فهرست

مطالب صفحه

فصل ۱۰.
دوزه‌های کشش مفتول ..... ۳۶ ـ ۱

فصل ۱۱.
روانکاری در کشش مفتول‌های آهنی ..... ۵۲ ـ ۳۷

فصل ۱۲.
عملیات حرارتی مفتول آهنی ..... ۶۳ ـ ۵۳

فصل ۱۳.
تنش‌زدایی ..... ۷۶ ـ ۶۴

فصل ۱۴.
آنیل‌کار ..... ۱۰۰ ـ ۷۷

فصل ۱۵.
آزمون مفتول یا میلگرد آهنی ..... ۱۳۵ ـ ۱۰۱

مقدمه

با کمال خرسندی چهارمین کتاب از سری کتاب‌های آموزشی شرکت ایروف را منتشر و به صنعتگران و پژوهندگان عرضه می‌دارم، این کتاب سومین و آخرین جلد از ترجمه فصل‌های منتخب از کتاب FERROUS WIRE HANDBOOK تحت عنوان مبانی کشش مفتول است که طبق قرار قبلی مندرج در مقدمه جلد دوم همین ترجمه می‌بایست شامل ۵ فصل باشد، ولی در روزهای پایانی و بازخوانی مطالب این نوشتار دریافتم که ترجمه فصل مهمی از این کتاب با عنوان «تنش‌زدایی» مورد غفلت قرار گرفته که خود نقصانی غیرقابل گذشت خواهد بود. از این روی بر آن شدم که فصل ششمی نیز بر کتاب حاضر بیافزایم.

بر اساتید و دانش‌پژوهان علاقه‌مند است که این میدان را به همت و هنر خود بیارایند و آن‌چه مانده را به نیاز خود که نه، به نیاز صنعت و صنعتگران، دانش و دانش‌پژوهان، به زیور ترجمه خود آراسته و این ناتمام را به اتمام برسانند.

همانند گذشته و بیش از گذشته نیز مدیریت شرکت ایروف حمایت مالی و معنوی خود را در انتشار این کتاب روا داشتند و با تقبل هزینه‌ای افزون بر کتاب‌های قبلی کیفیت کاغذ و هزینه چاپ گران‌تری را تقبل نمودند تا دو جلد آخر این ترجمه مطلوب‌تر از آن‌چه می‌پنداشتیم حاصل آید و تشکر به رسم قدرشناسی از علاقه‌مندی آنان به نشر دانش فنی و حمایت دیرینه‌ای که از صنعت و صنعتگران مبذول داشته‌اند کمترین کلامی است که می‌توان دین مرا ادا نماید.

سایر همکاران نیز که در کتاب‌های قبلی از آنان نام برده شده در چاپ این جلد هم سهیم بودند و بدون همکاری صمیمانه آنان این مهم میسر نمی‌شد.

به امید بهروزی

اسماعیل مدرس ــ پاییز ۱۳۹۵

فصل ۱۰

دوزه‌های کشش

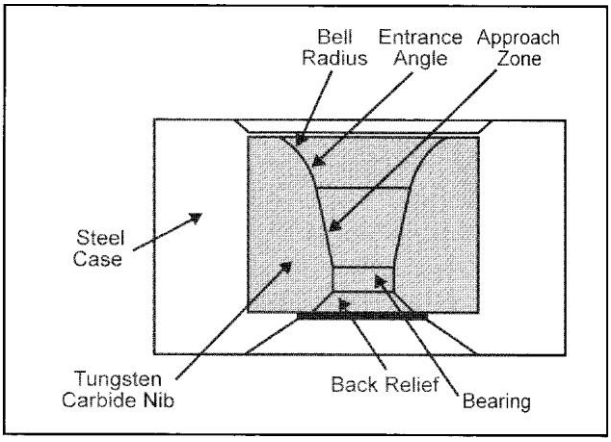
دوزه

آلن ب داو نوشته:

دوزه کشش که به درستی برجسته‌ترین ابزار به کار گرفته شده بشر توصیف گردیده، دارای ترکیب قابل توجهی از سادگی و کارآیی می‌باشد که باعث سیلان پلاستیکی فلز می‌گردد و ازدیاد طول و کاهش قطر را به گونه‌ای فراهم می‌سازد که با ابزار دیگر میسر نمی‌باشد. دوزه کشش باعث تغییر خواص فیزیکی ماده می‌گردد و دقتی در قطر و مقطع مفتول فراهم می‌کند که با کمتر ابزاری می‌توان این کار را انجام داد. دوزه، فلزی با ساختار متراکم و سطح سخت و بسیار پولیش شده می‌باشد. به صورت یک دستگاه خودکار تست که نقص فلز را تشخیص می‌دهد عمل نموده و آنها (نواقص) را به صورت شکست آشکار می‌سازد. تمام این عملکردها با کمک روانکارها و روکش‌ها و نیرویی که جسم را از دوزه ثابت بیرون می‌کشد، شکل می‌گیرند.

امروزه صنعت کشش مفتول نیازمند نگرش به تولید مفتول کشیده با کیفیت سطح خوب و هزینه کم می‌باشد. افزایش استفاده از زنگ‌گیرهای مکانیکی و سرعت‌های کشش بالا موجب رشد تقاضای مفتول نوردی و دوزه‌های کاربایدی گردیده است. براین اساس تغییرات به منظور بروزرسانی زنگ‌گیری، روانکاری و مشخصه‌های شکل دوزه و دستیابی به کارآیی مورد نظر دستگاه و فراهم نمودن یک سرانجام بهتر، ضروری می‌باشد. این تغییرات نیاز به گسترش یک فهم بهتر در مورد هندسه دوزه و تکنیک‌های نهایی را به ارمغان آورده است. هندسه دوزه و تکنیک‌ها وقتی به‌درستی مورد استفاده قرار گیرند کارایی بهتر دوزه، عمر طولانی‌تر دوزه، روانکاری بهتر و دماهای کمتر کشش مفتول را به دنبال دارند. نهایتاً مدرن‌ترین ماشین‌آلات کشش مفتول با آخرین تکنولوژی، بدون دوزه کشش نمی‌توانند مفتول تولید کنند. این فصل به خواننده نشان می‌دهد که

چگونه یک طراحی خوب دوزه کارایی مفتول نوردی را بهبود می‌بخشد. همچنین این فصل جنس دوزه، قسمت‌های دوزه و از همه مهم‌تر طراحی دوزه را نیز پوشش می‌دهد.
در ابتدا قسمت‌های کلیدی دوزه کشش در شکل ۱ مشخص شده‌اند.



شکل۱ـ نامگذاری دوزه

هفت بخش اصلی دوزه کشش عبارتند از:

- هسته تنگستن کارباید **Tungsten carbide nib**
- پوسته فولادی **Stell case**
- قیف ورودی **Bell radius**
- زاویه ورودی **Entrance angle**
- ناحیه تماس **Approach zone**
- استوانه سایز **Bearing**
- زاویه آزاد پشت **Back relief**

هسته تنگستن کارباید

هسته از کارباید سخت شده که مخلوطی از پودر کارباید و چسب فلزی کبالت می‌باشد، ساخته شده است. مخلوط به صورت سرد پرس و شکل داده می‌شود و در دمای ۱۴۲۷ درجه سانتی‌گراد

تفجوش می‌گردد. (تا دمای ذوب کبالت حرارت داده می‌شود ـ مترجم) درحین تفجوشی هسته‌ها بین ۱۵ تا ۲۰ درصد منقبض می‌شوند و به یک جسم صلب یکنواخت که سخت و خشن و ضدسایش است، تبدیل می‌شوند. اغلب هسته‌ها با ۳ تا ۱۲درصد کبالت که آنها را ۸۸ تا ۹۳ راکول C (ویکرز ۱۸۵۰ـ۱۲۱۵) سخت می‌سازد، ساخته شده‌اند. متوسط سایز دانه برای هسته‌ها از خیلی نرم (۰/۵ تا ۰/۹ میکرون) و متوسط (۱/٤ تا ۲ میکرون) و زبر (۳/۵ تا ۵ میکرون) تشکیل شده‌اند. قطر خارجی هسته معمولاً با تلرانس دقیق به طور هم‌مرکز با سوراخ هسته سنگ زده می‌شود تا پرسی دقیق در پوسته آهنی صورت گیرد.

پوسته فولادی

پوسته می‌بایست از فولاد مرغوب با سختی ۲۰ تا ۲۵ راکول C (ویکرز ۲۵۵ تا ۲۳۸) ساخته شود. قطر خارجی می‌بایست هم‌مرکز با سوراخ داخلی و عمود بر کف باشد تا سازگاری با هندسه دوزه فراهم سازد. سوراخ داخلی می‌بایست با دقت زیاد تراشیده شود تا پرس صحیح هسته در آن انجام شود. بدون یک پرس مناسب، مواد قوی می‌توانند در هسته ترک ایجاد کرده و نتیجه آن شکست مصیبت بار دوزه می‌باشد.

قیف ورودی

قیف ورودی مفتول را که در بدو ورودش به دوزه دارای حرکت مارپیچ است به داخل دوزه هدایت می‌کند. چون مفتول یا میلگرد می‌باست با صافی هر چه بیشتر جهت جلوگیری از تنش ناصافی، وارد دوزه گردد، بنابراین قبل از هم‌مرکز شدن با ناحیه تماس یک برخورد لحظه‌ای با قیف ورودی خواهد داشت. صافی سطح این ناحیه به دلیل اینکه هیچگونه کششی در آن روی نمی‌دهد، اهمیتی ندارد و پولیش آن فقط جنبه تزئینی دارد.

زاویه ورودی

عمل کرد زاویه ورودی جهت دادن به جریان پودر به ناحیه عملکرد یک دوزه می‌باشد. مانند قیف ورودی سطح این زاویه نیز می‌تواند بدون پولیش باشد. زاویه ورودی نرمال براساس استاندارد R_5 دوزه‌های کشش ٤۰ درجه می‌باشد.

ناحیه تماس

ناحیه تماس مهم‌ترین قسمت یک دوزه کشش می‌باشد. کاهش سطح مقطع و کشیده شدن روانکار برروی مفتول در اینجا اتفاق می‌افتد. کارایی هر دوزه با طراحی و دقت این ناحیه تماس تعیین می‌گردد که به صورت یک زاویه دقیق و سطح نهایی پولیش شده، تراشیده می‌شود.

اضلاع این ناحیه تماس می‌بایست صاف و بدون هرگونه انحنا باشد. زاویه می‌بایست با دقت زیاد ماشینکاری گردد تا کاملاً با سطوح قالب هم‌مرکز باشد. به‌علاوه این سطوح می‌بایست با قطر خارجی پوسته فولادی نیز جهت جلوگیری از بیضی شدن مفتول، هم‌مرکز باشند. زوایای معمول در کشش مفتول بین ۸ تا ۲۰ درجه می‌باشند.

استوانه سایز

عملکرد استوانه سایز کنترل قطر نهایی مفتول کشیده شده، تضمین گردی و صافی سطح آن می‌باشد. به این دلایل برای تولید مفتول کیفی می‌بایست سطوح این استوانه گرد و موازی و با تلرانس دقیق ماشینکاری گردد. طول سطوح موازی این استوانه می‌بایست ۲۵ تا ۵۰ درصد قطر آن باشد تا در اثر خارج از سایز شدن دوزه، فوری از رده خارج نگردد. برای مثال دوزه قطر ۲/۵٤ میلیمتر با ۳۵درصد طول قسمت استوانه، این طول ۰/۸۹ میلیمتر خواهد شد. انتخاب این طول بستگی به سختی مفتول کشیده شده و ضخامت مورد نظر روانکار برروی مفتول دارد. برای مثال مواد سفت‌تر با طول استوانه سایز کوتاه‌تری مثلاً ۲۵ تا ۳۵درصدی کشیده می‌شوند. زیرا با این‌کار از ایجاد حرارت زیاد و ضعف روانکاری جلوگیری می‌شود. مواد نرم‌تر می‌توانند از طول بلندتری تا ۵۰درصد استفاده کنند، که زمان استفاده از سایز نهایی بیشتر می‌شود. تراش مجدد سایز دوزه اجازه می‌دهد تا حلقه سایش برداشته شود بدون اینکه طول استوانه کوتاهتر گردد زیرا در اثر کوتاه شدن استوانه سایز دوزه می‌بایست از چرخه کار خارج گردد.

به‌هر حال طول بلند قسمت سایزکن دوزه، می‌تواند دمای اصطکاکی بیشتری ایجاد کند که روانکار را بسوزاند. در سرعت‌های پایین، طول بلند قسمت سایزکن دوزه به منظور ایجاد حرارت و ذوب کردن و نشاندن روانکار برروی مفتول که لازمه کشش‌های بعدی می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این طول به صورت کوتاه (زیر ۲۰درصد) متوسط (۳۰ تا ۵۰درصد) و بلند (بیشتر

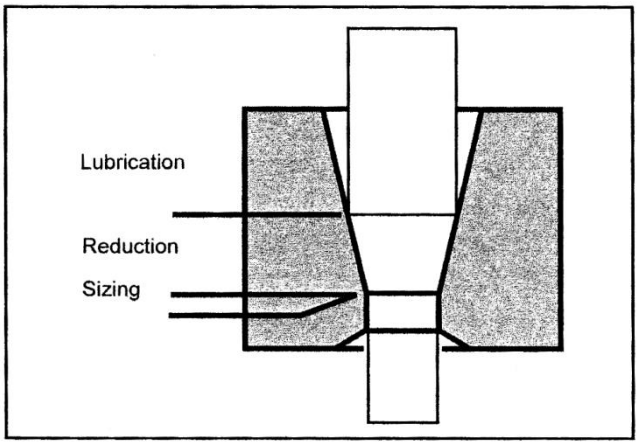
از ۷۵درصد) تعریف می‌گردد. در آمریکا اکثر مفتول‌های کشیده شده از طول متوسط سایزکن دوزه استفاده می‌کنند.

زاویه آزاد پشت

زاویه آزاد پشت یک زاویه مخروطی است که جهت استقامت دوزه در برابر شکست طراحی گردیده است. این زاویه همچنین این امکان را فراهم می‌سازد که عملیات کشش در وسط طول هسته صورت گیرد زیرا طول این زاویه باعث می‌شود که زاویه تماس و قسمت سایز در وسط هسته قرار گیرند. زاویه آزاد پشت معمولاً زبر و دارای زاویه بین ۳۰ تا ۹۰ درجه می‌باشد.

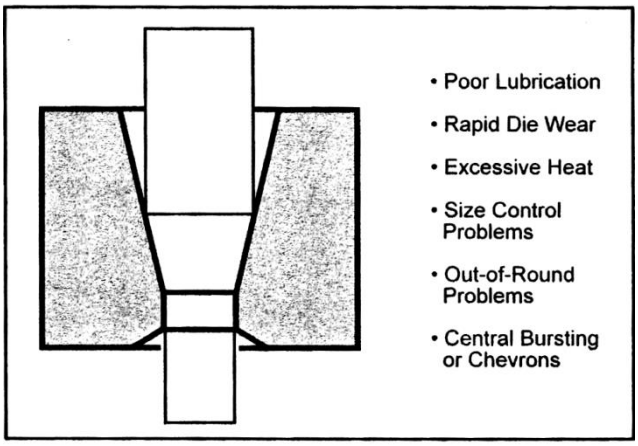
طراحی دوزه کشش مفتول

طراحی دوزه مستلزم انتخاب مناسب طول هسته، زاویه تماس و کاهش در هر مرحله کشش که تعیین کننده شکل هندسی ناحیه تماس و محلی که مفتول ورودی با ناحیه تماس برخورد می‌کند، می‌باشد. ناحیه تماس مهمترین قسمت دوزه کشش می‌باشد زیرا کار تغییر شکل (کاهش قطر) در این ناحیه روی می‌دهد. این کار تغییر شکل پلاستیکی مفتول را سخت می‌کند، بنابراین خواص مکانیکی افزایش می‌یابد. ناحیه تماس براساس طراحی پارامترها سه وظیفه اصلی را عهده‌دار می‌باشد؛ روانکاری، کاهش و سایز کردن (به شکل ۲ نگاه کنید)



شکل ۲ـ عملکردهای ناحیه تماس

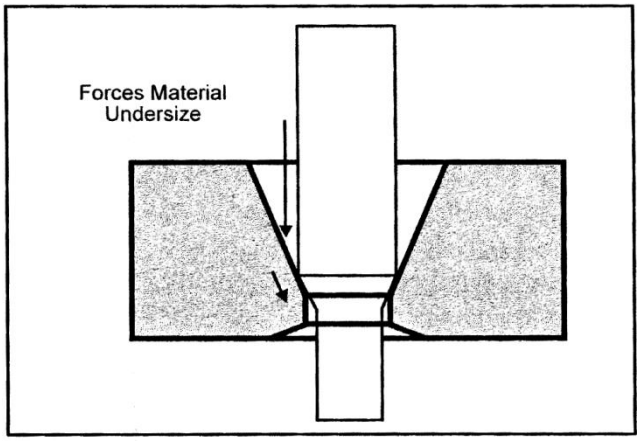
فشردگی روانکاری در فضای میان مفتول ورودی و سطح دوزه ایجاد می‌گردد. این فضا، حدفاصل نقطه تماس (طول هسته) و زاویه تماس می‌باشد. یک فاصله بلندتر، روانکاری بهتری را به دنبال خواهد داشت. زاویه تماس میزان و یکنواختی تغییر شکل در ناحیه کاهش را تعیین می‌کند. برای هر کاهش مورد نظر، زاویای تماس بزرگ‌تر میزان کاهش بزرگ‌تر و تغییر شکل غیریکنواخت‌تری را باعث می‌شود. اندازه نهایی مفتول در یک نقطه حدفاصل زاویه تماس و استوانه سایز ایجاد می‌گردد. استوانه سایز فقط قطر را کنترل می‌کند و نقشی در ایجاد قطر نهایی مفتول ندارد. برای انتخاب طراحی خوب دوزه، می‌بایست به آن چه بر مفتول در ناحیه تماس برای شرایط مختلف کشش اتفاق می‌افتد، توجه کرد. رایج‌ترین وضعیتی که برای کشش مفتول‌های نوردی مورد استفاده قرار می‌گیرد، زاویه تماس خیلی بزرگ و کاهش صورت گرفته در ناحیه خیلی کوچک می‌باشد و نتیجتاً تماس مفتول با دوزه در نزدیکی فصل مشترک زاویه تماس و استوانه سایز صورت می‌گیرد. (به شکل ۳ نگاه کنید)



شکل۳ـ زاویه تماس خیلی باز، کاهش در ناحیه خیلی کوچک

برای مثال؛ با استفاده از یک دوزه با زاویه ١٤ درجه و کاهش سطح مقطع ۱۷درصدی، ناحیه کاهش بسیار کوتاه می‌باشد که باعث تغییر شکل فوری مفتول می‌گردد که این خود باعث فرسایش سریع دوزه و تمرکز حرارت در این ناحیه کوتاه کاهش می‌باشد. ناحیه روانکاری خیلی بزرگ است، در نگاه اول به نظر می‌رسد روانکاری خوبی برروی مفتول انجام می‌شود. اما این‌گونه

نیست، در واقع با این روش فشار لازم جهت فشرده شدن روانکار برروی مفتول کاهش می‌یابد. به‌علاوه پدیده گردابی، روانکار را از مفتول دور می‌سازد و نتیجه آن خط و خش برروی مفتول می‌باشد. در نهایت کاهش قطر به وسیله دوزه‌ای با زاویه تماس خیلی بزرگ به دلیل انتقال سریع ماده از ناحیه کاهش به ناحیه استوانه سایز، سایز نهایی پایین‌تر از سایز دوزه خواهد شد. اگر ماده نرم باشد برای مثال؛ فولاد کم‌کربن AISI 1010 یا کمتر، مقاومت کششی کافی برای بیرون جهیدن از استوانه سایز وجود ندارد و نتیجه آن کاهش قطر مفتول خروجی نسبت‌به قطر استوانه سایز و همچنین دو پهنی می‌تواند باشد. (به شکل ٤ نگاه کنید)



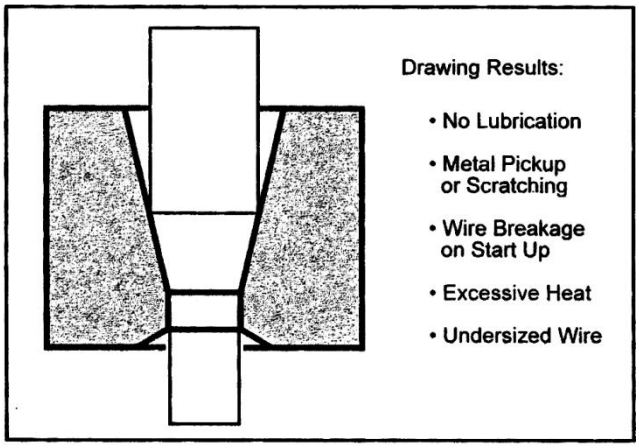
شکل ۴ـ انتقال ماده

در کشش‌های خیلی کم، برخورد مفتول با ناحیه تماس خیلی نزدیک به فصل مشترک ناحیه تماس و استوانه سایز صورت می‌گیرد. (نقطه‌ای که زاویه تماس تبدیل به استوانه سایز می‌گردد را فصل مشترک این دو می‌گویند ـ مترجم) در این حالت هرگونه انحراف یا حرکت مفتول باعث نیرویی می‌شود که مفتول را در این فصل مشترک دارای موج می‌کند درنتیجه قطرهای متناقض و موج‌دار به وجود خواهند آمد. نتایج استفاده از زوایای تماس بزرگ و یا کاهش سطح مقطع خیلی کم را می‌توان به صورت زیر انتظار داشت:

- روانکاری ضعیف
- فرسایش سریع دوزه

- دمای بیش از اندازه
- مشکلات کنترل سایز
- مشکلات غیرگردی
- ترکیدگی مرکزی یا ترک‌های جناغی

برعکس این وضعیت، برای مثال؛ وقتی زاویه تماس خیلی کوچک یا کاهش سطح مقطع بزرگ‌تر از توان زاویه باشد، مفتول نزدیک به ابتدای زاویه تماس با دوزه برخورد می‌کند (به شکل ۵ نگاه کنید) و این باعث می‌شود که ناحیه تغییر شکل خیلی بزرگ شود و مفتول در طول بیشتر از آن چه مورد نیاز است، تغییر شکل پیدا کند.



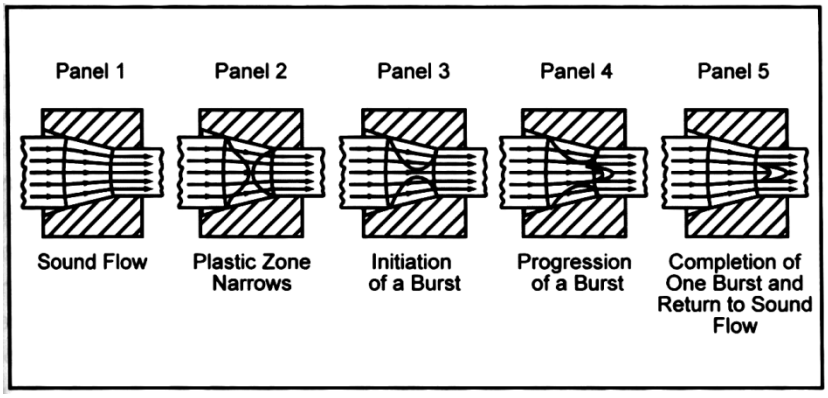
شکل ۵ ـ زاویه تماس خیلی باریک و ناحیه کاهش خیلی زیاد

موج افتادگی یا کار اضافی برروی فلز انجام می‌گیرد که باعث افزایش دما و نیروی لازم جهت کشش می‌شود. فضای روانسازی کم می‌شود، از عملکرد دوزه جهت نشاندن لایه روانکار بر روی مفتول ورودی جلوگیری به عمل می‌آید. نیروی کشش افزایش می‌یابد که باعث کش آمدن مفتول می‌شود که مشکلات گردی و خارج از سایز بودن را به دنبال دارد. وقتی زاویه تماس خیلی باریک و یا کاهش سطح مقطع خیلی سنگین باشد، نتایج زیر را می‌توان انتظار داشت:

- عدم روانکاری
- کنده شدن فلز یا خط‌دار شدن

- بریدن مفتول در شروع کار
- دمای بیش از اندازه
- مفتول خارج از سایز

یک تحقیق درباره عملیات کشش نشان داده است که ویژگی‌های هندسی دوزه کشش مانند زاویه تماس، کاهش در هر کشش و اصطکاک بین مفتول و دوزه، علت اصلی عیوبی هستند که «برش مرکزی» نامیده می‌شوند. برش‌های مرکزی (ترک جناغی یا شکست فنجان و مخروط نیز نامیده می‌شوند) حفره‌هایی هستند در خط مرکزی یک مفتول کشیده شده مربوط به تنش بیش از اندازه هیدرواستاتیکی در آن ناحیه وقتی که تارهای بیرونی مفتول تغییر شکل پلاستیکی بیشتری نسبت‌به تارهای مرکزی پیدا کرده باشند. این نتیجه مستقیم تغییر در سرعت مفتول (V_o) درحین عبور از دوزه کشش می‌باشد. به ازاء کاهش قطر، به دلیل ابقاء حجم سرعت خروجی (V_f) می‌بایست افزایش یابد. شکل‌گیری برش مرکزی به صورت الگووار در شکل ٦ نشان داده شده است.



شکل ۶ ـ شکل‌گیری برش مرکزی

تابلو ۱ حالت عادی را نشان می‌دهد، جریان بی‌عیب و نقص در ناحیه تغییر شکل پلاستیکی به‌طوری که سرعت در نقطه تماس (V_o) به‌طور یکنواخت به سرعت (V_f) در خروج از استوانه سایز افزایش می‌یابد. در تابلو ۲ ناحیه تغییر شکل پلاستیکی نازک می‌گردد و V_o و V_f در مرکز مفتول در زاویه تماس همگرا می‌گردند. برای مقادیر خاص کاهش، زوایای دوزه و اصطکاک،

سطوح سرعت به طور ملموس در تابلو۳ نشان داده شده است. پس در اثر نیروی کشش هیدرواستاتیکی (یکنواخت) در رشته‌های خط مرکزی تغییرات ناگهانی سرعت (V_0 به V_f) ایجاد می‌شود که باعث ایجاد حفره گردیده و در کشش‌های بیشتر این حفره رشد کرده و برش مرکزی را باعث می‌شود. رشد و پیشرفت برش مرکزی در ناحیه استوانه سایز دوزه روی می‌دهد. تابلو٤ و تابلو ٥ نشان دهنده اتمام شکل‌گیری حفره مرکزی و همراه شدن با جریان عادی سیال در دوزه کشش می‌باشد. یک برش مرکزی می‌تواند هم در زوایای تماس بزرگ و هم در کاهش‌های خیلی کم روی دهد.

فاکتور دلتا

شکل هندسی قسمت کار (ناحیه تماس) یک دوزه کشش می‌تواند به وسیله فاکتور **(Δ)** تعریف گردد که نسبت قوس دایره در نقطه میانی سطح تماس دوزه به طول تماس بین دوزه و مفتول می‌باشد. برای دوزه‌های مخروطی فاکتور دلتا به صورت زیر می‌باشد.

معادله(۱)

$$\Delta = sin\alpha\left(\frac{D_1+D_2}{D_1-D_2}\right)$$

که α۲ زاویه تماس می‌باشد (α نصف زاویه تماس است)، D_1 قطر مفتول ورودی و D_2 قطر مفتول نهایی است. برای مقادیر کوچک نصف زاویه تماس، $\sin\alpha = \alpha$ برحسب رادیان خواهد بود و با ضرب سمت راست معادله ۱ در $(D_1+D_2)/(D_1+D_2)$ و با جایگزینی کاهش سطح مقطع $[r=1-(D_2/D_1)^2]$ در فرمول به جای قطر مفتول ورودی و نهایی، Δ می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

معادله(۲)

$$\Delta = \frac{\alpha}{r}\left[1+\sqrt{1-r}\right]^2$$

مقادیر کم Δ (نصف زاویه کوچک یا کاهش سطح مقطع بزرگ) نشان دهنده اثرات زیاد اصطکاک و دمای سطح که مربوط به تماس زیاد مفتول با ناحیه تماس می‌باشد، خواهد بود. مقادیر زیادتر

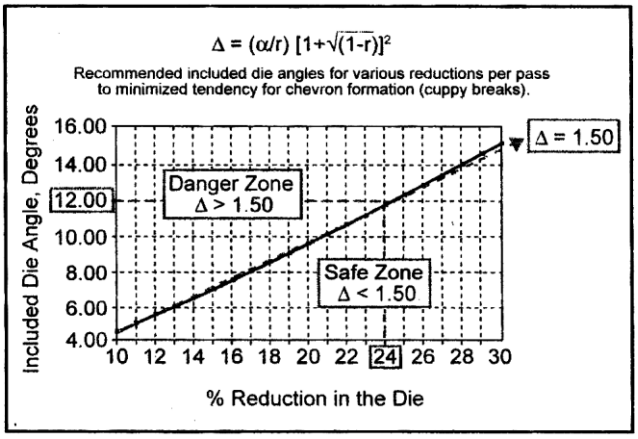
Δ (نصف زاویه بزرگ یا کاهش سطح مقطع کمتر) نشان‌دهنده افزایش کار اضافی و سختی سطحی مربوط به تغییر جهت بیش از حد مفتول در جریان ورود به دوزه می‌باشد. کار اضافی و سختی سطح مشکلاتی هستند که معمولاً با چشم دیده نمی‌شوند تا زمانی که مصرف‌کننده این مفتول‌ها بخواهد تغییر شکلی بر آنها انجام دهد که در آن مرحله مفتول دچار شکست یا ترک خواهد شد. کار اضافی تغییر شکل پلاستیکی بیش از حد نیاز برای کاهش سطح مقطع مورد نظر می‌باشد. به عبارت دیگر، کار بیشتر از نیاز برای کاهش قطر می‌باشد. کار اضافی به کار سختی کمک می‌کند، به ویژه در سطح مفتول و تعداد دفعات کشش را که می‌توانند بدون آنیل‌کاری انجام شوند، کاهش خواهد داد. مقادیر Δ برای یک سری نصف زاویه‌ها و کاهش‌های سطح مقطع در شکل ۷ نشان داده شده است. برای اهداف عملی، دوزه کشش مفتول‌های آهنی می‌بایست فاکتورΔ بین ۱ تا ۳ داشته باشند.

	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%
2°	2.73	1.33	0.86	0.63	0.49	0.39	0.33
4°	5.46	2.66	1.72	1.26	0.97	0.79	0.65
6°	8.19	3.99	2.59	1.88	1.46	1.18	0.98
8°	10.92	5.32	3.45	2.51	1.95	1.57	1.30
10°	13.65	6.65	4.31	3.14	2.44	1.97	1.63
12°	16.30	7.94	5.15	3.75	2.91	2.35	1.95
14°	19.03	9.27	6.01	4.38	3.40	2.74	2.27
16°	21.76	10.59	6.87	5.01	3.89	3.14	2.60
Note: Angle expressed in semi-angle, 1/2 angle.							

شکل ۷ـ جدول فاکتور دلتا

دلتای بزرگ اغلب تمایل بیشتری به ایجاد حفره و برش مرکزی دارد. شکل ۸ طرحی از ترکیب زاویه دوزه و کاهش سطح مقطع در هر مرحله کشش را نشان می‌دهد که مرز بین محدوده حداقل تمایل به برش مرکزی و محدوده خطرناک برای برش مرکزی را ترسیم نموده است. خط مرزی در این نمودار خیلی نزدیک به Δ=۱/۵ می‌باشد. بنابراین برش مرکزی برای Δ بزرگتر از ۱/۵ شکل می‌گیر و ترکیب زاویه تماس و کاهش سطح مقطع که Δ کمتر از ۱/۵ را به وجود آورد، احتمالاً

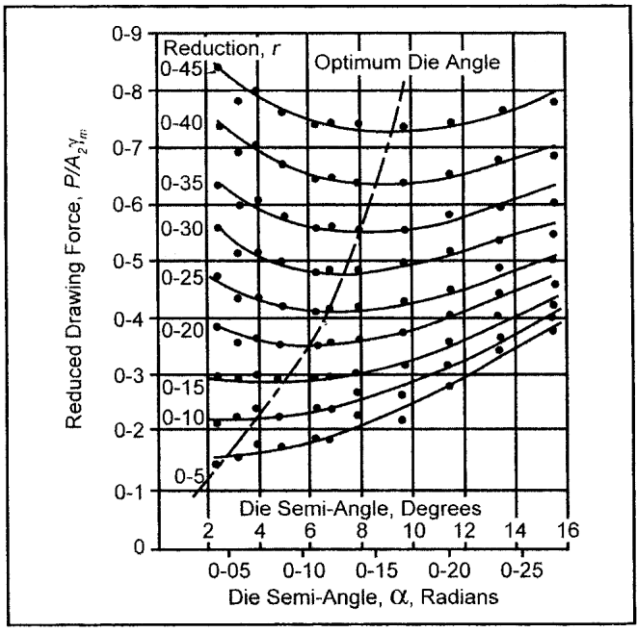
مطمئن خواهد بود. برای مثال، فاکتور Δ یک دوزه کشش با زاویه ۱۲ درجه (نصف زاویه ٦ درجه) و ٢٤درصد کاهش سطح مقطع، ١/٥٤ خواهد بود. این مقدار در ناحیه خطرناک شکل ۸ قرار دارد. بنابراین به احتمال کم برش مرکزی روی خواهد داد.



شکل ۸ ـ جدول احتمال برش مرکزی

کشش دوزه نیروی کشش لازم جهت فائق آمدن بر کار انجام شده در دوزه کشش می‌باشد. برای زوایای کوچک تماس و یا کاهش‌های بزرگ (دلتای کم)، کار اصطکاکی حکمفرما می‌باشد. در حالی که زوایای بزرگ تماس و یا کاهش‌های کوچک (دلتای زیاد)، درگیر کار اضافی خواهد شد. بهترین حالت آن است که در یک کاهش به خصوص کشش دوزه حداقل باشد. بهترین زاویه تماس برای حداقل کشش دوزه به عنوان تابعی از کاهش در هر مرحله کشش در شکل ۹ نشان داده شده است. دوزه‌های طراحی شده برای مقدار بهینه Δ از مشکلات زیر جلوگیری می‌کند.

- سختی سطح یا تنش‌های پسماند
- برخورد با مشکلات ویژه کششی
- حرارت ناشی از کشش بیش از اندازه
- کاهش شکل‌پذیری مفتول

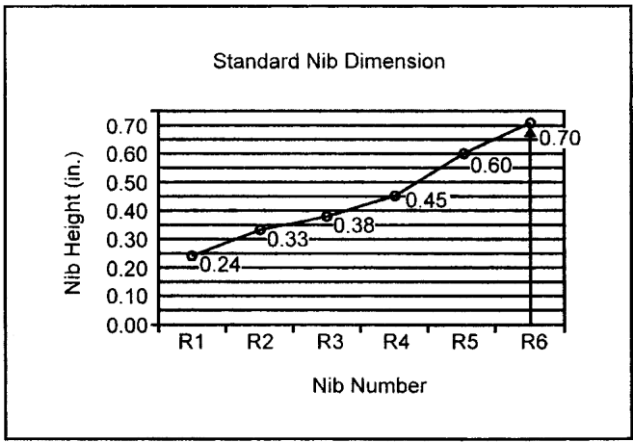


شکل ۹ ـ تغییرات نیروی کشش دوزه با زاویه تماس

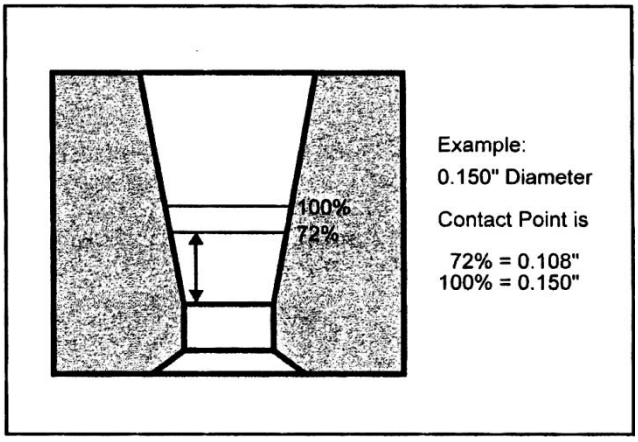
با توجه به اینکه همه اتفاقات برروی مفتول در ناحیه تماس روی می‌دهد و زاویه تماس بر کارآیی و کیفیت مفتول تأثیرگذار است، انتخاب زاویه صحیح چگونه می‌باشد؟ کل کاهش سطح مقطع مورد نیاز برای یک محصول معمولاً شناخته شده می‌باشد. کاهش سطح مقطع در هر دوزه بستگی به تعداد دوزه‌های مورد استفاده و برنامه کشش دارد، برای مثال برنامه کشش شامل یکنواختی، شیب کم شدن کاهش‌ها و غیره می‌باشد. برای یک اندازه هسته و کاهش بر هر دوزه، زاویه تماس به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که مفتول با دوزه تقریباً در وسط ناحیه تماس برخورد پیدا کند. ارتفاع استاندارد هسته‌های تنگستن کارباید خام (سری R) دوزه‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

براساس ارزیابی چندین ساله نتایج محصولات، یک نقطه برخورد خوب مفتول در ناحیه تماس دوزه در فاصله ۱۰۰٪ ـ ۷۲٪ قطر نهایی از فصل مشترک ناحیه تماس با استوانه سایز می‌باشد. همانگونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. برای یک قطر نهایی (d_f) ۰/۱۵ اینچ (۳/۸

میلیمتر) نقطه برخورد بهینه در فاصله ۲/۷٤ میلیمتر برای حالت d_f٪۷۲ و در فاصله ۳/۸ میلیمتری برای حالت d_f٪۱۰۰ از نقطه شروع استوانه سایز قرار دارد.



شکل ۱۰ ـ ارتفاع استاندارد هسته‌های تنگستن کارباید خام سری **R**



شکل ۱۱ـ نقطه برخورد خوب

با استفاده از این معیار برای نقطه برخورد خوب، زاویه تماس می‌تواند برای کاهش سطح مقطع داده شده **(r)** محاسبه گردد. تانژانت نصف زاویه تماس **(α)** به قرار زیر محاسبه می‌گردد:

معادله(۳)

$$tan\ \alpha = \left(\frac{d_o + d_f}{2x d_f}\right)$$

که d_o قطر مفتول ورودی و x درصدی از قطر مفتول خروجی که محل نقطه تماس را تعیین می‌کند، می‌باشد. با در نظر گرفتن کاهش (r) ، تانژانت نصف زاویه تماس به شکل زیر خواهد بود.

معادله(۴)

$$tan\ \alpha = \frac{1-\sqrt{1-r}}{2x\sqrt{1-r}}$$

اگر قطر ورودی مفتول مثال شکل ۱۱، ٤/۳۹ میلیمتر و کاهش سطح مقطع ۲۵٪ باشد، با استفاده از معادل ۳ یا ٤ نصف زاویه بهینه ٤/٤ و کل زاویه تماس ۸/۸ درجه برای نقطه تماس d_f٪۱۰۰ می‌باشد و برای نقطه تماس d_f٪۷۲ نصف زاویه ٦/۱ درجه و کل زاویه تماس ۱۲/۲ درجه خواهد شد. شکل ۱۲ برای زوایای مختلف $(\alpha 2)$ کاهش‌هایی که در نقاط تماس d_f٪۷۲ و d_f٪۱۰۰ صورت می‌گیرد را لیست کرده است. چنانچه نقطه برخورد مفتول با دوزه خوب طراحی شده در وسط ناحیه تماس باشد، طول این ناحیه حدوداً می‌بایست دو برابر قطر مفتول باشد تا اجازه روانکاری خوب داده شود.

Included Angle	72% Contact Point	100% Contact Point
6	13% R.A.	18%
8	17%	23%
10	21%	27%
12	25%	32%
14	28%	36%
16	30%	40%

شکل ۱۲ـ جدول نقطه برخورد

گفته نمی‌شود که کاهش‌های بیشتر یا کمتر برای زاویه تماس داده شده کار نمی‌کند، بلکه این یک نقطه شروع خوب برای تعیین زاویه تماس برای یک کشش به‌خصوص یا خط کامل می‌باشد. جدول شکل ۱۲ برای دوزه‌های مفتول R_6 و کمتر در استاندارد هسته‌های کاربايد، تهیه شده است. برای هسته‌های بزرگ‌تر مشکل این است که ارتفاع هسته کارباید متناسب با قطر افزایش نمی‌یابد درنتیجه در هسته‌های بزرگ‌تر ناحیه تماس کوتاه‌تر می‌شود که در زاویای نازک‌تر محفظه‌ای کوچک برای روانکاری و کاهش ایجاد می‌شود. مشکل دیگر شرایط ویژه مفتول می‌باشد، مانند کیفیت سطح مورد لزوم و ضخامت لایه روانکار برروی مفتول، که اینها ممکن است با زوایا و میزان کاهش‌های مطرح شده در جدول ۱۲ قابل دسترسی نباشند. زیرا این مقادیر برای دستیابی به حداکثر عمر دوزه و حمل روانکار طراحی شده‌اند. در مثال بالا و با استفاده از شکل ۱۱، یک زاویه تماس ۱۰ درجه (d_f٪۸۸) یا ۱۲ درجه (d_f٪۷۲) برای یک کاهش سطح مقطع ۲۵درصدی انتخاب می‌گردد.

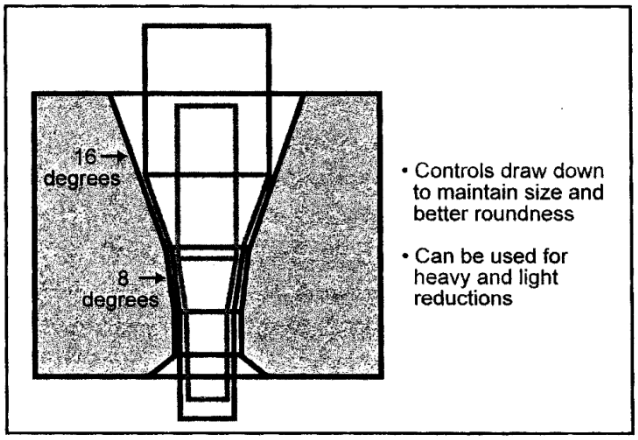
فاکتور Δ برای زاویه تماس ۱۲ درجه‌ای و کاهش ۲۵درصدی این مثال ۱/٤٦ می‌باشد. یک بازبینی جدول احتمال برش مرکزی (شکل ۸) نشان می‌دهد که این ترکیب در محدوده مطمئن برای برش مرکزی می‌باشد چون Δ کمتر از ۱/۵ است. تولید مفتول کیفی با سرعت‌های قول داده شده توسط سازندگان دستگاه‌های کشش اگر طراحی دوزه با توجه به زاویه دوزه و نسبت آن با کاهش سطح مقطع بهینه نشده باشد، بسیار مشکل خواهد بود. همچنین درک تاثیر طراحی دوزه بر حل مؤثر مشکلات کشش مفتول مهم می‌باشد زیرا نتیجه منطقی متغیرها در پارامترهای طراحی به خوبی شناخته شده می‌باشند.

جدول نقطه تماس (شکل۱۲) برای هسته‌های تنگستن کارباید ایجاد شد. اگر بلوک‌های الماس پلی‌کریستال مورد استفاده قرار گیرند، طراحی دوزه می‌بایست براساس ارتفاع خیلی کم این بلوک‌ها صورت گیرد. در اغلب موارد وقتی کاهش سطح مقطع محاسبه می‌گردد، ارتفاع بلوک برای ایجاد زاویه مناسب خیلی کوتاه می‌باشد. بنابراین زاویه می‌بایست افزایش یابد تا اجازه داده شود که مفتول بدون مشکل به ناحیه تماس وارد شود. این ساخت زاویه در عمل مخالف طراحی

خوب دوزه می‌باشد. با این حال این کار ضروری است اگر بلوک پلی‌کریستال به درستی مورد استفاده قرار گیرد.

یک مشکل اساسی به وجود آمده در رابطه با زاویه تماس در این موارد این است که قطر مفتول خروجی از قطر مورد نظر کمتر خواهد شد. این به دلیل زاویه خیلی باز، کشش دوزه بیش از حد یا مقاومت کششی کم به وجود خواهد آمد که کنترل گردی و سایز را مشکل می‌سازد. یک انتقال تدریجی بین ناحیه تماس و ناحیه سایز پایین آمدن سایز را از بین می‌برد. راحت‌ترین و دقیق‌ترین روش برای انتقال نرم اضافه کردن یک ناحیه دوم می‌باشد که نصف ناحیه تماس می‌باشد و تقریباً ۱ تا ٤/۷۵ میلیمتر طول دارد. (به شکل ۱۳ نگاه کنید)

دوزه با دو زاویه می‌تواند هم کشش‌های سنگین و هم سبک را در بر گیرد، زاویه اول کشش‌های سنگین را انجام می‌دهد و زاویه دوم سهولت انتقال کشش سنگین به قسمت سایزکن را فراهم می‌سازد. دوزه دو زاویه‌ای به راحتی می‌تواند کشش‌های سبک را انجام دهد به طوری که زاویه اول عملاً حذف می‌گردد و تماس فقط در زاویه دوم صورت می‌گیرد.



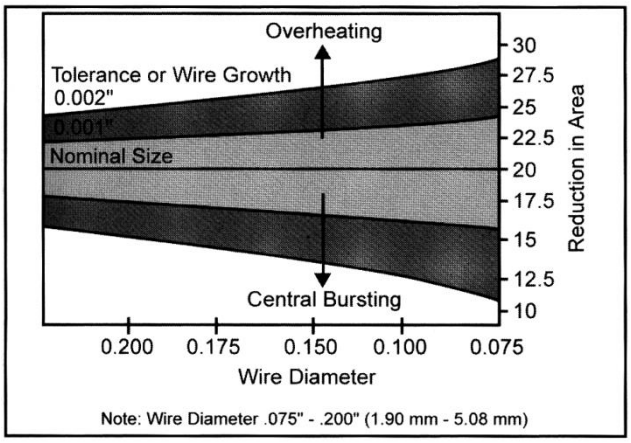
شکل ۱۳ـ دوزه دو زاویه‌ای

حتی با طراحی دقیق دوزه، این طراحی می‌بایست عملیات موفق کشش مفتول را به دنبال داشته باشد. برای مثال؛ مشکلات فرآیند از قبیل عدم تبعیت از سایز دوزه می‌تواند بر کیفیت مفتول و عمر دوزه تأثیرگذار باشد. همچنین حفظ قطر مشخص با تلرانس قابل قبول مهم می‌باشد. مرسوم

است که تولید با دوزه‌هایی با قطر نزدیک به حد پایینی تلرانس شروع شود و اجازه داده شود تا رسیدن به حد بالایی تلرانس باز شوند. در حالی که این عمل برای استفاده زمان طولانی‌تر از دوزه به کار گرفته می‌شود، انحراف بیش از حد اندازه اسمی برای هر دوزه در خط تولید می‌تواند بر شکل هندسی و کاهش‌ها تأثیرگذارده و برش مرکزی و حرارت زیاد ترویج یابند.

شکل ١٤ طرح بدترین مورد تأثیر تلرانس قطر ۰/۰۲ و ۰/۰۵ میلیمتر بر یک کاهش ۲۰درصدی برای کشش مفتول از قطر ۵/۰۸ میلیمتر به ۱/۹۱ میلیمتر می‌باشد. این شکل نشان می‌دهد که انحراف از قطر اسمی در تلرانس‌های قابل قبول ممکن است هم برش مرکزی (کاهش کمتر) و هم کار سختی حاصل از افزایش دما (کاهش بیشتر) را باعث شود. اگر اپراتورهای کشش مفتول توجه به سایز مفتول ورودی نداشته باشند، می‌توانند مزایای دوزه دقیق طراحی شده بر کیفیت مفتول را با کم و زیاد کردن کاهش سطح مقطع، خنثی نمایند. روانکاری و کاهش سطح مقطع مهمترین عملیاتی هستند که در ناحیه تماس دوزه اتفاق می‌افتند. ناحیه قبل از تماس مفتول یا میلگرد با ناحیه تماس، ناحیه روانکاری می‌باشد که پودر روانکار خشک برسطح مفتول یا میلگرد فشرده می‌شود. روانکار به ناحیه تماس توسط قیف و زاویه ورودی وارد می‌شود و بین مفتول و دوزه در ناحیه روانکاری حبس می‌گردد. به محض اینکه فضای بین سطح دوزه و سطح مفتول کاهش یابد، روانکار تبدیل به یک ماده چسبناک می‌گردد و یک لایه پلاستیکی حاصل از فشردگی زیاد و افزایش دمای حاصل از ناحیه تماس برروی مفتول کشیده می‌شود. عمر خوب دوزه و کیفیت مفتول نیازمند یک لایه به اندازه کافی ضخیم از روانکار برروی مفتول می‌باشد تا از تماس مستقیم مفتول با سطح دوزه جلوگیری نماید. بنابراین انتخاب درست زاویه تماس و نقطه برخورد مهم می‌باشد.

بسیاری از تولیدکنندگان برای حفظ ضخامت کافی لایه روانساز جهت رسیدن به سرعت‌های بالای کشش، سیستم قالب فشار **(Pressure die)** را پیشنهاد می‌کنند. سیستم قالب فشار در واقع دو قالب می‌باشد، یک قالب فشار و یک قالب کار که به صورت مشترک در یک پوسته فولادی مناسب طراحی گردیده است. دوزه تماس یا فشار مستقیماً در جلو دوزه کار قرار گرفته است. به شیوه‌ای که روانکار از بین دو دوزه نمی‌توان بیرون بزنند.



شکل ۱۴ـ تأثیر تلرانس به کاهش سطح مقطع

دوزه فشار شامل یک هسته کارباید می‌باشد با سوراخی شبیه شکل دوزه کار با این تفاوت که زاویه آزاد پشت را ندارد. قطر ورودی دوزه فشار معمولاً ۱۰ تا ۱۵درصد از قطر مفتول ورودی بزرگ‌تر است تا اجازه دهد روانکار کافی برروی مفتول فشرده شود قبل از اینکه مفتول وارد دوزه کار گردد. فشار روانکار در ناحیه تماس دوزه کار ممکن است تا بیش از **900 PSI** برسد. صنعت کشش با استفاده از سیستم دوزه فشار و دیگر ادوات برای نشاندن روانکار برروی مفتول در محفظه دوزه دستگاه‌های کشش، می‌تواند بهره‌وری را افزایش دهد.

تغییرات در طراحی دوزه برای فرآورده‌های خارج از طراحی معمولی دوزه

فرآورده‌های مختلف مفتولی وجود دارند که کشش درست آنها نیازمند ساخت دوزه می‌باشد. برای مثال نیازمندی محصولات ویژه شامل سطح پولیش مفتول، حداقل پوشش روانکار، کشش مفتول برای آبکاری و کاهش‌های خیلی زیاد و یا کم در عملیات کشش یک مرحله‌ای می‌باشد. تغییرات طراحی دوزه که برای این محصولات مورد نیاز است به شرح زیر می‌باشند.

کاهش زیاد در کشش یک مرحله‌ای ـ اگر کاهش‌های زیاد صورت می‌گیرد و مشکل خارج از سایز شدن و عدم گردی وجود دارد، می‌توان از دوزه دو زاویه‌ای جهت بر طرف کردن مشکل استفاده نمود. برای کاهش‌های سنگین (۳۲ تا ٤۰درصد) مواد نرم، زاویه تماس ممکن است به حدی بزرگ باشد که باعث خارج از سایز شدن مفتول گردد. ایجاد یک زاویه به اندازه نصف زاویه

اصلی دوزه در جلو قسمت استوانه دوزه باعث کاهش انتقال ناگهانی از زاویه تماس بـه اسـتوانه سایز می‌گردد. درنتیجه، کشیدگی کمی در مفتول ایجاد می‌گردد و کنترل سایز بهتر می‌شـود. (بـه شکل ۱۳ مراجعه کنید)

کاهش‌های سبک ـ برای کشش‌های سبک و پوستی **(Skin Pass)** معمولاً زیر ۱۰درصد کـاهش سطح مقطع، زوایای استاندارد دوزه خیلی بزرگ هستند و نقطه برخورد خیلی نزدیـک بـه فصـل مشترک زاویه تماس و استوانه سایز می‌باشد که ایـن باعـث فرسـایش سـریع دوزه، بلنـد شـدن روانکار، خط‌دار شدن مفتول و کنترل ضعیف سایز می‌شود. یک دوزه دو زاویه‌ای می‌توانـد ایـن مشکلات را بر طرف نماید. به طوری که مفتول در زاویه کوچـک‌تـر دوم بـا دوزه تمـاس پیـدا می‌کند. این زاویه کوچک‌تر محل برخورد مفتول به نزدیکـی اسـتوانه سـایز را دورتـر مـی‌کنـد. ضخامت لایه روانکار بیشتر می‌شود و عمر دوزه و کیفیت سطح ارتقاء پیدا می‌کنند. (به شکل ۱۳ مراجعه کنید)

مفتول براق ـ یک مفتول براق دارای سطح صاف و براق با حداقل پسـماند روانکـار مـی‌باشـد. ساخت دوزه کشش برای مفتول براق بسیار دشوار است. بسیاری از طراحی‌های دوزه بـا دو و یـا سه زاویه برای مقاصد مختلف صورت می‌گیرند. طراحی خوب می‌بایست شرایطی را فراهم سازد که چربی لازم حاصل از روانکاری جهت تداوم عمر دوزه برروی مفتـول وجـود داشـته باشـد و همچنین بتوان به راحتی آن را از روی مفتول برطرف نمـود. دوزه مـی‌بایسـت بـا زاویـه تمـاس بزرگ‌تری نسبت‌به آن چه در جدول نقطه برخورد آمده است، طراحی گردد. (بـه شـکل۱۲ نگـاه کنید) زاویه تماس بزرگ‌تر کار اضافه بیشتری در سطح مفتول ایجاد می‌کند و ایـن باعـث ایجـاد سطح صاف و براق مفتول می‌گردد. افزایش طول قسمت استوانه تا ۷۵٪ و شیبدار کردن انتقـال از سطح تماس به ناحیه سایز نیز می‌تواند به این کیفیت سطح کمک نماید. زوایـای بـزرگ تمـاس مقدار کمی کاهش در ناحیه استوانه را باعث می‌شود و با افزایش طول استوانه، کـار اصـطکاکی افزایش می‌یابد که سطح مفتول را براق می‌سازد. اگر طراحی‌ها طوری باشند که ریـزش روانکـار زیاد باشد، احتمال خط‌دار شدن مفتول وجود دارد.

مفتول گالوانیزه کشیده شده ـ عموماً کاهش‌های زیاد برای کشش مفتول‌های گالوانیزه به کار گرفته می‌شوند، به خصوص در کشش اول، این عمل کار اضافی را کاهش می‌دهد. از طرفی سرد کردن مفتول برای جلوگیری از ذوب شدن روی در دوزه در کاهش‌های زیاد دشوار خواهد بود. بنابراین، افزایش تعداد کشش‌ها و کم کردن کاهش‌ها در هر کشش ممکن است از این ذوب شدن جلوگیری کند. همچنین با استفاده از زوایای کوچک تماس کار اضافه می‌تواند کاهش یابد، برای مثال زوایای ۱۰ درجه‌ای را می‌توان نام برد.

علاوه بر افزایش تعداد مراحل کشش و زوایای کوچک تماس، دوزه‌های کشش برای مفتول‌های گالوانیزه می‌بایست طول قسمت استوانه سایز کوچکتری داشته باشند، برای مثال ۲۵ تا ۳۵ درصد قطر قسمت استوانه و همچنین سایز کردن این استوانه می‌بایست از سمت اضلاع زاویه انجام شود. این باعث می‌شود که یک شیب ملایم وارد ناحیه سایز گردد که کمک می‌کند که روکش‌ها از سطح مفتول جدا نشوند. این طراحی دوزه برای سایر مواد آبکاری روکشی نیز به کار گرفته می‌شود.

مفتول طناب پیش‌تنیده ـ طراحی دوزه برای مفتول PC اغلب زوایای تنگ با طول هسته بلند را به کار می‌گیرد از این‌رو کاهش در طول بلندتری در ناحیه تماس صورت می‌گیرد. طول اضافی هسته این اجازه را می‌دهد که روانکاری هیدرواستاتیکی افزایش یابد و لایه ضخیم‌تری از روانکار برروی سطح مفتول تجمع یابد. این طرح امکان ریختن روانکار، زخمی شدن مفتول در دوزه و آسیب مفتول را کاهش می‌دهد. مطمئناً برای مواد خاص طراحی‌های ساخت دوزه متفاوتی وجود دارند. در اینجا فهرستی از طراحی‌های دوزه برای رایج‌ترین کاربردهایی که خارج از طراحی دوزه معمولی می‌باشند آورده شده است. جدول ۱ طراحی دوزه پیشنهادی برای چند جنس اصلی مفتول را نشان می‌دهد.

اگر طراحی بهینه دوزه صورت گیرد و با عملیات پایانی دقیق و روش‌های بازرسی در هم آمیزد، دستاوردهای بهره‌وری قابل توجه‌ای برروی مفتول نوردی محقق خواهد شد.

جنس	زاویه تماس	استوانه سایز	ملاحظات
فولاد ضد زنگ	باز ـ تقریباً ۱۸ درجه	متوسط ۳۰٪ تا ۵۰٪	محل تقاطع زاویه تماس و استوانه سایز می‌بایست تیز باشد.
فولاد پرکربن	تقریباً ۱۲ درجه	متوسط ۳۰٪ تا ۵۰٪	محل تقاطع زاویه تماس و استوانه می‌بایست کمی انحنا داشته باشد.
فولاد کم کربن	تقریباً ۱۴ تا ۱۶ درجه	متوسط ۳۰٪ تا ۵۰٪	محل تقاطع زاویه تماس و استوانه می‌بایست به خوبی انحنا داشته باشد.
مس	تقریباً ۱۶ درجه	متوسط ۳۰٪ تا ۵۰٪	محل تقاطع زاویه تماس و استوانه می‌بایست به خوبی انحنا داشته باشد.
آلومینیوم	تقریباً ۱۶ درجه	بلند ۷۵٪ تا ۱۰۰٪	محل تقاطع می‌بایست به حدی منحنی باشد که گذار از زاویه تماس به استوانه سایز قابل تشخیص نباشد.

جدول ۱ ـ دوزه‌های کشش برای مواد رایج

مواد دوزه

موادی که برای ساخت هسته دوزه کشش مورد استفاده قرار می‌گیرند به شرح زیر می‌باشند:

- **کاربیدهای سخت**
  - **تنگستن کارباید (WC)**
- **الماس**
  - **تک کریستال طبیعی (SCN)**
  - **تک کریستال مصنوعی (SCS)**
  - **چند کریستالی (PCD)**
- **سرامیک**
  - **تیتانیم کارباید (TiC)**
  - **تیتانیم نیترید (TiN)**
  - **نیترید برن مکعبی (CBN)**

خواص مهم مواد دوزه کشش عبارتند از:

- مقاومت در برابر سایش (سختی) (به جدول ۲ نگاه کنید)
- چقرمگی
- مدول الاسیتیته
- ضریب اصطکاک

Die Material	Vickers Hardness (HV)
Diamond	10,000
Titanium carbide	3,800
Titanium nitride	3,000
Cemented carbide	1,800
Hard chrome	1,300
Nitrided steel	1,100
High-speed steel	764

جدول ۲ ـ سختی ویکرز **(HV)** مواد دوزه

قسمت‌های بعدی این بخش در بردارنده پیشینه، خواص و ویژگی‌های تنگستن کارباید و الماس دوزه کشش می‌باشد.

تنگستن کارباید ـ یک ترکیب سخت کارباید از پودر تنگستن کارباید و ماده مناسب چسباننده مانند کبالت می‌باشد. تنگستن کارباید تجاری با چسب کبالت برای اولین بار در آلمان (۱۹۲۶) و سپس در آمریکا (۱۹۲۸) و کانادا (۱۹۳۰) تولید و به بازار عرضه گردید. رایج‌ترین هسته‌های تنگستن کارباید از پودر دانه متوسط تنگستن **(WC)** با یک چسب کبالت ٦ تا ۱۳درصد ساخته شده‌اند. مزایای اصلی هسته‌های تنگستن کارباید چقرمگی و مقاومت در برابر شکست می‌باشد که بستگی به سایز پودر تنگستن و میزان چسب کبالت دارد. مقاومت سایشی با افزایش سختی ترکیب و سختی با ریز شدن اندازه دانه و کم شدن میزان کبالت، افزایش می‌یابد. بنابراین شکنندگی نیز ممکن است افزایش یابد. سختی زیاد برای کشش قطرهای کم در سرعت زیاد سودمند می‌باشد. میزان زیادتر چسب کبالت باعث نرمی جنس دوزه و کم شدن سختی و مقاومت

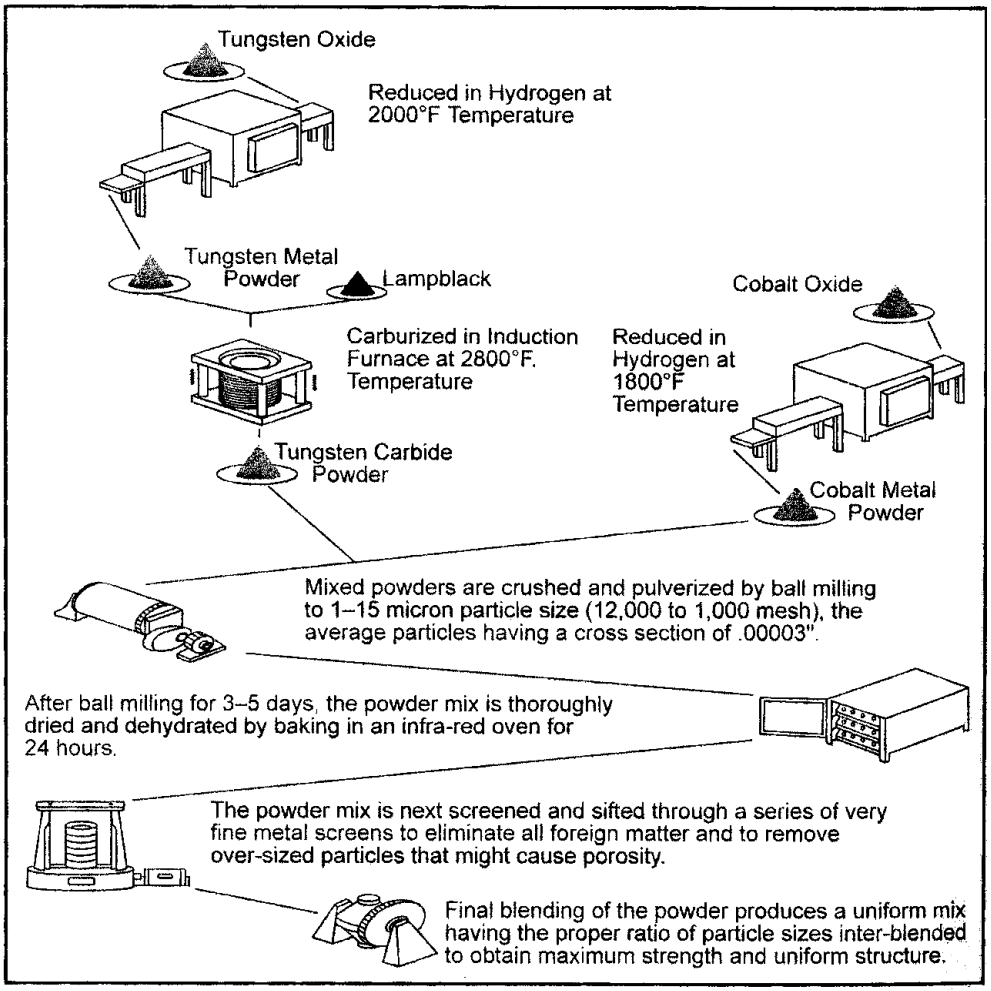
سایشی می‌شود. این دوزه‌ها با استهلاک کم در کشش مفتول‌های قطور در سرعت‌های کم مورد استفاده قرار می‌گیرند. افزودنی‌های تانتال (تانتالیوم) مقاومت چاله‌ای را بهبود بخشیده و آسیب‌های جوش خوردگی و خط افتادگی دوزه را کاهش می‌دهد. به هر حال مقاومت به مقدار کمی کاهش می‌یابد. دوزه‌هایی با افزودنی تانتال برای کشش فولاد ضدزنگ، آلیاژهای آلومینیوم و مفتول‌های گالوانیزه شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. افزودنی‌های تانتال سختی را افزایش می‌دهد، مقاومت سایشی را بهبود می‌بخشد و دانسیته کمتری دارند اما شکنندگی را افزایش می‌دهند. گریدهای زیر میکرونی تنگستن که حاوی تیتانیوم هستند در کشش مفتول‌های نازک پرکربن مثل مفتول طوقه لاستیک عمر دوزه را افزایش می‌دهند. این افزودنی‌های آلیاژی آسیب‌های سطح دوزه که باعث غیرقابل استفاده شدن برای مصارف بعدی می‌شود را به تأخیر می‌اندازد.

مشخصات طبقه‌بندی ـ تولیدکنندگان بیش از ۳۰ نوع (طبقه) تنگستن کارباید با دامنه عریض از ترکیبات کبالت (۲ تا ۳۰٪) و دانه‌بندی از خیلی ریز (۰/۵ تا ۰/۹ میکرون) را ارائه می‌نمایند. موقع انتخاب یک تنگستن کارباید، همواره سخت‌ترین نوع با کمترین میزان مواد چسبنده و ریزترین دانه‌بندی ممکن بدون مواجهه با شکست دوزه، مطلوب می‌باشد. این شرایط ماکزیمم عمر دوزه را فراهم می‌سازد. برای هر کاربردی معمولاً یک ترکیب از دانه‌بندی و میزان افزودنی چسبنده بهینه می‌باشد. ارائه دوزه برای هر کاربرد جداگانه‌ای، تولیدکنندگان کارباید را مکلف می‌سازد تا صدها نوع از آنها را داشته باشند. چون این امر غیرممکن است، تولیدکنندگان رایج‌ترین ترکیبات را به صورت استاندارد انتخاب نموده‌اند. جدول ۳ میزان کبالت و دانه‌بندی تنگستن کارباید برای انواع رایج مورد استفاده در کشش مفتول و میلگرد را نشان می‌دهد.

Grade	WC (%)	Co (%)	Grain Size	Strength (psi)	Density	R_A Hardness
GC-106	94	6	Fine	320,000	14.80–15.00	91.7–92.7
GC-206	94	6	Medium	320,000	14.80–15.00	90.7–91.7
GC-209	91	9	Medium	390,000	14.50–14.70	89.8–90.8
GC-313	87	13	Medium	400,000	14.05–14.25	88.1–89.1

جدول ۳ ـ مشخصات انواع تنگستن کارباید رایج

تولید تنگشتن کارباید ـ ابتدا تنگستن کارباید و کبالت پودر شده با نسبت‌های مناسب با یکـدیگر مخلوط می‌شوند. (به شکل ۱۵ نگاه کنید) این ترکیب با نسبت‌های مختلف برای مصارف گوناگون جهت ساخت کارباید سخت شده، می‌تواند متغیر باشد.

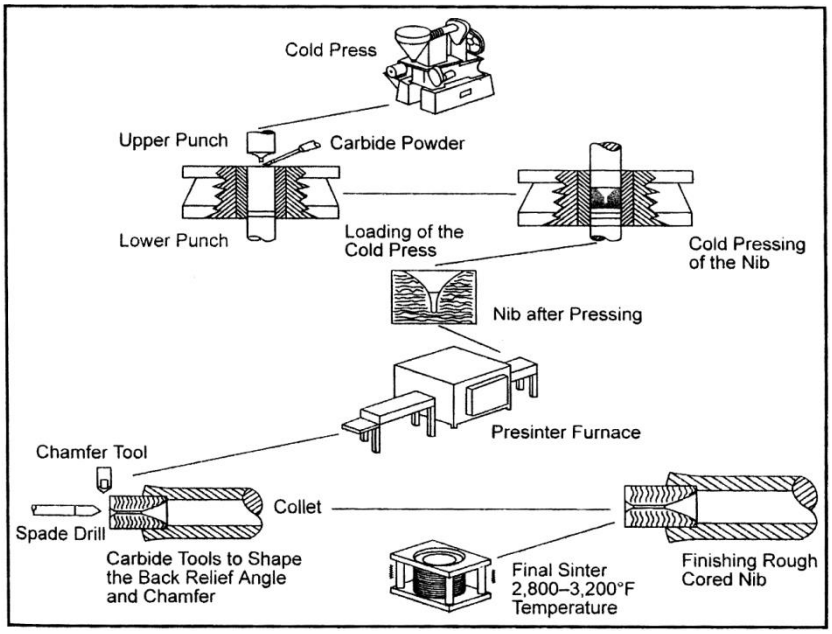


شکل ۱۵ـ تولید تنگستن کارباید

سپس پودرهای مخلوط شده جهت شکل‌گیری پرس شده و برای گیرش (قوام) گچ مانند حـرارت داده می‌شوند. در این حالت تنگستن کارباید می‌تواند تراشیده یا سوراخ شود و به ابعـاد دلخـواه

تبدیل شود. آخرین مرحله پختن هسته‌ها در خلاء یا اتمسفر هیدروژن در دمای بین ۱۳۴۳ تا ۱۵۳۵ درجه سانتیگراد می‌باشد.

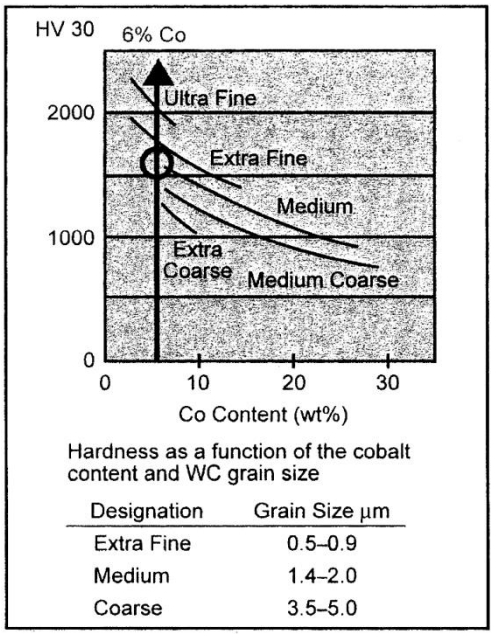
کارباید جامد فلز سختی نمی‌باشد. یک کامپوزیت پودر متالورژی می‌باشد. درحین پخت هسته‌ها بین ۱۵ تا ۲۰درصد ابعاد خطی آنها منقبض می‌شود و به یک ماده متراکم، سخت، چقر و یکنواخت تبدیل می‌گردد. (به شکل ۱۶ نگاه کنید)



شکل ۱۶ ـ ساخت هسته‌های تنگستن کارباید

بعداز پخت، جنس سنگ زده می‌شود و تا ایجاد سطوح کاملاً پولیش شده و تلرانس‌های خیلی دقیق پرداخت می‌گردد. صافی سطح تا کمتر از یک میکرو اینچ میسر می‌باشد. از این‌رو قیمت تمام شده یک سطح نهایی صاف می‌بایست به‌طور دقیق با نیازی که برای این سطح وجود دارد سنجیده شود. یک سطح نهایی صاف به عمر بیشتر دوزه منتهی می‌شود و یک سطح صاف‌تر تمایل کمتری به خط‌دار نمون مفتول حین کشش دارد.

سختی مواد یکی از خواصی است که نزدیک‌ترین تناسب به مقاومت سایشی را دارد. شکل ۱۷سختی ویکررز (HV) کارباید سخت شده را به عنوان تابعی از دانه‌بندی تنگستن‌کارباید و درصد کبالت به عنوان ماده چسبنده نشان می‌دهد. مقادیر بالاتر کبالت، سختی کمتر کارباید و چقرمگی بالاتر را به دنبال دارد. دانه‌بندی ریزتر تنگستن کارباید، سختی بالاتر و چقرمگی کمتری را به وجود می‌آورد.



Hardness as a function of the cobalt content and WC grain size

Designation	Grain Size μm
Extra Fine	0.5–0.9
Medium	1.4–2.0
Coarse	3.5–5.0

شکل ۱۷ـ سختی ویکرز کارباید سخت شده

همان‌گونه که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، یک هسته تنگستن کارباید با ٦٪ کبالت و دانه‌بندی پودر تنگستن کارباید از خیلی درشت تا خیلی ریز دارای دامنه سختی از ۱۲٦۰ تا ۲۰۰۰ ویکرز (HV) می‌باشد. سختی فولاد ابزار تندبر به‌طور نمونه ۷٦٤ ویکرز است. (به جدول ۲ نگاه کنید) بنابراین کارباید سخت شده دانه ریز سخت‌تر از فولاد ابزار می‌باشد. برعکس فولاد، کارباید در دماهای بالاتر سختی بیشتری را حفظ می‌نماید. به‌علاوه تکرار گرم شدن و سرد شدن خواص فیزیکی کارباید سخت شده را تغییر نمی‌دهد. ضریب انبساط گرمایی کارباید سخت شده حدود

نصف فولاد می‌باشد، به‌طوری که تأثیر حرارت ایجاد شده حین عملیات کشش مفتول بر ابعاد دوزه‌های تنگستن کارباید در مقایسه با دوزه‌های فولاد تندبر نصف می‌باشد.
مقاومت سایشی سطوح لغزشی درحین کشش مفتول، تعیین کننده عمر دوزه می‌باشد. تلاش جهت بهبود عمر دوزه معمولاً متمرکز بر افزایش سختی جنس دوزه می‌باشد. درحالی که مقررات شکست چقرمگی و هدایت حرارتی اغلب استفاده از مواد خیلی سخت را محدود می‌سازد، با استفاده از تنگستن کارباید با دانه‌بندی ۰/۳ تا ۱ میکرون و کبالت ۱/۵ تا ۵ درصد سختی ۱۸۰۰ تا ۲۵۰۰ ویکرز به دست می‌آید. نتیجه سایش این دوزه‌ها نشان می‌دهد که سختی جنس دوزه، سایش دوزه را کنترل نمی‌کند. به عنوان مثال؛ افزایش سختی دوزه مستقیماً منتهی به افزایش عمر آن نمی‌شود. بنابراین غالباً ضروری است که سختی قربانی عمر دوزه گردد.
به‌طور خلاصه، مزایای دوزه‌های تنگستن کارباید شامل سطح بالای سختی، مقاومت زیاد فشاری، چقرمگی خوب، مقاومت سایشی خیلی خوب و انتقال حرارت خوب، خنک‌کاری خیلی موثر را باعث می‌شوند. دوزه‌های تنگستن کارباید وقتی چقرمگی مهم باشد مورد استفاده قرار می‌گیرند، برای مثال؛ برای کشش فلزات آهنی مقاومت بالا و همین دوزه‌ها با افزودنی‌های تانتال یا تیتانیوم برای کشش فولاد ضدزنگ، آلیاژهای آلومینیوم و مفتول‌های گالوانیزه شده، به کار گرفته می‌شوند.
الماس ـ کربن با ساختار کریستالی مکعبی به خصوص می‌باشد. هر کربن اتم با چهار اتم دیگر به فواصل مساوی احاطه گردیده است و صفحه لغزشی در ساختار وجود ندارد. بنابراین سخت‌ترین جنس دوزه می‌باشد. الماس طبیعی **(ND)** همچنین بهترین هدایت حرارتی را دارد، حدود پنج برابر بهتر از مس و ٦ تا ١٠ برابر بهتر از تنگستن کارباید است. اگر چه هدایت حرارتی با دما تغییر می‌کند، هدایت حرارتی الماس در دماهای افزایش یافته به سرعت کاهش می‌یابد. بنابراین خنک‌کاری مناسبی برای جلوگیری از دماهای افزایش یافته کشش مورد نیاز می‌باشد. سه نوع الماس برای دوزه‌های کشش مفتول مورد استفاده قرار می‌گیرند، تک کریستال طبیعی **(SCN)**، تک کریستال مصنوعی **(SCS)** و چند کریستالی **(PCD)**.
تک کریستال طبیعی (SCN) ـ از نیمه دوم قرن ۱۹ در کشش مفتول مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجایی که تک کریستالی می‌باشد، با اصطکاک خیلی کم می‌تواند پرداخت خیلی خوبی

برروی آن انجام شود. سختی و ضریب اصطکاک دوزه‌های الماس تک کریستال طبیعی با جهت‌گیری محورهای شبکه بلوری تغییر می‌کند و باعث افزایش سایش دوزه در جهات مشخص شبکه بلوری می‌گردد. برای الماس طبیعی چقرمگی بسیار ضعیف است به‌طوری که کریستال الماس به طور طبیعی نقاط ضعیفی به نام صفحات تقسیم دارد که در آن‌جا شکست به راحتی صورت می‌گیرد.

مقاومت خوردگی الماس در برخی کاربردها یک ضعف می‌باشد. شکل‌دهی فلزات کارباید قوی مانند آهن، نیکل، تنگستن و مولیبدن اتم‌های سطح الماس را سریعاً بیرون می‌کشد، به‌خصوص اگر آن‌جا در اثر سرعت‌های بالا در ناحیه کشش حرارت زیاد باشد. دقت زیادی برای کاهش دمای کشش می‌بایست صورت گیرد.

سطوح الماس پولیش شده مقاومت خوبی در برابر آسیب سطحی دارند، اگر چه آسیب سطحی در شرایط اوضاع خیلی بد، مانند تغییرات شیمیایی سطوح یا پولیش ضعیف یا ترک سطحی دوزه ممکن است باقی‌بماند. الماس‌های تک کریستالی بهترین سطح نهایی را تولید می‌کنند و در دوزه‌های نهایی که سطوح براق و تمیز مورد نیاز باشند، به‌کار گرفته می‌شوند.

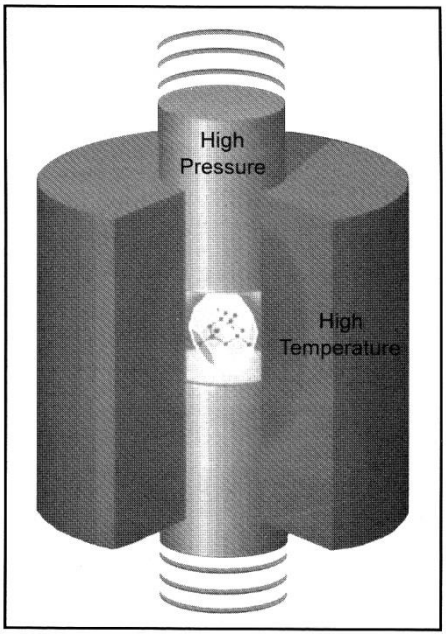
تک کریستالی مصنوعی (SCS) ـ به طور مصنوعی تولید می‌شوند، اما اتم‌های کربن در یک کریستال شبیه الماس‌های طبیعی قرار دارند. الماس مصنوعی نسبت‌به الماس طبیعی دوزه‌ها سایش یکنواخت‌تری دارند. دوزه‌های **SCS** به مقدار خیلی کم مقاومت سایشی و شکست چقرمگی‌شان نسبت‌به الماس طبیعی کمتر است. هدایت حرارتی آنها ۲ تا ۳ برابر از دوزه‌های الماس طبیعی بهتر است که در سرعت‌های بالای کشش که حرارت زیادی تولید می‌گردد و موجب فرسایش دوزه و از بین رفتن روانکار می‌گردد، مفید خواهد بود. دوزه‌های الماس طبیعی و مصنوعی تک کریستالی معمولاً برای کشش قطرهای کوچک در دستگاه‌های ترکش مورد استفاده قرار می‌گیرند.

الماس چند کریستالی (PCD) ـ در سال ۱۹۵۳ اریک لاندبلاد برای اولین بار در یک آزمایشگاه تحقیقاتی **ASEA** در سوئد الماس مصنوعی را ساخت. در سال ۱۹۵۵ جنرال الکتریک در آمریکا شروع به ساخت الماس‌های صنعتی کوچک نمود. در سال ۱۹۵۷ جنرال الکتریک با معرفی نوع **A** الماس‌های مصنوعی اولین تولیدکننده انبوه شد، تیپ **A** این الماس به ویژه جهت تراش و ساییدن

تنگستن کارباید طراحی شده بودند. توسعه بلوک‌های دوزه الماس در سال ۱۹۷٤ بـا ارائـه عمـر زیاد، توسعه بهره‌وری، سطح نهایی یکنواخت و کنترل بهتر ابعادی، انقلابـی در صـنعت مـس بـه وجود آورد. امروزه بلوک‌های PCD به تنهایی یا به صـورت محصـور در بلـوک‌هـای تنگسـتن کارباید اغلب در کاربردهای کشش مفتول آهنی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

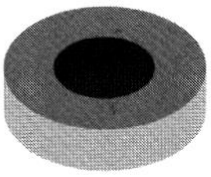
بلوک‌های الماس چند کریستالی (PCD) با تحت فشار و حرارت زیاد قرار دادن دانه‌های الماس و یک فلز کاتالیزور تا جایی که دانه‌های الماس به یکـدیگر پیونـد بخورنـد سـاخته مـی‌شـوند. مقاومت مکانیکی بین دانه‌های بلوک PCD به پیوند اتمی مربوط خواهد بود. فلـز فقـط تسـهیل کننده پیوند اتمی می‌باشد و چسباننده دانه‌های الماس نمی‌باشد. (به شکل ۱۸ نگاه کنید)

بلوک می‌تواند مستقل یا محصور در بلوک‌های تنگستن کارباید تولید گردد. (بـه شـکل ۱۹ نگـاه کنید)



شکل ۱۸ـ بلوک‌های دوزه الماس متراکم تولید شده تحت دما و فشار زیاد

- عمرطولانی‌تر دوزه، بازسازی بیشتر، زمان بیشتر کار ماشین
- بهبود سطح و شکل و کنترل ابعادی مفتول
- ارائه دامنه وسیع کاربردی برای کشش مفتول‌های آهنی و غیرآهنی
- مقاومت بیشتر شکست نسبت‌به الماس تک کریستالی



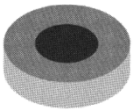
بلوک احاطه شده توسط تنگستن کارباید

بلوک مستقل

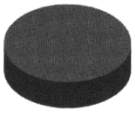
شکل ۱۹ـ مزایای محصول

مشخصات انواع ـ بلوک‌های مستقل معمولاً با دو اندازه دانه (کمتر از یک و پنج میکرومتر) و دو نوع (**TS**ـ فلز کاتالیزور بعداز پایداری حرارتی جدا می‌گردد و **MF** فلز کاتالیزور باقی می‌ماند) ارائه می‌گردند. بلوک‌های تحت پوشش و حمایت بلوک تنگستن کارباید یک هسته محصور شده توسط یک حلقه تنگستن کارباید می‌باشد. این بلوک‌ها معمولاً در ١٤ سایز و ٤ اندازه دانه (۳، ۵، ۲۵ و ۵۰ میکرومتر) ارائه می‌گردند. تمامی این بلوک‌ها در ساختار خود دارای فلز کاتالیزور هستند. شکل ۲۰ مشخصات و کاربرد بلوک‌های مستقل و تحت حمایت تنگستن کارباید را خلاصه نموده است.

بلوک احاطه شده توسط تنگستن کارباید



بلوک مستقل



● الماس چند کریستالی احاطه شده توسط حلقه تنگستن کارباید

● چهار دانه‌بندی مختلف

متوسط اندازه دانه‌ها ۵۰، ۲۵، ۵، ۳ میکرون

●در ساختار تمامی بلوک‌های **PCD** فلز کاتالیزور وجود دارد و دمائی نصب نباید بالاتر از ۷۰۰ درجه باشد.

● رسانای الکترویکی، هسته الماس را هم با روش **EDM** و هم سایر روش‌ها می‌توان شکل‌دهی کرد.

●پولیش کردن

پودر الماس سری **GE300** برای پولیش پیشنهاد می‌گردد و برای پولیش بسیار عالی پودر الماس ۱/۴ یا ۱/۲ میکرون استفاده می‌گردد.

●کاربرد

ـ نوع ۲۵ یا ۵۰ میکرون

ـ کشش مس، آلومینیوم و سایر مواد غیرآهنی با قطر متوسط

ـ نوع ۵ تا ۲۵ میکرون

ـ کشش موادآهنی و غیرآهنی با قطر متوسط و نازک با سطح نهایی بهتر

ـ نوع ۳ تا ۵ میکرون

کشش مفتول‌های آهنی و غیر آهنی در سایزهای نازک و سطح بسیار حساس

● الماس چند کریستالی مستقل **(PCD)**

● دو سایز دانه‌بندی

متوسط اندازه‌دانه کمتراز یک‌میکرون و ۵ میکرون

● دو نوع

TS= پایداری حرارتی، حذف کاتالیزور فلزی

MF= دارای فلز، حاوی فلز کاتالیزوری

نوع **TS**

ـ مقاوم در برابر حرارت تا **c** ۱۲۰۰°C در یک اتمسفر ساکن یا خلاء

ـ می‌تواند در پودرهای فلزی و مقاوم ودما بالا نصب گردد.

ـ بدون رسانایی الکتریکی، روش **EDM** برای سوراخ‌کاری جهت شکل‌دهی پیشنهاد نمی‌گردد، از لیزر یا اولتراسونیک یا سوزن جهت شکل‌دهی می‌بایست استفاده شود.

نوع **MF**

ـ ثبات حرارتی تا **c** ۷۰۰°C

ـ از دمای بالای ۷۰۰ درجه برای نصب بلوک استفاده نشود.

ـ رسانای الکتریکی، برای فرم‌دهی از اولتراسونیک یا لیزر یا سوزن استفاده می‌شود.

پولیش کردن

ـ پودر الماس سری **GE300** برای مشکل‌دهی نهایی سوراخ و پولیش دوزه الماس پیشنهاد می‌گردد.

ـ برای پولیش عالی پودر الماس ۱/۴ یا ۱/۲ میکرون استفاده شود.

● کاربرد

ـ برای کشش مفتول طوقه لاستیک (از نوع **TS** یک میکرون استفاده شود.)

ـ کشش دمای زیاد تنگستن/مولیبدن (از نوع **TS** استفاده شود).

ـ کشش قطرهای کوچک‌تر مفتول‌های آهنی با سطح خیلی حساس (استفاده از نوع **TS** یا **MF**).

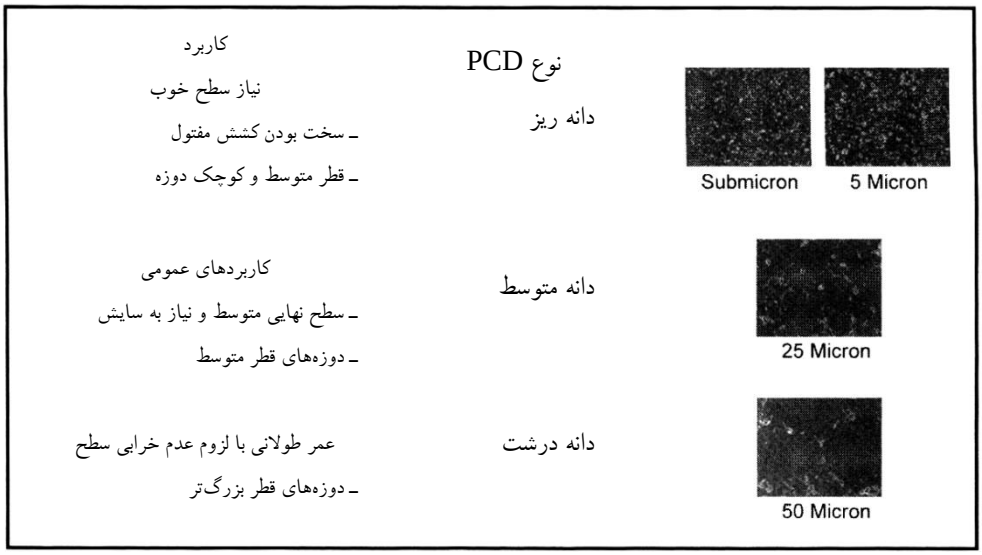
شکل ۲۰ـ بلوک‌های الماس چند کریستالی

الماس‌های چند کریستالی براساس سایز دانه مشخص می‌گردند، اغلب در چهارده رده؛ درشت، متوسط، ریز و خیلی ریز موجود می‌باشد. طبقه‌بندی سایز دانه مشکل می‌باشد زیرا هر تولیدکننده‌ای سنجش مختلفی از سایز دانه دارد (به عنوان یک متوسط یا حداکثر). همچنین، روشی که بلوک‌ها تولید می‌شوند به نظر می‌رسد که بر سایز دانه تأثیرگذار باشد. به هر حال، روند عملکرد خاص مربوط به سایز دانه در جدول ٤ خلاصه گردیده است.

ویژگی	دانه ریز	دانه درشت
اصطکاک	متوسط	کمی بهتر
انتقال حرارت	خوب	بهتر
سفتی	خوب	بهتر
مقاومت سایش	بهتر	خیلی خوب
مقاومت خوردگی	مانند **ND**	مانند **ND**
مقاومت آسیب‌پذیری	ضعیف	بهتر
خروج ذرات	ضعیف	بهتر
ایجاد پودر	ضعیف	بهتر
سطح نهایی مفتول	خوب	ضعیف

جدول ۴ـ روند عمومی **PCD** به عنوان تابعی از سایز دانه

کاربردهای PCD ـ شکل ۲۳ کاربردهای PCD با سایز دانه‌بندی ریز، متوسط و درشت را فهرست کرده است. برای انتخاب نوع می‌بایست با عرضه‌کننده دوزه مشورت صورت گیرد تا برای کاربرد خاص کشش مفتول بهترین رویکرد فنی حاصل شود. به خاطر بسپارید که بلوک‌های الماس طول محدودی دارند، بنابراین، زاویه تماس و طول استوانه سایز برای برخورد صحیح مفتول در بلوک برای کاهش مورد نظر، ممکن است متوسط در نظر گرفته شوند. معمولاً زوایای بازتر و طول استوانه کوتاه‌تری در دوزه‌های PCD مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۲۱ـ کاربرد PCD با دانه‌های ریز، متوسط و درشت

دوزه‌های الماس در ماشین‌های ترکش وقتی که تلرانس‌های قطر خیلی کم و صافی سطح خیلی خوب مورد نیاز باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین برای کشش مفتول فولادی قطر ۰/۱۸ میلیمتر و کمتر نیز از این دوزه‌ها استفاده می‌شود. فشار دوزه وقتی مفتول‌های نازک کشیده می‌شوند نسبتاً کم می‌باشد و احتمال شکست دوزه‌های الماس وجود ندارد.

دوزه‌های الماس برای مفتول‌های قطر ۰/۱۸ تا ۰/۷۶ میلیمتر در سرعت‌های کشش بالا که رسانایی حرارتی اهمیت دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. الماس چند کریستالی در بسیاری از کاربردها جایگزین الماس طبیعی و تنگستن کارباید گردیده است و در موارد زیر مطلوب می‌باشند.

- **افزایش سرعت دستگاه‌های کشش**
- **تلرانس بهتر سایز**
- **پایداری بیشتر کیفیت مفتول**
- **هزینه بهره‌وری بهتر**

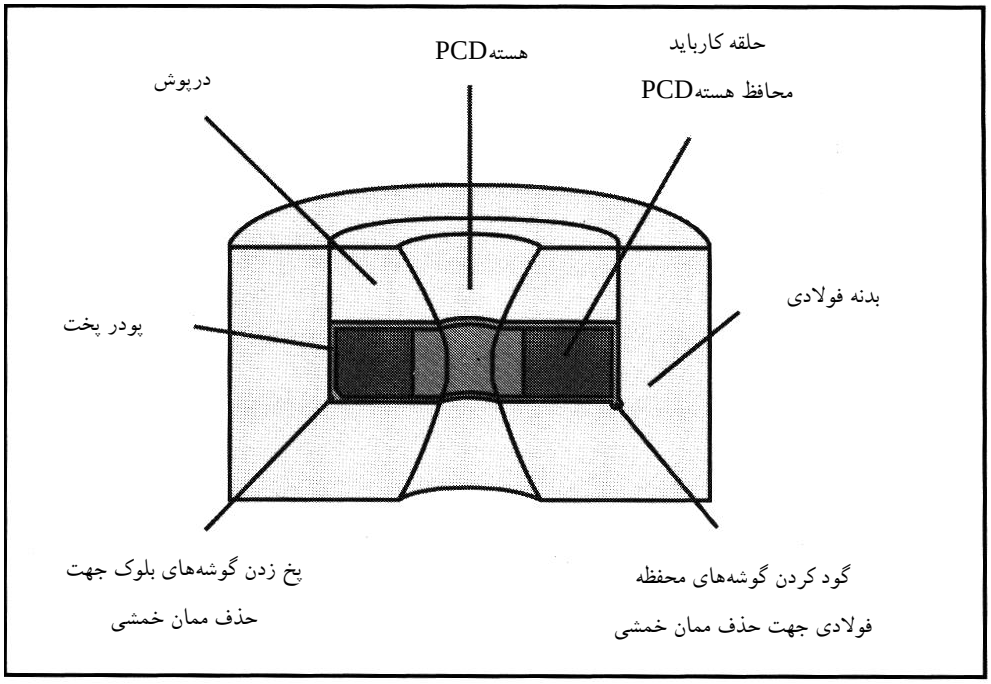
مشخصات دوزه‌های تک و چند کریستال برای کشش فلزات مختلف در جدول ۵ لیست شده است.

جنس	انحناء	زاویه (ND)	استوانه سایز (ND)	زاویه (PCD)	استوانه سایز(PCD)
مس خام	خوب	۱۸°± ۲°	٪۴۰ ± ٪۱۰	۱۸°± ۲°	٪۲۵ ± ٪۱۰
آلومینیوم	خوب	۲۰°± ۲°	٪۲۵ ± ٪۱۰	۲۰°± ۲°	٪۲۵ ± ٪۱۰
مس با روکش قلع و نقره	خیلی خوب	۲۰°± ۲°	٪۲۰ ± ٪۱۰	۲۰°± ۲°	٪۲۰ ± ٪۱۰
فولاد ضدزنگ	کمی	۱۴°± ۲°	٪۴۵ ± ٪۱۰	۱۴°± ۲°	٪۳۵ ± ٪۱۰
تنگستن	کمی	۱۴°± ۲°	٪۵۰ ± ٪۱۰	۱۴°± ۲°	٪۳۰ ± ٪۱۰
فولاد کربنی با روکش برنج	کمی	۱۲°± ۲°	٪۳۵ ± ٪۱۰	۱۴°± ۲°	٪۳۰ ± ٪۱۰
طول استوانه سایز = درصدی از قطر نهایی					

جدول ۵ ـ مشخصات دوزه‌های الماس تک و چند کریستالی

عرضه‌کنندگان دوزه از چند روش برای جا زدن بلوک‌های دوزه **PCD** در پوسته مناسب استفاده می‌کنند. شکل ۲۲ یک نمونه جا زدن بلوک محصور شده را نشان می‌دهد.

نامگذاری بلوک سری D ـ درحین توسعه اولیه بلوک‌های **PCD**، تعدادی از تولیدکنندگان دوزه انجمن تولیدکنندگان دوزه الماس **(ADD MA)** را تأسیس کردند و خصوصیات بلوک سری **D** را بنا نهادند. سری **D** توسط تولیدکنندگان بلوک دوزه الماس به عنوان خط راهنما جهت شناسایی



شکل ۲۲ـ قرار گرفتن دوزه PCD در پوسته

محصولات‌شان مورد استفاده قرار گرفت. این سری از D_6 تا D_{36} برای قطر و ضخامت بلوک به همراه دیگر اطلاعات نامگذاری می‌شوند. به نظر می‌رسد که هر تولیدکننده‌ای سری D بلوک‌های خود را به حدی تغییر می‌دهند که درج مشخصات در این فصل دقت کافی را نخواهد داشت. به این دلیل این اطلاعات را می‌بایست از تولیدکننده فراهم نمود.

به طور خلاصه؛ دوزه مفتول در بهره‌وری، کیفیت و سودبخشی مفتول نوردی حیاتی می‌باشد. یک نوع دوزه برای همه کاربردها کارایی ندارد. یک طراحی یا جنس دوزه می‌بایست در رابطه با هزینه کارگر، خروجی و خواب ماشین، کیفیت محصول، میزان ضایعات و یا همه اینها باهم ارزیابی می‌گردد. اگر روزی جنسی یا طراحی برای دوزه یافت شد، می‌بایست با دقت و ثبات با عملیات کیفی دوزه‌سازی به کار گرفته شود.

فصل ۱۱

روانکاری در کشش مفتول آهنی

مقدمه

اهمیت روانکاری در کشش مفتول

فرآیند کشیدن مفتول از درون یک دوزه کاهنده قطر، باعث ایجاد حرارت زیاد، ایجاد نیروهای فشاری و برشی در داخل دوزه و نهایتاً باعث ایجاد تغییر شکل دائمی بزرگی در مفتول می‌گردد. از آنجایی‌که وظیفه هرگونه روانسازی کاهش اصطکاک بین دو عامل متحرک برروی یکدیگر می‌باشد، در کشش مفتول نیز یک روانساز نقش حیاتی در کاهش اصطکاک و همچنین کاهش فرسایش دوزه به عهده دارد. این روانکاری اثرات مهمی به دنبال خواهد داشت از قبیل:

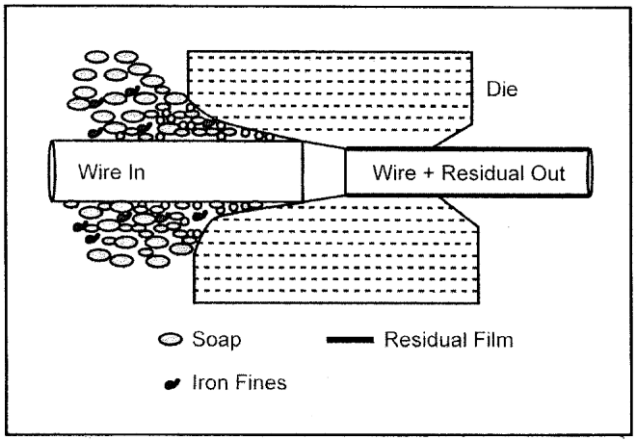
- کاهش زمان خاموش کردن دستگاه جهت تعویض دوزه‌های خراب
- کاهش نیروهای کشش به دلیل کاهش اصطکاک
- کاهش دمای سطح مفتول و دوزه
- خواص فیزیکی یکنواخت مفتول به دلیل تغییر شکل یکنواخت مفتول
- کاهش مشخصات خارج از عرف مفتول

به دلایل بالا نقش روانکاری در عملیات کشش مفتول حیاتی بوده و به یکی از مهمترین متغیرها برای عملکرد بهتر، این عملیات (کشش مفتول) می‌باشد.

تأثیر انتخاب روانکار بر عملیات کشش مفتول

از وظایف اولیه روانکار کاهش اصطکاک و به حداقل رساندن فرسایش می‌باشد. بنابراین جهت انتخاب روانکار، ضوابطی وجود دارد که می‌بایست مورد توجه قرار گیرند. چون چربی می‌بایست درحین عملیات کشش حفظ گردد، همیشه باقی‌مانده‌های روانکار برروی مفتول کشیده شده وجود دارد. (به شکل ۱ نگاه کنید) این باقی‌مانده‌های روانکاری برای عملیات بعدی برروی مفتول ا ز

قبیل؛ کله‌زنی سرد و نوردکاری مفید می‌باشند و همچنین می‌توانند پوششی برای سطح و جلوگیری از زنگ‌زدگی در مواقع انبارش مفتول باشند. از طرف دیگر روانسازهای باقی‌مانده برروی سطح مفتول می‌توانند عملیات تمیزکاری و آنیل‌کاری مفتول را دچار مشکل سازند. نهایتاً در انتخاب روانساز می‌بایست ملاحظات زیست‌محیطی از قبیل مواد پر خطر، انتشار مواد مضر و سهولت دفع مورد توجه قرار گیرند.



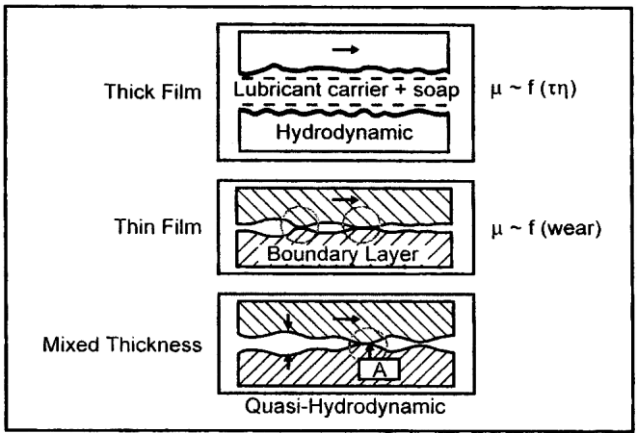
شکل ۱ـ الگویی برای نشان دادن خارج شدن روانکار

با وجود این دلایل واضح است که تأثیر روانساز حیاتی بوده و دانستن عملکرد و شیمی این مواد مهم می‌باشد. این فصل تمرکزی دارد بر پودر صابون که ابتدایی‌ترین روانساز در کشش مفتول‌های آهنی می‌باشد. همچنین بررسی نیز برروی روانکارهای مایع صورت گرفته است.

عملکرد روانکار در کشش مفتول

روانکاری لایه‌ای و هیدرودینامیکی

ضخامت لایه روانکار نمایانگر عملکرد روانکاری می‌باشد. برای لایه‌های ضخیم، روانکاری هیدرودینامیکی اتفاق می‌افتد و روانکاری لایه‌ای نتیجه‌اش یک قشر نازک از روانکار برروی مفتول می‌باشد. برای ضخامت‌های دوگانه روانساز، عملکرد روانکاری اشتراکی از روانکاری لایه‌ای و هیدرودینامیکی می‌باشد که شبه هیدرودینامیکی نامیده می‌شود. (به شکل ۲ نگاه کنید)



شکل ۲ـ ضخامت‌های لایه

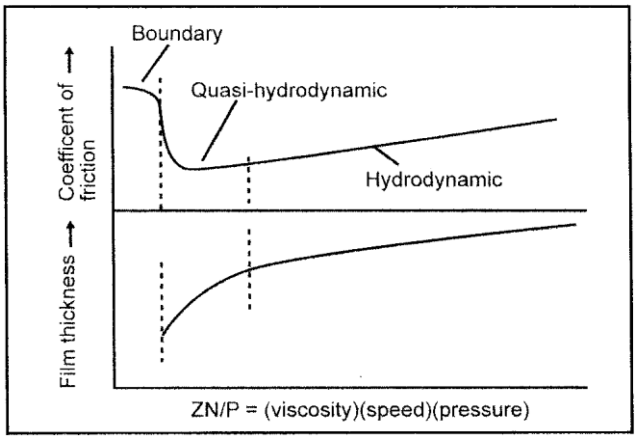
در روانکاری هیدرودینامیکی، یک لایه روانکار به طور فیزیکی سطح قسمت استوانه دوزه **(bearing)** و مفتول را از یکدیگر جدا می‌سازد و در غیر این صورت این دو با هم تماس مستقیم خواهند داشت. اگر این لایه به اندازه کافی ضخیم باشد، حرکت نسبی مفتول در دوزه در تقابل با مقاومت برشی و ویسکوزیته لایه روانکار خواهد بود. بنابراین صراحتاً ضریب اصطکاک برای روانکاری هیدرودینامیکی تابعی از مقاومت برشی و ویسکوزیته روانساز می‌باشد. اصطکاک در روانکاری هیدرودینامیکی کم و پوشش حداقل می‌باشد.

در ارتباط با بارهای زیاد، ضخامت لایه روانساز به طور فزاینده‌ای نازک می‌گردد و یک لایه میکروسکپی جدا سازنده سطوح ایجاد می‌گردد. در این مورد، خواص فیزیکی آن حجم روانساز از قبیل مقاومت برشی و ویسکوزیته اهمیت زیادی نخواهند داشت.

بیشتر از خواص فیزیکی روانکار در این موارد، آنالیز شیمیایی آن و ماهیت فلز پایه آنها مهم می‌باشد. به‌طور نمونه؛ روانساز برای تشکیل لایه روانکاری هم جذب سطح فلز می‌گردد و هم واکنش شیمیایی با آن انجام می‌دهد. ناهمواری‌های سطوح تخلخلی در لایه روانساز ایجاد می‌کند به‌طوری‌که ضریب اصطکاک را تابعی از خواص پوشش سطح می‌سازد.

ضخامت لایه و ضریب اصطکاک برای لایه سطحی شبه هیدرودینامیکی و هیدرودینامیکی روانکاری تابعی از ویسکوزیته روانکار **(Z)**، سرعت نسبی حرکت یک سطح نسبت‌به سطح دیگر

(N) و فشار دوزه (P) می‌باشد که به‌وسیله منحنی‌های Stribeck ارائه شده است. (به شکل۳ نگاه کنید)



منحنی‌های **Stribeck** نشان‌دهنده روش‌های روانکاری به صورت تابعی از **ZN/P**

در سرعت‌های بالا و فشارهای کم (ZN/P افزایش می‌یابد)، روانکاری هیدرودینامیکی غالب است. بنابراین با کاهش نسبت ZN/P ، ضخامت لایه کاهش می‌یابد و پوشش ناقصی از جدایی دو سطح نسبت‌به هم به‌وجود می‌آید. در نقطه‌ای که روانکاری لایه مرزی (لایه نازک) غالب می‌گردد، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. در این نقطه اصطکاک زیاد است و نسبتی بین خواص فیزیکی روانساز و اصطکاک وجود ندارد.

حالت‌های روانکاری در کشش مفتول با پودرهای صابونی

روانکاری هیدرودینامیکی در کشش مفتول ترجیح داده می‌شود، طراحی دوزه طوری صورت می‌گیرد که این حالت از روانکاری به شدت ترویج یابد. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است.

روانکاری هیدرودینامیکی کمترین اصطکاک در عملیات کشش را مهیا می‌سازد. از آنجایی که در عملیات کشش مفتول دامنه وسیعی از فشار، دما و سرعت و از تفکیک مفتول گرفته تا محصول خوب کشیده شده، همگی تأثیرگذار بر عملیات روانکاری می‌باشند، از این‌رو بهترین روانکاری در کشش مفتول در عمل ترکیبی از دو حالت هیدرودینامیکی و لایه نازک روانکاری می‌باشد.

برای مفتول در فشار زیاد کشش و سرعت کم، لایه روانکاری نازکی مشاهده می‌گردد و برعکس در کشش‌های کم و با سرعت زیاد، روانکاری هیدرودینامیکی روی می‌دهد.
باید توجه داشت که این یک شرح کلی از حالت‌های روانکاری می‌باشد و کار خیلی اساسی این است که عملکرد روانکاری بهتر شناخته شود. با این حال ادامه مطلب پیرامون توسعه و انتخاب روانکارها برای کشش مفتول می‌باشد. آنالیز شیمیایی و همینطور ویژگی عمده باید مورد توجه قرار گیرد تا پودر صابون بهترین عملکرد را داشته باشد.

انواع آنالیز شیمیایی روانسازهای کشش مفتول

پودرهای صابونی

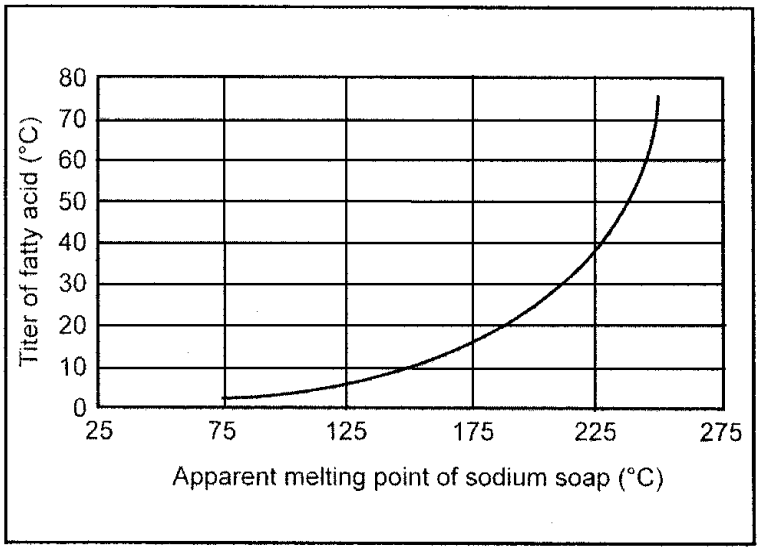
روانکاری خشک، کشش اکثر ترکیبات مفتول آهنی جهت رسیدن به کاهش سطح مقطع لازمه را در بر می‌گیرد. تمامی صابون‌های کشش مفتول محصول یک اسیدچرب و یک قلیا برای شکل‌گیری یک نمک، همراه با افزودنی‌ها و مواد گنجانیده دیگر در صابون برای افزایش عملکرد می‌باشند. صابون‌های کشش مفتول براساس حلالیت آنها در آب به صورت زیر طبقه‌بندی می‌گردند:

- صابون‌های غیرمحلول ـ معمولاً با پایه کلسیم، مانند استئارات کلسیم که از ترکیب آهک و اسیداستئاریک شکل می‌گیرد.
- صابون‌های تاحدی محلول ـ معمولاً ترکیبی از استئارات سدیم و کلسیم که از ترکیب سود کاستیک (یا سدیم کربنات) و آهک با اسیداستئاریک شکل می‌گیرد.
- صابون‌های محلول ـ استئارات سدیم یا پتاسیم که با ترکیب سود کاستیک (سود سوزآور) و پتاس کاستیک (پتاس سوزآور) با اسیداستئاریک شکل می‌گیرند.

نوع اسید چرب مصرفی برای تولید صابون کشش در خواص آن تأثیرگذار می‌باشد. این اسیدهای چرب با تیتراسیون براساس نقطه ذوب آنها طبقه‌بندی می‌گردند.
به طور نمونه نقطه نرمی صابون (نقطه ذوب) با افزایش تیتراسید، افزایش می‌یابد. همانگونه که در شکل ٤ نشان داده شده است. باید توجه داشت که شناسایی نقطه ذوب اغلب دشوار می‌باشد.

به طور معمول صابون‌های سدیمی محلول یا صابون‌های کلسیمی نامحلول در طول زمان واکنش با قلیا یا اسیدچرب شامل افزودنی‌های دیگر نیز می‌باشند. این افزودنی‌ها ممکن است موادی با نقطه ذوب بالا برای افزایش نقطه ذوب و ویسکوزیته مذاب روانکار باشند.

همچنین ممکن است افزودنی‌های فشار شدید **(EP)**، افزایش دهنده چسبندگی، بازدارنده‌های خوردگی و غیره باشند. انواع و اثرات افزودنی‌ها در زیر مورد بحث قرار گرفته‌اند.



شکل۴ـ ارتباط بین تیتراسید چرب و نقطه ذوب صابون کشش مفتول

آهک (هیدروکسید کلسیم)

تاکنون به دلیل اثربخش و هزینه آن رایج‌ترین افزودنی می‌باشد. آهک ضمن اینکه در درجه اول در صابون‌های پایه کلسیم مورد استفاده قرار می‌گیرد، در صابون‌های سدیمی نیز مؤثر می‌باشد. معمولاً نسبت آهک به صابون کلسیمی به صورت غنای صابون شرح داده می‌شود. صابون ضعیف چربی کمتری دارد و نقطه ذوب بالاتری خواهد داشت. آهک در درجه اول عامل حجم‌دهنده می‌باشد که ویسکوزیته مذاب صابون را افزایش می‌دهد. همانگونه که در شکل ۵ نشان داده شده

است. ارتباط بین غنای صابون و خواص روانکاری در قسمت انتخاب روانکار همین بخش آمده است.

براکس

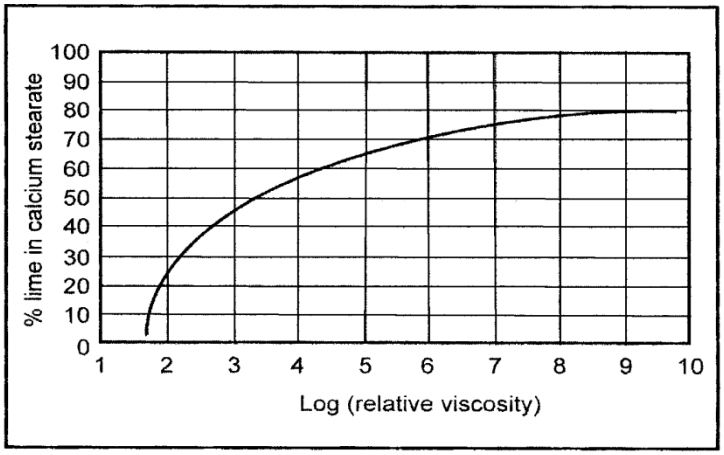
یکی دیگر از افزودنی‌های رایج برای صابون‌های کشش مفتول است که مانند آهک از سال‌ها پیش به عنوان پوشش‌دهنده میلگرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساساً براکس در صابون‌های سدیمی برای افزایش نقطه ذوب، ویسکوزیته ذوب و مقاومت فشاری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

همچنین به عنوان افزودنی در صابون‌هایی که می‌بایست مقداری پودر بعداز عملیات کشش برروی مفتول بماند ولی تداخلی با عملیات جوشکاری بعدی نداشته باشد، اضافه می‌گردد. عیبی که براکس دارد این است که آبگیر می‌باشد، بنابراین سعی در جذب رطوبت در محیط‌های مرطوب دارد که نتیجه آن تجمع می‌باشد. قوانین زیست محیطی در مورد میزان بُر (بُرن) در فاضلاب‌ها می‌بایست مورد توجه قرار گیرد.

کربنات سدیم (خاکستر سودا)

جهت بالا بردن ویسکوزیته ذوب در صابون‌های سدیمی ذوب شده است. حضور کربنات سدیم همچنین قابلیت حل شدن در آب را بالا می‌برد و برای کاربردهای تمیزکاری با آب مناسب می‌باشد. سولفات سدیم نیز مانند کربنات سدیم ویسکوزیته ذوب را بالا می‌برد ولی به خاصیت قلیایی روانکار کمکی نمی‌کند. این ماده همچنین نشستن روانکار بر مفتول را بیشتر می‌کند و در نتیجه ضخامت لایه روانکار زیاد می‌شود، شاید شبیه حالت منسوخ شده‌ای که روانکار سولفات آهن ایجاد می‌کند.

قبل از ظهور دوزه‌های کارباید، یک روکش مهم که به کشش مفتول کمک می‌کرد، روکش اکسیدآهن بود. در واقع این پوشش قهوه‌ایی روشن حاصل پاشیدن آب بر مفتول اسیدشویی شده می‌باشد. سولفات آهن که یک نمک اسیدی می‌باشد، پسماند مایل به قهوه‌ای برروی مفتول باقی می‌گذارد که شبیه روکش اکسیدآهن می‌باشد. روانکارهای حاوی سولفات آهن توسط تولیدکنندگان میخ ترجیح داده می‌شوند، زیرا لایه روانکار باقی‌مانده برروی مفتول باعث برش بهتر آن می‌گردد.



شکل ۵ ـ تأثیر میزان آهک بر ویسکوزیته ذوب روانکارهای کشش مفتول با پایه کلسیم

رنگ دانه‌های رنگی

شامل موادی از قبیل اکسیدروی، دی‌اکسید تیتانیم و کلسیم کربنات می‌شوند. این مواد افزودنی‌های دو منظوره می‌باشند. آنها ظاهر سطح مفتول را تغییر می‌دهند و در روشی مشابه در مایعات رنگی در عملیات تغییر شکل عمیق در ورق‌های فلزی نیز ظاهر سطح را تغییر می‌دهند. ذرات رنگ دانه در زبری سطح فرو می‌روند و سطح صافی را به وجود می‌آورند. این عملیات به طور ویژه پس از زنگ‌گیری‌های مکانیکی که هیچگونه عملیات پوششی برای پر کردن زبری‌های سطح مفتول صورت نمی‌گیرد، به‌کار گرفته می‌شوند. به دلیل سختی، دی‌اکسید تیتانیوم قابلیت پولیش کردن و ایجاد یک سطح نرم در دوزه را دارد. به‌علاوه دی‌اکسید تیتانیوم تمایل به جذب مفتول دارد و بنابراین یک جدایشی بین سطح مفتول و دوزه ایجاد می‌کند.

تعدیل‌کننده‌های اصطکاک

گرافیت، میکا، تالک (منیزیم سیلیکات)، دی سولفید مولبیدن، دی سولفید تنگستن، گرافیت فلوراید و پودرهای تفلون از جمله افزودنی‌هایی هستند که برای تعدیل اصطکاک به آنها اشاره شده است. آنها موادی صفحه مانند هستند که به راحتی برروی هم می‌خوابند. با تغییر درجه تأثیر

و قیمت، این مواد می‌توانند اصطکاک بین مفتول و دوزه را کاهش دهند. به‌ویژه دی‌سولفیدمولیبدن به دلیل پایین بودن ضریب اصطکاکش بسیار کارآمد می‌باشد ولی قیمت آن بالاست.

افزودنی‌های سولفور و فشار بالا (EP)

مانند سولفور عنصری، سولفیدهای قلیایی و پلی‌سولفیدها، آنها ذاتاً واکنش‌پذیر هستند. آنها با واکنش با سطح مفتول ترکیبی (سولفیدآهن) تشکیل می‌دهند که دارای تنش برشی کمتری نسبت‌به تنش برشی جنس مفتول و دوزه می‌باشد. در مواردی که بعداز کشش نیاز به جوشکاری مجدد باشد و یا زنگ‌زدگی مشکل آفرین باشد، استفاده از این افزودنی‌ها می‌بایست با احتیاط صورت گیرد. خاصیت مهم این مواد، افزایش ویسکوزیته ذوب با افزایش دما می‌باشد، بنابراین شرایط کشش سنگین را فراهم می‌سازند.

بازدارنده‌های خوردگی

معمولاً نیتریت‌های فلزی قلیایی را با روانکارهای کشش مفتول ترکیب می‌کنند. به ویژه آنهایی که در آب محلول و نم‌گیر هستند. مهم است به خاطر سپرده شود که آنها پایداری دمایی محدودی دارند و بنابراین در چرخه عملیات حرارتی و آنیل‌کاری حفظ نمی‌گردند.

خمیرها و گریس‌ها

خمیرها مخلوط آب و صابون با افزودنی‌های مختلف هستند و گریس‌ها صابون غلیظ شده روغن‌ها با افزودنی‌ها هستند. افزودنی‌ها مانند آنهایی هستند که در پودرهای کشش مورد مصرف قرار می‌گیرند. خمیرها و گریس‌ها برای کشش مفتول‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که تمیزی و براقی سطح آنها مورد نظر باشد. برای معقول بودن عمر دوزه می‌بایست یک لایه روانکار برروی مفتول کشیده شده باقی‌بماند. در مورد این روانکارها پسماند زیادی برروی مفتول باقی خواهد ماند.

روانکارهای تر (مایع)

در کشش مفتول‌های نازک معمولاً کشش تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌ویژه در مواردی که صافی سطح به خصوص مدنظر باشد و همچنین برای کشش مفتول‌هایی با روکش مس، روی و دیگر آلیاژها نیز از سیستم ترکشی استفاده می‌شود. در اغلب موارد، کشش تر به دنبال یک کشش

خشک صورت می‌گیرد، بدین منظور که در قسمت کشش تر تماس فلز با فلز در اثر پسماند روانکار خشک برروی مفتول کمتر شود.

روانکار مایع معمولاً برای کشش مفتول مس به کار گرفته می‌شود، برای کشش مفتول‌های روکش شده با مس یا برنج که نیروهای بین دوزه و مفتول به اندازه عملیات معمول کشش بزرگ نیستند، روانکار مایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روانکارها صابون چرب حل شده در آب می‌باشند که صابون به عنوان یک ماده امولسیون کننده، خیس کننده و پاک کننده عمل می‌نماید. چربی به وسیله صابون در آب معلق می‌گردد (امولسیون) که روانکاری اصلی را فراهم می‌سازد. سیستمی شیمیایی **(Chelators)** جهت محافظت از صابون در واکنش با یون‌های آهن موجود در آب سخت می‌بایست پیش‌بینی گردد. همچنین **PH** محلول جهت ثابت نگه‌داشتن پاکیزگی و چربی آن می‌بایست کنترل گردد. موقع کشش مفتول با روکش مس، ورود نمک‌های مس به محلول روانکار کشش می‌تواند کارایی آن را از بین ببرد. ترکیبات جدید این روانکارها پایه ترکیبی می‌باشند که شامل عناصری از قبیل روغن‌های معدنی برای روانکاری و تا حدی برای کاهش کف، ضدکف‌های دیگر و بازدارنده‌ها برای جلوگیری از زنگ‌زدگی فلز و اکسید شدن و میکروبی شدن روانکار هستند. همچنین جهت محلول‌سازی کلوخه‌های تشکیل شده ناسازگار، به آنها موادی افزوده می‌گردد.

مزایای دیگر روانکارهای پایه ترکیبی عبارتند از:

- عدم واکنش با نمک‌های آب سنگین یامس
- چربی موثر و پاک‌کنندگی در دامنه وسیع‌تر **PH**
- حمل راحت‌تر تا زمانی که مایع هستند به جای خمیر کنستانتره
- اساساً صددرصد فعال و کارآمد هستند و درنتیجه هزینه آب کم خواهد بود.
- در عملیات آنیل‌کاری خاکستر کمی تولید می‌کنند.
- عمر محلول اساساً به دلیل حساسیت کم به **PH** یا غلظت نمک (آب سنگین یا مس) طولانی می‌باشد.

انتخاب روانکار

انطباق نوع روانکار با کاربرد

برای کشش مفتول خوب سه مورد زیر می‌بایست رعایت گردد. (به شکل ۱ نگاه کنید)

- روانکار برای عبور از دوزه می‌بایست جاری (روان) گردد.
- روانکار مانده برروی مفتول می‌بایست کافی باشد.
- شکل دوزه می‌بایست برای عملیات کشش مناسب باشد.

می‌بایست توجه کرد که شکل دوزه هم برای تولیدکنندگان مفتول و هم برای تأمین‌کنندگان روانکار می‌تواند مشکل‌ساز باشد. چون با یک شکل دوزه بد و ضعیف نمی‌توان در عملیات کشش روانکار را برروی مفتول کشید.

برای درک خواص روانکاری صابون‌های ضعیف و غنی، کشش مفتول‌های فنری پرکربن و مفتول کم‌کربن با قطر اولیه و خروجی یکسان را در نظر بگیرید. مفتول پرکربن مقاومت کششی بالاتری دارد و برای کشش، نیروی بیشتری نیاز است درنتیجه حرارت ایجاد شده در مقایسه با کشش مفتول کم‌کربن بیشتر است. یک صابون ضعیف با درجه ذوب و ویسکوزیته ذوب بالا، یک روانکاری خوب با پسماند کم روانکار برروی مفتول را فراهم می‌سازد در صورتی که یک صابون غنی با نرمی بیش از حد در خارج از سطح مشترک دوزه و مفتول فشرده می‌شود. وقتی چنین اتفاقی روی دهد، روانکار در محفظه دوزه به صورت گوی در می‌آید و نتیجه آن خط برروی مفتول و برش می‌باشد. برای مفتول کم‌کربن، حرارت کم دوزه امکان استفاده از صابون غنی با لایه مناسب روانکار برروی مفتول را فراهم می‌سازد. در حالی که یک روانکار ضعیف اگر چه روانکاری خوبی انجام می‌دهد ولی لایه ضخیمی از روانکار را برروی مفتول می‌نشاند که موجب مصرف زیاد، هزینه، گرد و غباری بودن مفتول و سطح نامناسب برای محصولات نهایی می‌شود.

نسبت‌های آهک در صابون کلسیمی معمولاً از ۲۵ به ۷۵ تا ۷۵ به ۲۵ متغیر می‌باشد. زیر ۲۵درصد آهک، روانکار اغلب نرم می‌باشد که برای کشش‌های حداقل با دمای بسیار پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد. همانگونه که در شکل ۵ نشان داده شده است. بالای ۷۵درصد آهک، چربی به دلیل عدم انسجام و ناقص بون لایه‌های روانکار آسیب‌پذیر می‌باشد.

انتخاب روانساز متأثراز متغیرهای عملی زیادی می‌باشد. برخی از این عوامل به قرار زیر می‌باشند:

- عملیات کشش ـ کاهش سطح مقطع بزرگتر، نیروی کشش بیشتری را باعث می‌شود.
- سرعت کشش ـ سرعت بالاتر نیروی بیشتر کشش و افزایش دما را باعث می‌شود.
- طراحی دستگاه و دوزه ـ خنک‌کاری حین کشش و میزان نشستن روانکار برروی مفتول می‌تواند بر دمای دوزه تأثیرگذار باشد.
- سطح مفتول خام ـ پوشش‌های سطحی سنگین میزان کم نشست روانکار را نیاز دارد در صورتی که سطوح صاف لایه ضخیم‌تری از روانکار را نیاز دارند.
- سطح مفتول تمام شده ـ سطوح تمام شده تمیزتر، نشست روانکار کمتری نیاز دارند.

صابون‌های سدیم و پتاسیم نسبت‌به صابون‌های کلسیم محدوده نرمی بالاتری دارند. اما با این حال آنها بعداز کشش لایه روانکار نازک‌تری از خود برروی مفتول می‌گذارند. به این دلیل ترکیبات معدنی سدیم به این صابون‌ها می‌افزایند تا بتوان از آنها برای کاربردهای سرعت و دمای بالا استفاده نمود. از آنجایی که این ترکیبات معدنی حاوی براکس و خاکستر سودا می‌باشند، صابون‌های سدیمی را با مشکلی مواجهه می‌کنند که حساسیت رطوبت می‌باشد. این صابون‌ها در محیط‌های مرطوب بیشتر از صابون‌های کلسیمی تمایل به جذب رطوبت دارند. نگاهداری آنها در ظروف پلی‌اتیلن از این مشکل می‌کاهد. افزایش نقطه ذوب در درجه حرارت لازمه عملیات، دست‌به دست افزایش ویسکوزیته ذوب می‌دهد و مقاومت فشاری را افزایش می‌دهند. این موضوع در مورد صابون‌های سدیم و مخلوط سدیم و پتاسیم که برای کاربردهای سرعت بالا مدنظر بوده‌اند، نتیجه داده است.

آهک وقتی در صابون‌های سدیمی ذوب شده باشد، چنین اثری را دارد و همچنین برای کاربردهای بیشتری مفید می‌باشد.

افزایش ضخامت لایه و/یا بهبود عمر دوزه	کاهش ضخامت لایه و/یا سطح تمیزتر و شفاف‌تر
استفاده از صابون ضعیف (حجم‌دهنده زیاد اسید چرب کم)	استفاده از صابون غنی‌تر
استفاده از صابون با تیتر بالاتر (اسید چرب با نقطه ذوب بالاتر)	استفاده از صابون با تیتر پایین‌تر
استفاده از EP یا دیگر افزودنی‌ها	کاهش افزودنی‌ها
استفاده از روانکار پایه کلسیمی	استفاده از روانکار پایه سدیم یا پتاسیم

جدول ۱ ـ تأثیر ترکیب روانساز

صابون‌های پودری ترکیبی، مانند ترکیب صابون‌های محلول و غیرمحلول (استارات کلسیم + استارات سدیم) و صابون‌های محلول ترکیبی مانند محلول (استارات سدیم + استارات پتاسیم) بسیار مفید هستند مزایای صابون‌های ترکیبی این است که دامنه کارایی روانکار به دلیل افزایش دامنه نرمی آنها بیشتر می‌شود. این مسأله به‌ویژه در ماشین‌های چند بلوکه یا در سیستم‌هایی با متغیرهای زیادتر مهم می‌باشد.

اندازه ذره و توزیع ذره در روانکار پودر شده از پارامترهای قطعی در انتخاب روانکار برای کشش مفتول می‌باشد. اندازه و توزیع ذره بر میزان نشستن روانکار بر روی مفتول و بهداشت محیط کار تأثیرگذار می‌باشد. ضروری است که دانه‌های روانکار به اندازه‌ای باشند که در اثر عبور مفتول از محفظه دوزه بتوانند برروی مفتول عبوری بنشینند. (به شکل ۱ نگاه کنید)

دانه‌های کوچک بر سطح مفتول به راحتی می‌چسبند و در مسیر عبور مفتول سیلان پیدا می‌کنند. این یک قانون کلی است، بنابراین ذره‌های خیلی ریز به خوبی جاری نمی‌گردند. در عوض آنها به‌هم چسبیده و در مسیر عبور مفتول یک کانال ایجاد می‌کنند. این پدیده به‌ویژه وقتی روی می‌دهد که مفتول تحت پس‌کشش باشد و یا حرکت و تحرک جانبی نداشته باشد. بنابراین وجود مخلوطی از پودر ریز و درشت مطلوب می‌باشد به طوری که پودر به دور مفتول حرکت می‌کند و دانه‌های ریزتر به همراه مفتول جذب می‌شوند. دانه‌های درشت‌تر در این حالت خرد شده و جایگزین دانه‌های ریز می‌گردند.

به عنوان یک قاعده کلی، مفتول شسته شده با مواد حامل روانکار (Lubricant Carrier) می‌بایست با روانکاری که دانه‌هایش از قطر $\frac{1}{4}$ اینچ به $\frac{5}{32}$ و $\frac{1}{8}$ اینچ آسیاب شده‌اند، کشیده شود. مفتول‌های قطر متوسط می‌بایست از دانه‌بندی $\frac{1}{8}$ یا $\frac{1}{16}$ اینچ استفاده کنند. مفتول‌های قطر کم معمولاً پودر با دانه‌بندی $\frac{1}{32}$ اینچ نیاز دارند. از طرف دیگر تا وقتی که پودر روانکاری قابلیت خرد شدن به سایزهای دلخواه را دارد، نیازی نیست که پودر با دانه‌بندی‌های مختلف در دستگاه به کار گرفته شود.

بهداشت و گرد و غبار

از نظر ظاهری دو نوع روانکار برای بالا بردن بهداشت توسعه یافته‌اند:

- فرآورده‌های ورقه‌ای
- فرآورده‌های حبه‌ای

آنها گاهی اوقات به جای مواد پودر شده برای بر طرف نمودن غبار حاصل از مواد نرم در هنگام عملیات کشش مفتول مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین تصور می‌شود که این اشکال از روانسازها پوشش یکنواخت‌تری برروی مفتول ضمن عبور از دوزه ایجاد می‌کنند. متأسفانه قسمت عمده غبار ایجاد شده مربوط به تکه‌هایی از روانکارها می‌باشد که به همراه مفتول از دوزه خارج شده و در قسمت طبله دستگاه کشش در هوا پراکنده می‌شوند. این مشکل با استفاده از دو شکل اخیر روانساز نیز مرتفع نمی‌گردد. راجع‌به میزان غبار، تغییر شکل و سیلان شناسی ماده روانکار نتیجه بخش می‌باشد. برای مثال تغییر شکل و سیلان ماده در اثر اعمال تنش‌ها می‌بایست تقریباً با ماشین‌و کاربرد ویژه روانکار همخوانی داشته باشد.

آزمایش روانکار

امروزه تکنیک‌های قابل اعتمادی که بتوانند کارایی روانکار کشش مفتول را پیش‌بینی کنند وجود ندارند. تنها آزمایش واقعی کارکرد محصول برروی ماشین به خصوص می‌باشد. با این وجود توسعه تکنیک‌هایی جهت تشخیص کارایی روانکار بسیار مطلوب می‌باشد.

روش‌های توصیف صفات اختصاصی

در صفات شناسی مواد، توسعه روابط ساختار ویژه خواص که می‌تواند در تشخیص کارایی مفید باشد، بسیار مطلوب خواهد بود. برخی خواص مهم روانکارهای کشش مفتول عبارتند از:

- ریزساختار صابون
- خواص گرمایی صابون
- تغییر شکل و سیلان‌شناسی صابون

ریزساختار صابون بستگی به آنالیز شیمیایی و عملیات حرارتی/مکانیکی تولید آن دارد و بنابراین به کمیت در آوردن آن بسیار دشوار است، به‌ویژه آن که اغلب ترکیبات و روش‌های تولیدی اختصاصی می‌باشند. به این دلیل، بحث ریزساختار صابون خارج از دامنه این فصل می‌باشد.

خواص حرارتی صابون با استفاده از تکنیک‌های گرماسنجی مانند گرماسنجی اسکنی جزیی (DSC) یا آنالیز گرمایی وزن سنجی (TGA) قابل شناسایی هستند. تکنیک DSC تغییرات ترمودینامیکی را به صورت تابعی از دمای نقاط ذوب آشکار، دماهای گداز شیشه‌ای (دمایی که در آن مایع به جامد شیشه‌ایی تبدیل می‌شود) و واکنش‌های شیمیایی، شناسایی می‌کند. تکنیک TGA یک شاخص تغییرات مکانیکی به وجود آمده توسط رخدادهای ترمودینامیکی را فراهم می‌سازد. با این تکنیک‌ها می‌توان تعیین کرد که در دماهای مختلف برای پودر مورد استفاده چه رخداد حرارتی پیش می‌آید.

هنوز مشکلات جدی در استفاده از این اطلاعات برای پیش‌بینی اهداف وجود دارد. اثرات قابل توجه فشار زیاد در دوزه بر خواص حرارتی صابون، مانند نقطه ذوب به دلیل محدودیت‌های موجود برای تجهیزات DSC در فشار زیاد تعیین نشده‌اند. همچنین شناسایی خواص حرارتی بدون دانستن اثرات تغییر شکل و سیلان شناسی ناقص می‌باشد. به ویژه آن که افزودنی‌های EP خواص نقطه ذوب را برای بالا بردن کارایی اصلاح نموده‌اند.

به این دلایل برخی بر اندازه‌گیری تغییر شکل و سیلان‌شناسی تکیه کردند تا بتوانند ویسکوزیته ذوب صابون درحین عملیات کشش مفتول را تعیین نمایند. شخصی به نام اسمیت ویسکوزیته صابون‌ها در عملیات کشش چند مرحله‌ای را به صورت تابعی از دما در دوزه‌های کشش و اثرات

ایجاد شده، مورد مطالعه قرار داد. این کار نشان داد که اندازه‌گیری ویسکوزیته می‌تواند صابونی را از صابون دیگر تشخیص دهد. آنها تحت فشارهای کم مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. به‌علاوه، نتایج واقعی نمی‌توانند کارایی روانساز را درحین عملیات کشش پیش‌بینی نمایند.

شخص دیگری به نام مونتمیتونت و همکارانش مطالعات اساسی بیشتری برروی اثرات فشار بر خواص گرمایی و ویسکوزیته‌ای صابون‌های ساده انجام دادند. این مطالعه به وضوح نشان داد که فشار به طور قابل توجهی بروسیکوزیته و انتقال حرارت‌ها تأثیرگذار است. به علاوه، نسبت‌های ساختار و خواص برمبنای این نتایج طرز رفتار صابون‌ها در عملیات کشش مفتول را مشخص می‌کند. کارهای زیاد دیگری برای تست پیش‌بینی صابون‌های کشش مفتول پیش‌رو می‌باشد.

خلاصه

نقش روانکارها در کشش مفتول را نمی‌توان دست‌کم گرفت زیرا این کلید تولید فرآورده‌های مفتولی با کیفیت بالاست. بنابراین کار برروی جنبه‌های اساسی روانکاری می‌بایست جهت بالا بردن کارایی ادامه یابد. آینده شاهد گسترش روانکارهای جدید بر پایه مواد پلیمری و حالت‌های پیشرفته کاربرد روانکارها مانند کاربردهای سیستم‌های تحت فشار خواهد بود. به علاوه، اصلاحات اساسی در عملیات کشش مفتول جهت حفظ این پیشرفت‌ها نیاز به روانکارهایی با بنیان جدید خواهند داشت.

فصل ۱۲

عملیات حرارتی مفتول آهنی

ساختمان میکروسکوپی فولاد

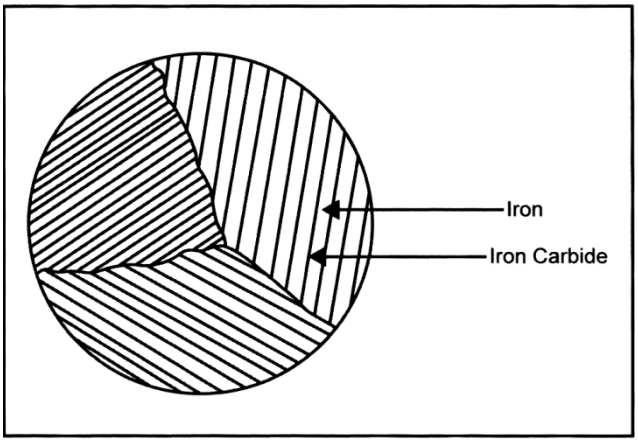
فولاد کربن‌دار متشکل از دو جزء اصلی آهن (فریت) و کاربیدآهن (سمنتیت) می‌باشد. آهن نسبتاً نرم و انعطاف‌پذیر می‌باشد، کاربیدآهن سخت و شکننده است.

در مقایسه فولاد با پلاستیک تقویت شده توسط شیشه می‌توان گفت آهن به مانند رزین پلاستیکی و کاربیدآهن مانند فیبرهای شیشه‌ای می‌باشد.

با آن که اجزاء بسیار کوچک شیشه و سمنتیت به صورت توده شکننده هستند ولی مواد عالی جهت تقویت ماده می‌باشند.

به طور مثال؛ ساختمان میکروسکوپی کلی فولاد نرماله شده متأثر از میزان کربن موجود در فولاد می‌باشد. در مقادیر کم‌کربن، ساختار میکروسکوپی یک محلول جامد و سخت از کربن در آهن خالص می‌باشد. در ترکیب او تکتوئیدی (حدود ۷۷ صدم کربن) ساختار میکروسکوپی فولاد به عنوان پرلیت (آلیاژ آهن و کربن) شناخته شده است. این دو ساختار در شکل یک نشان داده شده است. سمنتیت شکننده در مقادیر بالای کربن شکل می‌گیرد. پرلیت متشکل از صفحات کوچک متناوب یا لایه‌های فریت و سمنتیت می‌باشد. برای مقادیر کربن کمتر از ترکیب اوتکتوئیدی، ساختار میکروسکوپی ترکیبی از پرلیت و فریت نرم و انعطاف‌پذیر می‌باشد. درحالی که برای مقادیر بالاتر کربن، ساختار میکروسکوپی ترکیبی از پرلیت و سمنتیت شکننده می‌باشد. فضا و فواصل میان صفحات پرلیتی نشان داده شده در شکل یک را می‌توان با میکروسکوپ الکترونی واشکافی نمود و به نظر می‌رسد که به‌طور قابل توجهی به دلیل تفاوت جهت‌ها از دانه‌ای به دانه دیگر محتوای این فضا متغیر می‌باشد. با این حال آزمایشات نشان داده است که مقدار میانگین فضای کاربیدی واقعی ۱/٦٥ مرتبه بیشتر از حداقل مقدار مشاهده شده توسط میکروسکوپ می‌باشد.

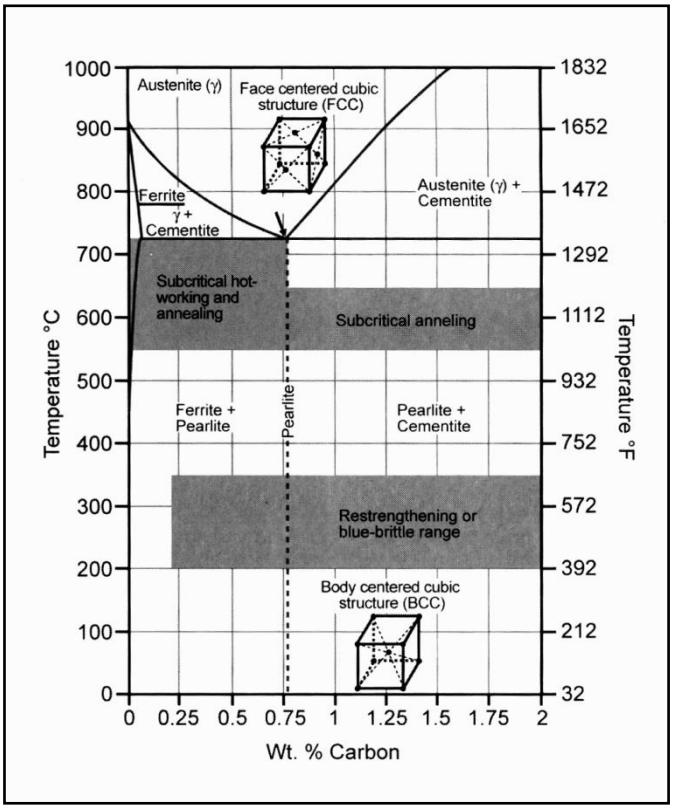
در فولادهای صددرصد پرلیتی، محتوای کاربیدآهن حدود ۱۲ درصد می‌باشد درحالی که قسمت عمده باقی‌مانده فریت است.



شکل۱ـ نمایش فضاهای کاربیدی مختلف مرتبط با جهت دانه‌ها

مشخص گردیده است که مقاومت کششی فلزی که دارای یک فاز سخت پراکنده شده در داخل یک فاز نرم‌تر می‌باشد، بستگی به فاصله میان نواحی فاز سخت دارد. برای ساختارهای پرلیتی و کروی، مقاومت سیلان در تغییر بعد نسبی حقیقی ۲ یا حدود ۸۵ درصد کاهش سطح مقطع با کارسرد، به صورت معکوس متناسب با لگاریتم پهنه فریت اصلی می‌باشد.

ساختار واقعی متالورژیکی فولاد کربن‌دار مرتبط با آنالیز فولاد، درجه حرارتی که در آن فولاد حرارت داده شده و به دنبال آن سرعت خنک‌سازی می‌باشد. زمانی که فولاد اوتکتوئیدی (صددرصد پرلیتی) به سمت آستنیتی F.C.C (آهن گاما) حرارت داده می‌شود، (شکل ۲) کربن وارد محلول در آهن گاما می‌شود. درحین خنک‌سازی، کربن به صورت کاربیدآهن در داخل دانه‌های پرلیتی رسوب می‌کند به طوری که اتم‌های آهن از ساختار F.C.C به ساختار B.C.C تغییر شکل می‌دهند. ساختمان میکروسکوپی واقعی فیزیکی بستگی به دما یا درجه حرارتی دارد که در آن فولاد تغییر ساختار می‌دهد.



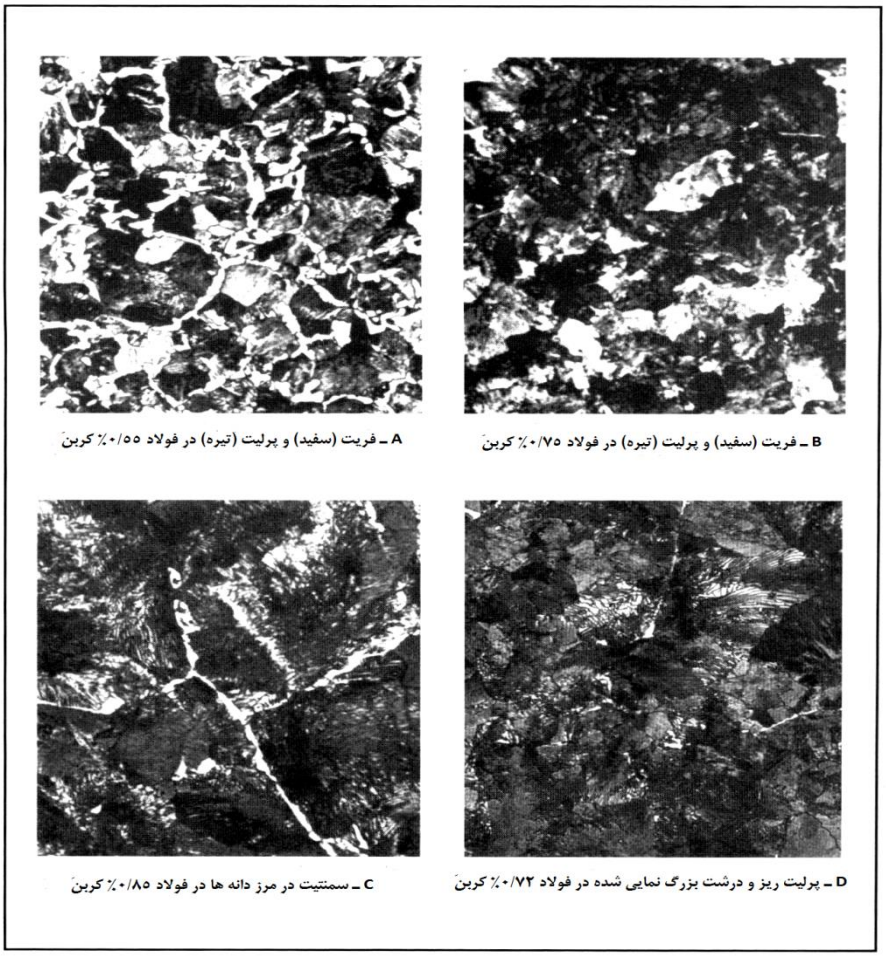
شکل ۲ـ نمودار فاز آهن ـ کاربید آهن

فولادی که کربن کمتری نسبت‌به فولاد اوتکتوئیدی دارد یا فولاد هیپواوتکتوئیدی به محض خنک‌کاری در برگیرنده ترکیبی از فریب و پرلیت خواهد شد. (همانگونه که در شکل ۳A برای فولاد کربن‌دار ۵۵ صدم درصد کربن نشان داده شده است). در این شکل نواحی سیاه رنگ پرلیت می‌باشند، درحالی که نواحی سفید رنگ فریت هستند که می‌توانند هر دو به عنوان دانه و به صورت شبکه‌ای مشاهده شوند که مرزهای دانه را ترسیم می‌کند. از آنجایی که فریت یک جزء اصلی نرم و انعطاف‌پذیر است، شبکه فریتی در مرزهای دانه، به دانه‌ها اجازه خواهد داد که در برابر یکدیگر جاری شوند و حرکت کنند که منجر به یک ماده شکل‌پذیر نرم می‌شود.

برای مقادیر کربنی که به ترکیب اوتکتوئیدی نزدیک می‌شوند، ساختار میکروسکوپی اغلب پرلیت به همراه مقادیر کمی فریت می‌باشد. (همانگونه که در شکل **B** ۳ برای فولاد کربن‌دار ۷۵صدم درصدی نشان داده شده است).

هرگاه میزان کربن از ترکیب اوتکتوئیدی یا فولاد هیپواتکتوئیدی تجاوز کند، ساختمان میکروسکوپی دربردارنده ترکیبی از پرلیت و سمنتیت می‌باشد. ساختمان میکروسکوپی فولاد هیپواوتکتوئیدی در شکل **C**۳ برای میزان کربن ۸۵ صدم درصد نشان داده شده است.

در اینجا نواحی سیاه رنگ پرلیت و نواحی سفید رنگ سمنتیت می‌باشند. شبکه‌های سفید رنگ در مرزهای دانه در فولاد هیپواوتکتوئیدی سمنتیت سخت و شکننده می‌باشد که درحین تغییر شکل شکسته خواهند شد. میکرونگاری الکترونی با بزرگ‌نمایی بالا، فولاد اوتکتوئیدی کربن‌دار ۷۲صدم درصد کربن در شکل **D**۳ نشان داده شده است. ساختمان میکروسکوپی مشاهده شده در اینجا ترکیبی است از پرلیت درشت، جایی که صفحات و لایه‌ها به‌طور واضح دیده می‌شوند و پرلیت نرم جایی که وضوح فاصله لایه‌ای امکان‌پذیر نمی‌باشد. یک بررسی و سنجش دقیق پرلیت درشت، تغییرات فواصل بین دانه‌ها را نشان می‌دهد که می‌تواند به جهت‌گیری دانه مربوط باشد.



شکل۳ـ تأثیر ترکیب فولاد بر ساختمان میکروسکوپی

عملیات حرارتی

عملیات حرارتی معمول از قبیل رفع تنش، عملیات حرارتی جهت نرم کردن فلزات در دمای پایین، کروی‌سازی، نرماله کردن و پتنت کردن همه به منظور بالا بردن خاصیت شکل‌پذیری یا جهت اصلاح ویژگی‌های فیزیکی برای اهداف خاص طراحی شده‌اند. عملیات حرارتی می‌تواند در درجه حرارت‌های کم۱۹۰ درجه سانتیگرادی آغاز شود. در یک فرآیند که فرم‌دهی گرم نامیده می‌شود، چنین دمای پایینی می‌تواند به پروسه فرم‌دهی در عملیات کله‌زنی کمک کند.

یکی از مهمترین عملیات حرارتی در صنعت سیم و مفتول، عملیات حرارتی جهت نرم کردن فلزات در دمای پایین در سرب یا واسطه‌های دیگر جهت پایین آوردن مقادیر تنش‌های کار سختی به منظور افزایش درصد ازدیاد طول در عملیات گالوانیزه کردن یا برای فراهم کردن شرایط کار نهایی خشک برروی سیم می‌باشد.

درجه حرارت به کار رفته در روش آستنیته کردن پیوسته سربی ممکن است از حدود نقطه ذوب سرب (۳۲۷℃) تا درجه حرارت بالای ۹۰۰ درجه سانتیگراد تغییر کند.

آنیل‌کاری سربی

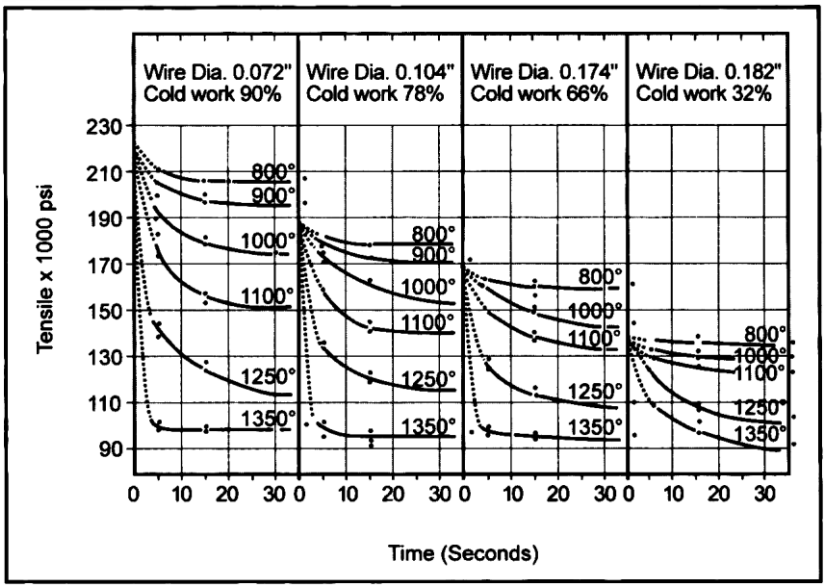
سرب مذاب به عنوان واسطه عملیات گرمایی به دلیل ویژگی‌های عالی انتقال گرمایی و توانایی در حفظ و نگهداری دقیق درجه حرارت به‌کار برده می‌شود. با این حال چسبندگی سرب برروی مفتول‌های تحت عملیات حرارتی اغلب مسایل و مشکلاتی را به وجود می‌آورد. در سال‌های اخیر مقررات ایمنی و بهداشت استفاده و کاربرد حمام‌های سرب مذاب که امروزه با نمک‌ها مذاب با ترکیبات مختلف و بسترهای سیال جایگزین شده‌اند را محدود کرده است.

داده‌هایی درباره پاسخ و واکنش انواع مختلف فولاد در عملیات حرارتی در سرب نشان می‌دهد که رفتار و عملکرد فولاد در این عملیات قابل پیش‌بینی می‌باشد. البته کاملاً مشخص است که ناخالصی در فولادهای تجاری، تغییرات در شرایط عملیات نورد گرم، تغییر شیوه‌های عملیات سربی برای قطرهای بزرگ‌تر مفتول، شیوه‌های مفتول‌کشی و متغیرهای دیگر، عوامل غیرقابل سنجشی را معرفی می‌کنند که همیشه مانعی در مقابل برآوردهای دقیق پاسخ و واکنش یک فولاد ویژه می‌شوند.

داده‌ها در شکل ٤ می‌توانند در تعبیر و تفسیر و مرتبط‌سازی عملیات حرارتی با شرایط مختلف کار سرد انجام شده بر فولاد (میزان کشش) مفید باشد.

شکل ٤ داده‌های تجربی برای تأثیرات زمان غوطه‌وری و دمای وان بر خواص کششی فولاد AISI 1035 که یک نمونه فولاد متوسط کربن می‌باشد را نشان می‌دهد.

در حالی که روش‌ها یکسان می‌باشند این تأثیرات برای فولادهای کم‌کربن و پرکربن کمی متفاوت هستند، همانگونه که در زیر بحث شده است.



شکل۴ـ تأثیر زمان غوطه‌وری در سرب در دماهای مختلف بر مقاومت کشش

۴ مفتول به قطرهای ۱/۸۲، ۲/۶۴، ۴/۴ و ۴/۶ میلیمتر که از قطر ۵/۵ میلیمتر مفتول ۱۰۳۵ کشیده شده‌اند.

مفتول کم‌کربن

آزمایشات مشابه نشان داده‌اند که درجه حرارت‌های عملیات سربی تا ۵٤۰°C برای فولادهای ۱۰۰۵، ۱۰۰٦ ناآرام، ۱۰۰۸ و ۱۰۱۷ دانه‌های فریت را در شرایط اصلی تغییر شکل یافته‌شان نگاه داشته است. همچنین در عملیات سربی برای مفتولی که کار سرد زیادی مثلاً حدود ۹۰ درصد کاهش سطح مقطع برروی آن انجام شده است، تبلور مجدد ناچیز مشاهده می‌گردد.

بعداز عملیات حرارتی در دمای ۵۹۰°C فلزاتی که کار سرد انجام شده برروی آنها حدود ۷۵٪ کاهش سطح مقطع می‌باشد، جوانه دانه‌ای جدید مشاهده می‌گردد. اما در درجات کمتر کارسرد و قطرهای بالاتر مفتول تبلور مجدد تأخیری دیده می‌شود. در هر مورد افزایش زمان و یا درجه حرارت رشد دانه‌ای را افزایش می‌دهد. تبلور مجدد معمولاً مستقل از میزان کار سرد یا نوع فولاد در ۳۰ ثانیه ماندگاری در سرب در درجه حرارت ٦۸۰°C مشاهده می‌گردد.

تغییرات در شکل و توزیع پرلیت فقط در دمای ۷۳۰°C و بالاتر مشخص و واضح می‌باشند و با زمان طولانی‌تر عملیات حرارتی تشدید می‌شوند. در این درجه حرارت فریت و پرلیت مشخصه‌های جهت‌گیری را از دست می‌دهند.

مفتول متوسط کربن

مفتول‌های پتنت هوایی ۱۰۳۵ (شکل٤)، ۱۰٤۰ و ۱۰۳۵ آبدهی شده در سرب هیچ تغییرات ساختاری را در آنیل‌کاری سربی تا دمای ۵۹۰°C از خود نشان نمی‌دهند. در دمای ۶۸۰°C حتی با غوطه‌وری مختصر، تبلور مجدد در تمام نمونه‌هایی که دارای بیش از ۷۵درصد کاهش سطح مقطع (کارسرد) می‌باشند آشکار می‌گردد. در نمونه‌هایی با عملیات کار سرد کمتر بعد از ۳۰ ثانیه در دمای ۶۸۰°C فقط ردپایی از شکل‌گیری رشد دانه مشاهده می‌شود. در دمای ۷۳۰°C در ۳۰ ثانیه تبلور مجدد کامل ساختار صورت می‌گیرد و رشد دانه نیز آشکار می‌شود.

افزایش درجه حرارت تا ۸۲۰°C منجر به تبلور مجدد سریع‌تر ناشی از رشد دانه‌ای مرتبط با میزان کار سرد انجام شده می‌شود.

پرلیت افزایش یافته به دلیل میزان کربن بیشتر در مقایسه با نمونه‌های کم‌کربن، تأخیری در تبلور مجدد در دماهای بالاتر ایجاد می‌کند.

مفتول پرکربن

آزمایشات نشان داده است که تبلور مجدد در این فولادها در درجه حرارت‌های بالاتر رخ می‌دهد. فولاد AISI-1055 با ساختار اصلی کارسرد شده در پتنت هوایی، فولاد AISI-1065 با آبدهی سربی و فولاد AISI-1065 و فولاد بدون پتنت با کارسردی سنگین قبلی AISI-1065 در حمام سرب تا دمای ۶۸۰°C نگاه داشته شدند.

تبلور مجدد در ۵ ثانیه در دمای ۶۸۰°C در قطرهای کوچک‌تر (حدود ۲/۰۳ میلیمتر) آغاز می‌شوند. نمونه‌هایی که فقط ٤۰درصد کاهش سطح مقطع (کارسرد) برروی آنها انجام شده است، هیچ تغییر ساختاری را در این دما با حدود ۳۰ ثانیه غوطه‌وری از خود نشان نمی‌دهند. در دمای ۷۳۰°C نمونه‌های فوق به‌طور کامل در پنج ثانیه دچار تبلور مجدد می‌شوند. در مقایسه‌ای دیگر، فولاد با ساختار پتنت هوایی دیرتر از فولاد با آبدهی سربی دچار تبلور مجدد می‌شود و حتی

دیرتر از فولاد با ساختار غیرپتنت این عمل صورت می‌گیرد. زمان‌های به کار گرفته شده در این آزمایشات برای به دست آوردن ساختار آستنیتی کامل، حتی در بالاترین درجه حرارت‌های تحقیق شده (۷۳۰°C) کافی نمی‌باشند.

نتیجه‌گیری‌های کلی

برخی از نتایج درباره فرآیندهای عملیات حرارتی به‌ویژه در سرب مذاب در زیر به صورت خلاصه بیان شده‌اند.

- مقاومت کششی تمام فولادهای مورد تحقیق در بالاترین درجه حرارت آنیل‌کاری زیر درجه حرارت بحرانی (۷۲۷°C)، کاهش می‌یابند به همان نسبت درصد افزایش طول افزایش می‌یابد.
- با افزایش میزان کربن در فولاد، دمای بالاتری برای تبلور مجدد مورد نیاز است.
- تبلور مجدد در درجه حرارت‌های بالاتر افزایش می‌یابد.
- با زمان ماند کافی، دماهای بالاتر از حد پایینی دمای بحرانی افزایش ناچیزی در مقاومت کششی و کاهش در شکل‌پذیری را فراهم می‌سازند. (برعکس مورد اول نتیجه‌گیری ـ مترجم)
- در اکثر موارد، غوطه‌وری به مدت ۲۰ ثانیه در قطرهایی از ۱/۷۸ تا ٤/٦٢ میلیمتر بهترین نتیجه را خواهد داد.
- افزایش قطر مفتول منجر به تأخیر قابل توجهی در زمان تبلور مجدد می‌شود.
- افزایش کارسرد برروی مفتول (کشش بیشتر) درجه حرارت تبلور مجدد را کاهش می‌دهد. کارسرد بالای ۸۰ درصد کاهش سطح مقطع منجر به تغییری در مشخصه‌های رفتاری درحد کم شدن خاصیت شکل‌پذیری می‌گردد.
- عملیات حرارتی که تا حدی (نه کامل) فولاد کار سخت شده را مجدداً متبلور می‌کند، منجر به غیریکنواختی در محصول نهایی می‌شود و عملیات بعدی را دچار مشکل می‌سازد.

بازیافت، تبلور مجدد و رشد دانه‌ای

شکل ۵ تأثیر درجه حرارت برروی مقاومت کششی در سه دامنه اصلی را نشان می‌دهد.

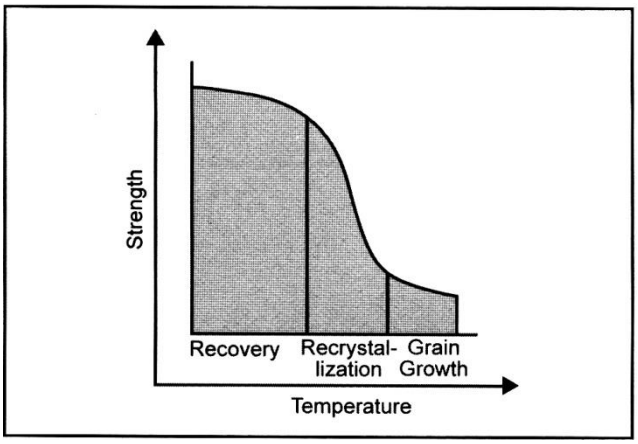
بازیافت ـ بازیافت در ناحیه یا منطقه‌ای میان دمای اتاق تا ۶۸۰ درجه سانتیگراد بسته به متغیرهایی از قبیل؛ زمان، آنالیز مواد و درجه و میزان کارسرد انجام شده قبلی رخ می‌دهد. در این دامنه از درجه حرارت‌ها، تنش‌های پسماند کاهش می‌یابند و مقاومت کششی فقط اندک و به‌طور ناچیز کاهش می‌یابند.

تبلور مجدد ـ تبلور مجدد در دامنه دمایی میان شکل‌گیری اولیه جوانه و آغاز رشد دانه‌ای رخ می‌دهد. ماتریس شبکه حاصل از کارسرد با مجموعه‌ای از دانه‌های جدید جایگزین می‌شوند که به رشد ادامه می‌دهند تا زمانی که ماتریس از بین می‌رود. نیروی محرک برای تبلور مجدد، اختلاف انرژی میان کارسرد و تبلور مجدد دانه‌ها می‌باشد.

سرعت تبلور مجدد ممکن است به‌طور قابل توجهی توسط وجود مقادیر جزیی و اندک ناخالصی‌ها تحت تأثیر واقع شود. تناوب جوانه زنی دانه‌ای با افزایش زمان و افزایش کرنش ایجاد شده در فولاد افزایش می‌یابد. تبلور مجدد ممکن است فقط زمانی آغاز شود که انرژی شبکه برای غلبه بر مقاومت حرکت اتم کافی باشد. حرارت فقط بخشی از انرژی را عرضه می‌کند. باقی‌مانده انرژی، انرژی تغییر شکل موجود در شبکه می‌باشد. از این رو مفتول‌هایی با کارسرد زیاد با سرعت بیشتری مجدداً متبلور می شوند. مقاومت کششی به‌طور آشکار درحین تبلور مجدد کاهش می‌یابد.

رشد دانه‌ای ـ به دلیل این‌که گروهی از بلورها تمایل دارند مانند یک کریستال واحد کمترین حالت انرژی را داشته باشند، رشد دانه‌ای رخ می‌هد. اتم‌های بلورهای کوچک‌تری که دارای انرژی بالاتر و بیشتری می‌باشند، تمایل دارند که در نتیجه رشد دانه‌ای، بخشی از دانه‌ای بزرگ‌تر شوند. رشد دانه‌ای نه به واسطه تجمع و به هم‌آمیختگی دانه‌های مجاور، بلکه به واسطه جابه‌جایی و تغییر مکان مرزدانه رخ می‌دهد. هیچ پیوستگی و اتصالی در فرآیند فوق وجود ندارد و حتی مسیر جابه‌جایی و تغییر مکان می‌تواند تغییر کند. هر دانه‌ای ممکن است توسط دانه مجاور در یک جهت تحلیل برود و سپس مجدداً به واسطه دانه مجاور در جهت دیگر تحلیل برود. منحنی‌های

هم‌دما یا ایزوترمال نشان می‌دهند که رشد دانه‌ها در یک زمان نسبتاً کوتاهی بعداز دستیابی و اکتساب مشخصه اندازه دانه برای یک دمای معین متوقف می‌شود. مقاومت کششی متناسب با افزایش اندازه دانه کاهش می‌یابد.



شکل ۵ ـ تأثیر درجه حرارت در هنگام بازیافت، تبلور مجدد و رشد دانه‌ای بر مقاومت کششی

فصل ۱۳

تنش‌زدایی

تنش‌های پسماند

تنش‌زدایی به صورت «حرارت دادن تا دمای مناسب، نگاه داشتن در مدت زمان کافی در آن دما جهت کاهش تنش‌ها و سپس خنک کردن به اندازه کافی آرام جهت به حداقل رساندن گسترش تنش‌های پسماند جدید» تعریف می‌گردد. این تعریف نیازمند توضیحات بیشتری می‌باشد.

اول، تنش‌های پسماند در مفتول (یا هر شکل دیگر فلزی) که تحت تغییر شکل خارج از حدالاستیک خود قرار گیرد، به‌وجود می‌آید. به طور مثال؛ وقتی که تغییر شکل پلاستیکی روی می‌دهد.

بنابراین عملیات حرارتی تنش‌زدایی مربوط به مفتول کشیده شده یا مفتولی است که به یک محصول تبدیل گردیده است. مفتول آنیل شده یا سخت شده و برگشت داده شده به عنوان آخرین فرآیند انجام شده برروی آن را می‌توان دارای تنش پسماند نزدیک به صفر فرض کرد.

دوم، «یک دمای مناسب» نیاز به تعریف دارد. عملیات حرارتی تنش‌زدایی نمی‌بایست درگیر هرگونه تغییر ساختار اساسی، تبلور مجدد یا نرم کردن در مفتول گردد. اما همانگونه که نشان داده خواهد شد، تغییر کوچک ساختاری رخ خواهد داد. از این‌رو در این عملیات یک دمای حداکثری وجود دارد که تجاوز از آن حرکت به سوی آنیل‌کاری می‌باشد.

سوم، «نگاه داشتن در مدت زمان کافی» بیشتر یک اصطلاح مبهم می‌باشد و در واقع صحیح نمی‌باشد زیرا حتی کوتاه‌ترین زمان در دمای اتاق ممکن است باعث کاهش تنش‌های پسماند گردد، اما از بین بردن این تنش‌ها با دما و زمان بیشتری صورت می‌گیرد. تشخیص اهمیت هر دو عامل دما و زمان در این روش عملیات حرارتی بسیار مهم می‌باشد همانگونه که در اغلب فرآیندهای عملیات حرارتی این دو پارامتر با همدیگر مورد توجه قرار می‌گیرند. همچنین

ضروری است خاطر نشان ساخت که تنش‌زدایی یک اسم دقیق برای این عملیات می‌باشد. یعنی تنش‌های پسماند آزاد یا کاهش می‌یابند اما حذف نمی‌گردند.

جهت از بین بردن تنش‌های پسماند ضروری است دما و زمان تا حدی افزایش یابند که باعث نرمی یا آنیل محسوس مفتول گردد. از این‌رو فرآیندهای عملیات حرارتی تنش‌زدایی بین یک تا ۹۹ درصد تنش‌های پسماند را آزاد می‌نمایند.

در پایان «خنک کردن به اندازه کافی آرام» برای مفتول‌های متقارن شکل گرفته و محصولات مفتولی با ابعاد کوچک دارای اهمیت نمی‌باشد زیرا برقراری یک شیب کاهش دما که خود باعث ایجاد تنش‌های پسماند جدید نشود، دشوار خواهد بود. بنابراین این جنبه از تنش‌زدایی نیاز به توجه بیشتر ندارد.

قبل از بحث درباره فرآیند و اثرات تنش‌زدایی، تشخیص نوع تنش‌های پسماند در مفتول کشیده شده یا محصولات مفتولی مهم می‌باشد. تنش‌های پسماند که در اثر کشش مفتول به وجود می‌آیند پیچیده و غیریکنواخت می‌باشند و بستگی به فاکتورهایی از قبیل برنامه کشش (نحوه دوزه‌بندی) و زاویه دوزه دارند. در کنار این تنش‌ها فرآیند فرم‌دهی مفتول نیز تنش‌های پسماند خمشی بیشتری به وجود می‌آورد. جمع شدن این تنش‌های پسماند در صورت عدم آزادسازی آنها و اضافه شدن تنش‌هایی که در اثر تغییر شکل دادن‌های مصرف کننده نهایی برروی مفتول ایجاد می‌شود بر ثبات فرم‌پذیری مفتول تأثیرگذار خواهد بود.

مفتول‌هایی که در اثر فرآیند کشش دارای مقدار زیادی تنش پسماند می‌شوند عبارتند از:

- مفتول‌های فولادی کشیده شده کم‌کربن
- مفتول‌های فولادی پرکربن با ریزساختار پرلیتی
- مفتول‌های فولاد ضدزنگ کشیده شده با ساختار آستنیتی که ممکن است کمی به مارتنزیت تبدیل شوند. با این حال هیچکدام از این مفتول‌ها معمولاً بعداز کشش و قبل از فرآیندهای بعدی تنش‌زدایی نمی‌گردند. در مورد فولادهای کم‌کربن به دلیل اینکه حدالاستیک آنها نسبتاً کم می‌باشد و تنش‌های پسماند نیز کم هستند، تنش‌زدایی بعداز کشش انجام نمی‌شود. در هر دو مورد فولادهای پرکربن و ضدزنگ تنش‌زدایی قبل از

فرآیند بعدی باعث کار سختی و کاهش قابل توجه فرم‌پذیری آنها می‌گردد که این پدیده مطلوب نمی‌باشد.

در فرآیندهای تولید قطعات مهندسی به ندرت مفتول مصرفی تنش‌زدایی می‌گردد. فرآیندهایی که ممکن است منجر به ایجاد تنش‌های پسماند قابل ملاحظه گردند عبارتند از:

- شکل‌دهی سرد به وسیله خمش یا پیچش
- جوشکاری
- فورج سرد یا کوبش (چاق‌سازی)

تنش‌های پسماندی که اینگونه به وجود می‌آیند می‌توانند به وسیله حرارت از بین بردند، اما توضیح متالورژیکی عدم تغییر ساختار در این پدیده چیست؟

مکانیزم متالورژیکی

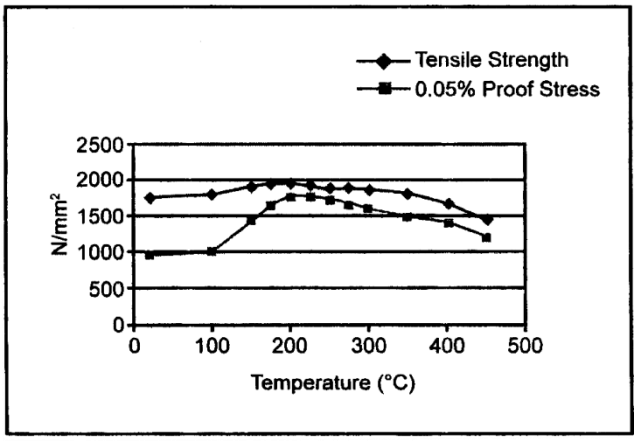
تنش‌های پسماند در مفتول‌هایی که تبدیل به محصولات مهندسی می‌گردند مربوط به تولید مقادیر زیادی نابجایی می‌باشند و یا مرتبط هستند با ویژگی‌های ساختاری بین دانه‌ای که ساختار دانه‌ای طبیعی آلیاژ آهنی را تحت کرنش قرار می‌دهند. تنش‌زدایی مستلزم توانایی نابجایی‌ها به حرکت در ساختار دانه‌ای به سمت‌هایی است که کرنش (یا تنش) در دانه در آنجا کاهش یابد. این پدیده وقتی روی می‌دهد که نابجایی‌ها در هم آمیخته و/ یا در تقابل با یکدیگر، در جاهای خالی مرزهای ریز دانه، ذرات فاز دوم، ناخالصی‌ها و مرز دانه‌ها قرار گیرند.

در موارد آهنی، یک واکنش متالورژیکی اضافه به همراه کاهش کرنش‌های دانه‌ای روی می‌دهد. این واکنش که «کرنش پیری» یا «پیر سختی» نامیده می‌شود سرنخی به دست می‌دهد که نشان‌دهنده علت تشابه پیرسختی با رسوب سختی می‌باشد. در دمای بالاتر از ۱۵۰درجه سانتی‌گراد در فولاد کربنی و حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد در فولاد ضدزنگ آستینتی، رسوب‌های خیلی کوچکی در ساختار دانه‌ای رشد می‌کنند. این رسوب‌ها به قدری کوچک هستند که با میکروسکپ چشمی متالورژی دیده نمی‌شوند و برای تشخیص میکروسکپ انتقال الکترونی نیاز می‌باشد و حتی با این حال به سختی دیده می‌شوند. این باور وجود دارد که در پیرسختی، اجزاء بینابینی آلیاژ کربن و نیتروژن درحین انتشار فولاد رسوب‌های کربو- نیترید بدور بعضی نابجایی‌ها

شکل می‌دهند که باعث قفل شدن انها در محل می‌شود. این قفل نابجایی باعث افزایش درحد الاستیک (مقاومت الاستیک) فولاد می‌گردد و میزان کمتری موجب افزایش مقاومت کششی می‌گردد. برای فولادهای کربنی خواص مکانیکی با تنش‌زدایی حرارتی در حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه سانتیگراد، به حداکثر می‌رسند و برای فولادهای ضدزنگ آستنیتی این حداکثر سازی خواص مکانیکی در دمای تنش‌زدایی ٤٠٠ تا ٤٥٠ درجه سانتیگراد به دست می‌آید. در دماهای بالاتر تنش‌زدایی این باور وجود دارد که رسوب‌های کربونیترید درحدی رشد می‌کنند که کمترین تأثیر را بر قفل نابجایی خواهند داشت و بنابراین خواص کاهش می‌یابند. برای تنش‌زدایی فولاد کربنی و جهت اجتناب از نرم شدن محسوس حداکثر دمای به‌کار گرفته شده ۳۷۵ درجه سانتیگراد و برای فولادهای ضدزنگ آستنیتی ۵۰۰ درصد سانتیگراد خواهد بود. دماهای بالاتر می‌توانند بیشتر از تنش‌زدایی برای آنیل‌کاری مناسب باشند. البته اگر آنیل مفتول مورد نظر باشد معمولاً دماهای خیلی بالاتر می‌بایست به کار گرفته شوند همانگونه که در مبحث آنیل‌کاری به آنها اشاره شده است.

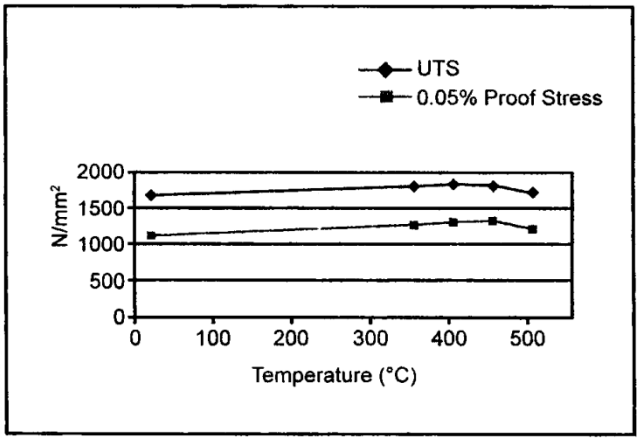
اثر دما بر خواص مکانیکی

تأثیر دمای تنش‌زدایی و زمان بر مقاومت تسلیم و مقاومت کششی فولاد کربنی در شکل ۱ نشان داده شده است.



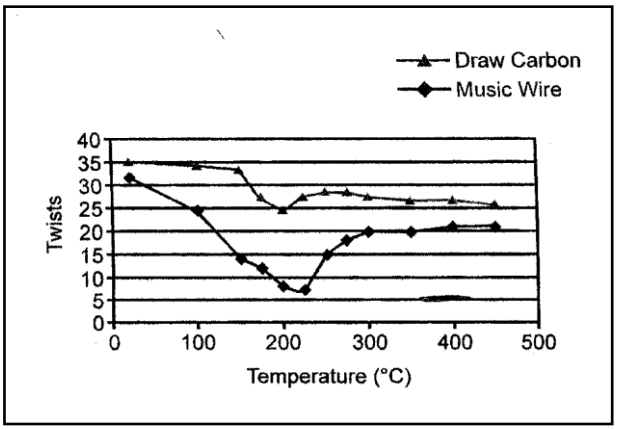
شکل ۱ـ تأثیر دمای تنش‌زدایی به خواص مکانیکی مفتول فولاد کربنی کشیده شده قطر ۲/۶۵ میلیمتر

در شکل یک به وضوح دیده می‌شود که خواص مکانیکی به دلیل پیرسختی در دمای ۲۰۰ تا ۲۲۵ درجه سانتیگراد میزان حداکثری دارد. همچنین ضروری است که تأثیر دما بر تنش‌های پسماند نیز مدنظر قرار گیرد. حدود ٤٠ تا ٥٠درصد تنش پسماند خمش در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد از بین می‌رود و ۹۰ تا ۹۵ درصد آنها در دمای ۳۷۵ درجه سانتیگراد آزاد خواهند شد همانگونه که در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. بنابراین برای انتخاب دما جهت به حداکثر رسانی خواص مکانیکی و حداقل رسانی تنش‌های پسماند همیشه می‌بایست تعاملی وجود داشته باشد. تولیدکنندگان فنر اغلب از دمای خیلی تعاملی معقول حدود ۲۸۰درجه سانتیگرادی برای تمامی فنرهای فولاد کربنی استفاده می‌کنند. برای فولادهای ضدزنگ آستنیتی، اثرات مشابه‌ای اما در دمای نسبتاً بالاتر روی می‌دهد، همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل۲ـ تأثیر دمای تنش‌زدایی به خواص مکانیکی مفتول فولاد فنر ضدزنگ۳۰۲

عملیات حرارتی تنش‌زدایی بر فرم‌پذیری مفتول‌ها نیز تأثیر می‌گذارد. این پارامتر به وسیله کاهش سطح مقطع تا برش (یا ازدیاد طول نمونه تا برش) در تست کشش ممکن است قابل اندازه‌گیری باشد. همچنین این پارامتر به وسیله آزمایش خم (شکل۳) یا از روی منحنی تغییر شکل پلاستیکی درحین تست کشش قابل اندازه‌گیری می‌باشد. به هر حال این کاهش فرم‌پذیری مفتول‌های آهنی بعداز عملیات حرارتی تنش‌زدایی، اندازه‌گیری شده است و بنابراین بیشتر فرم‌پذیری می‌بایست قبل از تنش‌زدایی صورت بگیرد.



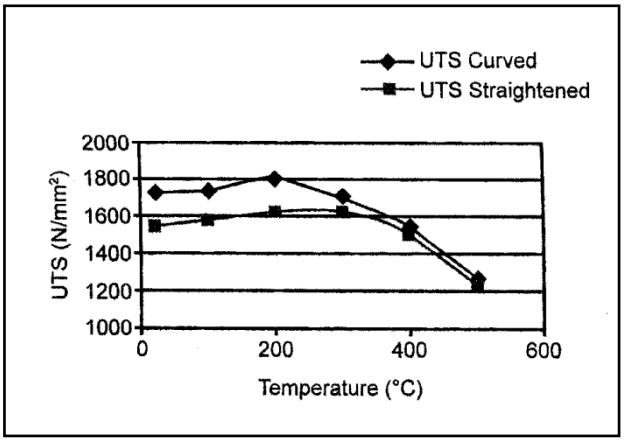
شکل۳ـ تأثیر دمای تنش‌زدایی به فرم‌پذیری پیچشی مفتول‌های فولادی

تأثیر صاف کردن مفتول بر خواص مکانیکی

مفتول‌های کشیده شده ممکن است با فرآیندهای هم مارپیچی و هم چرخشی صاف شوند. برای مفتول‌های مورد استفاده در بتن‌های پیش تنیده مفتول ممکن است در هنگامی که تحت تنش کششی قرار می‌گیرد، تنش‌زدایی گردد.

صاف کردن مارپیچی مقاومت کششی را بین ۵ تا ۱۰ درصد کاهش می‌دهد، همانگونه در شکل ٤ نشان داده شده است. این کاهش جزیی است و توسط عملیات حرارتی تنش‌زدایی، قابل بازیابی البته نه به صورت کامل می‌باشد.

تنش‌زدایی در زمانی که مفتول تحت تنش کششی قرار دارد مقاومت کششی را تقریباً بدون تغییر نگاه می‌دارد اما باید توجه داشت که تنش‌زدایی تمایل به بازگرداندن اثر هرگونه تنش اعمالی به مفتول را دارد. بنابراین محصولات شکل گرفته مفتولی عموماً می‌بایست درحین تنش‌زدایی تحت هیچگونه تنشی نباشند. مثلاً اگر یک قطعه فنری بزرگ در آون تنش‌زدایی جا نمی‌شود و برای جا رفتن به صورت حلقه در می‌آید، می‌بایست تکه‌تکه مورد تنش‌زدایی قرار گیرد.



شکل۴ـ تأثیر دمای تنش‌زدایی بر خواص مکانیکی مفتول فنری فولاد ضدزنگ ۳۰۲

اثرات تنش‌زدایی

عملیات حرارتی تنش‌زدایی علاوه‌بر کاهش تنش پسماند ناشی از فرم‌دهی و تغییر در خواص مکانیکی، تأثیر سومی نیز خواهد داشت و آن تغییر دائمی فیزیکی در محصولاتی است که در معرض این‌گونه عملیات حرارتی قرار داشته باشد. می‌توان گفت این اثر تغییرات دقیق قابل پیش‌بینی در ابعاد به وجود می‌آورد. اما اگر محصولی در طول عمر خود دمایش از دمای تنش‌زدایی تجاوز نکند، تغییر ابعادی بیشتر در آن روی نمی‌دهد. مشاهده شده است که چنانچه فولاد کربنی تنش‌زدایی نگردیده باشد تدریجاً در دمای اتاق نیز تغییر ابعاد خواهد داد.

یک فنر ساز در یک دوره آموزش که در آن مزایای تنش پسماند در فنرهای پیچشی مطرح گردید حضور داشت. براساس شنیده‌های خود در این دوره تصمیم گرفت فرآیند تنش‌زدایی را در یک سری از تولیدات خود که چنگک‌های کشاورزی (فنرهای پیچشی) بود، حذف نماید. او قبل از حمل تولیدات خود، به دقت زوایای چنگک‌ها را بررسی نمود. اما بعداز سه هفته که محصولات به کارخانه مشتری رسید با تعجب دید که زوایا تغییر کرده و اشتباه هستند. چنگک‌ها در مدت زمان حمل درحدی دچار پیچش و خمیدگی شده بودند که از حدود قابل قبول تجاوز نموده بودند و این به دلیل عدم تنش‌زدایی بود.

محصولات فولاد کربنی که شکل منحنی به خود گرفته باشند پس از عملیات تنش‌زدایی دچار کاهش قطر یا شعاع می‌شوند در صورتی که فولادهای ضدزنگ افزایش این ابعاد را خواهند داشت. واضح است که آزادسازی تنش پسماند نمی‌تواند توضیح کاملی برای رفتار در این دو ماده کاملاً متفاوت داشته باشد. برای ضدزنگ‌های آستنیتی، یک واکنش دیگر متالورژیکی روی می‌دهد. (برای مثال؛ تبدیل جزیی آستنیت به مارتنزیت) این اعتقاد وجود دارد که این واکنش علت اصلی عدم پیچش فنرهای فولاد ضدزنگ درحین تنش‌زدایی می‌باشد، برعکس فولادهای کربنی که دچار پیچش می‌گردند. بعداز شکل‌گیری یک فنر حلقوی در قسمت داخل خم، تنش پسماند کششی مربوط به حالت برگشت فنری **(Spring – back)** وجود خواهد داشت. تنش‌زدایی، تنش‌های شکل‌دهی در یک فنر را آزاد می‌سازد و انتظار می‌رود باعث شود شکل فنر کاملاً نزدیک به شکل قبل از حالت برگشت فنری و در نتیجه باز شدن بماند. این اثر برای هر دو فولاد کربنی و ضدزنگ مورد انتظار می‌باشد. از طرفی برای فولادهای ضدزنگ شکل‌دهی سرد پتانسیل ایجاد کرنش تبدیل آستنیت به مارتنزیت را دارد و مارتنزیت اضافی زیادی در موقعیت ماکزیمم تنش پسماند کششی در سطح داخلی فنر شکل می‌گیرد. این تبدیل آستنیت به مارتنزیت همسو خواهد بود با افزایش حجم که خود می‌تواند با تغییرات مربوط به کاهش تنش پسماند در فنرهای فولاد ضدزنگ مقابله نماید و در نتیجه باعث باز نشدن آنها گردند. این شاید یک نمود از اصل شاتولیه باشد که می‌گوید «وقتی یک سیستم متعادل مورد تغییر قرار گیرد، به گونه‌ای رفتار می‌کند که در برابر تغییر مقابله کند یا آن را به حداقل برساند». بنابراین تبدیل آستنیت به مارتنزیت در فرم‌دهی سرد با تولید تنش پسماند مقابله می‌نماید.

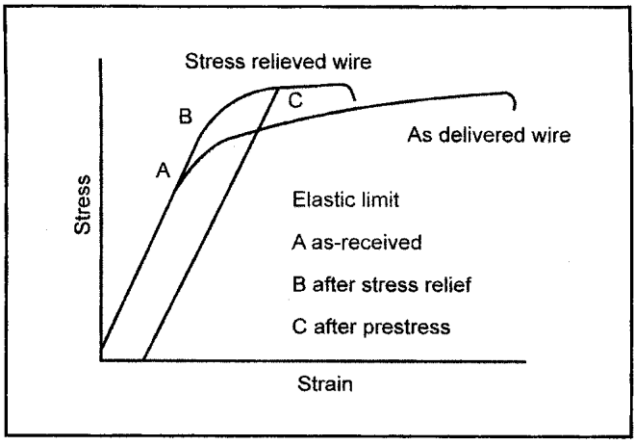
نوع فرآیند عملیات

فرآیندهایی که ممکن است بعد از شکل‌گیری محصولات مفتولی برای روی آنها انجام شوند شامل موارد زیر خواهند بود:

- عملیات حرارتی تنش‌زدایی
- سخت‌کاری
- سخت‌کاری و بازپخت یا بازپخت آستنیتی

- پیش تنیدن
- شات بلاست یا ساچمه‌زنی
- آبکاری الکترولیز
- فسفات‌کاری/ رنگ‌کاری

سوال این است که آیا عملیات تنش‌زدایی می‌بایست قبل از این فرآیندها صورت پذیرد. معمولاً جواب مثبت است، اما باید توجه داشت که عملیات حرارتی تنش‌زدایی قبل از عملیات حرارتی زائد می‌باشد. چرا که تغییر شکلی که در اثر رفع تنش‌های پسماند روی می‌دهد، در دمای سخت‌کاری یا دیگر فرآیندهای سخت‌کاری نیز اعمال می‌گردد. این یک منشاء اعوجاج (درهم پیچیدگی) می‌باشد که بر اثر عملیات حرارتی در قطعه اتفاق می‌افتد.

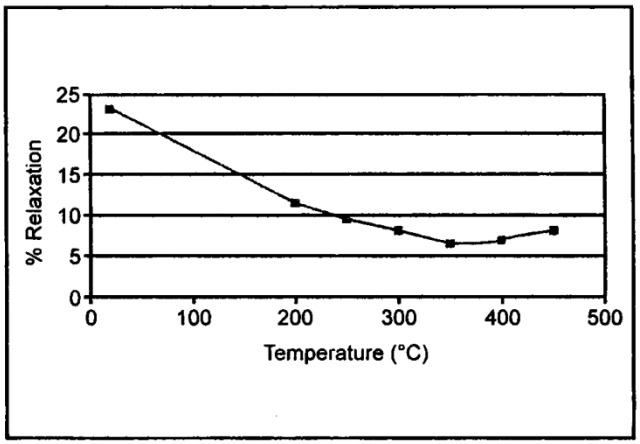


شکل۵ ـ تأثیر عملیات حرارتی تنش‌زدایی بر مشخصه‌های تنش/کرنش مفتول فولاد کربنی

شکل ۵ نشان می‌دهد که چرا تنش‌زدایی می‌بایست همیشه قبل از پیش‌تنیدگی باشد اگرچه همه مزایای پیش‌تنیدگی را بر طرف نماید. همچنین ضروری است عملیات حرارتی تنش‌زدایی قبل از آبکاری الکترولیز صورت بگیرد. حضور تنش‌های پسماند قابل توجه درحین عملیات الکترولیز به میزان زیادی قابلیت انتشار هیدروژن در فولاد را افزایش می‌دهد، بنابراین خطر تردی‌هیدروژنی به‌ویژه اگر مقاومت فولاد مورد آبکاری متجاوز از ۱۰۰۰ نیوتن بر میلیمتر مربع باشد وجود دارد.

تأثیر تنش‌زدایی بر رهایی (relaxation) و خستگی (fatigue)

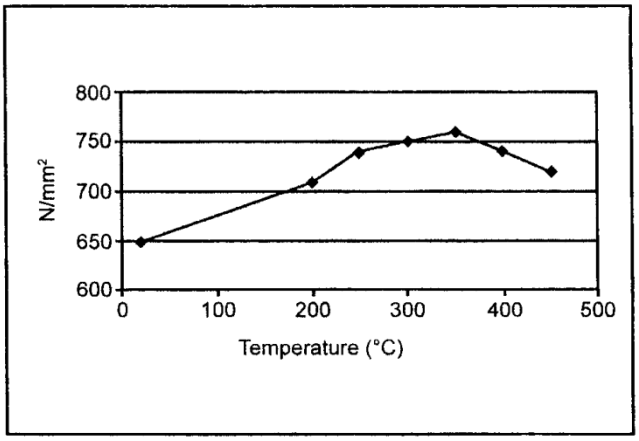
شکل‌های ٦ و ٧ نشان می‌دهند که هم مقاومت رهایی و هم مقاومت خستگی محصولات مفتول فولادی وقتی دمای تنش‌زدایی به اندازه یا نزدیک بیشترین دمای پیشنهادی باشد، بهینه خواهند بود. به عبارتی دما باعث کاهش قابل ملاحظه مقاومت نهایی کششی مفتول می‌گردد. همین اصل برای فولادهای ضدزنگ آستنیتی با دمای پیشنهادی ٤٥٠درجه سانتیگراد جهت بهینه‌سازی کارایی رهایی و خستگی صادق می‌باشد.



شکل۶ ـ تأثیر دمای تنش‌زدایی بر رهایی فنرهای فشاری فولاد کربنی

اگر اثرات متالورژیکی عملیات حرارتی تنش‌زدایی مورد توجه قرار گیرند، مشخص می‌گردد که مقاومت رهایی و کاهش‌تنش پسماند مربوط به حرکت نابجایی‌های قابل تحرک به مکان‌هایی با تنش کمتر یا به مکانی که امکان حرکت بیشتر نداشته باشند، می‌باشد. اگر نابجایی‌ها نتوانند حرکت کنند، نمی‌توانند رها گردند. روش دیگر بهبود مقاومت رهایی، پیش‌تنیدن می‌باشد که بارگذاری در جهت اعمال بار درحدی که از حدالاستیک تجاوز نموده و موجب تغییر شکل پلاستیکی گردد، است. تنش درگیر در پیش تنیدن بر تحرک نابجایی‌های قابل حرکت اثر می‌گذارد. پیش‌تنیدن و عملیات حرارتی تنش‌زدایی به‌طور مشترک مقاومت رهایی را بهبود

می‌بخشند. اگر دمای پیش‌تنیدن افزایش یابد مقاومت رهایی بیشتری حاصل می‌گردد. به عبارت ساده می‌توان تصور کرد که تحرک نابجایی که موجب رهایی می‌گردد تا حدودی به‌وسیله عملیات حرارتی و پیش‌تنیدن تأمین می‌گردد. ولی همین تحرکات در صورت انجام پیش‌تنیدگی در دمای بالاتر اغلب کاملاً حذف می‌گردند. (مثلاً در دمای ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه سانتیگراد برای فولاد کربنی)



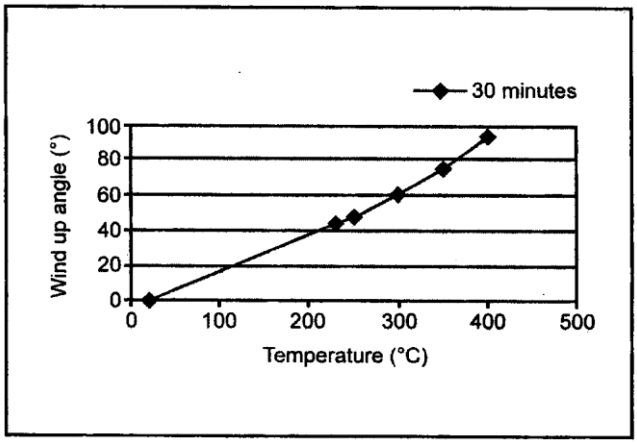
شکل۷ ـ تأثیر دمای تنش‌زدایی بر ماکزیمم تنش جهت اجتناب از گسیختگی خستگی فنرهای فولاد کربنی در یک میلیون سیکل

تنش‌زدایی مجدد بعداز عملیات ساچمه‌زنی نیز سودمند می‌باشد، فرآیندی که در درجه اول مقاومت خستگی را بهبود می‌بخشد ولی تأثیر مخالفی بر مقاومت رهایی خواهد داشت. پرتاب ساچمه تعداد زیادی نابجایی قابل تحرک در سطح مفتول ایجاد می‌کند و به همان میزان تنش پسماند فشاری پدیدار می‌گردد. تنش‌زدایی در دمای ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه سانتیگراد بعداز ساچمه‌زنی تحرک برخی از این نابجایی‌ها را محدود می‌کند بدون اینکه سطح تنش پسماند به اندازه کافی تنزل نماید، از این‌رو مقاومت خستگی بهبود می‌یابد. بنابراین بعداز پرتاب ساچمه و

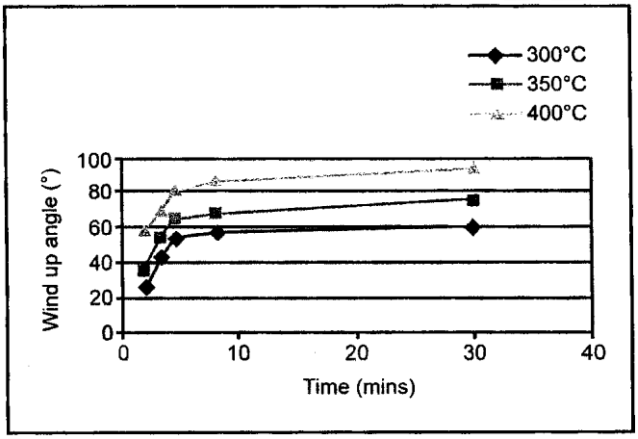
تنش‌زدایی، پیش‌تنیدن نیز می‌بایست انجام شود. اگر پیش‌تنیدن در دمای بالاتر از $(\leq 250^{\circ} C)$ صورت پذیرد، تنش‌زدایی و پیش‌تنیدن را به طور همزمان می‌توان انجام داد.

فرآیند گروهی یا پیوسته تنش‌زدایی

تنش‌زدایی یک فرآیند وابسته به دما و وزن می‌باشد. مطمئناً با استفاده از دمای بالاتر و زمان کوتاه‌تر نتیجه مشابه‌ایی به دست خواهد آمد، به شرط آن که محدوده دمایی فرآیندها رعایت گردند. در فرآیندهای گروهی بزرگ چنان چه هدف دستیابی به تغییر ابعادی یکنواخت باشد، البته دما بسیار مهمتر از زمان خواهد بود. جهت مشخص نمودن نسبت زمان و دما، گروه‌هایی از فنرهای پیچشی در آون‌های گروهی و پیوسته مورد تنش‌زدایی قرار گرفتند. تغییرات در زوایای فنرهای پیچشی مبنای کارایی فرآیندهای تنش‌زدایی بود. برای طراحی ویژه فنرهای نشان داده شده در شکل‌های ۸ و ۹ باز شدن ۱۰۰ درجه‌ای زوایا تقریباً مساوی با تنش‌زدایی صددرصد تنش پسماند بود. از طرفی زمان ۳۰ دقیقه در دمای ۲۳۰ درجه سانتیگراد تقریباً برابر با زمان ۳/۲۵ دقیقه در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد و هر دو وضعیت تنش‌زدایی‌ها کاهش حدود ٤٥ درصدی تنش پسماند این فنرها را به دنبال خواهد داشت.



شکل۸ ـ تأثیر دما بر پیچش فنرهای پیچشی فولاد کربنی



شکل۹ ـ تأثیر زمان بر پیچش فنرهای پیچشی فولاد کربنی

فصل ۱۴

آنیل‌کاری

مقدمه

آنیل‌کاری یک عبارت کلی به معنی عملیاتی است که شامل حرارت دادن و نگاه داشتن در یک دمای مطلوب و به دنبال آن خنک کردن با یک سرعت مناسب، می‌باشد. به طورکلی به معنی نرم کردن مواد فلزی می‌باشد.

عملیات آنیل‌کاری متوسط و کامل در کنترل مشخصه‌های کششی و فرم‌دهی محصولاتی از مفتول و میلگرد، مهم می‌باشند. اهداف این‌گونه عملیات حرارتی عبارتند از:

- **یکنواخت کردن ساختمان فلز بعداز عملیات نوردکاری**
- **از بین بردن کار سختی حاصل از کارسرد عملیات کشش مفتول**
- **نرم کردن فلز**
- **اصلاح شکل‌پذیری، سفتی، مقاومت کششی، مقاومت تسلیم، ازدیاد طول و دیگر خواص فیزیکی**
- **ایجاد یک ساختمان میکروسکپی دلخواه**

نرم شدن فلز در عملیات آنیل‌کاری در نتیجه تبلور مجدد می‌باشد و این تبلور مجدد شامل سه مرحله است.

- **بازیابی**
- **تبلور مجدد**
- **رشد دانه**

بازیابی

بازیابی نرم شدن اولیه فلز کارسرد شده در عملیات آنیل‌کاری است. این نرم شدن در اثر ترتیب مجدد نابجایی (جابجای) های موجود با اعمال انرژی کم (در چند وجه) حاصل می‌شود. فعل و

انفعالات زیاد نابجایی‌ها نیز کاهش می‌یابد و تنش الاستیکی کم می‌شود. در موقع حرارت دادن مفتول کربن‌دار کار سرد شده، بازیابی در فاصله دمای ۳۹۰ تا ۵۱۰ درجه سانتی‌گراد شروع می‌شود.

تبلور مجدد

تبلور مجدد یک شکل‌گیری دانه‌های جدید در یک ساختمان میکروسکپی تغییر شکل یافته یا تحت کار سرد قرار گرفته می‌باشد. فعل و انفعالات جابجایی‌ها در دانه‌های جدید به مقدار زیاد کاهش یافته‌اند بنابراین باعث نرم شدن فلز و کاهش مقاومت تسلیم می‌شود. دانه‌های جدید دارای ابعاد تقریباً مساوی هستند و دارای قابلیت شکل‌پذیری می‌شوند. تبلور مجدد دانه‌های کار سرد شده تابعی از زمان و دمای عملیات آنیل‌کاری است، اثراتی که ارتباط نزدیکی با هم دارند. دمای تبلور مجدد برای فولاد کربنی ٦٧٧ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. افزایش کار سرد دمای تبلور مجدد را پایین می‌آورد و سایز دانه‌های حاصله را کاهش می‌دهد.

رشد دانه

رشد دانه در دانه‌های مجدداً تبلور یافته در دمای بیش از حد نیاز برای تبلور مجدد روی می‌دهد. (چنانچه در آنیل‌کاری دمای بیش از نیاز آنیل‌کاری اعمال گردد با رشد دانه مواجهه می‌شویم ـ مترجم) این عمل باعث نرم شدن فلز و به طور معکوس به دلیل غیریکنواختی ریز ساختار باعث کم شدن قابلیت کشش می‌گردد.

زمان و دما و همین‌طور سرعت خنک کردن در عملیات آنیل‌کاری به جنس مورد عملیات حرارتی قرار گرفته و خواص متالورژیکی نهایی مورد نظر بستگی دارد.

تعاریف

آنیل‌کاری کامل

آنیل‌کاری کامل شامل حرارت دادن فلزات آهنی تا دامنه بالای دمای بحرانی و نگهداری در این دما با تلرانس $\pm 5^{\circ}C$ که معمولاً **Soaking** (خیساندن) نامیده می‌شود و خنک‌کاری با سرعت $42^{\circ}C$ در ساعت تا رسیدن به دمای $649^{\circ}C$ می‌باشد. در اتمسفر کنترل شده (فضای محفظه

کوره) براساس کیفیت سطح یا رنگ، جسم مورد آنیل ممکن است تا دمای ۴۲۷° C یا ۹۳° C خنک شود.

در یک کوره تیپ **Bell** وقتی که دمای مفتول تا حد مطلوب پایین آورده شده باشد و درپوش داخلی برداشته و مفتول تخلیه گردد، ساختمان نهایی محصول اساساً لایه پرلیت خواهد بود همانگونه که در شکل **1A** نشان داده شده است.

فرآیند آنیل‌کاری

این فرآیند شامل حرارت دادن یک آلیاژ پایه آهنی تا رسیدن به زیر یا نزدیک به دامنه دمای بحرانی و نگاه داشتن در این دما با تلرانس ±۸° C و سپس خنک کردن مفتول در اتمسفر محافظت شده می‌باشد. سرعت خنک کردن در این عملیات بحرانی نمی‌باشد زیرا تشکیل مجدد ساختمان فریتی همه آن چیزی است که مطلوب است.

کروی کردن

کروی ساختن یک عملیات حرارتی طراحی شده برای کروی کردن پرلیت‌ها می‌باشد. همانگونه که در شکل **1B** نشان داده شده است. سه روش برای کروی کردن آلیاژهای پایه آهنی می‌تواند به کار گرفته شود. روش مورد استفاده بستگی به نوع ماده و میزان کروی‌سازی مورد نیاز دارد. روش‌ها عبارتند از:

- حرارت دهی تا بالای دمای بحرانی، نگاهداری در این دما با تلرانس حرارتی کم، سرد کردن سریع تا زیر دمای بحرانی، نگاهداری برای مدت زمان کافی جهت شکل‌گیری ساختمان مطلوب، خنک کردن کوره برای مدت ۲ ساعت، تخلیه کوره و خنک کردن در اتمسفر محافظت شده تا دمای مورد نظر برای تخلیه نهایی.
- حرارت دادن تا دامنه بالای دمای بحرانی، نگاهداری در یک تلرانس حرارتی کم، خنک کردن سریع تا ۲۸° C بالاتر از حد پایینی دمای بحرانی و خنک کردن آرام تا حد پایینی دمای بحرانی (۶۴۹° C) با سرعت ۵ درجه سانتی‌گراد در ساعت.
- حرارت دادن نزدیک به حد پایینی دمای بحرانی و نگاه داشتن در آن دما برای مدت کافی جهت شکل‌گیری کروی سازی، معمولاً ۸ تا ۱۲ ساعت.

نرماله کردن

حرارت دادن تا ۲۸ درجه سانتی‌گراد بیشتر از حد بالایی دمای بحرانی، نگاه داشتن در یک دامنه حرارتی $\pm ۱۰^{\circ} C$ و خنک کردن در هوا یا جو محافظت شده با حداکثر سرعت ممکن می‌باشد.

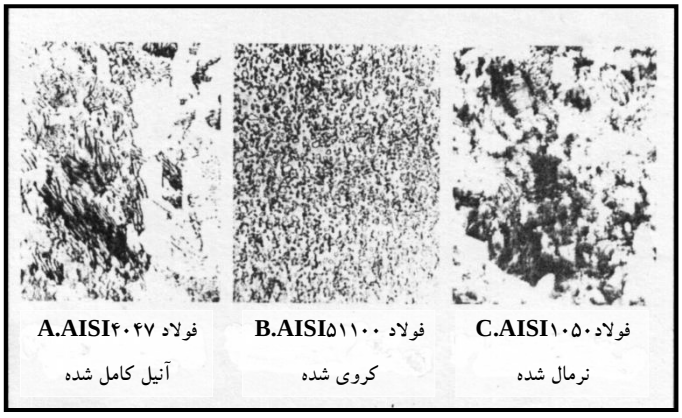
نرماله کردن یک ساختمان کریستالی شبیه آن چه در شکل **1C** نشان داده شده است، ایجاد می‌کند. این عملیات به عنوان یک عملیات حرارتی مقدماتی برای مواداولیه میلگردها جهت کنترل سطح آنها در برابر آسیب‌های سطحی با ایجاد پوسته انجام می‌شود. این پوسته‌ها در عملیات اسیدشویی بعدی از بین می‌روند.

کوره‌های نوع Batch (گروهی)

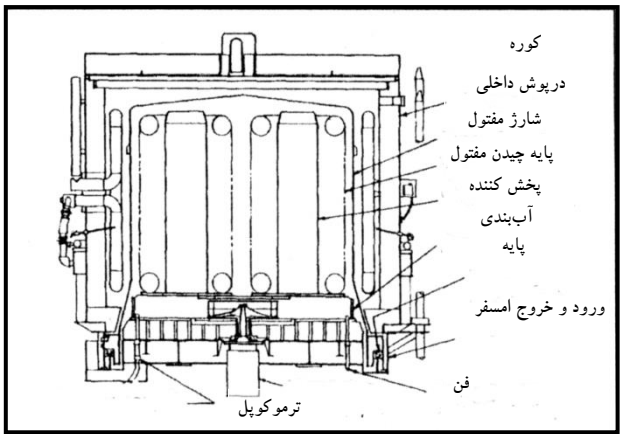
بخش اعظمی از آنیل‌کاری مفتول در این نوع کوره‌ها صورت می‌گیرد. یک ترکیب کلی کوره با هدایت حرارتی زیاد در شکل ۲ نشان داده شده است. این واحد شامل:

- یک پوشش قابل حمل بیرونی با یک منبع حرارتی معمولاً شعاعی و یک سیستم احتراق
- یک سازه پایه برای تحمل شارژ مفتول، یک فن جهت گردش گاز، یک محفظه داخلی برای پوشش مفتول و گاز و یک سیستم آب‌بندی محفظه داخلی و پایه

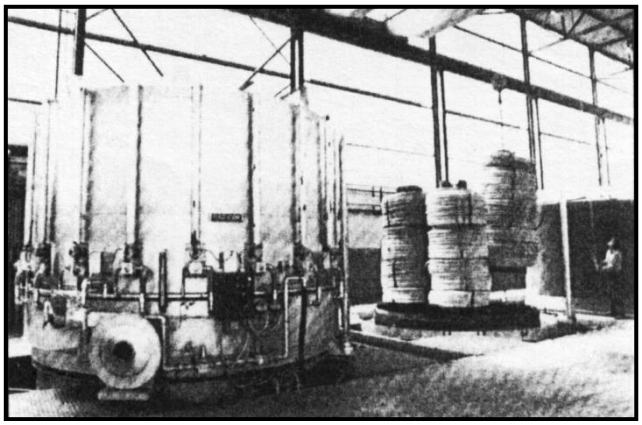
داشتن چند سازه پایه برای عملیات نیمه پیوسته آنیل‌کاری امری معمول است. برای کنترل تجهیزات کوره و سیکل حرارتی، ادواتی از نیمه اتوماتیک تا کاملاً اتوماتیک موجود می‌باشد.



شکل ۱ـ عکس‌های میکروسکپی فولاد آنیل شده بزرگ نمایید × ۱۰۰۰

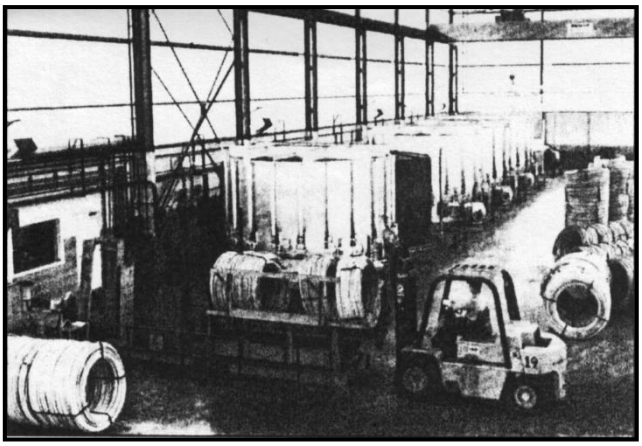


شکل ۲ ـ ترتیب عمومی یک کوره نوع Batch با انتقال دمای زیاد



شکل۳ ـ کوره آنیل تیپ **Bell**

کوره‌های آنیل مفتول از نظر ارتفاع محدود می‌باشند و این محدودیت به دلیل وزن ستون مفتول می‌باشد چرا که ممکن است در پایین ستون در مفتول‌ها درحین عملیات آنیل چسبندگی به وجود آید. به این دلیل ارتفاع شارژ مفتول نباید از ۲۷٤^{cm} تجاوز کند. شارژهای خیلی معمول به ارتفاع ۲۱۳ الی ۲۲۸ سانتی‌متر می‌باشند. همان‌گونه که در جدول ۱ آمده است، با این سایز کوره‌ها امکان شارژ مفتول از ۹ تا ۱۸ تن وجود دارد. جدول همچنین نشان می‌دهد که میزان تولید بین ۰/۷۵ تا ۳ تن در ساعت امکان‌پذیر است.



شکل۴ ـ کوره آنیل تیپ **Bell**

نمونه سیکل عملیات حرارتی

فرآیند آنیل (کم کربن) و نرماله کردن

- بارگذاری و نصب محفظه داخلی
- تخلیه گازهای موجود در محفظه و تست این تخلیه توسط تجهیزات مربوطه
- حرارت دادن تا دمای آنیل
- نگهداری در دمای آنیل برای مدت مطلوب
- برداشتن محفظه حرارت‌دهی
- خنک کردن تا دمای تخلیه
- برداشتن محفظه داخلی و تخلیه

آنیل کامل (کربن متوسط و پر کربن)

- بارگذاری و نصب محفظه داخلی
- تخلیه هوای داخل محفظه و تست توسط تجهیزات استاندارد
- تخلیه هوا تا نقطه شبنم (برای کنترل کربن)
- حرارت دادن تا دمای آنیل
- نگاه داشتن در این دما تا مدت زمان مطلوب و با تلرانس $\pm 8^{\circ}C$
- کنترل خنک کردن با سرعت ۲۸ تا ٤۲ درجه سانتی‌گراد در ساعت تا رسیدن به دمای $649^{\circ}C$
- برداشتن محفظه حرارت دهی
- خنک شدن در محفظه داخلی تا دمای مطلوب و تخلیه

سیکل کروی کردن

- بارگذاری و نصب محفظه داخلی
- تخلیه هوای درون محفظه
- تخلیه هوا تا نقطه شبنم
- حرارت دادن تا دمای مطلوب
- نگاه داشتن در این دما با تلرانس دمایی $\pm 8^{\circ}C$ برای مدت زمان مطلوب
- روش‌های خنک کردن
- خنک کردن سریع، نگاه داشتن و سپس خنک کردن آهسته
- خنک کردن سریع و سپس خنک کردن آهسته
- خنک کردن آهسته با سرعت $5^{\circ}C$ در ساعت برای همه موارد
- برداشتن محفظه حرارت دهی
- خنک کردن تا دمای مطلوب تخلیه و سپس تخلیه

اتمسفرهای محافظ برای آنیل‌کاری مفتول

وظیفه اتمسفر (فضا) یک کوره آنیل جلوگیری از شکل‌گیری اکسیداسیون و دی‌کربوره شدن (از بین رفتن کربن) درحین عملیات آنیل‌کاری می‌باشد. عواملی که باعث اکسیداسیون یا دی‌کربوره

شدن می‌شوند، ممکن است آب‌بندی نبودن محفظه داخلی به خصوص اطراف فـن، روانسـازهای موجود در سطح مفتول و اکسیدهای موجود برروی سطح مفتول باشند.
منفی کردن فشار داخل محفظه کوره به طور اتوماتیک می‌تواند منبـع اکسیداسـیون و دی‌کربـوره شدن شود. باید توجه کرد که درصورت نفوذ هوای بیرون به کوره بیشـتر ایـن هـوا بـا اتمسـفر حفاظتی کوره ترکیب شده و آب و دی‌اکسیدکربن شکل می‌گیرد.

جلوگیری از اکسیداسیون

پوسته شکل گرفته برروی سطح میلگرد نوردگرم شده در صورتی که در هـوا خنـک شـده باشـد ترکیبی از سه نوع مختلف اکسیدآهن می‌باشد.

- اکسیدآهن **Feo (Wustite)**
- اکسید فریک **Fe_2O_3 (Hematite)**
- **Fe_3O_4 (Magnetite) $(Fe^{+2})(Fe^{+3})_2O_4$**

واکنش‌های اصلی اکسیداسیون آهن به قرار زیرند:

- $2XFe + yO_2 \leftrightarrow 2Fe_xO_y$
- (wustite) $(x = 1, y = 1)$ $2Fe + O_2 \leftrightarrow 2FeO$
- (Hematite) $(x = 2, y = 3)$ $4Fe + 3O_2 \leftrightarrow 2Fe_2O_3$
- (Magnetite) $(x = 3, y = 4)$ $6Fe + 4O_2 \leftrightarrow 2Fe_3O_4$
- $XFe + yH_2O \leftrightarrow Fe_xO_y + yH_2$
- $XFe + yHO_2 \leftrightarrow Fe_xO_y + yCO$

Charge Size				Charge Load					
Diameter, in.	Height, in.	Crane Loud (tons)	Base Fan HP, Std. Temp.	No. of Stems	Type	O.D., in.	Lb. Per Stem	Total Lb.	Lbs./Hr. to Temp.
114	90-108	12.5	25 or 30	3 6 9 18	Rod 26" Block 22" Block 16" Block	54 36 29 22	7,000 5,000 4,500 2,500	21,000 30,000 40,500 45,000	4,900 5,200 5,800 6,300
108	90	12.0	25	3 6 8 15	Rod 26" Block 22" Block 16" Block	48 36 29 22	6,000 5,000 4,500 2,500	18,000 30,000 40,000 37,500	4,700 5,200 5,800 5,500
81	90	10.0	20 or 25	1 3 5 8	Rod 26" Block 22" Block 16" Block	54 36 29 22	7,000 5,000 4,600 2,500	7,000 15,000 22,500 20,000	3,000 4,200 4,700 4,500
74	90-84	9.0	20	1 2 4 7	Rod 26" Block 22" Block 16" Block	54 36 29 22	7,000 5,000 4,500 2,500	7,000 10,000 18,000 17,500	2,500 3,000 3,500 3,500
62	66	6.0	15	1 3 5	Rod 22" Block 16" Block	54 29 22	5,000 3,300 1,900	5,000 9,900 9,500	1,500 2,500 2,500
62	90-84	7.5	15	1 3 5	Rod 22" Block 16" Block	54 29 22	7,000 5 2,500	7,000 13,500 12,500	2,000 3,000 3,000
54	84	7.0	7.5	1 3	Rod 16" Block	54 22	7,000 2,500	7,000 7,500	1,800 2,000
48	90-84	6.5	7.5	1 3	Rod 16" Block	48 22	6,000 2,500	6,000 7,500	1,700 2,000

جدول ۱ ـ ظرفیت‌های تجهیزات عملیات حرارتی

شکل‌های خیلی رایج اکسیدآهن Feo (Wustite) است که پوسته تیره رنگی می‌باشد که در دمای ٥٦٦° C شکل می‌گیرد، Fe_3o_4 (Magnetite) که می‌تواند اکسیدآبی رنگ سخت باشد در دمای پایین‌تر شکل می‌گیرد. Fe_2o_3 (Hematite) هم به ویژه در حضور اکسیژن ولی معمولاً در دماهای بالاتر شکل می‌گیرد.

همه این واکنش‌ها در کاهش دما، کندی قابل توجهی خواهند داشت. در دمای پایین حدود ۳۱٦° C فقط واکنش با اکسیژن هوا مهم خواهد بود. مفتول تا زمانی که به دمای حدود ۹۳° C برسد جهت ممانعت از اکسیداسیون محسوس می‌بایست در معرض هوا قرار نگیرد. چون این

واکنش‌ها دارای موازنه هستند می‌توانند در هر دو جهت اتفاق بیفتند. سوق دادن واکنش‌های بالا در جهت استحاله اکسید (به سمت چپ همانگونه که در بالا نوشته شده است)، مشروط به وجود عوامل استحاله مانند هیدروژن (H2) و منوکسیدکربن (CO) در محیط می‌باشد. از بین بردن اکسید شکل گرفته بسیار مشکل‌تر از جلوگیری از تشکیل آن است. یک اکسید یکبار شکل می‌گیرد و سپس از بین می‌رود ولی آسیب سطحی برروی مفتول باقی خواهد ماند.

نسبت مقادیر عوامل از بین برنده اکسید و اکسیدکننده در جلوگیری از اکسیداسیون بسیار مهم می‌باشد برای مثال نسبت آب به هیدروژن و کربن دی‌اکساید به کربن منوکساید. نسبت‌های دقیق مورد نیاز بستگی به درجه حرارت دارد همانگونه که در شکل ۵ نشان داده شده است. براساس این شکل مقادیر هیدروژن و CO در دمای داده شده می‌تواند تعیین شود در صورتی که نقطه شبنم و غلظت کربن دی‌اکساید مشخص باشد.

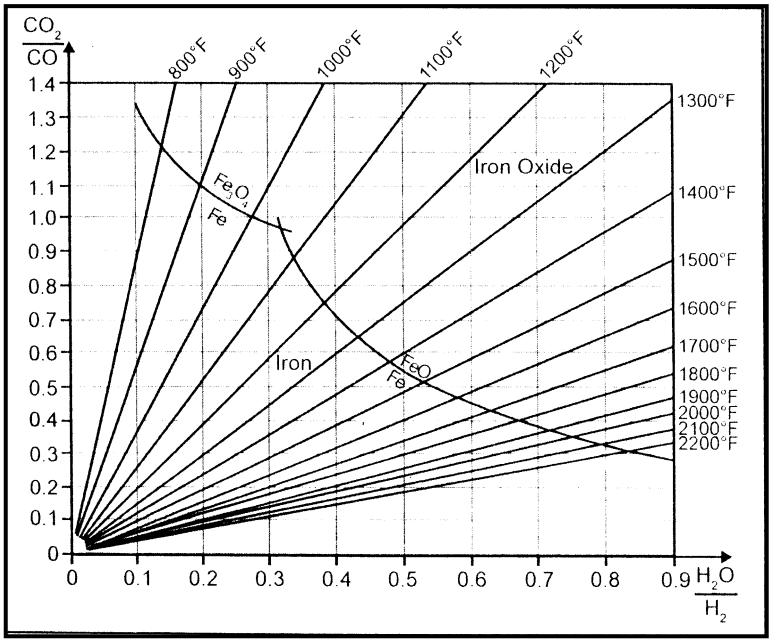
شکل ۵ همچنین نشان دهنده نوع اکسید شکل گرفته در هر درجه حرارت به عنوان تابعی از آب و کربن دی‌اکساید می‌باشد. منیتیت (Fe_2o_3) نیز ممکن است در حضور اکسیژن شکل گیرد. برای ابقاء یک اتمسفر کاهنده اکسید، یک کوره آنیل می‌بایست نسبت $\frac{CO2}{CO}$ و $\frac{H2o}{H2}$ را بالای خط موازنه آهن/ اکسیدآهن برای تمام درجه حرارت‌ها در سیکل‌کاری کوره نگاه دارد. به دلیل اینکه واکنش‌های اکسیداسیون در دماهای پایین‌تر، کندتر هستند، نسبت‌ها در شروع و پایان سیکل عملیات زیاد مهم نیستند. همانگونه که در شکل ۵ به وسیله شروط موازنه نشان داده شده است.

کنترل کربن

واکنش‌های اصلی کنترل کربن به شرح زیرند:

- $C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$
- $C + CO2 \leftrightarrow 2CO$
- $2C + O2 \leftrightarrow 2CO$

واکنش کربن با آب سریع‌تر از واکنش با کربن دی اکساید می‌باشد. یادآوری می‌شود که بیشتر اکسیژن ورودی به کوره تا مادامی که دما بالاتر از $538^{\circ}C$ باشد با اتمسفر کوره واکنش می‌کند و آب و دی‌اکسیدکربن شکل می‌گیرد تا این که با خود مفتول واکنش کند.



شکل ۵ ـ موازنه آهن/ اکسیدآهن در مخلوط‌های گازی $\frac{H2o}{H2}$ و $\frac{CO2}{CO}$

به هر حال اکسیژن می‌تواند به میزان زیادی در اتلاف کربن شرکت داشته باشد. به دلیل کاهش فعالیت کربن در دماهای پایین‌تر، دی‌کربوره شدن در دمای ۵۹۳ درجه سانتی‌گراد خیلی کمتر می‌باشد و زیر دمای ۵۳۸ درجه سانتی‌گراد ناچیز خواهد بود. در دمای بالاتر از $593^{\circ}C$ و پایین‌تر از دمای تبدیل (به‌طور رسمی $738^{\circ}C$) پتانسیل واقعی کربن در اتمسفر قابل کنترل نخواهد بود. میزان قابل توجهی از کربن در واقع نمی‌تواند به مفتول اضافه گردد زیرا کربن موجود در اتمسفر ابتدا به صورت دوده در می‌آید و یک امکان وجود دارد که به صورت یک لایه کارباید آهن بر روی مفتول بنشیند. کوره آنیل می‌بایست در برابر دی‌کربوره شدن مفتول محافظت شود و این محافظت با ایجاد اتمسفری بدون آب، دی اکسیدکربن و اکسیژن امکان‌پذیر است و برای ایجاد چنین اتمسفری، افزودنی‌های اتمسفری جهت واکنش با این عوامل دی‌کربوره کننده می‌بایست تدارک دیده شود.

وجود یک لایه اکسید برروی سطح فلز، دی‌کربوره شدن را به تأخیر می‌اندازد زیرا این لایه از واکنش کربن با اتمسفر جلوگیری می‌کند. بنابراین کار کردن با یک اتمسفر اکسیدکننده دارای مقدار زیادی آب،

دی‌اکسیدکربن و اکسیژن از مشکل دی‌کربوره شدن جلوگیری می‌کند. پاک کردن اتمسفر جهت دستیابی به محصول تمیزتر می‌تواند باعث دی‌کربوره شدن شود مگر این‌که عوامل بالا مورد توجه قرار گیرند.
برای نرماله کردن در دمای بالاتر از دمای تبدیل آستنیت (۷۳۸° C) یک اتمسفر با پتانسیل کربن خنثی برای مفتول می‌بایست ایجاد شود. برای این کار از روش اتمسفر کربوریزه توسط نیتروژن، منوکسیدکربن و هیدروژن حاصل از سیستم نیتروژن متانول یا مولد گرماگیر می‌توان استفاده کرد. یک سیستم بررسی دقیق اکسیژن یا کنترل نقطه شبنم می‌بایست جهت دستیابی به پتانسیل مطلوب کربن ایجاد شود.

انواع اتمسفرهای حفاظتی

اتمسفرهای حفاظتی را می‌توان با استفاده از گازهای صنعتی که از احتراق هوا و گازهای طبیعی به دست می‌آیند، فراهم نمود. گازهای صنعتی را از تفکیک آمونیاک بدون آب نیز می‌توان به دست آورد. در هر یک از موارد اجزاء فعال که در بالا شرح داده شدند معمولاً بخش کوچکی از اتمسفر را تشکیل می‌دهند، در حالی که نیتروژن که اثری بر فولاد کربنی ندارد بخش اعظمی از اتمسفر را تشکیل می‌دهد.

اتمسفرهای صنعتی

اتمسفرهای صنعتی که در بسیاری از کوره‌های تجاری آنیل برای فولاد کربنی مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل؛ نیتروژن هستند. نیتروژن حاصل از گازهای صنعتی درجه خلوص بالا حدود ۹۹/۹۹۹٪ و بسیار خشک و دارای نقطه شبنم زیر ۶۸° C ـ می‌باشد. به دلیل این‌که نیتروژن هیچ‌گونه ناپاکی اکسیدکننده یا دی‌کربوره کننده به اتمسفر کوره اضافه نمی‌کند، می‌تواند به تنهایی به عنوان یک اتمسفر حفاظتی مورد استفاده قرار گیرد. در بسیاری از موارد نشت هوا و آلودگی‌های موجود برروی مفتول یک افزودنی به اتمسفر حفاظتی را طلب می‌کند. یک مخلوط ٤٪ هیدروژن در نیتروژن می‌تواند در جلوگیری از اکسیداسیون مؤثر باشد ضمن این‌که آتش‌زا نیز نمی‌باشد. زمانی که هیدروژن و نیتروژن به تنهایی قادر به جلوگیری از فعالیت عوامل دی‌کربوره کننده نباشند، یک افزودنی مشتمل بر کربن برای فولادهای پرکربن در مواقع بحرانی دی‌کربوره شدن به کار گرفته می‌شود. اگر اتمسفر در جلوگیری از نشتی و از بین بردن اثرات روانسازها

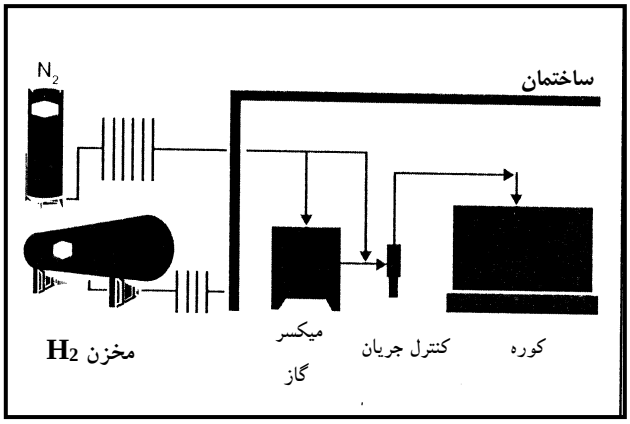
موفق بوده به طوری که دمای شبنم زیر $-34^{\circ}C$ باشد، افزودنی هیدروکربن مورد نیاز نخواهد بود. افزودنی‌های دارای کربن عبارتند از پروپیلن، پروپان، متان (گاز طبیعی) و متانول، از سایر هیدروکربن‌های اشباع نشده نیز می‌توان استفاده نمود.

برای آنیل کردن آلیاژهای فولاد ضدزنگ و غیرمتعارف یک اتمسفر ۱۰۰٪ هیدروژن مورد استفاده قرار می‌گیرد. هرچند امروزه برای آنیل فولاد آلیاژی نیز هیدروژن خالص مورد استفاده قرار می‌گیرد. هیدروژن باعث افزایش جابه‌جایی حرارت شده در نتیجه زمان مورد نیاز آنیل را کاهش داده و فن کم قدرت‌تری برای گردش اتمسفر داخل کوره مورد نیاز می‌باشد. کارآیی بیشتر فرآیند آنیل می‌تواند هزینه بالای اتمسفر هیدروژنی نسبت به دیگر اتمسفرها را جبران نماید. گازهای صنعتی مختلفی برای روش‌های مختلف آنیل‌کاری موجود می‌باشد و نگرانی برای طراحی اتمسفرهای مختلف وجود ندارد.

تهیه گازهای صنعتی

تهیه گازهای صنعتی با روش‌های مختلفی امکان‌پذیر می‌باشد. قدیمی‌ترین و معمول‌ترین روش ارسال مقداری از گاز به صورت مایع می‌باشد. گاز مایع در مخازنی تحت شرایط به خصوص در نزدیکی محل عملیات آنیل ذخیره‌سازی می‌گردند و سپس با عملیات تبادل حرارتی به گاز تبدیل شده و به مصرف می‌رسند.

معمولاً گازهایی که به این صورت ارسال و استفاده می‌شوند، هیدروژن و نیتروژن هستند. یک نمونه سیستم تغذیه گاز در شکل ٦ نشان داده شده است.



شکل ۶ ـ نمونه واحد سیستم تأمین نیتروژن ـ هیدروژن

روش‌های دیگر تهیه گازهای صنعتی عبارتند از:

سیلندرهای گاز ـ گاز تحت فشار زیاد در سیلندر ذخیره گردیده و سیلندرها بعداز خالی شدن تعویض می‌گردند. این روش برای مصارف کم گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان مثال برای استفاده به عنوان یک افزودنی یا اضافه کردن مقدار کمی از گاز به اتمسفر

جذب سطحی فشرده (PSA) ـ در این روش نیتروژن به وسیله الک مولکولی یا جذب سطحی پایه کربن از هوا جدا می‌گردد. روش **PSA** برای احتیاجات بیشتر نیتروژن به کار گرفته می‌شود. با تکنولوژی امروزی روش **PSA** یک خالص‌ساز اکسیژن برای دستیابی به خلوص نیتروژن که در اغلب عملیات آنیل‌کاری مورد نیاز است، به کار گرفته می‌شود.

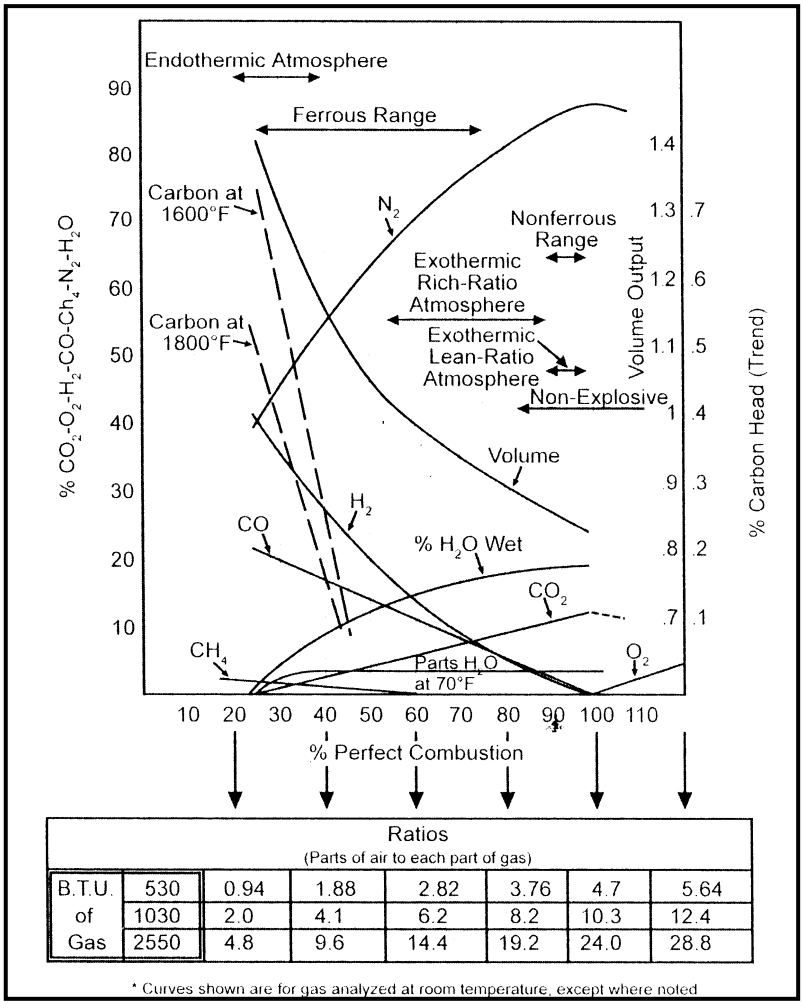
تفکیک غشاء ـ این یک روش دیگر برای کارگاه‌های آنیل کوچک می‌باشد. نیتروژن با عبور هوا از منافذ یک سری الیاف که خیلی شبیه پوسته و لوله‌های مبدل حرارتی هستند، به دست می‌آید. این روش بسیار کارآمد بوده و به خالص‌ساز اکسیژن نیز نیازمند است.

واحد تولید مایع سرمازا ـ این تکنولوژی که در کنار واحد آنیل کار می‌کند برای تولید گازهای مایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این سیستم هوا متراکم شده، خنک می‌گردد و منبسط می‌شود

به طوری که تبدیل به مایع شده و سپس به وسیله تقطیر جداسازی می‌گردد. این کارآمدترین روش برای تولید نیتروژن با میزان جریان بالاتر از ۷۰۸ مترمکعب در ساعت می‌باشد.

تولید اتمسفرها

اتمسفرها به وسیله احتراق گاز طبیعی با هوا که به صورت گاز متمایل به گرمازا، زیاد گرمازا و گرماگیر طبقه‌بندی گردیده‌اند، تولید می‌شوند. این تفاوت داشتن در نسبت هوا به گاز طبیعی (یا هیدروکربن دیگر مانند پرویان) شارژ شده به دستگاه تقطیر و بنابراین تناسب با غلظت محصول احتراق در شکل ۷ خلاصه گردیده است. به دلیل این‌که تغییر در جریان هوا و گاز ورودی ممکن است اتمسفر تولید شده را دچار تغییرات عمده‌ای بکند، لذا اپراتور می‌بایست میزان این جریان‌ها را در تمام اوقات ثابت نگاه دارد. روش دیگر تولید اتمسفر مناسب برای کوره، استفاده از هیدروژن و نیتروژن تولید شده به وسیله تفکیک آمونیاک می‌باشد.



شکل ۷ ـ نمودار اتمسفرهای گرمازا و گرماگیر

اتمسفر متمایل به گرمازا

این اتمسفر به وسیله احتراق ۹ الی ۱۰ به یک، هوا به گاز طبیعی در دستگاه تقطیر تولید می‌شود. احتراق نیاز به کاتالیست ندارد. این اتمسفر حدود جمعاً ٦٪ مواد سوختنی (CO,H_2) کمتری دارد و همچنین شامل ۱۰٪ تا ۱۲٪ CO_2 و مقدار زیادی آب می‌باشد. گاز اتمسفر همچنین ناپاکی‌هایی از قبیل سولفور حاصل از گاز طبیعی تغذیه شده، دارا خواهد بود.

در آنیل مواد غیرآهنی فقط در صورت خشک کردن این اتمسفر، می‌توان از آن استفاده نمود. اغلب آنیل‌کاران مفتول‌های فولادی نیز با حذف دی‌اکسیدکربن این اتمسفر جهت جلوگیری از دی‌کربوره شدن از آن استفاده می‌کنند. دی‌اکسیدکربن می‌تواند به وسیله جذب سطحی آمین یا جذب الک مولکولی حذف گردد. با استفاده از آمین‌ها، گازها خنک شده و سپس به صورت خلاف جهت با منواتان اولامین (MEA) یا دی‌اتان اولامین (DEA) در برج جریان می‌یابند.
آمین با استفاده از دمای احتراق مجدداً بازیافت می‌گردد. آب توسط خشک‌کن‌های یخچالی یا آب‌گیر گرفته می‌شود. آب و دی‌اکسیدکربن هر دو در یک مرحله توسط روش الک مولکولی نیز می‌توانند گرفته شوند.
نتیجه احتراق اتمسفر متمایل به گرمازایی تصفیه شده به صورت زیر می‌باشد.

- $\mathbf{C} \approx$ ۰ – ٪۳
- $\mathbf{H_2} \approx$ ۰ – ٪۳
- $\mathbf{N_2} \approx$ ٪۹٤ – ٪۱۰۰
- نقطه شبنم: کمتر از $-٤٠^{\circ}\mathbf{C}$ با آب‌گیر یا خشک کردن الک مولکولی

این گاز گاهی اوقات نیتروژن آماده نیز نامیده می‌شود، به مقدار کمی احیا کننده است و می‌تواند در آنیل فولادهای کم‌کربن و متوسط کربن بدون دی‌کربوره شدن مورد استفاده قرار گیرد. با غنی‌سازی با یک گاز هیدروکربنی می‌تواند در آنیل فولادهای کربن بالا نیز مورد استفاده قرار گیرد.

اتمسفر گرمازا غنی

با احتراق ٦ الی ۹ قسمت هوا و یک قسمت گاز طبیعی اتمسفر گرمازا غنی تولید می‌شود. تا زمانی که واکنش گرمازا باشد (نیاز به حرارت نباشد) دستگاه نیاز به کاتالیست دارد.
نمونه ترکیب گرمازا غنی به صورت زیر است:

- $\mathbf{C} \approx$ ٪۷ – ٪۹
- $\mathbf{H_2} \approx$ ٪۷ – ٪۱۱
- $\mathbf{CO_2} \approx$ ٪۷ – ٪۵

- N_2 ≈ ٪۷۳ -٪۸۳

- نقطه شبنم: بستگی د ارد به نوع روش به کار گرفته شده برای خنک کردن و خشک کـردن، بـا یک تبادل حرارتی استاندارد، نقطه شبنم حدود $۲٤^{\circ}C$ می‌باشد. این اتمسـفر حـدود ۳٪ نیـز آب دارد.

یک اتمسفر گرمازا غنی برای آنیل‌کاری شفاف فولاد کم‌کربن بـه کـار گرفتـه مـی‌شـود. وقتـی دی‌کربوره شدن بحرانی باشد مانند موارد فولادهای متوسط و پرکربن، یک اتمسفر گرمـازا غنـی می‌تواند تصفیه گردد و به کار گرفته شود.

اتمسفر گرماگیر

اتمسفر گرماگیر می‌تواند با کاهش نسبت هوا به گاز طبیعی درحد ۱: ۲/۵ و عبور مخلوط از روی یک کاتالیست حرارت دیده، تولید شود. یک مولد گرماگیر دو جریان سوخت جداگانه دارد. یکی آن‌که در دستگاه تا حدود ۹۸۲ درجه حرارت می‌بیند و دیگـری آن‌کـه اتمسـفر حفـاظتی تولیـد می‌کند. بنابراین اتمسفر گرماگیر بسیار گران‌تر از اتمسفر گرمازا می‌باشد. ترکیب اتمسفر گرمـاگیر به شرح زیر است:

- CO ≈ ٪۲۰
- H_2 ≈ ٪٤۰
- N_2 ≈ ٪٤۰

- نقطه شبنم: حدود $۹^{\circ}C$- و گاز شامل مقداری هیدروکربن واکنش نداده و دیگـر آلـودگی‌هـا می‌باشد.

گاز گرماگیر معمولاً برای کربوره کردن و تجدید کربن مورد استفاده قرار می‌گیرد. گـاهی اوقـات این گاز با گاز گرمازا در آنیل‌کاری فولادهای متوسط و پرکربن بـرای کـاهش دی‌کربـوره شـدن مخلوط می‌گردد.

آمونیاک تفکیک شده

آمونیاک تفکیک شده آمونیاک بی‌آب می‌باشد که به صورت گاز مایع در مخزن ذخیره شـده و در مجاورت یک کاتالیست به همراه افزایش دما تجزیه می‌گردد. دستگاه تقطیر معمـولاً بـه صـورت

الکتریکی تا دمای عملیات حدود $899^{\circ}C$ گرم می‌گردد و این دما ممکن است باعث آتش گرفتن گاز گردد، برعکس اغلب مولدهای گرماگیر و گرمازا که جریان گاز ثابتی را ارائه می‌دهند در روش تجزیه آمونیاک گاز می‌تواند قطع گردد و این روش همچنین نسبت به روش‌های دیگر خیلی گرانتر می‌باشد.

ترکیب اسمی گاز تولید شده به قرار زیر است:

- $H_2 \approx$ ٪۷۵
- $N_2 \approx$ ٪۲۵
- گاز دارای نقطه شبنم حدود $-40^{\circ}C$ می‌باشد و همچنین شامل مقداری آمونیاک تجزیه نشده و هیدروکربن ناخالص می‌باشد.

چنانچه ایجاد نیترات در اتمسفر مشکل‌آفرین باشد یک تصفیه کننده می‌بایست به ژنراتور اضافه گردد تا میزان آمونیاک آزاد در اتمسفر را کاهش دهد. اتمسفر هیدروژن ـ نیتروژن برای آنیل براق مفتول به کار گرفته می‌شود و برخی اوقات با یک گاز گرمازا جهت کاهش غلظت اشتعال‌زایی مخلوط می‌گردد. اگرچه اتمسفر آمونیاک تفکیک شده باعث دی‌کربوره شدن نمی‌گردد ولی در صورت وجود ناپاکی‌هایی در اتمسفر قادر به جلوگیری از دی‌کربوره شدن نمی‌باشد.

ارزیابی اقتصادی سیستم‌های اتمسفر شامل هزینه تولید و استفاده و ذخیره‌سازی این سیستم‌ها می‌باشد. روش ذخیره‌سازی به تناسب مورد استفاده متفاوت می‌باشد بنابراین هزینه هر واحد تولیدکننده اتمسفر نیز متناسب با کاربرد خاص اتمسفر متغیر می‌باشد.

فرآیند

میزان جریان اتمسفر

میزان جریان اتمسفر برابر است با هوای خروجی از کوره زیرا مهم‌ترین وظیفه یک اتمسفر آنیل‌کاری محافظت از مفتول می‌باشد. جریان گاز اتمسفر همچنین می‌بایست عاری از هرگونه آلودگی از قبیل تبخیر روانسازهای کشش در کوره باشد. در تمامی موارد، اتمسفر خالص‌تر یک میزان جریان کمتری نسبت به اتمسفر آلوده نیاز خواهد داشت.

برای کوره‌های نوع **Batch** (مفتول به صورت جمعی) مانند کوره‌های **Bell** ، جریان واقعی مورد نیاز براساس سیکل آنیل تغییر می‌کند. در زمان تخلیه هوا و بالا رفتن دما، وقتی پس‌مانده‌های روانساز شروع به از بین رفتن می‌کنند، یک جریان گاز بیشتر مورد نیاز می‌باشد و همچنین در موقع شروع خنک کردن نیز دوباره یک جریان زیاد گاز ضروری است. برای مثال وقتی کوره خاموش می‌شود و عملیات سرد شدن شروع می‌شود، گازهای موجود در کوره سعی به انقباض کرده و می‌توانند هوا را به داخل کوره مکش کنند. در زمانی که مفتول در دمای مشخصی در کوره نگاه داشته می‌شود **(Soaking)** و یا موقعی که خنک‌کاری سریع انجام می‌شود، یک میزان جریان کمتری مورد نیاز می‌باشد.

اگر ژنراتور اتمسفر نتواند میزان جریان متغیر را فراهم کند، یک تغییر سه برابری حجم اتمسفر در ساعت در طی سیکل‌کاری می‌بایست به کار گرفته شود. تغییر حجم گاز در دما و فشار استاندارد اندازه‌گیری می‌گردد. وقتی که میزان جریان قابل تغییر باشد و چنانچه از الگوهای بالا پیروی شود، فرآیند بسیار کارآمد و اقتصادی خواهد بود. به تناسب هر نقطه از سیکل‌کاری تغییر حجم می‌تواند از یک تا ۵ برابر در ساعت تغییر کند. برای کوره‌های پیوسته نوع فشاری، وقتی که درب‌ها باز هستند اتمسفر می‌بایست حداقل یک تغییر حجم ۵ برابری در ساعت را فراهم سازد. وقتی که درب‌ها بسته هستند یک تغییر حجم سه برابری مورد نیاز است. در اشکال به خصوص کوره و یا وجود نشتی در کوره، جریان گاز زیادی مورد نیاز می‌باشد. در کوره‌های پیوسته با درب باز، فاکتور اصلی برای تعیین میزان جریان اتمسفر، سایز درب‌های باز می‌باشد. نشتی‌ها نیز یک فاکتور محسوب می‌شوند. این کوره‌ها تغییر حجم اتمسفر بیش از ۵ برابر را نیاز دارند. میزان جریان می‌بایست متناسب با فرآیند باشد.

تجدید کربن

تجدید کربن ممکن است برای تهیه مواد یکنواخت از نظر پروفیل کربن مورد استفاده قرار گیرد. موادی که کربن از دست داده‌اند، چه در نوردگرم و چه در عملیات حرارتی با استفاده از اتمسفر کنترل شده می‌توانند تجدید کربن کنند. بهترین روش قرار دادن ماده در یک اتمسفری است که کربن آن شبیه کربن فلز اولیه باشد، به عبارت دیگر انجام یک سیکل منظم کربن دهی.

این روش بهترین کنترل کربن را ارائه داده و از کربن دهی اضافی و ایجاد کاربایدهای سطحی جلوگیری می‌کند.

برای این‌کار اتمسفرهای گرماگیر و پایه ـ نیتروژن کربن‌دهی مورد استفاده قرار می‌گیرند و کلیه کنترل‌های اجزا کربن‌دهی منظم به‌کار گرفته می‌شوند. این عملیات در کوره‌های تیپ **Batch** به همان خوبی که در کوره‌های فشاری مناسب برای کربن‌دهی صورت می‌گیرد، انجام می شود.

روش دیگر تجدید کربن استفاده از یک هیدروکربن برای تولید اتمسفر کربن‌ده می‌باشد. در عمل با ترکیب یک اتمسفر گرماگیر خشک و تر معمولاً از متان به عنوان افزودنی هیدروکربن استفاده می‌شود، و بدین ترتیب یک اتمسفر کربن‌ده تولید می‌گردد. این اتمسفر متعادل نبوده و کنترل اوضاع آن آسان نیست. یک روش سوم تجدید کربن از ترکیب هیدروکربن در نیتروژن استفاده می‌کند. یک تیرگی سنج برای کنترل هیدروکربن اضافی (متان CH_4 یا پروپیلن C_3H_6) در تعیین سطح دوده مورد استفاده قرار می‌گیرد. وقتی تیرگی سنج یک میزان از قبل تعیین شده دوده را نشان دهد افزودن هیدروکربن کاسته می‌شود. این اتمسفر نیز یک اتمسفر نامتعادل می‌باشد. امکان کربن‌دهی اضافی و شکل‌گیری کاربایدهای سطحی وجود دارد. در عملیات بعدی کشش شکل‌گیری کاربایدهای سطحی می‌تواند عمر دوزه را کاهش دهد.

تمیز کردن فولاد قبل از عملیات حرارتی

تمیز کردن فولاد قبل از عملیات حرارتی بسیار مهم می‌باشد بنابراین قبل از هرگونه عملیات حرارتی که دما از $427^{\circ}C$ تجاوز نماید پوسته سطح می‌بایست زدوده شود. چنانچه در هنگام عملیات حرارتی برروی میلگرد پوسته وجود داشته باشد حرارت می‌تواند ضخامت آن را افزایش دهد همچنین از طرف دیگر لایه **Feo** می‌تواند به صورت زیر تجزیه گردد.

$$4Feo \leftrightarrow Fe_3o_4 + Fe$$

لایه جدید منیتیت (Fe_3o_4) می‌تواند در فصل مشترک پوسته ـ فولاد رسوب کند و به دلیل عملاً غیرحلال بودن در عملیات اسیدشویی به راحتی از بین نخواهد رفت. چنانچه پوسته قبل از عملیات حرارتی بر طرف گردد فولاد صاف‌تر و محصول عملیات حرارتی به آسانی تمیز می‌گردد.

در آنیل‌کاری مفتول کشیده شده، صابون‌های روانساز مواد چربی تولید می‌کنند که ممکن است خروجی اتمسفر را مسدود کنند. این مشکل را می‌تواند با جایگزینی نوع دیگر روانساز یا تمیز کردن قلیایی مفتول قبل از عملیات آنیل بر طرف نمود. در بسیاری از موارد، استفاده از پودر کشش حل شونده سدیمی مشکل را بر طرف می‌نماید.

آنیل‌کاری پیوسته

آنیل‌کاری پیوسته مفتول به شکل رشته‌ای ممکن است در کوره‌های **Muffle** ، کوره‌های لوله‌ای، نمک مذاب، بسترهای سیال یا سرب مذاب انجام گیرد.

آنیل‌کاری در سرب مذاب در فصل ۱۷ مورد بحث قرار گرفته و بسترهای سیال در فصل ۰۲۲ آنیل‌کاری رشته‌ای می‌تواند مانند عملیات پتنت‌کاری که در فصل ۲۱ شرح داده شده است، انجام شود. عملیات پیوسته رشته‌ای در مقایسه با فرآیندهای آنیل‌کاری با سیستم گروهی **(Batch)** مزیت حرارت‌دهی و خنک‌کاری خیلی دقیق را دارد.

اتمسفر در کوره‌های لوله‌ای و **Muffle** قابل کنترل می‌باشد. اتمسفرهای حفاظتی نیز ممکن است به کوره‌هایی با بسترهای سیال اضافه گردند.

در موقع طراحی یک خط آنیل‌کاری، پتنت‌کاری یا تنش‌زدایی پیوسته تعیین «گلویی دادن دو طرفه» در فرآیند کار مهم می‌باشد. زمان در کندترین قسمت عملیات تعیین کننده سرعت تولید می باشد.

خلاصه اصطلاحات علمی آنیل‌کاری

آنیل‌کاری جعبه‌ایی (Box Annealing) ــ آنیل‌کاری یک فلز یا آلیاژ در ظرفی آب‌بندی شده تحت شرایطی جهت به حداقل رساندن اکسیداسیون را آنیل‌کاری جعبه‌ای گویند. برای آلیاژهای آهنی، جعبه آنیل به آهستگی تا رسیدن به دمای زیر دامنه دمای تبدیل حرارت داده می‌شود و در شرایط خاص دما تا حد دمای تبدیل و بالاتر از آن نیز می‌رسد و سپس به آرامی خنک می‌گردد. این فرآیند را گاهی اوقات آنیل‌کاری بسته یا دیگ آنیل‌کاری **(Pot Annealing)** نیز می‌نامند.

آنیل‌کاری براق ـ آنیل‌کاری در اتمسفر محافظت شده جهت جلوگیری از تغییر رنگ سطح می‌باشد.

آنیل‌کاری تکمیلی ـ یک عملیات آنیل‌کاری است که زیر مرحله خطرناک و بحرانی برروی فولادهای متوسط و کم کربن کار سرد شده، انجام می‌شود. این عملیات تنش‌های پس‌ماند را کاهش می‌دهد، در نتیجه خطر پیچش و از شکل افتادگی را در ماشین‌کاری به حداقل می‌رساند در حالی که اغلب مزایای کار سرد را حفظ می‌نماید.

آنیل‌کاری شعله‌ای ـ عملیاتی است که حرارت به وسیله شعله مستقیماً اعمال می‌شود.

آنیل‌کاری کامل ـ حرارت دادن تا بالای دمای بحرانی و نگاه داشتن در آن دما **(A_3)** برای آستنیت‌سازی کامل و به دنبال آن خنک کردن آرام یا ایزوترمال تا زیر دمای بحرانی **(A_1)**. ساختارها و خواص ویژه به ترکیب و ساختمان کریستالی فولاد در شروع عملیات و به خصوص به سیکل زمان ـ دما به کار گرفته شده در عملیات آنیل‌کاری، بستگی دارند.

- دمای زیر نقطه بحرانی **(A_1)** ـ در این دما انتقال از فریت (آهن **BCC**) به آستنیت (آهن **FCC**) شروع می‌شود.
- دمای بالای نقطه بحرانی **(A_3)** ـ در این دما انتقال از فریت (آهن **BCC**) به آستنیت (آهن **FCC**) تکمیل می‌گردد.

آنیل‌کاری درون بحرانی ـ هرگونه عملیات آنیل‌کاری که شامل حرارت دادن و نگاه داشتن در بین دماهای بالا و پایین نقطه بحرانی جهت دستیابی به آستنیت شدن جزیی و به دنبال آن خنک کردن آرام یا نگاه داشتن در دمای زیر نقطه بحرانی را آنیل‌کاری دورن بحرانی می‌گویند.

آنیل‌کاری متوسط ـ آنیل‌کاری فلزات یا آلیاژهای ساخته شده در یک یا چند مرحله در بین پروسه ساخت قبل از عملیات پایانی تولید را آنیل‌کاری متوسط گویند.

آنیل‌کاری هم دمایی (Isothermal) ـ آستنیت کردن جزیی یا کامل آلیاژ آهن و به دنبال آن خنک کردن و نگاه داشتن در دمایی است که آستنیت تبدیل به فریت نسبتاً سخت به اضافه کارباید آهن متراکم (پرلیت) می‌شود.

فرآیند آنیل‌کاری ـ هرگونه عملیات آنیل‌کاری جهت تجدید شکل‌پذیری برای انجام کارسرد بیشتر یا بعدی را فرآیند آنیل‌کاری گویند و این عملیات معمولاً مربوط به عملیات زیر نقطه بحرانی می‌شود.

آنیل‌کاری بازیابی ـ یک عملیات آنیل‌کاری زیر نقطه بحرانی که تنش‌های پس‌ماند و مقداری سفتی را از بین برده یا به عبارتی شکل‌پذیری در فولاد کار سرد شده را بازیابی می‌کند. دمای به کار گرفته شده کمتر از حدی است که بتواند شکل‌گیری دانه‌های جدید در تجدید ساختمان کریستالی را ترقی دهد، و درجه نرمی که به دست می‌آید کمتر از حدی است که در حالت آنیل‌کاری تجدید ساختمان کریستالی حاصل می‌شود.

آنیل‌کاری تجدید ساختمان کریستالی ـ آنیل‌کاری یک فلز یا آلیاژ کار سرد شده برای ایجاد یک ساختمان دانه جدید بدون تغییر فاز می‌باشد.

آنیل‌کاری کروی‌سازی ـ هرگونه عملیات آنیل‌کاری طراحی شده مخصوص ایجاد یک شکل کروی کارباید آهن در فولاد می‌باشد.

تنش‌زدایی ـ یک عملیات آنیل‌کاری مخصوص برای کاهش تنش‌ها در فولادهای کار سرد شده یا عملیات حرارتی شده می‌باشد. دماهای به کار گرفته شده در اغلب عملیات تنش‌زدایی کمتر از حدی است که باعث تجدید ساختمان کریستالی کامل شود.

آنیل‌کاری زیر نقطه بحرانی ـ آنیل‌کاری در یک دمای زیر دامنه پایینی دمای بحرانی است. این عملیات برای تجدید شکل‌پذیری در عملیات کشش یا کار سرد مورد استفاده قرار می‌گیرد که معمولاً به عنوان فرآیند آنیل شناخته می‌شود.

فصل ۱۵

آزمون مفتول یا میلگرد آهنی

مقدمه

ترکیب شیمیایی، عملیات ذوب فولاد، نوردگرم و به دنبال آن عملیات خنک‌سازی، عملیات حرارتی و کارسرد برروی فولاد، فرآیندهایی جهت دستیابی به مشخصه‌های فیزیکی تعریف شده مفتول‌ها و میلگردهای آهنی هستند. خواص حاصل از این فرآیندها می‌بایست برای پاسخگویی نیاز مصرف‌کنندگان کافی باشد و در بسیاری از موارد (صنایع خاص) می‌بایست مورد پذیرش استانداردها باشند.

تولیدکنندگان مفتول کیفیت و مناسب بودن مفتول را به وسیله آزمون‌های استاندارد مکانیکی تعیین می‌کنند. زیرا در اکثر موارد نمی‌توان برای محصول نهایی آزمون ویژه‌ایی تدارک دید. متناسب با روش تولید، خواص فولادها یکسان نبوده و در همه جهات برابر نیستند. بنابراین ممکن است برای ارزیابی مشخصات نیاز باشد بیش از یک نوع آزمایش مکانیکی به کار گرفته شود.

برخی آزمون‌های اصلی شامل، کشش، پیچش، سختی و خم می‌باشند. خواص خستگی مفتول نیز مهم می‌باشد و مشخصات آن ممکن است شامل خستگی تحت تنش‌های خمشی یا پیچشی باشند.

آزمون کشش

تست کشش معمول‌ترین آزمون مکانیکی است که برای تعیین کردن مشخصات فلزات به کار گرفته می‌شود. نتایج تست کشش برای انتخاب مواد مناسب جهت کاربردهای خاص مهندسی و مطابقت با مشخصات فنی یا استانداردها مفید می‌باشد.

تست کشش شامل نمونه‌ای است که به طور یکنواخت تحت بار محوری افزایش یابنده قرار می‌گیرد تا شکست در آن روی دهد. به محض اعمال بار، نمونه افزایش طول می‌یابد و ارتباط بین نیروی وارد شده و افزایش طول حاصل، مشاهده می‌گردد. آزمون کشش اطلاعاتی راجع‌به رفتار

الاستیکی، مقاومت تسلیم و کششی، درصد ازدیاد طول، کاهش سطح مقطع و کار سختی را می‌تواند ارائه نماید.

به محض وارد شدن بار به نمونه در تست کشش، نمونه افزایش طول می‌یابد. رابطه‌ای بین نیروی به کار گرفته شده و افزایش طول وجود دارد که مهم می‌باشد. این اطلاعات توسط یک کشش سنج که به مفتول متصل است و خواندن ازدیاد طول درحین آزمایش، به دست می‌آیند.

تست کشش تنش ـ کرنش ظاهری (مقدار تنشی که برمبنای سطح مقطع اولیه محاسبه می‌شود ـ مترجم) اغلب برای دستیابی به اطلاعات طراحی بنیادی به‌کار گرفته می‌شود. یک منحنی تنش ـ کرنش ظاهری برحسب بارـ ازدیاد طول در شکل ۱ نشان داده شده است. تنش ظاهری **(S)** با تقسیم بار برسطح مقطع اولیه نمونه به دست می‌آید و بنابراین این تنش میانگین تنش طولی می‌باشد (معادله ۱). کرنش (تغییر طول نسبی) ظاهری متوسط کرنش خطی می‌باشد، که با تقسیم تغییر طول حاصل شده در نمونه بر طول اولیه آن به دست می‌آید. (معادله ۲).

معادله (۱)

$$S = \left(\frac{P}{A_0}\right)$$

معادله (۲)

$$e = \left(\frac{L - L_0}{L_0}\right)$$

که:

P= بار کششی

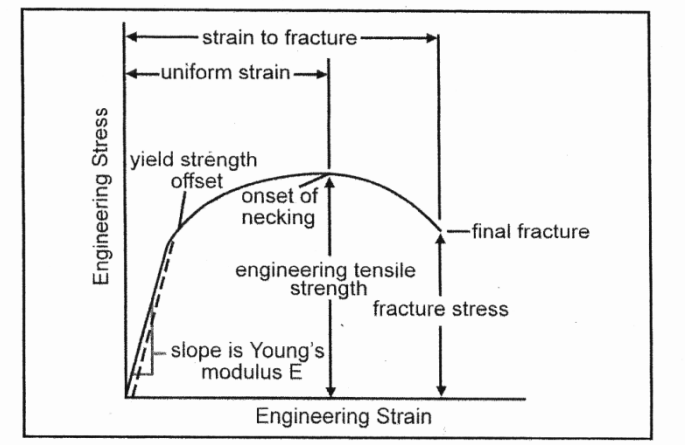
A0= سطح مقطع اولیه

L= طول کشیده شده (طول ثانویه یا افزایش یافته)

L0= طول اولیه

شیب خطی اولیه منحنی تنش ـ کرنش مدول یانگ می‌باشد **(E)** که مدول‌الاستیته نیز نامیده می‌شود. (به معادله ۳ نگاه کنید) در تنش‌های کم، ازدیاد طول متناسب با مقدار بار اعمال شده می‌باشد. در این محدوده ماده رفتار الاستیکی دارد یعنی اگر بار برداشته شود نمونه به طول اولیه

خود برمی‌گردد. مدول‌یانگ یک مقیاس برای سفتی جنس می‌باشد و می‌تواند به عنوان یک پارامتر طراحی مورد استفاده قرار گیرد. مدول‌یانگ به طور معمول برای فولاد در دمای اتاق ۲۰۷ گیگاپاسکال می‌باشد.



شکل ۱ـ منحنی تنش ـ کرنش ظاهری

معادله (۳)

$$\mathbf{E} = \left(\frac{\mathbf{S}}{\mathbf{e}}\right)$$

مقاومت کششی نهایی **(UTS)** حاصل تقسیم بار نهایی به سطح مقطع اولیه نمونه می‌باشد.

معادله (۴)

$$\mathbf{S_U} = \left(\frac{\mathbf{P_U}}{\mathbf{A_0}}\right)$$

که:

$\mathbf{S_U}$= مقاومت کششی نهایی

$\mathbf{P_U}$= حداکثر بار کششی

مقاومت کششی نهایی اصلی‌ترین مشخصه ماده برای تعیین ظرفیت تحمل بار می‌باشد زیرا تعیین آن بسیار ساده و تجدیدپذیر می‌باشد. با این وجود مقاومت کششی یک مقیاس خوب برای تعیین شکل‌پذیری ماده نمی‌باشد زیرا این فقط یک مقیاس برای تعیین تحمل باردریک محور می‌باشد.

وقتی که میزان تنش از محدودالاستیک تجاوز نماید، سیلان پلاستیکی شروع می‌شود. تنش نقطه شروع سیلان را تنش تسلیم می‌گویند (σ_0). تنش تسلیم را می‌توان در منحنی تنش ـ کرنش با رسم یک خط موازی با خط الاستیک و محل تلاقی این خط با منحنی به دست آورد، مبدأ خط برای کرنش قراردادی ۰/۲٪ می‌بایست روی محور کرنش از عدد (۰/۲٪) ۰/۰۰۲ = e شروع شود (شکل۲). تنش تسلیم پارامتر مفیدی است برای مواقعی که می‌بایست از تغییر شکل پلاستیکی اجتناب گردد.

معادله (۵)

$$\sigma_0 = \left(\frac{P_{e=0/002}}{A_0} \right)$$

که:

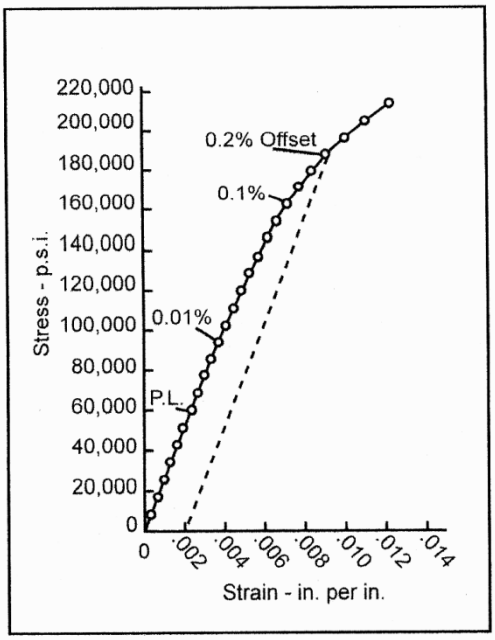
P_e = نیرو در کرنش معادل ۰/۰۰۲ (۰/۲٪) می‌باشد.

روش قراردادی ۰/۲٪ به این دلیل مورد استفاده قرار می‌گیرد که چنانچه ماده‌ایی تحت چنین تنشی قرار گیرد با برداشتن بار، مسیر برگشت در امتداد خطی می‌باشد (خط چین نشان داده شده در شکل۲) که در یک کرنش پلاستیکی ۰/۲ درصدی ایجاد می‌شود. توجه داشته باشید که مقادیر قراردادی دیگری نیز ممکن است برای تعیین کردن مقاومت تسلیم، به‌کار گرفته شوند.

استفاده کننده از دستگاه می‌بایست برای جلوگیری از اشتباه میزان قراردادی (کرنش) را که به‌کار گرفته شده، مشخص نماید.

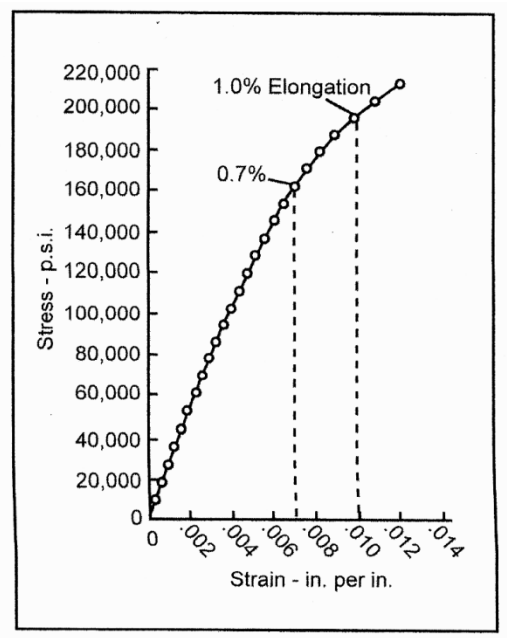
تنش تسلیم همچنین ممکن است برای مقادیر قراردادی ۰/۷ درصد و یک درصد یا مقادیر دیگر نیز تعیین گردد. مقاومت تسلیم با روش کشش در شکل ۳نشان داده شده است. این آزمون توسط مشاهده نتایج کشش سنج می‌تواند انجام شود و در جایی که روش قراردادی برای کرنش

می‌بایست به‌کار گرفته شود با رسم یک خط موازی با قسمت خطی منحنی این کار صورت می‌گیرد.



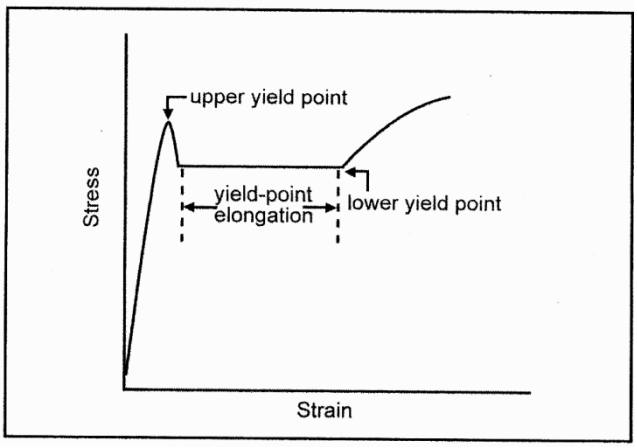
شکل۲ـ منحنی تنش ـ کرنش برای مفتول کشیده شده سرد و نمایش مقاومت تسلیم با روش قراردادی

تعیین حدالاستیک با بارگذاری و برداشتن بار قبل از مشاهده ازدیاد طول دائمی امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین مقداری که به عنوان حد تناسب شناخته شده است، نمایانگر حدالاستیسیته می‌باشد. حد تناسب نقطه جدا شدن خط راست از منحنی می‌باشد تا این نقطه تنش متناسب با کرنش می‌باشد. تعیین جدا شدن خط از منحنی مشکل می‌باشد و بستگی زیادی به دقت اندازه‌گیری کرنش دارد.



شکل۳ـ منحنی تنش ـ کرنش برای مفتول سرد کشیده شده و نمایش مقاومت تسلیم با روش ازدیاد طول تحت بار

فولادهای کم‌کربن یک نقطه مشخص عبور از محدوده تغییر شکل الاستیکی به پلاستیکی را از خود به نمایش می‌گذارند. همانگونه که در شکل ٤ می‌توان دید منحنی تنش ـ کرنش برای فولاد کم‌کربن با افزایش بار پیوسته و کرنش الاستیکی، یکباره سقوط می‌کند، و با یک بار تقریباً ثابت دچار نوسان می‌گردد و سپس به کرنش بیشتر می‌رسد، بار در نقطه سقوط ناگهانی را نقطه تسلیم بالایی می‌گویند و بار ثابت بعدی را نقطه تسلیم می‌گویند. تغییر شکل صورت گرفته در ازدیاد طول نقطه تسلیم ناهمگون می‌باشد مانند تغییر شکل صورت گرفته در یک گروه تغییر شکل‌های مجزا اینها را معمولاً «خطوط لودرز» می‌نامند.



شکل۴ـ منحنی تنش ـ کرنش نشان‌دهنده رفتار نقطه تسلیم برای فولاد کم‌کربن

با افزایش بار خارج از محدوده تنش تسلیم، افزایش طول نمونه ادامه می‌یابد. افـزایش طـول تـا رسیدن به بار نهایی به صورت یکنواخت روی خواهد داد. در بار ماکزیمم نمونه شروع می‌کند به نازک شدن (گلویی) در یک نقطه و بار در این زمان کاهش می‌یابد.

گلویی دادن تا شکست نهایی ادامه می‌یابد، شکست نهایی تحت باری که به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از ماکزیمم بار است، روی می‌دهد.

درحین آزمون کشش سطح مقطع تغییر می‌کند. بنابراین مقاومت کششی برمبنای سطح مقطع واقعی محاسبه می‌گردد که مقاومت کششی واقعی نامیده می‌شود. مقاومت کششی واقعی کمی بیشـتر از مقاومت کششی ظاهری می‌باشد همانگونه که در شکل ۵ نشان داده شده اسـت. تغییـر شـکل در ناحیه گلویی با اندازه‌گیری تغییرات قطر در طول زمان گلویی دادن تعیین می‌گردد. تنش و کرنش واقعی در این نقطه به صورت زیر می‌تواند محاسبه گردد:

معادله (۶)

$$\sigma = \left(\frac{P}{A_i}\right)$$

معادله (۷)

$$\varepsilon = L_n\left(\frac{A_o}{A_i}\right) = L_n\left(\frac{L_i}{L_o}\right)$$

که:

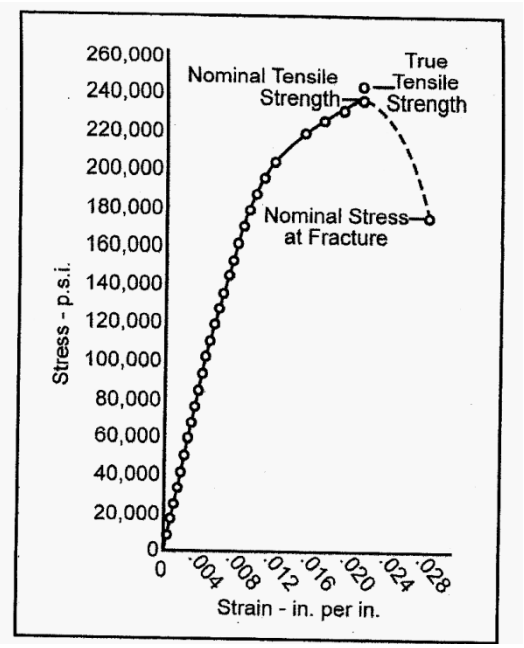
σ = تنش واقعی

ε = کرنش واقعی

A_i = سطح مقطع آنی (در هر لحظه)

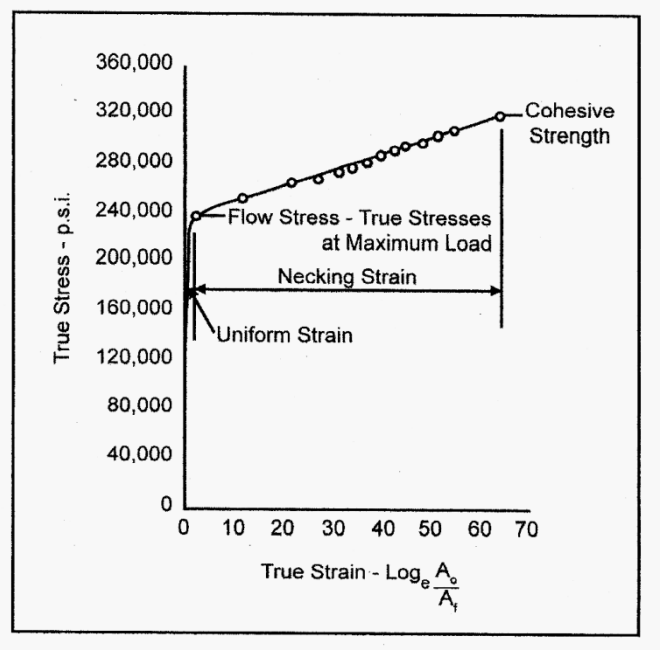
A_o = سطح مقطع اصلی

این فرمول برای هر لحظه افزایش طول درحین تست به کار گرفته می‌شود.



شکل ۵ ـ منحنی تنش ـ کرنش کششی برای مفتول سرد کشیده شده

محنی تنش ـ کرنش که برمبنای تنش و کرنش واقعی در سراسر طول تست محاسبه می‌گردد در شکل ٦ نشان داده شده است. این منحنی نشان می‌دهد که تغییر شکل صورت گرفته در مرحله گلویی به مراتب بیشتر تغییر شکلی است که تا قبل از گلویی دادن روی می‌دهد. شیب در اثنای گلویی، یک مقیاس میزان‌کار سختی ماده می‌باشد.



شکل۶ ـ منحنی تنش ـ کرنش واقعی برای مفتول سرد کشیده شده

کاهش **سطح‌مقطع و ازدیاد طول دو پارامتر اصلی برای تشریح خاصیت شکل‌پذیری ماده می‌باشند. کاهش سطح مقطع، نسبت کاهش سطح مقطع نمونه بعداز برش به سطح مقطع اولیه می‌باشد.**

معادله (۸)

$$\%\mathbf{ROA} = \left(\frac{\mathbf{A_o - A_f}}{\mathbf{A_O}}\right) \times \mathbf{100}$$

که:

ROA = کاهش سطح مقطع

A_f = سطح مقطع بعداز برش

A_o = سطح مقطع اولیه

افزایش طول، نسبت افزایش طول ایجاد شده در نمونه به طول اولیه می‌باشد.

معادله (۹)

$$\text{درصد ازدیاد طول} = \left(\frac{\mathbf{L_f - L_o}}{\mathbf{L_o}}\right) \times \mathbf{100}$$

که:

L_f = طول در لحظه برش

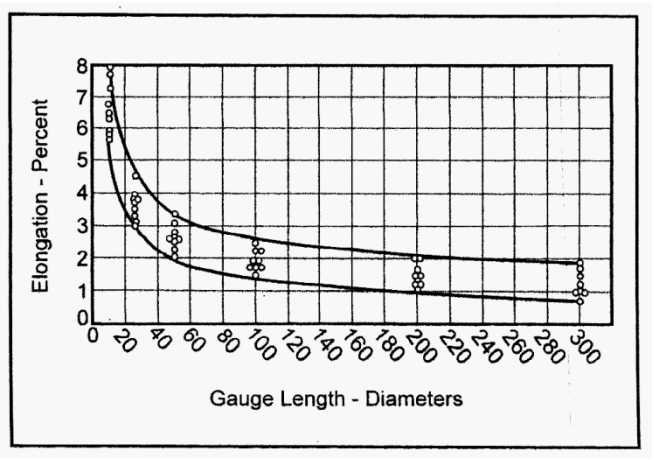
L_o = طول اولیه

شاخص نرمی و شکل‌پذیری معمولاً از تست کشش به دست می‌آید که شامل یک مقدار متوسط افزایش طول و کل کاهش سطح مقطع صورت گرفته در ناحیه شکست نمونه‌ای به طول حدود ۲۵ سانتیمتر می‌باشد.

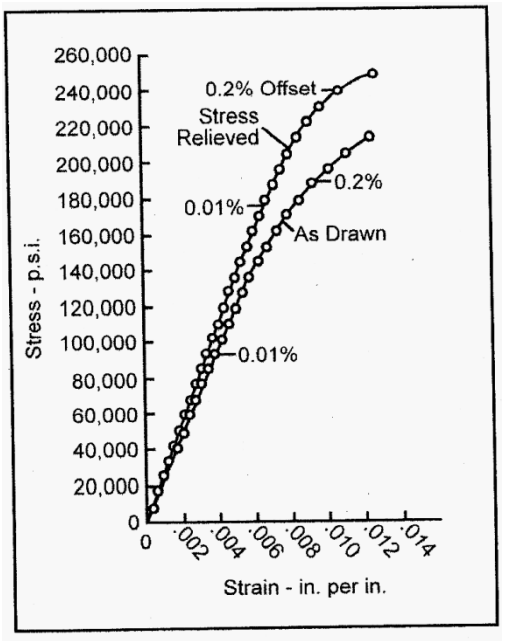
ازدیاد طول هم توسط اکستنسومتر و هم به وسیله علامت‌گذاری روی مفتول می‌تواند اندازه‌گیری شود. وقتی که اکستنسومتر مورد استفاده قرار می‌گیرد ممکن است ازدیاد طول در نقطه برش تعیین گردد که هم شامل ازدیاد طول‌الاستیکی و هم ازدیاد طول پلاستیکی باشد. وقتی از روش علامت‌گذاری روی مفتول استفاده می‌شود، ازدیاد طول بعداز تست نمونه اندازه‌گیری می‌شود که نشان دهنده افزایش طول قبل از برش می‌باشد.

ازدیاد طول مفتول تحت تأثیر شیمی ماده، عملیات حرارتی و میزان کار سرد انجام شده برروی آن توسط کشش مفتول می‌باشد. برای هر نوع خاص مفتول طول نمونه نیز موثر در درصد ازدیاد طول می‌باشد. اطلاعاتی راجع‌به نسبت بین ازدیاد طول و طول نمونه در شکل ۷ نشان داده شده است. اطلاعات شکل ۷ نشان می‌دهد که میزان ازدیاد طول در مفتول سرد کشیده شده، محدود می‌باشد.

خواص کششی مفتول کشیده شده به طور قابل ملاحظه‌ایی می‌تواند به‌وسیله عملیات حرارتی تغییر کند. متناسب با دما و زمان، خواص الاستیک و پلاستیک می‌تواند به مقدار زیاد تغییر کند، همانگونه که در شکل ۸ نشان داده شده است. در این مثال، مفتول سرد کشیده شده تا ۲۰٤درجه سانتیگراد برای مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شده است. این زمان و دما عملیاتی حرارتی است که جهت بهبود خواص الاستیکی فنرهایی که از مفتول سرد کشیده شده‌اند، به کار گرفته می‌شود. بعداز این عملیات حرارتی که نوعی تنش‌گیری است، تنش تسلیم خواص بهتری از خود نشان می‌دهد.



شکل ۷ـ تأثیر طول نمونه بردرصد افزایش طول مفتول کشیده شده سرد



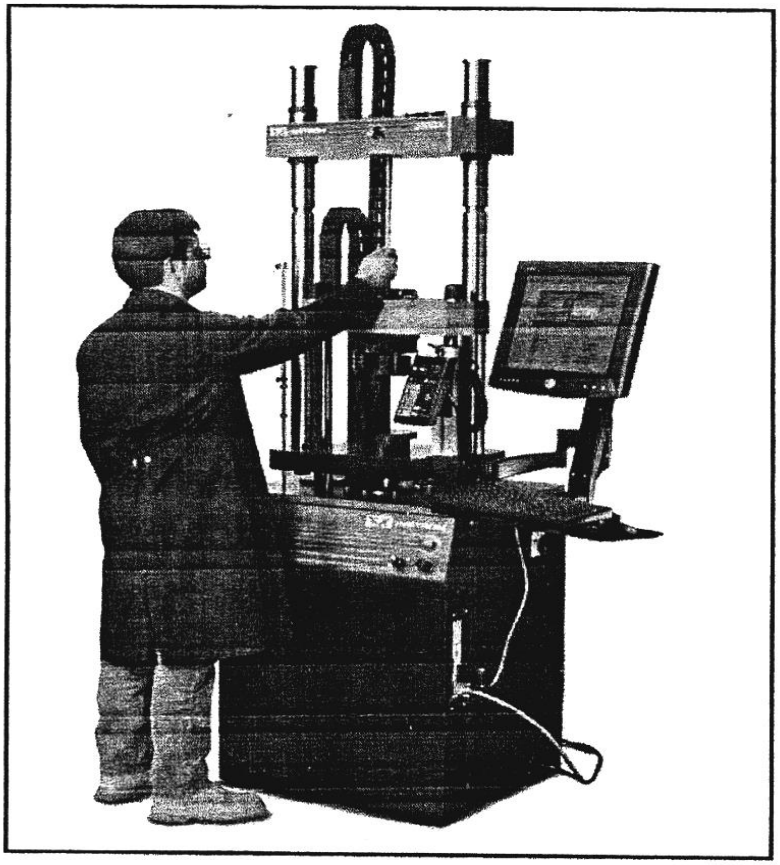
شکل ۸ ـ منحنی تنش ـ کرنش برای مفتول سرد کشیده شده قبل و بعداز تنش‌گیری

شکل ۹ یک نمونه دستگاه تست کشش مفتول عمودی را نشان می‌دهد. این نمونـه در مـدل‌هـا و ظرفیت‌های مختلف وجود دارد. نمونه عمودی این دستگاه‌ها برای تست طنـاب و مفتـول دولا و

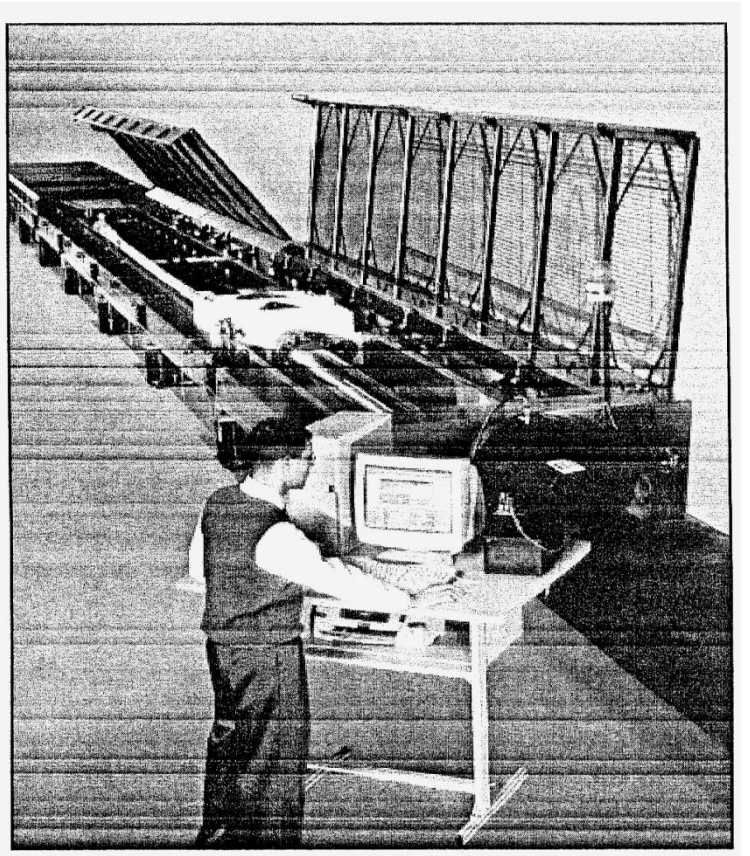
مفتول بکسل ایده‌آل می‌باشد. شکل ۱۰ نوع افقی دستگاه برای تست محصولات با طول بلند را نشان می‌دهد. نوع افقی به طور خاص برای تست مفتول، طناب و کابل طراحی گردیده‌اند.

برای تست مفتول‌ها و کابل‌های مقاومت بالا از دستگاه‌هایی با کله‌گی با گیره داخلی استفاده می‌شود. این گیره‌ها در داخل کله‌گی دستگاه قرار می‌گیرند و می‌توانند برای تست نمونه‌هایی با نیروی حدود ۲۷۰تن مورد استفاده قرار گیرند. فک‌های دستگاه (کله‌گی) می‌توانند توسط دنده شانه‌ایی یا پینیون و یا سیستم هیدرولیک با اهرم دستی باز و بسته شوند.

شکل ۱۱ نحوه قرار گرفتن گیره در کله‌گی دستگاه را نشان می‌دهد. شکل ۱۲ نوع مخصوص گیره برای تست کابل و بکسل را نشان می‌دهد. این گیره‌های برای قطرهای مختلف طراحی گردیده‌اند.



شکل ۹ ـ نمونه یک دستگاه تست کشش عمودی



شکل ۱۰ـ نمونه دستگاه تست کشش افقی برای نمونه‌های بلند و ظرفیت بار حدود ۴۵۰تن

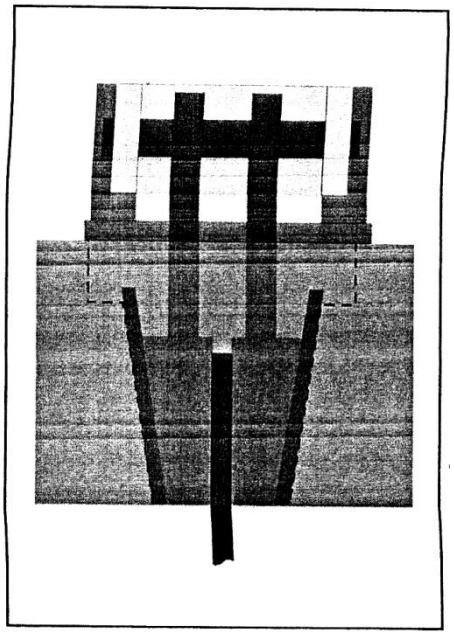
یک نگرانی اصلی و کلیدی در تست کشش حفظ و نگهداری گیره‌ها می‌باشد. گیره‌های فرسوده اجازه لغزش و سُر خوردن به نمونه را می‌دهند که باعث خطا در نتیجه آزمون می‌شود، نگرانی دیگر برش نمونه در داخل گیره می‌باشد که اجازه نمی‌دهد نمونه ازدیاد طول کامل خود را در ماکزیمم تنش کششی داشته باشد. در این صورت می‌بایست تست کشش تکرار گردد.

طرح چرخ تسمه یا پولی برای گرفتن دو سر نمونه جهت تست کشش باعث می‌شود نیروی کششی بیشتری نسبت‌به نمونه‌های گیره‌ایی اعمال گردد و از سر خوردن نمونه و یا شکستن در

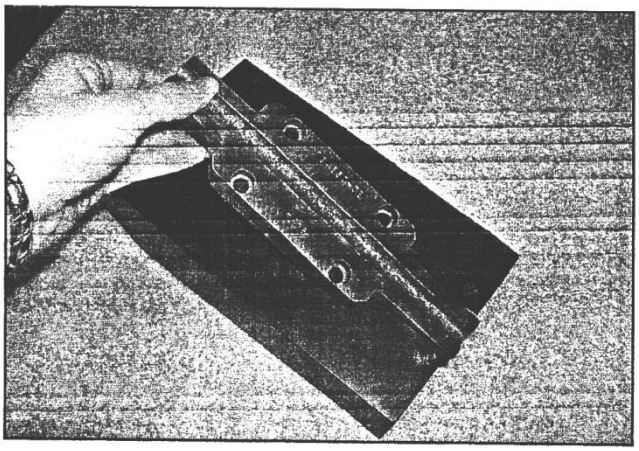
فک‌ها جلوگیری می‌شود و مطمئناً تنش در قسمت طول آزاد نمونه به نهایت خود می‌رسد و برش نیز در قسمت آزاد روی می‌دهد و در نتیجه نتایج به دست آمده معتبرتر می‌باشند.

شکل ۱۳ یک نمونه از این دستگاه‌ها را که برای تست مفتول از قطر ۰/۱ تا ۱/۵ میلیمتر طراحی شده‌اند را نشان داده است.

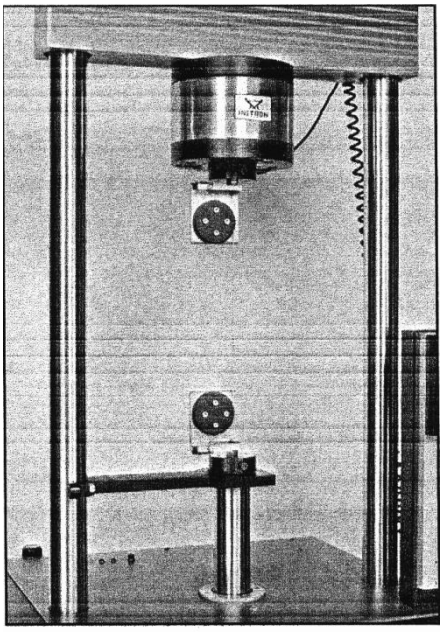
این دستگاه‌ها شامل قرقره‌های فولادی سخت‌کاری شده هستند که برروی یک صفحه آلومینیومی نصب شده‌اند که برروی آنها نیز یک گیره کوچک (کلیپس) پیچ شده و مفتول در سر دیگر این گیره‌ها توسط یک پیچ محکم می‌شود و متناسب با مقاومت مفتول ۱/۵ تا ۲/۵ دور به‌دور پولی‌ها پیچیده می‌شوند و آماده تست می‌گردند.



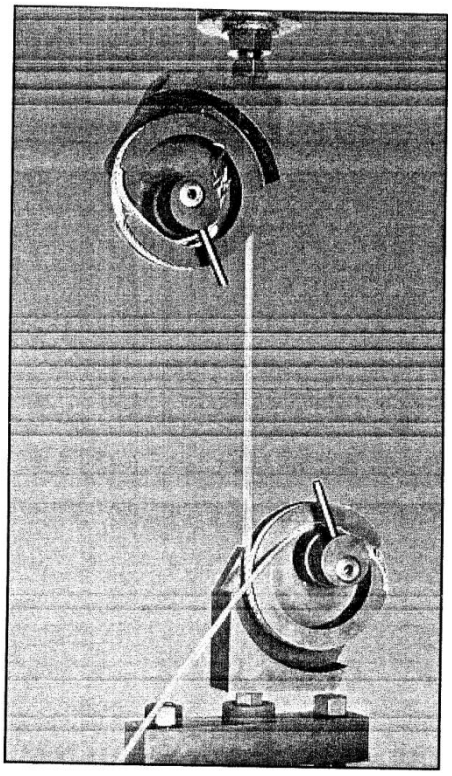
شکل ۱۱ـ دایاگرام گیره داخل کله‌گی



شکل۱۲ـ نصب یک نمونه گیره داخلی مخصوص تست کابل و بکسل



شکل۱۳ـ دستگاه تست کشش هیدرولیکی با سیستم گرفتن مفتول توسط پولی



شکل۱۴ـ نمونه دیگر دستگاه تست کشش با پولی

چندین استاندارد **ASTM** مانند **E-8** و **A-370** جزییاتی راجع‌به تست و آماده‌سازی نمونه و روند تست گرفتن ارائه کرده است.

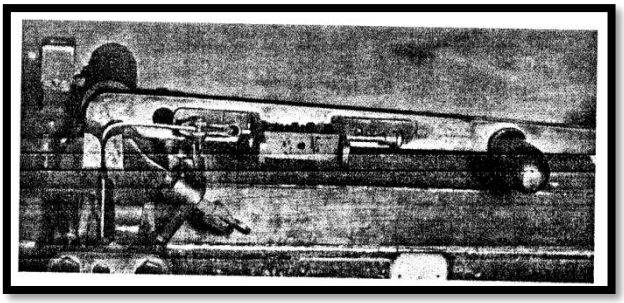
مطالعه این استانداردها جهت اطمینان از انجام آزمایش مطابق استانداردهای قابل قبول، توصیه می‌گردد.

تست خش

توانایی انجام تغییر شکل به‌وسیله خمش را با وسایل گوناگون می‌توان اندازه گرفت. آزمون‌های خمش طوری طراحی شده‌اند که نتایج عددی نیستند و به صورت قبول یا مردود بیان می‌شوند. پروسه کلی این است که مفتول بین دو فک گرد با شعاع مشخص محکم نگاه داشته می‌شود بعد

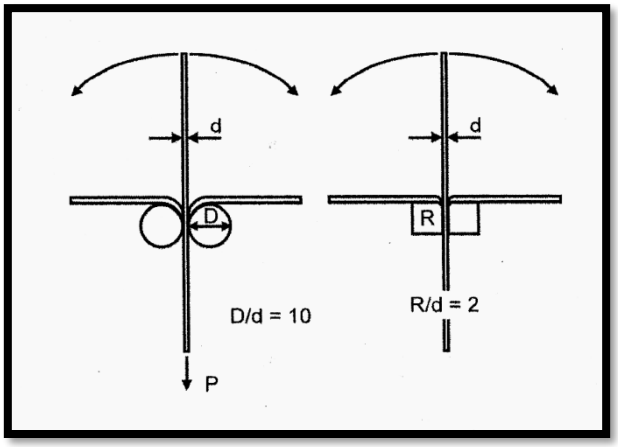
به اندازه ۱۸۰ درجه در دو جهت مخالف برروی دو فک مرتب خم می‌شود تا نمونه دچار شکست شود. این دستگاه‌ها توسط کاربران بگونه‌ای توسعه یافته‌اند که با آنها تست‌های ساده و کم هزینه انجام گیرد.

یک نمونه دستگاه تست خم مفتول در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در انواع دیگر این ماشین‌ها به جای فک از محورهای هرزگرد استفاده می‌شود. در این دستگاه‌ها مفتول با نیروی برابر با یک‌درصد استحکام کششی به دور محورها خم می‌گردد.

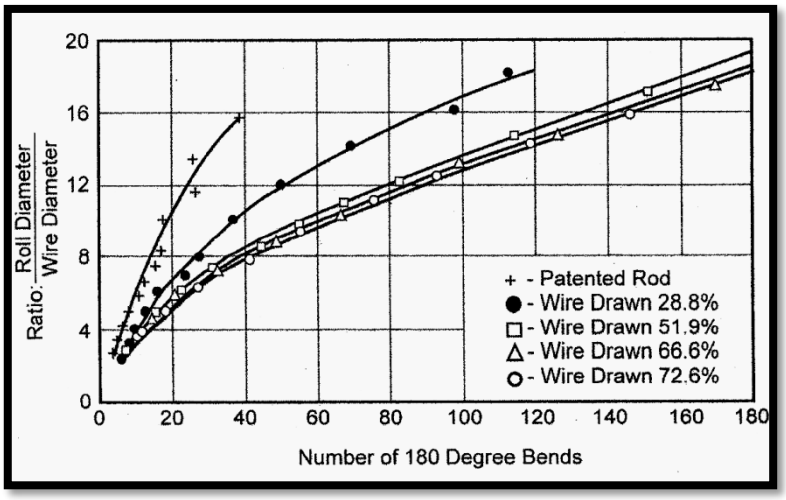


شکل۱۵ـ دستگاه استاندارد تست خم مفتول

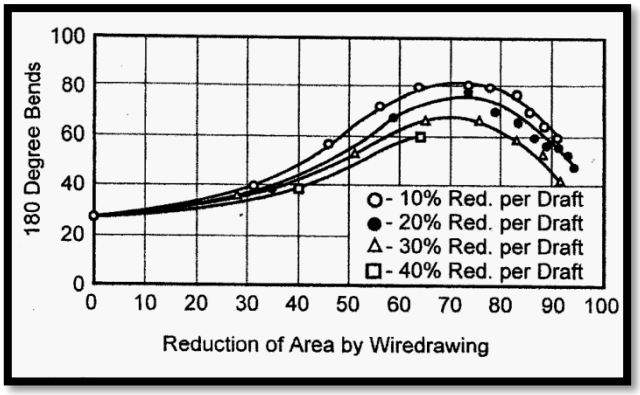
نسبت بین قطر مفتول و قطر فک‌های دستگاه تست تأثیر زیادی در تعداد خم‌ها تا قبل از شکست دارد زیرا کرنش کششی در تارهای بیرونی خم در مفتول متناسب با نسبت قطر مفتول با قطر فک‌ها می‌باشد (در شکل ۱۶ $\frac{d}{D}$) معمولاً وقتی $\frac{d}{D}=1$ باشد، مفتول بعداز تعداد کمی خم دچار شکست می‌شود و آزمایش سریع‌تر متوقف می‌گردد. تأثیر شعاع خمش بر تعداد خم‌ها در شکل ۱۷نشان داده شده است. با انتخاب یک شعاع خم به اندازه کافی بزرگ ($D>10d$)، آزمایش می‌تواند نسبت‌به اختلاف خواص مواد بسیار حساس‌تر باشد و نتایج به دست آمده برای مطالعه تأثیر نوع عملیات تولیدکنندگان برخواص مفتول مورد استفاده قرار گیرد، همانگونه که در شکل ۱۸ نشان داده شده است.



شکل۱۶ـ در آزمون خم رفت و برگشتی، کرنش کششی در تارهای بیرونی مفتول متناسب است با $\frac{d}{D}$



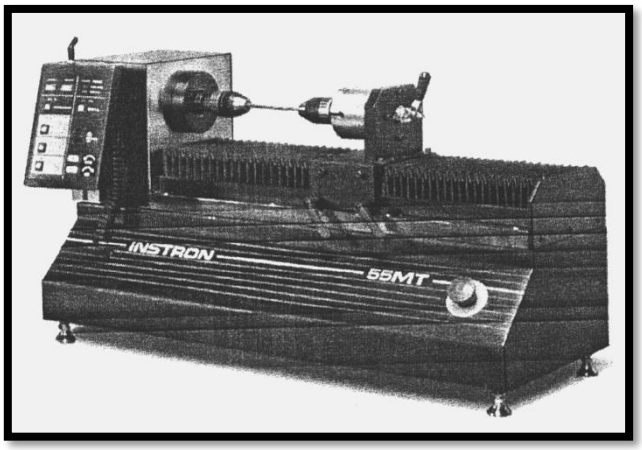
شکل۱۷ـ تأثیر شعاع خم بر تعداد خم‌ها



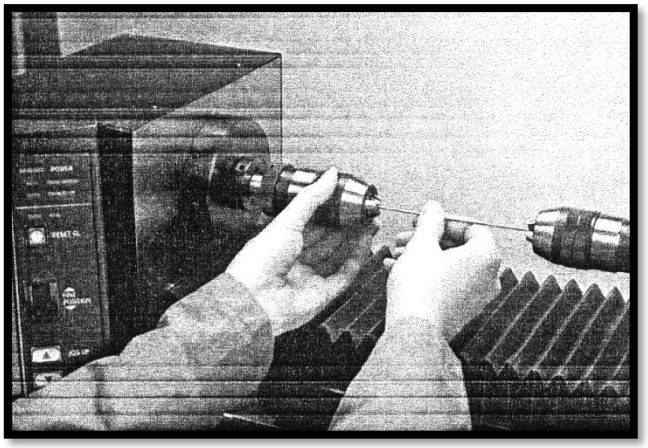
شکل۱۸ـ تأثیر عملیات کشش بر خواص خمشی مفتول کشیده شده سرد

آزمون پیچش

آزمون پیچش ممکن است برای تعیین خواص مکانیکی از قبیل مدول‌الاستیسیته در برش، مقاومت تسلیم پیچشی و مدول (ضریب) گسیختگی به کار گرفته شود. همچنین ممکن است به شیوه کلی‌تر برای تعیین رفتار مواد تحت بارهای پیچشی مورد استفاده قرار گیرد. شکل ۱۹ دستگاه تست پیچش را که توانایی تست مفتول و کابل را دارد، نشان می‌دهد. شکل ۲۰ نوع دیگر این دستگاه با سه نظام اتوماتیک (بدون آچار) را نشان می‌دهد.



شکل۱۹ـ دستگاه تست پیچش مفتول



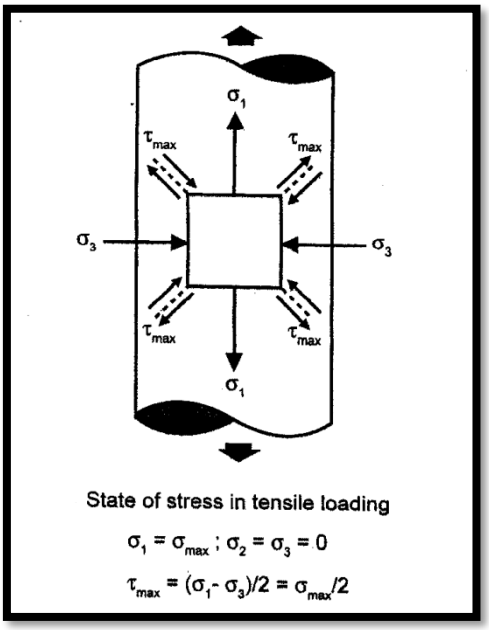
شکل ۲۰ـ دستگاه تست پیچش مفتول با سه نظام اتوماتیک

در هر دو تست خمش و پیچش تنش کششی اصلی به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از تنش برشی می‌باشد. چگونگی تنش برای کشش در شکل ۲۱ نشان داده شده است. برای تست کشش، تنش اصلی کششی (σ_1) موازی محور مفتول می‌باشد. و تنش اصلی فشاری (σ_3) عمود بر محور مفتول می‌باشد. تنش برشی (Tmax) تحت زاویه ٤٥درجه نسبت‌به محور مفتول اعمال می‌گردد. تنش برشی نصف ماکزیمم تنش کششی می‌باشد. بنابراین شکستگی تردی ناشی از (σ_1) عمود بر محور مفتول می‌باشد، در حالی که شکستگی نرمی ناشی از Tmax در زاویه ٤٥درجه روی می‌دهد.

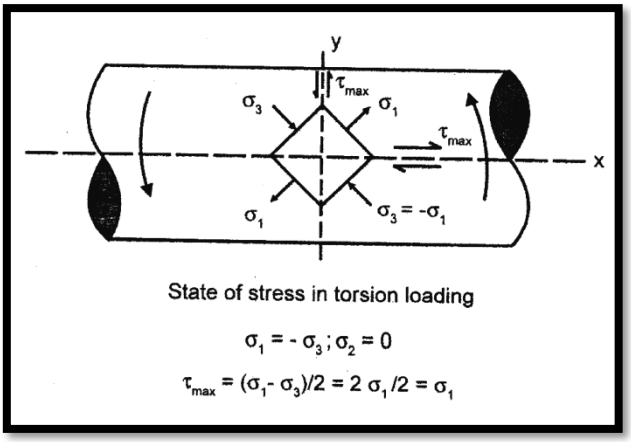
تنش‌های اصلی برای تست پیچش نسبت به تست کشش دارای چرخش ٤٥درجه‌ای می‌باشند. تنش‌های برشی (Tmax) موازی و عمود بر محور مفتول می‌باشند و تنش اصلی (σ_1) و تنش‌های فشاری (σ_3) تحت زاویه ٤٥درجه نسبت‌به محور مفتول قرار دارند (نگاه کنید به شکل ۲۲) در تست پیچش، تنش‌های برشی در سطح مفتول در امتداد طول و عمود بر محور مفتول، برابر با تنش کششی می‌باشد. تنش کششی در سطح مفتول در صفحه‌ای با زاویه ٤٥درجه نسبت‌به محور مفتول، ماکزیمم مقدار خود را دارد.

به این دلیل تنش‌های برشی در تست پیچش بسیار با اهمیت می‌باشند. به دلیل این‌که تنش برشی مواد نرم و شکل‌پذیر خیلی کمتر از مقاومت چسبندگی یا مقاومت کششی است، شکست یا برش در تست پیچش معمولاً یک شکست برشی است و یک شکست چسبندگی مانند آن چه در تست کشش روی می‌دهد، نخواهد بود.

در تست پیچش، مفتول از یک سر ثابت می‌گردد و از سر دیگر پیچانده می‌شود. وسیله اندازه‌گیری پیچش که تراپتومتر نام دارد تغییر شکل نمونه را اندازه‌گیری می‌کند. جابه‌جایی‌های زاویه‌ای بین نقاط هر سر نمونه در طول نمونه تعیین می‌گردد. حداکثر سرعت پیچش پیشنهادی در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲۱ـ تنش برشی در کشش نصف ماکزیمم تنش کششی می‌باشد.



شکل۲۲ـ تنش برشی در پیچش برابر با تنش کششی است.

Wire Diameter, inches (mm)	Twisting Speed (RPM)
< 0.040 (1.02)	90
0.040 to 0.142 (1.02 to 3.61)	60
>0.142 (>3.61)	30

ماکزیمم سرعت پیچاندن پیشنهادی برای طول نمونه صد برابر قطر

تعداد پیچش تا حدبریدن مفتول می‌تواند مقیاسی برای کیفیت مفتول باشد. طول پیشنهادی برای نمونه تست حدود ۲۰/۳ سانتیمتر می‌باشد. (فاصله دو فک دستگاه تست). طول کافی برای گرفتن توسط فک‌ها نیز می‌بایست در نظر گرفته شود.

برای تست طول‌هایی دیگری به جز ۲۰/۳ سانتیمتر نیز ممکن است براساس توافق تولیدکننده مفتول و مشتری یا طول تعیین شده مناسب در مشخصات محصول، به‌کار گرفته شود. معمولاً طول

مفتول نمونه جهت تست پیچش صد یا دویست برابر قطر آن در نظر گرفته می‌شود. وقتی طول نمونه تست (X) غیر از ۲۰/۳ سانتیمتر یا (۸ اینچ) باشد، حداقل تعداد پیچشی که می‌بایست بین دو فک صورت بگیرد تا نمونه دچار شکست شود، با فرمول زیر تعیین می‌گردد.

معادله (۱۰)

$$T_x = \frac{(T_8)(L_x)}{L_8}$$

که:

T_x = تعداد پیچش تا برش

T_8 = تعداد پیچش تا برش برای نمونه ۸ اینچی

L_x = طول نمونه غیر ۸ اینچی

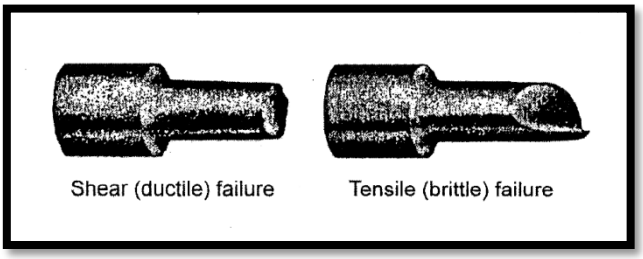
L_8 = طول نمونه ۸ اینچی یا ۲۰/۳ سانتیمتر

علاوه بر تعداد پیچش تا برش نوع برش (نرم یا ترد) نیز بسیار مهم می‌باشد. یک فلز نرم معمولاً در هنگام تست پیچش در یک صفحه عرضی نسبت‌به محور مفتول بریده می‌شود که سطح برش تمیز و تیز می‌باشد. این برش در صفحه ماکزیمم تنش برشی روی می‌دهد که برابر با تنش برشی اعمال شده در صفحات موازی محور برش می‌باشد.

یک فلز ترد در صفحه عمود بر جهت ماکزیمم تنش برشی گسیخته می‌شود. این صفحه زاویه بین دو صفحه ماکزیمم تنش برشی را به دو نیم می‌کند و یک زاویه ٤٥درجه با جهات طولی و عرضی می‌سازد. بنابراین یک برش مارپیچ به‌وجود می‌آید. مفتول کیفی همیشه به صورت نرم گسیخته می‌شود، به طور مثال در صفحه ماکزیمم برش عمود بر محور مفتول این اتفاق روی می‌دهد. (به شکل ۲۳ نگاه کنید)

اگر صفحات طولی به دلیل عیوب سطح مانند شکاف یا درزها و یا در اثر حرارت زیاد در عملیات کشش مفتول، ضعیف شده باشند، گسیختگی برشی اولیه ممکن است در صفحات طولی اتفاق بیافتد. این نوع شکست شکافی به محض شروع تست در طول مفتول پیشرفت می کند و

یک ترک مارپیچ در نمونه تست ایجاد می‌کند. وقتی چنین شکستی روی می‌دهد معمولاً تعداد پیچش تا مرحله شکست کمتر خواهد بود. وقوع این‌گونه برش پیچشی نشان می‌دهد که مقاومت برشی طولی مفتول کمتر از مقاومت برشی عرضی است.

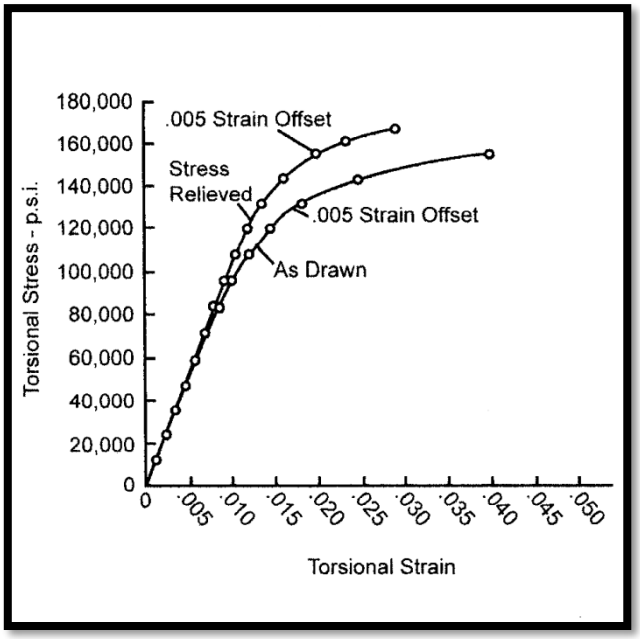


شکل۲۳ـ برش پیچشی در صفحه ماکزیمم برش

نسبت تنش ـ کرنش بین تنش پیچشی و کرنش پیچشی برای مفتول کشیده شده سرد در شکل ۲٤ نشان داده شده است. این آزمون‌ها که برروی مفتول‌های کشیده و تنش‌زدایی شده انجام گرفته است نشان می‌دهد که خواص پیچشی می‌تواند توسط عملیات حرارتی تغییر کند مانند آن چه در مورد خواص کششی روی می‌دهد. این اطلاعات نشان می‌دهد که چگونه خواص الاستیکی کلاف‌های فنری به وسیله تنش‌زدایی بهبود می‌یابد. جهت به کارگیری جزییات تکنیکی تست‌های قابل قبول، خواننده به **ASTM E-938** (روش استاندارد برای تست پیچش مفتول) و **ASTM E-143** (روش استاندارد برای مدول برش در دمای اتاق) ارجاع داده می‌شود.

گره دادن و آزمون‌های پیچیدن

آزمون گره دادن معمولاً برای مفتول‌های نازک با قطر کمتر از ۰/۳۸ میلیمتر به جای تست پیچش مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمون مشتمل‌بر ساختن حلقه ۳٦۰ درجه‌ایی از مفتول و سپس (باز کردن) کشیدن آن به وسیله دست می‌باشد. چندین تست گره در زمان کوتاهی می‌تواند انجام شود و با یک خم (باز کردن) ۹۰ درجه‌ای بعداز هر تست و پس از چهار تست محیط کامل مفتول می‌تواند چک شود. تست گره مفتول را در معرض تنش‌های پیچشی و برشی قرار می‌دهد.

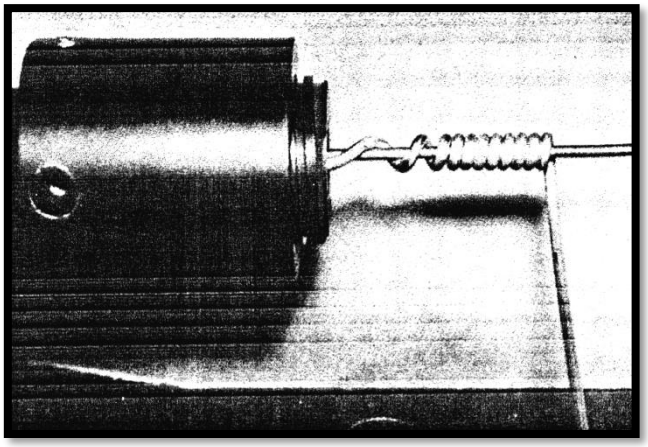


شکل۲۴ـ منحنی تنش ـ کرنش پیچشی مفتول کشیده شده سرد قبل و بعداز تنش‌زدایی

تست پیچش شبیه تست خم است که در آن مفتول به دور یک محور خم می‌شود. قطر محور می‌تواند از یک تا پنج برابر قطر مفتول متناسب با شدت تست متغیر باشد.

در این روش و پس از پیچیدن چندین دور مفتول به دور محور و به دلیل استفاده از طول زیاد مفتول، سطح آن می‌تواند مورد تست قرار گیرد. در شکل ۲۵ یک نمونه مفتول با روکش‌فلزی تحت تست پیچاندن برروی محوری با قطر برابر با قطر نمونه، نشان داده شده است.

درحین تست پیچیدن، سر آزاد مفتول به دور محور خود می‌چرخد به دلیل چرخاندن مفتول پیچش‌ها شکل می‌گیرند. اگر پیچش‌های کافی اعمال گردند، کل محیط مفتول تحت تنش‌های خمشی ماکزیمم قرار گرفته است. تست پیچیدن ممکن است برای سنجش کیفی شکل‌پذیری مفتول و یا کیفیت روکش مفتول مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۲۵ـ تست پیچاندن برای مفتول با روکش فلزی

آزمون سختی

سختی فلز معمولاً به صورت مقاومت در برابر فرو رفتگی تعریف می‌گردد. اصل کلی تست سختی این است که یک گوه سخت به صورت ساچمه یا نوک تیز تحت بار معین و زمان تعریف شده به فلز فشار وارد می‌کند، سپس عمق و سایز فرورفتگی اندازه‌گیری می‌شود.

به دلیل رابطه تجربی سختی و سایر خواص فیزیکی از قبیل مقاومت کششی، آزمون سختی مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمون‌های سختی ساده، راحت و نسبتاً غیرمخرب هستند. آزمون‌های سختی ممکن است براساس نیروی به‌کار گرفته شده طبقه‌بندی شوند. آزمون سختی زیاد **(macrohardness)** شامل به کارگیری نیروی بزرگتر از یک کیلوگرم می‌باشد. این نیرو برای آزمون سختی کم **(microhardness)** بین یک گرم تا یک کیلوگرم می‌باشد.

آزمون سختی برینل ـ یک سطح تخت از نمونه توسط یک ساچمه فولادی سخت شده به قطر ۵ یا ۱۰ میلیمتر به مدت ۱۰ تا ۳۰ ثانیه تحت فشار ۵۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلوگرم قرار می‌گیرد. به دنبال آن و پس از قطع نیرو، فرو رفتگی در نمونه دیده می‌شود که توسط میکروسکپ مجهز به مقیاس میلیمتر قابل اندازه‌گیری می‌باشد. عدد سختی برینل **(Brinell hardness number) (BHM)** به شرح زیر تعریف می‌گردد:

معادله (۱۱)

$$BHN = \left(\frac{P}{\left(\frac{\pi D}{2}\right)\left(D - \sqrt{D^2 + d^2}\right)} \right)$$

که:

P = بار (کیلوگرم)

D = قطر ساچمه (میلیمتر)

d= قطر فرو رفته‌گی (میلیمتر)

عدد سختی برنیل یک ماده همان‌گونه که در بالا تعریف شد، نسبت $\frac{P}{A}$ می‌باشد که **P** بار است برحسب کیلوگرم و **A** سطح مقطع فرورفتگی برحسب میلیمتر مربع می‌باشد. این نسبت برای ماده مشخص وقتی فقط همان بار و همان ساچمه در آزمایش به‌کار گرفته شوند، ثابت و یکسان خواهد بود. توجه زیادی می‌بایست معطوف این مورد نمود که اندازه‌گیری فرورفتگی به دلیل بازیافت الاستیکی و به‌ویژه کار سختی در هنگام آزمایش ممکن است باعث خطا گردد.

آزمون سختی راکول ـ رایج‌ترین تست سختی به کار گرفته شده می‌باشد. اساساً به دلیل سادگی و سرعت علاوه‌بر آن خواندن نتایج مستقیم می‌باشد و نیازی به اندازه‌گیری چشمی وجود ندارد. آزمون سختی راکول براین اساس است که یک بار کوچک ۱۰ کیلوگرمی به نمونه وارد می‌شود و به عنوان نقطه صفر تلقی می‌گردد. سپس یک بار بزرگ ٦۰، ۱۰۰ یا ۱۵۰ کیلوگرمی برای فاصله زمانی به خصوصی بعداز برداشتن بار کم به نمونه اعمال می‌گردد. عمق فرورفتگی که از نقطه صفر تا انتها متغیر می‌باشد برروی یک وسیله اندازه‌گیری تغییر بعدهای بسیار کوچک به عنوان سختی راکول دلخواه ضبط می‌گردد.

از آنجایی که سختی راکول بستگی به بار اعمال شده و گوه دارد، مهم است که ترکیب این ۲ در تست مشخص گردد. این کار با اضافه کردن یک حرف به عدد سختی انجام می‌پذیرد که نشان‌دهنده روش به‌کار رفته می‌باشد. برای مثال، مقیاس راکول **C (RC)** لازمه‌اش یک بار بزرگ ۱۵۰ کیلوگرمی در ترکیب با گوه الماس می‌باشد. این مقیاس برای مواد سخت مانند فولادهای

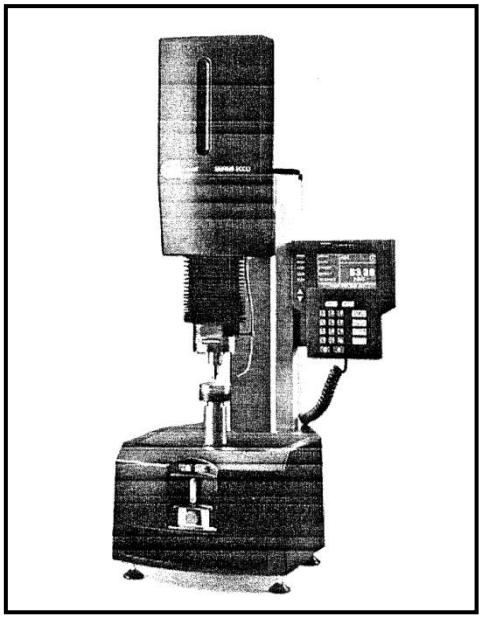
سخت‌کاری شده به کار گرفته می‌شود. ساچمه‌های فولادی سخت شده با قطرهای ۱/٦، ۳ ، ٦/۳ و ۱۲/۷ میلیمتر، ممکن است برای تست مواد نرمتر نیز به کار گرفته شوند. برای مقیاس راکول **B (RB)**، ساچمه با قطر ۱/٦ میلیمتر و بار بزرگ ۱۰۰ کیلوگرمی برای تست فولادهای آنیل شده به کار گرفته می‌شوند. نمونه کاربردهای مقیاس‌های راکول در شکل ۲٦ نشان داده شده است. شکل‌های ۲۷ و ۲۸ دو نوع دستگاه سختی‌سنج راکول را نشان می‌دهند.

Scale Symbol	Typical Application of Scales
B	Copper alloys, soft steels, aluminum alloys, malleable iron, etc.
C	Steel, hard cast irons, pearlitic malleable iron, titanium, deep case-hardened steel and other materials harder than B 100
A	Cemented carbides, thin steel and shallow case-hardened steel
D	Thin steel and medium case-hardened steel and pearlitic malleable iron
E	Cast iron, aluminum and magnesium alloys, bearing metals
F	Annealed copper alloys, thin soft sheet metals
G	Phosphor bronze, beryllium copper, malleable irons, upper limit G 92 to avoid possible flattening of ball
H	Aluminum, zinc, lead
K, L, M, P, R, S, V	Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that do not give anvil effect.

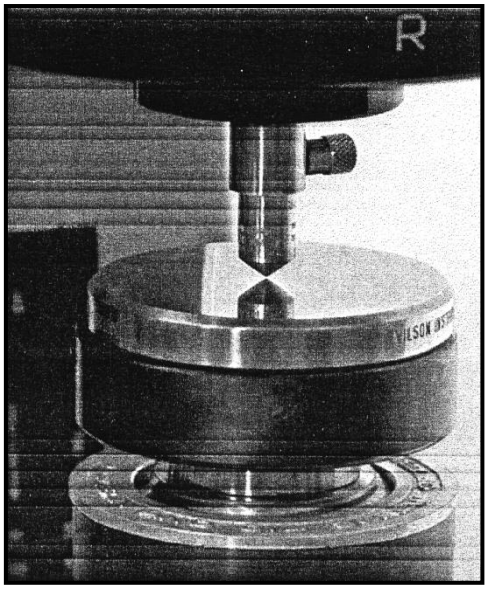
The N scales of the *Rockwell* superficial hardness tester are used for materials similar to those tested on the Rockwell C, A, and D scales, but of thinner gauge or case depth. The T scales are used for materials similar to those tested on the Rockwell B, F, and G scales but of thinner gauge. Where minute indentations are required, use the *Rockwell* superficial tester.

The W, X, and Y scales are used for very soft materials.

نمونه کار بر مقیاس‌های راکول



شکل ۲۷ـ دستگاه سختی سنج راکول



شکل۲۸ـ دستگاه سختی‌سنج راکول از نوع **Close UP**

آزمون سختی ویکرز (یا سختی الماس هرمی شکل) یک گوه الماس هرمی با قاعده مربع را که زاویه بین صفحات مقابل آن ۱۳۶ درجه می‌باشد به‌کار می‌گیرد. عدد سختی ویکرز به شکل زیر تعریف می‌گردد.

معادله (۱۲)

$$\mathbf{VHN} = \left(\frac{\mathbf{2Psin}(\frac{\boldsymbol{\theta}}{\mathbf{2}})}{\mathbf{L^2}}\right) = \left(\frac{\mathbf{1.854P}}{\mathbf{L^2}}\right)$$

که:

P = بار (کیلوگرم)

L= متوسط طول قطرهای هرم (میلمتر)

θ= زاویه بین صفحات مقابل الماس (۱۳۶ درجه)

عدد سختی ویکرز به دلیل این‌که مقیاس سختی پیوسته برای یک بار اعمال شده را ارائه می‌کند، بسیار مفید خواهد بود. به‌علاوه اثر ایجاد شده به وسیله گوه به طور هندسی کاملاً مشابه و مستقل از سایز گوه می‌باشد. بنابراین **VHN** مستقل از بار اعمال شده است. این مسأله معمولاً در فاصله بار ۱ تا ۱۲۰ کیلوگرمی درست می‌باشد.

بنابراین در تست سختی برینل توجه زیادی می‌بایست به اندازه‌گیری مقدار فرورفتگی کرد. یک فرورفتگی کامل می‌بایست مربع باشد.

برای سطوح خیلی کوچک آزمون سختی کم مرجعی برای آزمون سختی زیاد می‌باشد.

تست و یکرز برای به دست آوردن نتایج سختی کم یا ریزسختی نیز ممکن است به کار گرفته شود. اداره ملی استاندارد، گوه (فرو رونده) نوپ را برای اندازه‌گیری سختی میکروسکوپی ارائه نموده است.

فرورونده (گوه) سختی‌سنج میکروسکوپی (سختی‌کم) الماسی است که قاعده لوزی دارد با نسبت قطرهای بزرگ به کوچک ۷ به یک. عمق فرورفتگی حدوداً یک سی‌ام قطر بزرگ لوزی می‌باشد. عدد سختی نوپ به صورت معادله زیر تعریف می‌گردد. **(Knoop Hardness Number)**

معادله (۱۳)

$$KHN = \left(\frac{P}{A_p}\right) = \left(\frac{P}{L^2K}\right)$$

که:

P = بار (کیلوگرم)

A_P = مساحت فرورفتگی (میلیمترمربع)

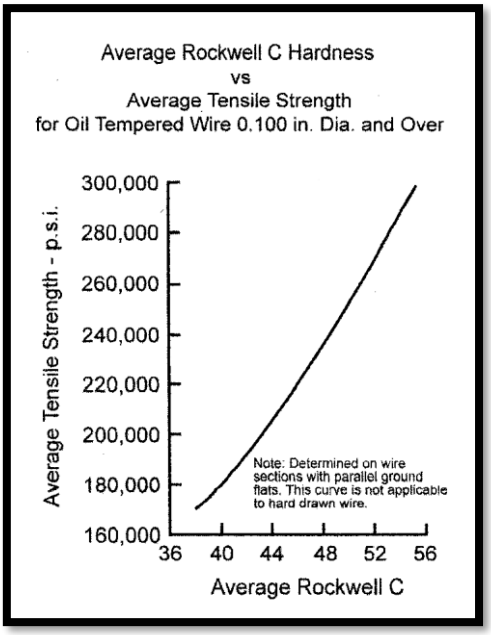
L = طول قطر بزرگ لوزی

K = ثابت گوه (توسط تولیدکننده داده می‌شود)

جدول تبدیل سختی جهت معادل سازی نتایج روش‌های مختلف آزمون‌های سختی درست شده است. که شامل سختی‌های راکول، برینل، ویکررز و نوپ می‌باشد. این جدول را می‌توان در استانداردهای **ASTM** که جزییات روش‌های آزمون را ارائه داده‌اند، پیدا کرد. روابط تجربی زیادی بین سختی و مقاومت کششی برای فولادها یافت شده است. برای مثال سختی راکول **C** برای فولاد قطر ۲/۵٤ میلیمتر و بیشر (با چقرمه‌کاری روغنی) و مقاومت کششی در شکل ۲۹ نشان داده شده است. سختی مفتول سرد کشیده شده کمی کمتر از مفتول چقرمه‌کاری شده روغنی است همانند مقاومت کششی آنها.

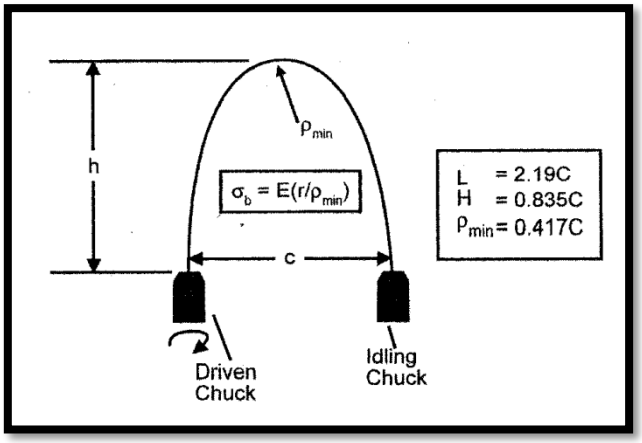
آزمون خستگی FATIGUE TESTS ـ اگر قطعه‌ایی تحت تنش‌های تکرار شونده قرار گیرد ممکن است در اثر تنشی کمتر از مقاومت تنشی و یا حتی کمتر از مقاومت تسلیم خود، گسیخته شود. این نوع گسیختگی را گسیختگی خستگی می‌نامند. برای آزمون خستگی تعداد زیادی ابزار و ادوات و قالب‌هایی تدارک دیده شده‌اند. اینها متناسب با باری که به نمونه اعمال می‌گردد، به کار گرفته می‌شوند مانند بار محوری، چرخشی، پیچش متناوب و یا تنش‌های مرکب.

آزمون خستگی خمشی رایج‌ترین آزمون خستگی می‌باشد. این آزمون با انواع مختلف تجهیزات می‌تواند صورت گیرد، بدین‌ترتیب که ضمن این‌که مفتول نمونه حول محور خودش در حال چرخش می‌باشد، تحت تنش‌های خمشی نیز قرار می‌گیرد. برای هر دور چرخش تنش خمشی از



شکل۲۹ـ نسبت بین سختی و مقاومت کششی مفتول با قطر بزرگ‌تر ۲/۵۴ میلیمتر با بازپخت روغنی

کششی به فشاری نوسان پیدا می‌کند و شرایط تنش نوسان‌دار مورد نیاز را فراهم مـی‌کنـد. یـک دستگاه تست خستگی خمشی برای میله چرخان در شکل ۳۰ نشان داده شده است.



شکل۳۰ـ دستگاه تست خستگی خمش میله چرخان

تنش خمش در نوارهای بیرونی نمونه مورد تست می‌تواند توسط معادله ١٤ محاسبه گردد.

معادله (۱۴)

$$\sigma_b = E\left(\frac{r}{\rho_{min}}\right)$$

که:

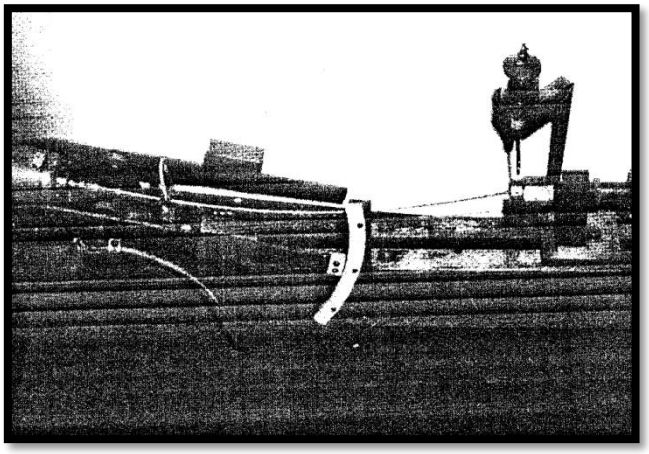
σ_b = تنش خمشی

E = مدول یانگ

R = شعاع مفتول تست

ρ_{min}= شعاع انحنای مفتول درحین آزمایش

شکل ۳۱ دستگاه تست خستگی برای مفتول شاخه شده را نشان می‌دهد که معمولاً طول نمونه ۱۵۰برابر قطر آن است که دو سر مفتول ثابت شده و ضمن چرخیدن تحت تنش خمشی مورد نظر قرار می‌گیرد.



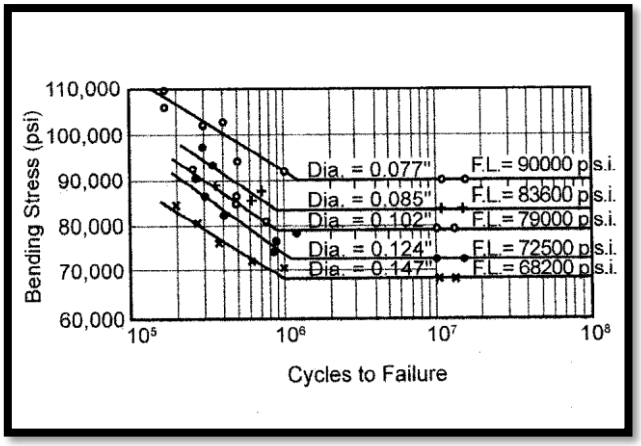
شکل۳۱ـ دستگاه تست خستگی خمشی

نمونه‌های آزمایش در چنین مواردی مانند تیری که از دو سر مهار شده و ماکزیمم تنش در وسط آن اعمال می‌شود، تحت تنش قرار می‌گیرند. این پروسه اثر گیرش دو سر در خواص خستگی را حذف می‌نماید زیرا تنش‌های خنثی در دو انتها که توسط فک‌های دستگاه تست مهار شده‌اند، صفر می‌باشند.

رفتار ماده در خستگی را می‌توان توسط منحنی‌های S-N تفسیر نمود، طرحی از تنش اعمال شده و تعداد آنها تا مرز گسیختگی. نمونه تحت سطوح مختلف تنش مورد آزمایش قرار می‌گیرند به طوری‌که هر چه میزان تنش در تست‌ها کم می‌شود تعداد سیکل آنها افزایش می‌یابد. در برخی سطوح تنش نمونه بعداز یک میلیون سیکل نیز دچار گسیختگی نمی‌شود.

بالاترین تنشی که این اتفاق در آن روی می‌دهد را محدوده تحمل می‌گویند. فولادها در این که یک محدوده تحمل با سطح تنش کمتری که ماده در آن گسیخته می‌شود و تحمل تعداد سیکل‌های تعریف شده تئوری برای گسیختگی، از خود نشان می‌دهند، منحصر به فرد هستند.

به شکل ۳۲ نگاه کنید.



شکل۳۲ـ تست‌های خستگی خمشی برروی مفتول سرد کشیده شده

خواص خستگی پیچشی نیز مهم می‌باشند. به ویژه در فنرهای کششی و فشاری پیچیده شده (شکل داده شده). فنرهای کامل شده اغلب تحت آزمون‌های خستگی قرار می‌گیرند. اما این‌گونه

آزمون‌ها معمولاً برروی مفتول انجام نمی‌شوند. دستگاه‌های تست پیچش شکل ۱۹ ممکن است هم برای پیچش ساکن (در یک جهت) و هم برای تست خستگی پیچشی (چرخش در دو جهت مختلف) مورد استفاده قرار گیرند.

دستگاه تست خستگی پیچشی طوری طراحی شده است که هر سر نمونه تست می‌تواند تحت هر زاویه دلخواه چرخش نماید. یک شکست خستگی پیچشی برروی فولاد سرد کشیده شده یک جدایش کامل نمونه تست نمی‌باشد. گسیختگی معمولاً با گسترش یک درز طولی برروی مفتول روی می‌دهد. بنابراین یک وسیله برای تعیین تعداد سیکل‌های لازم تا شروع ترک خستگی مورد نیاز می‌باشد. نصب یک اندیکاتور به مرکز نمونه مورد تست و تنظیم نقاط تماس در دو طرف اندیکاتور، ترک‌های خستگی اولیه را تشخیص می‌دهد. در شروع تست خستگی، قبل از آغاز هر ترک خستگی، پیچش در طول نمونه تست یکنواخت می‌باشد و نقاطی که اندیکاتور در نزدیکی آنها نصب شده در طی سیکل تنش تماسی با اندیکاتور ندارند. به محض این‌که کوچک‌ترین ترک طولی در نمونه تست روی دهد، کرنش در طول نمونه یکنواخت نخواهد شد و یکی از نقاط تماس الکتریکی پیدا کرده و کلید قطع‌کن آزمایش را فعال می‌سازد. این روش تشخیص گسیختگی خستگی پیچشی در آزمایشگاه همکاری تحقیق و توسعه **CF&I** توسعه یافت.

خواننده به بازبینی استانداردهای **ASTM** برای جزییات تکنیک‌های تست توصیه می‌گردد. در هنگام چاپ این مطالب حدود یکصد استاندارد **ASTM** مربوط به تست خستگی وجود داشت که می‌توان آنها را در وب‌سایت **ASTM** : **www.astm.org** جستجو نمود.