: کاربردهای فرایندهای برشکاری حرارتی [۴]

## ۷-۱-۱- برشکاری شعله ای<sup>۱</sup>

از دیدگاه اقتصادی برشکاری شعله ای حالتی بین برش زدن<sup>۲</sup> و ماشینکاری<sup>۳</sup> می باشد. برش زدن عمدتاً برای مواد نازک و برشکاری شعله ای برای مواد ضخیم کاربرد دارد.

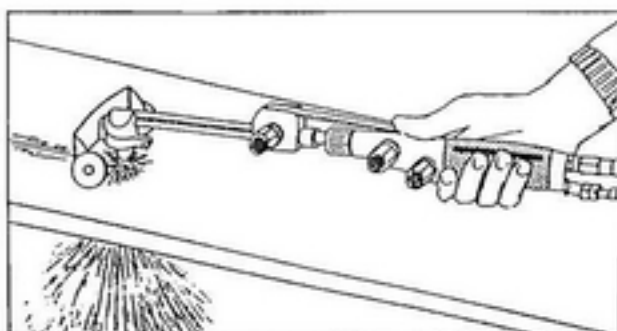
### ۷-۱-۱-۱- برشکاری دستی

برشکاری با لوله دمنده بوسیله دست می تواند با توجه به نوع کاربرد به صورت مستقیم یا چرخشی انجام گیرد. در برشکاری مستقیم یک ریل فولادی راهنما بر روی قطعه کار بسته می شود. کاتر شعله ای دستی با سرعت ثابت در امتداد ریل کشیده می شود. سپس یک راهنما، نوک نازل را در یک فاصله ثابت از سطح فلز نگه می دارد و با حرکت کاتر عمل برش انجام می شود (شکل ۲۹). در برشکاری چرخشی، کاتر شعله ای دستی بر روی یک میله شعاعی ثابت می شود سپس این میله توسط یک لولا در محل مورد نظر قرار می گیرد در این حالت فاصله نوک نازل برش از محل لولا به اندازه شعاع برش می باشد (شکل ۲۹).

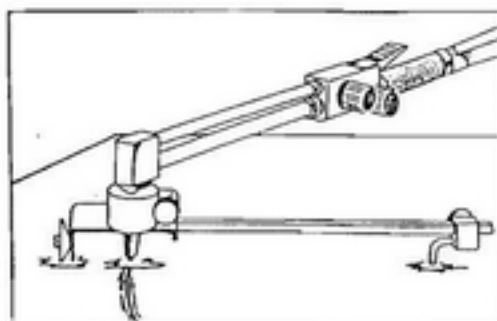
۱- Flame Cutting

۲- Shearing

۳- Machining



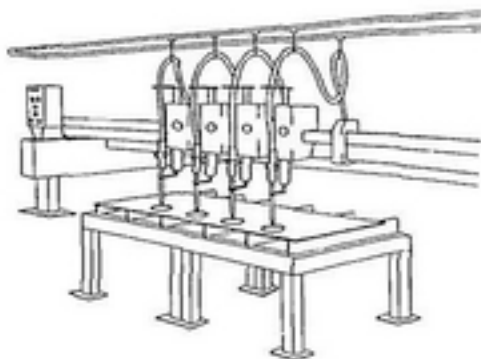
شکل ۲۸: برس دستی مستقیم [۴]



شکل ۲۹: برس چرخشی [۴]

## ۲-۱-۷- برشکاری ماشینی

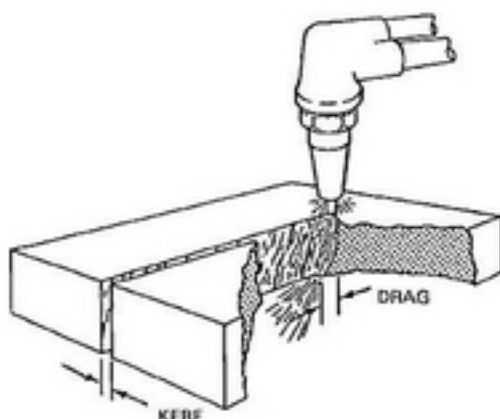
در این حالت تورچ برشکاری به طور ثابتی نگه داشته می شود و عمل برش با یک سرعت ثابت انجام می گیرد و یک برش بسیار دقیق ایجاد می گردد (شکل ۳۰). لبه های ایجاد شده در این حالت نیاز به عملیات ماشینکاری یا تمام کاری نهایی ندارند و اکسیدها از قسمت برش خورده به سادگی بوسیله برس سیمی خارج می گردد.



شکل ۳۰: برشکاری ماشینی [۴]

### ۷-۱-۳ برشکاری اکسی گاز

برشکاری شعله ای بر روی فولادهای غیر آلیاژی تا فولادهای کم آلیاژ با ضخامت های  $3mm$  تا  $100mm$  مناسب است. هنگامی که درجه حرارت تقریباً به  $1100^{\circ}C$  می رسد و در حضور اکسیژن، سوختن رخ می دهد و در نتیجه گرما و سرباره ایجاد می شود. در تماس با هوا، فولاد در  $1500^{\circ}C$  ذوب می شود. حرارت شعله سطح ماده را تا درجه حرارت احتراق گرم و آن را از انواع آلودگی ها تمیز می کند. سپس قطعه کار در امتداد مسیر گاز اکسیژن می سوزد. در نهایت عمل برش بوسیله حرکت تورج برشکاری انجام می شود و سرباره ای با ویسکوزیته پایین از شیار برش خورده خارج می شود. درجه حرارت ذوب لایه اکسیدی (سرباره) باید کمتر از درجه حرارت ذوب فلزات پایه باشد (شکل ۳۱).



شکل ۳۱: مکانیزم برشکاری شعله ای اکسی گاز [۲]

شعله مشتمل بر گاز استیلن ( $C_2H_2$ ) و اکسیژن خالص و ( $99.5\%O_2$ ) یا گاز پروپان و اکسیژن خالص است. در واقع گازهای گرمایش شعله عبارتند از:

۱- گاز طبیعی، پروپان، استیلن

۲- اکسیژن

گاز برشکاری اکسیژن است.

در جدول ۱۳ گازهای مورد نیاز برای روش های مختلف برشکاری آمده است.

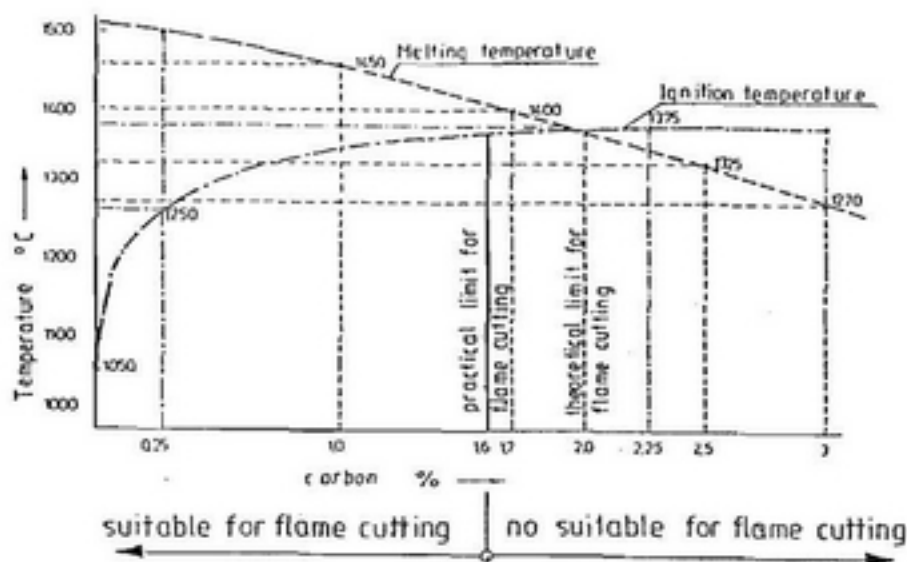
جدول ۱۳: مشخصات گازهای سوختی مختلف [۲]

Process	Gases
oxy-fuel gas cutting	acetylene, propane, oxygen
plasma arc cutting	argon, hydrogen, nitrogen, oxygen, $N_2/H_2$ -mixtures
laser beam cutting	laser gases ( $CO_2$ laser): helium, nitrogen, carbon dioxide, special laser gases; cutting gases: oxygen, nitrogen, argon



- مواد مناسب برای برشکاری اکسی گاز باید دارای مشخصه های زیر باشد
- ماده باید قابلیت سوختن توسط شعله اکسیژن را داشته باشد.
  - درجه حرارت احتراق برای سوختن باید کمتر از درجه حرارت ذوب ماده مورد نظر باشد.
  - درجه حرارت ذوب لایه اکسید باید کمتر از درجه حرارت ذوب فلز یا ماده مورد نظر باشد.
  - سرباره سوخته شده باید دارای گرانیروی پایین باشد.
  - هدایت حرارتی ماده مورد نظر باید پایین باشد.
- موادی که شرایط بالا را برآورده می کنند عبارتند از:
- ۱- فولاد غیر آلیاژی
  - ۲- فولاد کم آلیاژ
  - ۳- چدن ها

فولادهای با درصد کربن کمتر از ۰/۳٪، بدون مشکل خاصی قابل برشکاری گازی هستند اما فولادهای با درصد کربن (۰/۳ تا ۲٪)، نیاز به پیشگرم دارند (شکل ۳۲).



شکل ۳۲: امکان برشکاری شعله ای فولاد [۴]

#### ۷-۱-۴- مواد نامناسب برای برشکاری شعله ای

- ۱- آلومینیم ← شرط c را برآورده نمی کند.
- ۲- فولاد پرآلیاژ ← شرط d را برآورده نمی کند.
- ۳- مس ← شرط e را برآورده نمی کند.
- ۴- چدن خاکستری ← شرط a را برآورده نمی کند.

#### ۷-۱-۵- برش پذیری آلیاژهای فولادی

مقدار عناصر آلیاژی قابلیت برش پذیری فولاد را تعریف می کنند. جدول ۱۴ تاثیر عناصر آلیاژی را بر روی قابلیت برشکاری فولاد نشان می دهد.

جدول ۱۴ : تاثیر عناصر آلیاژی را بر روی قابلیت برشکاری فولاد [۴]

Element	Limit of alloys for cuttability
carbon C	All mild steels as well as steels with up to 0.3 % carbon. Higher concentrations require pre-heating. The upper theoretical limit is 2 % carbon, practical limit up to 1.7 %
silicon Si	Steel with up to 2.5 % silicon. With low carbon content up to 4 % silicon.
manganese Mn	Pure manganese steel with up to 1.3% carbon.
chromium Cr	Chromium content of up to 5 % does not reduce cuttability. When chromium steel is cut, the heating flame should have an excess of acetylene.
nickel Ni	Steel alloyed with up to 3 % nickel can be gas cut without difficulty.
copper Cu	Steel with up to 2 % copper.
tungsten W	Steel alloyed with up to 10 % tungsten.
molybdenum Mo	Molybdenum reduces the cuttability of steel, comparable with chromium.
aluminium Al	Normal concentrations do not affect the cutting process.
phosphorus (P) and sulphur (S)	Normal concentrations do not affect the cutting process.

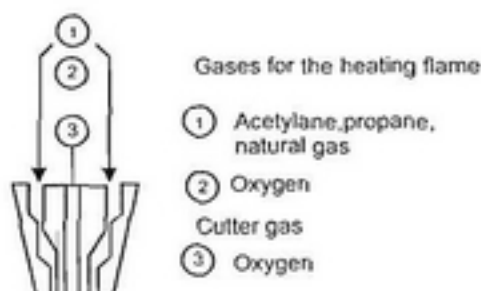
#### ۷-۱-۶- ابزار آلات برش

در رابطه با کاربرد ، کاترهای شعله ای به صورت زیر تقسیم بندی می شوند.

- کاتر دستی تک شعله
- سر تورچ برشکاری برای جوشکاری و برشکاری
- نفوذ کننده لوله دمنده
- دستگاه کاتر شعله ای

## ۷-۱-۷- نازل های برشکاری شعله ای

عمر کاری نازل های برشکاری به میزان دقت در نگهداری و استفاده صحیح از آن بستگی دارد و به دو دسته، یک بخشی و دو بخشی تقسیم بندی می گردد (شکل ۳۳).



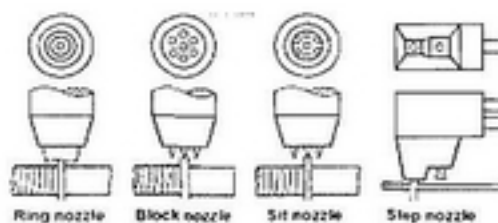
شکل ۳۳: نازل های برشکاری شعله ای [۱]

## • انواع نازل ها

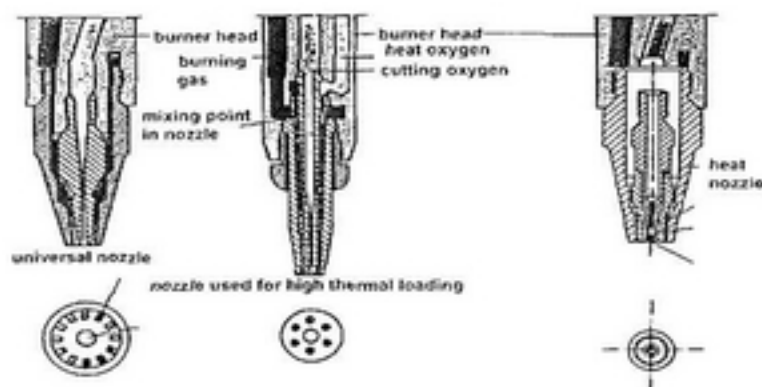
- ۱- نازل حلقه ای: این نازل از دو قسمت تشکیل شده است. فاصله بین شعله و قطعه کار تقریباً ۳ mm است.
- ۲- نازل بلوکی: این نازل دارای یک بخش است که قابل جدا شدن (تفکیک) نمی باشد. فاصله بین گرمای شعله و قطعه کار تقریباً ۷ mm است و لذا قطعه کار کمتر در معرض گرما و جرقه است.
- ۳- نازل شکاف دار: دارای دو بخش است. نگهداری و تمیز کردن آن ساده است. فاصله بین شعله و قطعه کار تقریباً ۷ mm است. و لذا به جرقه حساس نیست.

۴- نازل پله ای: برای بریدن ورق های نازک، بواسطه شعله کوچک آن ذوب سطحی ورق نازک اتفاق نمی افتد. برش منحنی در این حالت مشکل است. ترکیب نازل شعله و نازل برش، جهت برش را تعیین می کند.

در شکل ۳۵ انواع مختلف نازل ها و در شکل ۳۶ قسمت های مختلف یک نازل نشان داده شده است.



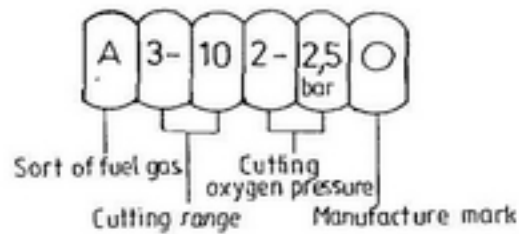
شکل ۳۴: انواع نازل ها [۱]



شکل ۳۵: قسمت های مختلف یک نازل [۲]

## • انتخاب نازل ها

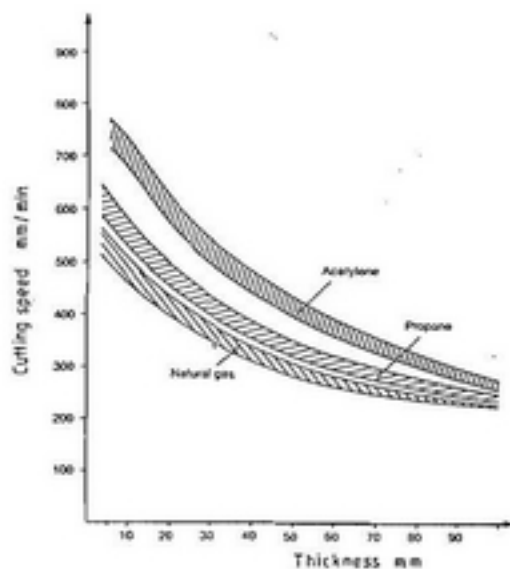
نوع نازل به ضخامت قطعه کار بستگی دارد. نازل ها به صورت شکل ۳۷ کدگذاری می شوند:



شکل ۳۶: کد گذاری نازل برشکاری [۴]

#### ۷-۱-۸- سرعت برش

کاربران با تجربه با توجه به پراکنده شدن جرقه ها و از صدای تولید شده بوسیله فرآیند برش می توانند حدس بزنند که آیا سرعت برش مناسب است یا خیر؟  
در شکل ۳۸ منحنی سرعت برشکاری شعله ای بر حسب ضخامت قطعه کار تحت شرایط مختلف نشان داده شده است:



شکل ۲۷: سرعت برشکاری در حالت شعله ای [۴]

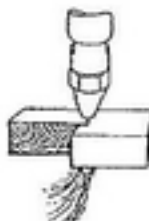
شکل های ۲۹، ۴۰ و ۴۱ الگوی جرقه های تولید شده در برشکاری صحیح، برشکاری با سرعت بالا و برشکاری با سرعت پایین را نشان می دهند. لبه های برش مناسب یا تیز تنها اگر درجه حرارت شعله به طور صحیح تنظیم شده باشد، ایجاد می شود.



شکل ۲۸: جهت برش به سمت راست - سرعت برش مناسب [۱]



Cutting direction →  
Cutting speed too high



شکل ۳۹: جهت برش به سمت راست - سرعت برش خیلی بالا [۱]

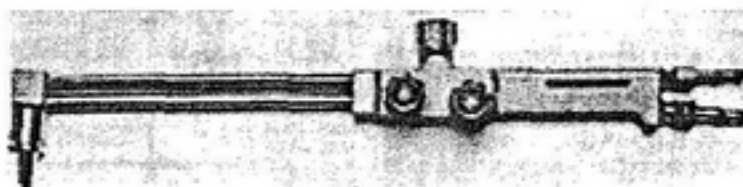
Cutting direction →  
Cutting speed too low



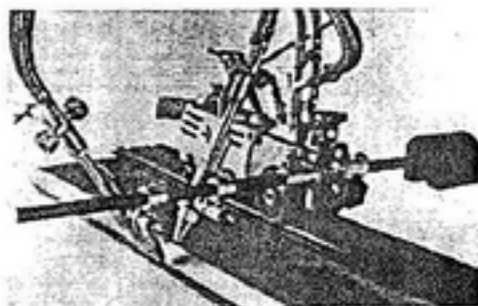
شکل ۴۰: جهت برش به سمت راست - سرعت برش خیلی پایین [۱]

## ۷-۱-۹- ابزار برشکاری

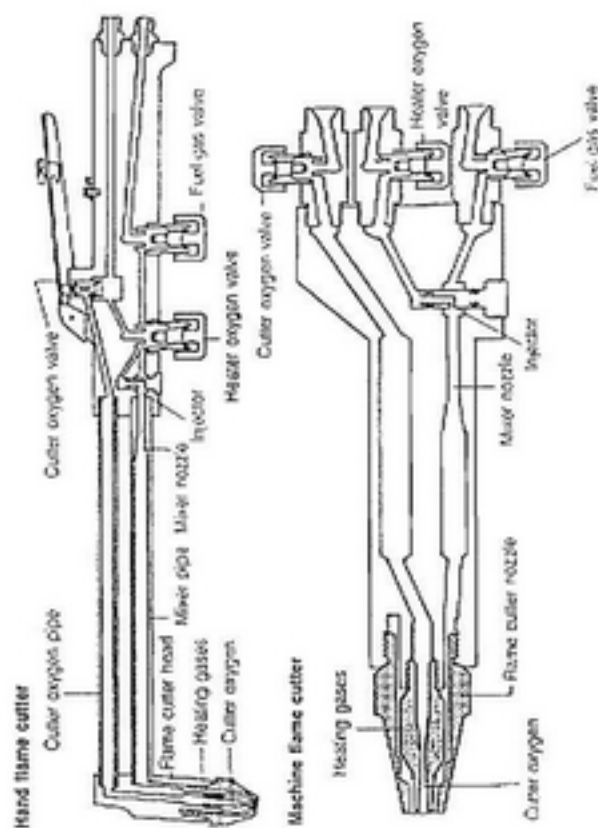
برشهای شعله ای قابل اجرا به صورت برشهای مستقیم، منحنی و عمودی و عرضی است. تورچ های برشکاری تک شعله دستی و تورچ های برشکاری چند شعله تقریباً شبیه به هم هستند. شکل های ۴۲، ۴۳، ۴۴ و ۴۵ نمونه هایی از تورچ های برشکاری را نشان می دهد.



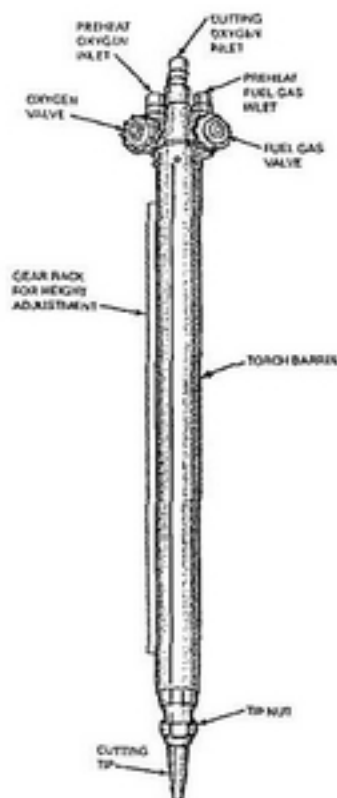
شکل ۴۱: تورچ دستی برشکاری شعله ای [۱]



شکل ۴۲: دستگاه دستی برشکاری شعله ای [۱]

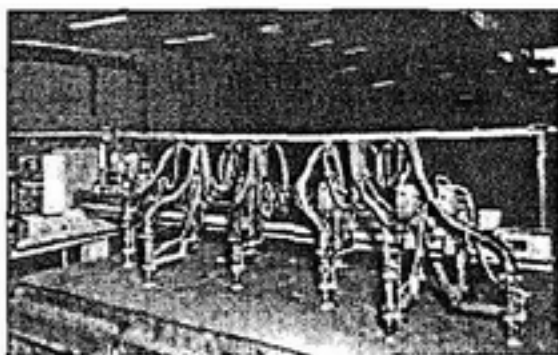


شکل ۴۳: تصاویر شماتیک کاربردهای دستی و ماشینی [۲]

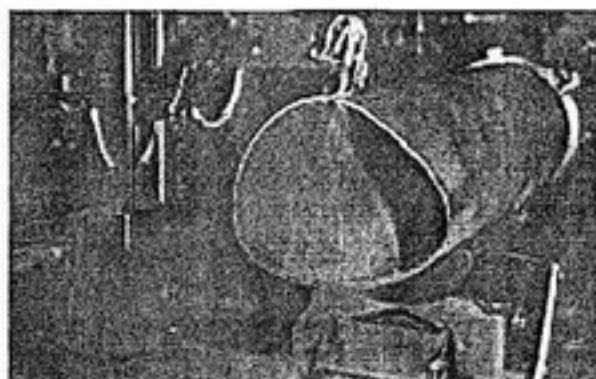


شکل ۴۴: تورچ برشکاری سه شپاکنه [۲]

شکل های ۴۶ و ۴۷ دو نوع دستگاه برشکاری شعله ای را نشان می دهند.



شکل ۴۵: دستگاه برشکاری شعله ای چند تایی [۱]



شکل ۴۶: دستگاه برشکاری شعله ای لوله [۱]

### • ابزارهای ویژه و تجهیزات کمکی

کنترل های فتوالکتریک، تنها قادر به انتقال اطلاعات مسیری می باشند. برعکس، کنترل های عددی می توانند کلیه اطلاعات (دگرگونی) را منتقل کنند.

برای تولید اتوماتیک زیاد، از ابزارهای متفاوت ویژه و تجهیزات کمکی استفاده می شوند:

سوراخ کننده (ناقد): اتوماتیک برای لبه پخ تا ضخامت ورق ۱۳۰ mm

کنترل ارتفاع مشعل: مکانیکی یا چرخ اسکن که به طور پیوسته ارتفاع تورچ را کنترل می کند.

### ۷-۱-۱۰- سخت شوندگی سطح برش

سخت شوندگی سطح برش فولاد به عوامل زیر بستگی دارد:

- ۱- درصد کربن
- ۲- درصد (مقدار عناصر آلیاژی)
- ۳- ضخامت قطعه کار (سرعت سرمایش)
- ۴- سرعت برش

شرایط زیر باید جهت جلوگیری از سخت شوندگی سطح برش برای مواد با درصد بالای کربن یا عناصر آلیاژی احراز گردد:

- پیشگرم کردن مواد
- کاهش سرعت سرد شدن
- بعد از برشکاری با شعله باید مواد مورد عملیات حرارتی قرار گیرند.

## ۷-۱-۱۱- کیفیت برش شعله ای

کیفیت برش از طریق قضاوت درباره عوامل زیر مشخص می شوند:

- زیری سطح
- عمق برش
- ذوب (نیمه ذوب)
- جدول ۱۵ عوامل مختلف را بر کیفیت شعله برش نشان می دهد.

جدول ۱۵ : تاثیر کیفیت شعله برش [۱]

flame cutter			
operating gas	nozzle	machine	material
<ul style="list-style-type: none"> <li>- pressure</li> <li>- amount</li> <li>- temperature</li> <li>- type</li> <li>- purity</li> <li>- mixing ratio</li> <li>- flow characteristics</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- construction</li> <li>- age</li> <li>- condition</li> <li>- distance to sheet</li> <li>- cutting angle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- construction</li> <li>- age</li> <li>- condition</li> <li>- cutting velocity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- composition</li> <li>- thickness</li> <li>- condition</li> <li>- errors</li> <li>- temperature</li> <li>- reaction <math>FeO_2</math></li> </ul>
quality of the flame cut			

## ۷-۱-۱۲- عوامل موثر بر کیفیت سطح برش

- ۱- نازل کاتر
  - شرایط نازل
  - ساختمان نازل
  - فاصله شعله نازل تا ورق فلزی

۲- گاز سوختنی

- فشار اکسیژن

۳- خلوص اکسیژن جهت برش

اکسیژن خالص تاثیر بسیار زیادی بر سرعت برش دارد. اکسیژن موجود در مخازن یا سیلندرها حداقل دارای خلوص ۹۹/۵٪ و به طور متوسط دارای خلوص ۹۹/۷٪ است. سرعت برشکاری با خلوص اکسیژن رابطه مستقیم دارد. هر چه میزان آلودگی ها در اکسیژن بیشتر باشد سرعت برشکاری پایین تر می آید.

۴- درجه حرارت شعله

۵- تنظیم شعله

اگر شعله خیلی بلند باشد آن گاه لبه بالای برش ذوب می شود و مقدار زیادی سرباره به لبه پایینی می چسبد.

۶- نسبت اکسیژن به گاز سوختنی (شکل ۴۸)

۷- تنظیم لوله دمنده گاز سوختنی

- موقعیت لوله دمنده گاز اکسیژن

- سرعت برش

۸- مواد

- ترکیب شیمیایی مواد

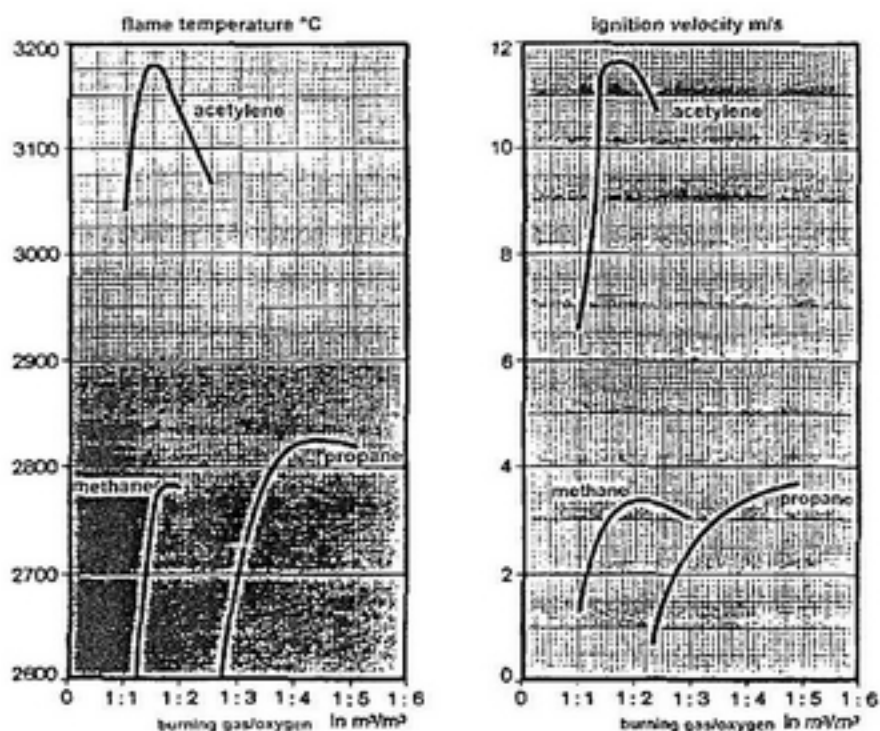
- عیوب نقص های مواد (سطح مواد)

- رنگ های سطحی

- تورق (ورقه ورقه شدن) مواد

شکل ۴۸ نسبت اکسیژن به گاز سوختنی و درجه حرارت شعله را نشان می دهد.

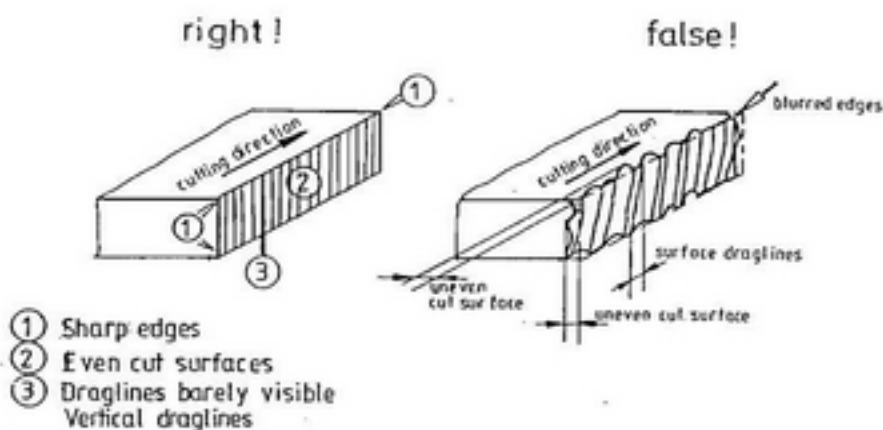




شکل ۴۷: نسبت اکسیژن به گاز سوختنی [۱]

### ۷-۱-۱۳-عیوب برش و علل آن

یک برش صحیح و مناسب برشی است که لبه ها و سطح برش تیز باشد و در ضمن خطوط برش عمودی بوده و خیلی عمیق نباشد. اگر یک برش دارای شرایط ذکر شده باشد سرباره چسبیده شده به انتهای برش به آسانی قابل حذف شدن است. در شکل ۴۹ دو نوع برش صحیح و ناصحیح آمده است.



شکل ۴۸: دو برش صحیح و نادرست [۴]

#### • عیوب لبه ها

۱- ذوب شدن و گرد شدن لبه بالایی

علت تشکیل عیب:

- سرعت پایین برشکاری
- گرمایش بالای شعله
- نازل خیلی بزرگ



شکل ۴۹: ذوب شدن و گرد شدن لبه بالایی [۴]

۲- پوسته پوسته شدن لبه بالایی

علت تشکیل عیب:

- سطح کثیف ورق فلزی

- فاصله خیلی کم نازل تا ورق فلزی
- شعله خیلی قوی



شکل ۵۰: پوسته پوسته شدن لبه بالایی [۲]

### ۳- ذوب شدگی لبه بالایی توسط سرباره

علت تشکیل عیب:

- فاصله خیلی زیاد نازل با سطح مقطع کار
- فشار قوی اکسیژن
- سرعت بالای برشکاری



شکل ۵۱: ذوب شدگی لبه بالایی توسط سرباره [۴]

### ۴- گرد شدن لبه های پایین

علت تشکیل عیب:

- کثیف شدن یا صدمه دیدن نازل
- فشار بالای اکسیژن
- سرعت بالای برشکاری



شکل ۵۲: گرد شدن لبه های پایین [۴]

#### • عیوب سطح برش

۱- انقباض شیار برش خورده

علت تشکیل عیب:

- فشار بالای اکسیژن
- سرعت بالای جوشکاری



شکل ۵۳: انقباض شیار برش خورده [۴]

۲- انقباض شیار برش خورده

علت تشکیل عیب:

- سرعت بالای برشکاری
- فاصله زیاد نازل تا سطح قطعه کار
- کشیف شدن یا صدمه دیدن نازل



شکل ۵۴: انقباض شیار برش خورده [۴]

### ۳- بریدگی کناره زیر لبه بالایی

علت تشکیل عیب:

- جریان نامنظم اکسیژن
- فشار بالای اکسیژن
- فاصله زیاد نازل تا سطح قطعه کار
- کثیف شدن یا صدمه دیدن نازل



شکل ۵۵: بریدگی کناره جوش زیر لبه بالایی [۴]

### ۴- بریدگی کناره در لبه پایینی

علت تشکیل عیب:

- سرعت بالای برشکاری
- کثیف شدن یا صدمه دیدن نازل
- جریان نامنظم اکسیژن



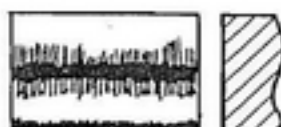
شکل ۵۶: بریدگی کناره در لبه پایینی [۴]

### ۵- پروفیل های موجی سطح برش

علت تشکیل عیب:

- سرعت بالای برشکاری

- کشیف شدن یا صدمه دیدن نازل
- فشار پایین اکسیژن
- جریان نامنظم اکسیژن
- بزرگ بودن نازل



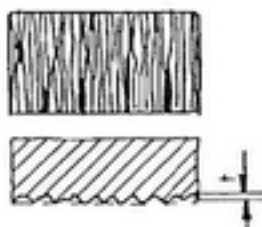
شکل ۵۷: پروفیل های موجی سطح برش [۴]

#### • عیوب خطی

۱- خطوط خیلی عمیق

علت تشکیل عیب

- سرعت نامنظم و بالای برشکاری
- فاصله کم نازل تا سطح قطعه کار
- کوچک بودن نازل



شکل ۵۸: خطوط خیلی عمیق [۴]

۲- شیب به سمت جلوی خطوط

علت تشکیل عیب:

- کشیف شدن یا صدمه دیدن نازل



- نایکنواختی جت اکسیژن



شکل ۵۹: شیب به سمت جلوی خطوط [۴]

۳- شیب به سمت عقب خطوط

علت تشکیل عیب:

- سرعت بالای برشکاری
- کوچک بودن نازل
- حجم کم اکسیژن برش
- فشار پایین اکسیژن



شکل ۶۰: شیب به سمت عقب خطوط [۴]

۴- برش ناکامل

علت تشکیل عیب:

- سرعت بالای برشکاری
- کثیف شدن یا صدمه دیدن نازل
- کوچک بودن نازل
- شعله کوچک برشکاری
- بازگشت جرقه
- فاصله زیاد نازل تا سطح قطعه کار
- کثیف بودن سطح قطعه کار



شکل ۶۱: برش ناکامل [۴]

### • چسبندگی سرباره

۱- چسبیده شدن سرباره به سطح یا ته برش

علت تشکیل عیب

- سرعت خیلی بالا یا پایین برشکاری
- فاصله زیاد نازل تا سطح قطعه کار
- فشار خیلی پایین اکسیژن
- کوچک بودن نازل
- شعله کوچک برشکاری
- کثیف بودن سطح قطعه کار



شکل ۶۲: چسبیده شدن سرباره به سطح یا ته برش [۴]

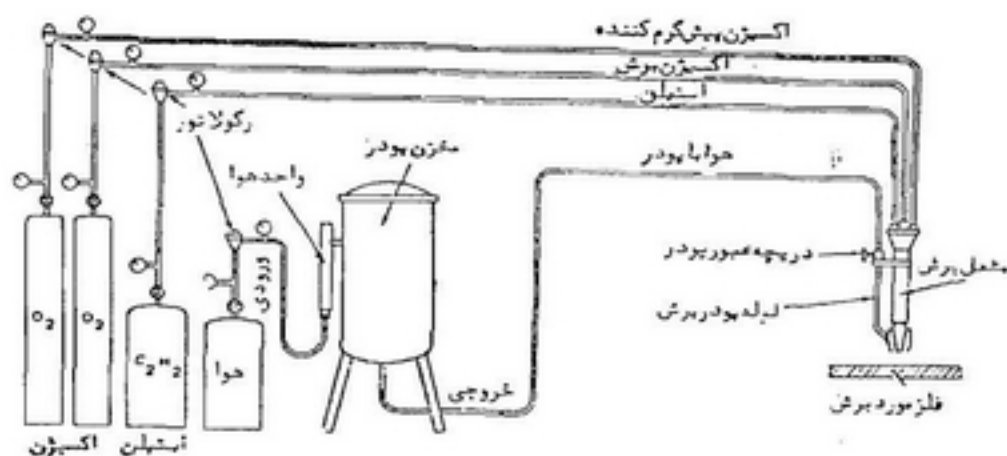
### ۸- برشکاری با تزریق پودر آهن<sup>۱</sup>

هدف از تزریق پودر آهن نیز رقیق کردن و کم کردن اثر بعضی عناصر مزاحم در برشکاری است. سوختن سریع پودر آهن اولاً حرارت ایجاد کرده و شدت تمرکز حرارت برای پیشگرم کردن بیشتر و متعاقباً سرعت پیشرفت برشکاری را افزایش می دهد، ثانیاً اکسید آهن باعث رقیق شدن سرباره

<sup>۱</sup>- Powder Cutting

- اکسیددی بعضی فلزات نظیر کروم می شود و در نتیجه سیالیت سرباره زیاد می شود. این سرباره آسان تر توسط فشار جت اکسیژن به بیرون پاشیده می شود.
- پودر آهن به دو روش به نوک مشعل هدایت می شود:
- ۱- از طریق لیزاندن با فرکانس و دامنه معینی که قابل تنظیم است.
  - ۲- از طریق اعمال فشار گاز معین در مخزن پودر که منجر به عبور دادن مقدار معینی پودر از انژکتور می شود.

پس از کنترل و تنظیم، پودر همراه با جریان اکسیژن یا هوا از طریق لوله جداگانه به نوک مشعل هدایت می شود. مشعل دستی با طرح خاص، علاوه بر مخلوط کردن سوخت گازی و اکسیژن، جریان گاز همراه با پودر را نیز در نوک شیب دار مشعل خالی می کند به طوری که هنگامی که دسته گاز اکسیژن برای بریدن فشرده می شود، مخلوط گاز و پودر نیز می تواند به شعله با سرعت بالا پاشیده شود. از این روش بیشتر برای برشکاری فلزات غیر آهنی استفاده می شود (شکل ۶۴).



شکل ۶۴: تجهیزات برشکاری با پودر آهن [۵]

## ۹- برشکاری با تزریق فلاکس<sup>۱</sup>

تکنیک تزریق فلاکس در شعله بیشتر برای برشکاری فولادهای زنگ نزن به کار می رود. در این روش اساس کار پاشیدن و تزریق نوعی ترکیب شیمیایی روانساز بر روی مسیر برش در حین برشکاری است به طوری که با اکسیدهای کروم و نیکل و اجزای بعضی فلزات دیگر سرباره ای با نقطه ذوبی نزدیک نقطه ذوب اکسید آهن ( $FeO$ ) تشکیل شود. این سرباره با فشار جت اکسیژن به راحتی از درز برش به بیرون پاشیده می شود. در این روش وسایل و تجهیزات اضافی لازم است تا فلاکس از مخزن با فشار لازم به دهانه نوک مشعل هدایت شود. فلاکس توسط اکسیژن به نوک مشعل منتقل می گردد. باید سعی کرد از جمع شدن فلاکس در لوله اکسیژن برشی و یا مشعل برش جلوگیری شود. با تزریق روانساز می توان فولادهای آلیاژی را با همان سرعت و کیفیت ظاهری مقطع برش فولادهای معمولی برش داد.







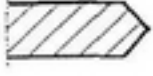



## ۱۰- آماده سازی اتصال جوشکاری براساس DIN ۸۵۵۱

در شکل ۶۵ آماده سازی اتصال بر اساس استاندارد DIN ۸۵۵۱ آمده است.

<sup>۱</sup>- Flux Cutting

## welding joint

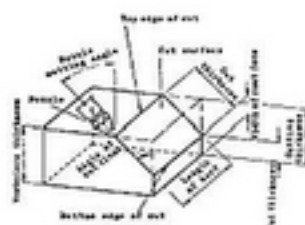
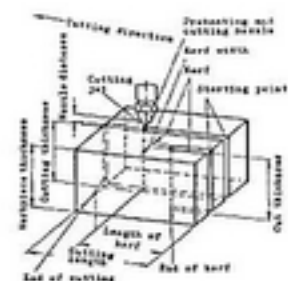
## process


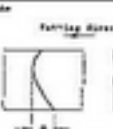
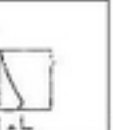
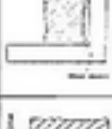


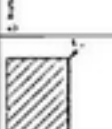
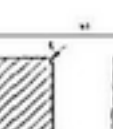

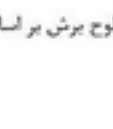


I-joint			as straight and curve cut	therm. cutting: oxy-gas plasma laser
				
single V-joint				shearing (slitter) sawing (band saw) punching (Nibbler) (abrasive cutting)
Y-joint			straight cut:	therm. cutting: oxy-gas plasma (mechanical)
				
double V-joint			curve cut:	therm. cutting: oxy-gas plasma
U-joint			straight cut:	therm. cutting: oxy-gas

شکل ۶۴: آماده سازی اتصال بر اساس استاندارد DIN ۸۵۵۱

## ۱۱- معیار دسته بندی سطوح برش بر اساس DIN ۲۳۱۰ Part ۱

در شکل ۶۶ معیار دسته بندی سطوح برش بر اساس DIN ۲۳۱۰ Part ۱ آمده است.



term/definition	symbol	pictorial view
drag marking the largest distance of two points of a cutting drag in cutting direction	a	  
right angle and inclination tolerance is the distance of two parallel lines which contact a theoretical right angle at the highest and lowest point	b	  
drag line depth is the arithmetic middle of the roughness depth $R_a$	c	  
smoothing is the definite dimension of the geometry	d	  

شکل ۶۵ : معیار دسته بندی سطوح برش بر اساس DIN ۲۲۱۰ Part ۱





## مراجع

- ۱- Eisenbeis, " Cutting ", SLV, ۱۹۹۹.
- ۲- AWS Handbook, ۱۹۹۰, Chapter ۲, "Cutting".
- ۳- ASM Handbook, ۱۹۹۳, Vol. ۶, " Welding, Brazing And Soldering.
- ۴- Cutting and Other Edge Preparation Processes, SZA.
- ۵- امیر حسین کوکی، " تکنولوژی جوشکاری "، انتشارات آزاده، ۱۳۸۲، چاپ پنجم.
- ۶- کاتالوگ های تجاری و صنعتی