

فهرست

صفحه	مطالب
	فصل ۶.
۱ - ۹۰	اسیدشویی و پوشش دهی
	فصل ۷.
۹۱ - ۱۳۷	پوسته‌زدایی مکانیکی مفتول
	فصل ۸.
۱۳۸ - ۱۶۸	تغییر شکل در کشش سرد
	فصل ۹.
۱۶۹ - ۱۹۷	تئوری کشش مفتول
۱۹۸	فهرست جلد ۳

مقدمه

جلد دوم ترجمه فصل‌هایی از کتاب *FERROUS WIRE HANDBOOK* تحت عنوان مبانی کشش مفتول منتشر و تقدیم حضور می‌گردد. در جلد نخست این کتاب خوانندگان گرامی را به انعکاس نارسایی‌ها و اشکالاتی که از سر سهو یا تازه کاری حاصل شده را به دیده منت نهاده بودیم، در این جلد نیز به دعوت خود خواهیم ماند و بجاست که اشارات برخی خوانندگان کتاب به کیفیت نازل عکس‌های جلد اول را قدر دانسته و به اطلاع برسانم که در جلد دوم به طریقی توانستیم که این نقیصه را تا حد ممکن مرتفع نماییم.

سزاوار است چون گذشته از مدیریت شرکت ایروف به خاطر حمایت‌های مادی و معنوی‌شان در نشر سری کتاب‌های آموزشی مفتول تشکر نمایم و همچنین از واحد روابط عمومی شرکت و سرکار خانم حقیقی نیز که در مراحل تایپ و نشر و توزیع این کتاب با اینجانب همکاری نمودند مراتب قدردانی به عمل آورم.

و در آخر این که ترجمه و نشر جلد سوم این کتاب نیز در دست اقدام است که امیدوارم در سال جاری در اختیار علاقه‌مندان قرار گیرد.

اسماعیل مدرس - بهار ۱۳۹۵

اسیدشویی و پوشش دهی

اسیدشویی فرآیند پرمصرف و کاملی برای از بین بردن پوسته مفتول و میلگرد قبل از کشش است. با وجود اینکه پیشرفت‌های قابل توجهی در روش پوسته‌زدایی مکانیکی باعث کاهش مقدار ماده پوسته شده، گردیده است، اما اسیدشویی هنوز در بسیاری از کارخانجات که از مزایای یک سطح خیلی تمیز و انعطاف‌پذیری در کار با میلگردها و کلاف‌ها در ابعاد مختلف اطلاع دارند، فرآیند ارجح است.

فرآیند اسیدشویی، یک فرآیند شیمیایی و یک تکنولوژی متفاوت با عملیات غالباً مکانیکی میلگرد و مفتول می‌باشد و ممکن است فهمیدن آن برای رسته مهندسی کارخانه مشکل باشد. به هر حال، اسیدشویی یک علم است و مانند سایر عملیات کارخانه از قوانین فیزیکی و شیمیایی پیروی می‌کند.

بیشتر موادی که اسیدشویی می‌شوند، میلگردها و مفتول‌های فولادی کربنی هستند، لذا اطلاعات این مبحث اغلب مربوط به مواد آهنی می‌شود. فرآیند اصلی برای سایر مواد نیز قابل کاربرد بوده و تفاوت‌های لازم برای این مواد در فصلی جداگانه شرح داده شده است.

پوسته‌زدایی میلگرد و مفتول فولاد کربنی

طبیعت پوسته: پوسته که بر روی سطح میلگرد یا مفتول داغ هنگام سرد شدن در هوا تشکیل می‌شود، مخلوطی از سه اکسید آهن مختلف می‌باشد:

- فرواکسید (ووستیت) FeO
- فریک‌اکسید (هماتیت) Fe_2O_3
- اسپینل (منیتیت) Fe_3O_4

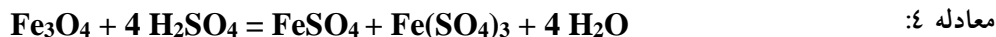
این پوسته باید قبل از کشش میلگرد یا مفتول برداشته شود تا از خرابی دوزه‌ها جلوگیری شده (اکسیدهای آهن بسیار ساینده هستند) و نیز یک سطح تمیز برای نشستن روانکار ایجاد گردد. به‌طور مشخص، وزن پوسته‌ها در آهن به ۰/۵ تا ۰/۷ درصد وزن میلگرد خام و ۰/۱ تا ۰/۲ درصد وزن مفتول آنیل شده بالغ می‌گردد.

مطالعات بسیاری بر ساختار پوسته میلگرد صورت گرفته است، ولی این امر کمک کمی به درک فرآیند اسیدشویی می‌کند. در اسیدشویی، سه عامل در مورد پوسته مهم می‌باشد:

- پوسته خیلی ترد است.
- اکسیدهای آهن مخصوصاً منیتیت، به آسانی قابل حل در اسید سولفوریک نیستند.
- ووستیت بهترین نوع پوسته برای اسیدشویی می‌باشد.

خواص شیمیایی اسیدشویی

اسیدسولفوریک: تاکنون اسیدسولفوریک، پرمصرف‌ترین اسید مورد استفاده در اسیدشویی میلگرد و مفتول بوده است و با غلظت ۹۳٪ ($66^\circ\text{Be}'$) خریداری می‌شود و در این غلظت برای فولادهای کربنی خورنده نمی‌باشد. در واقع، اسید خریداری شده را غالباً در مخازنی از جنس فولاد کربنی نگهداری می‌کنند. برای مصرف اسیدسولفوریک به عنوان یک واسطه مؤثر در اسیدشویی، آن را باید ۱۲ تا ۱۸ درصد وزنی (درصد وزن به وزن) رقیق نموده و تا دمای ۱۴۰ تا ۱۸۰ درجه فارنهایت (۶۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد) گرم کرد. در این اسید رقیق شده، واکنش‌های شیمیایی مختلفی درحین اسیدشویی صورت می‌گیرد. (برای توضیح علامت‌های شیمیایی به ضمیمه A مراجعه نمایید)



معادله اول بیانگر حمله اسید به پایه فولاد است که باعث حل شدن مقداری آهن و تولید گاز هیدروژن می‌شود. سه معادله بعد مربوط به انحلال سه نوع اکسید آهن در اسیدسولفوریک است و باعث تولید گاز هیدروژن نمی‌شود.

تولید گاز هیدروژن توسط حمله اسید به فولاد در اسیدشویی با اسیدسولفوریک امری اساسی است. پوسته اکسید آهن فقط به مقدار کم در اسیدسولفوریک حل می‌شود و فرآیند اسیدشویی بدون حمله به فلز پایه، بسیار کند انجام خواهد شد. آن چه در عمل اتفاق می‌افتد این است که اسید به ترک‌های لایه پوسته فلز پایه نفوذ می‌کند و حباب‌های هیدروژن زیر سطح پوسته تولید می‌شود که باعث بلند شدن پوسته می‌شود. پوسته به ته مخزن سقوط کرده و نهایتاً در اسید حل می‌شود. طبیعت ترد پوسته قطعاً باعث می‌شود که ترک‌ها در لایه پوسته گسترش یابند، بنابراین اسید می‌تواند به فلز نفوذ کند و گاز هیدروژن تولید نماید. اسید تنها جزئی از مایع اسیدشویی نیست که به فلز پایه حمله می‌کند. فریک سولفات نیز که از انحلال فریک اکسید و منیتیت در اسید ایجاد می‌شود به آهن پایه حمله می‌کند و طی واکنش زیر به فرو سولفات احیا می‌شود:



بنابراین تنها نمک آهن موجود در اسیدشویی فرو سولفات است که مطابق با انحلال فرو اکسید می‌باشد.

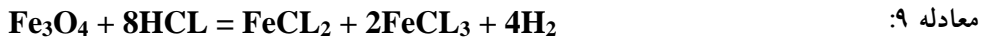
می‌توان از معادلات فوق دریافت که در فرآیند اسیدشویی، یک اتم آهن (وزن اتمی ۵۶) با یک مول اسیدسولفوریک (وزن مولکولی ۹۸) واکنش می‌دهد. این بدان معنی است که هر پوند از آهن حل شده (فلز پایه، یا به شکل اکسید آهن) $1/75 = 56 \div 98$ پوند اسیدسولفوریک خالص (معادل $1/88 = 0.93 \div 1/75$ پوند اسید با درجه تجاری ۹۳٪) مصرف می‌کند. در عمل، به علت تلفات در اسیدشویی از اسید بیشتری نسبت به مقدار فوق استفاده می‌گردد.

اسید هیدروکلریک: جوهر نمک نامیده می‌شود که در حال عمومیت یافتن برای اسیدشویی میلگرد و مفتول است، زیرا برای فلز، سطح نهایی براق تر و با حفره کمتر ایجاد می‌کند. معایب اسیدشویی

با اسید هیدروکلریک و دلایل عدم مصرف گسترده آن، سختی کنترل بخارات اسیدی از مخزن‌های روباز و طبیعت بسیار خورنده بخارات اسیدی می‌باشد.

در واقع اسید هیدروکلریک، محلول گاز کلرید هیدروژن (HCL) در آب است. معمولاً با غلظت ۳۲٪ وزن به وزن (20°Be') خریداری می‌شود و در این غلظت نسبت به فولادکربنی بسیار خورنده است. برای اسیدشویی آن را معمولاً به اندازه ۱۲ تا ۱۸ درصد وزن به وزن رقیق نموده و تا دمای ۱۰۴ تا ۱۴۰ درجه فارنهایت (۴۰ تا ۶۰ درجه سانتیگراد) گرم می‌نمایند.

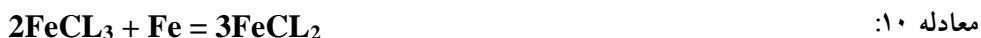
در این اسید رقیق شده واکنش‌های شیمیایی مختلفی درحین اسیدشویی صورت می‌گیرد. (برای توضیح علامت‌های شیمیایی به ضمیمه A مراجعه نمایید).



معادله اول بیانگر حمله اسید به پایه فولاد است، که باعث حل شدن مقداری آهن و تولید گاز هیدروژن می‌شود، سه معادله بعد مربوط به انحلال سه نوع اکسید آهن در اسید است و منجر به تولید گاز هیدروژن نمی‌شود.

تولید گاز هیدروژن توسط حمله اسید به فولاد در اسیدشویی با اسید هیدروکلریک مسأله اساسی نمی‌باشد و در عمل، گام‌هایی برای کمینه کردن آن برداشته شده است. به دلیل قابل حل بودن پوسته اکسید آهن در اسید هیدروکلریک، حتی اگر شکافی در لایه پوسته ایجاد نشود، اسیدشویی پیش می‌رود. با این حال، ترک‌ها در پوسته باعث نفوذ اسید به زیر پوسته و حمله اسید به هر دو سطح پوسته می‌گردند که سرعت اسیدشویی با اسید هیدروکلریک را بالا می‌برند.

اسید هیدروکلریک تنها ماده داخل محلول اسیدشویی نیست که می‌تواند به فلز پایه حمله کند. فریک کلراید که از انحلال فریک اکسید و منیتیت در اسید ایجاد می‌شود نیز به فاز آهن حمله کرده و در فرآیند به فروکلراید احیا می‌شود.



بنابراین تنها نمک آهن موجود در اسیدشویی، فرو کلراید است که مطابق با انحلال فرواکسید می‌باشد.

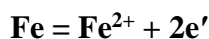
می‌توان از معادلات فوق دریافت که در فرآیند اسیدشویی، یک اتم آهن (وزن اتمی ۵۶) با دو مول اسید هیدروکلریک (وزن مولکولی $2 \times 36.5 = 73$) واکنش می‌دهد. این بدان معنی است که هر کیلوگرم از آهن حل شده (فلز پایه، یا به شکل اکسید آهن) $73 \div 56 = 1.3$ کیلوگرم اسید هیدروکلریک خالص (معادل $1.3 \div 0.32 = 4.08$ کیلوگرم اسید ۰/۳۲) مصرف می‌کند. در عمل، به علت تلفات در اسیدشویی که بعداً بررسی خواهد شد، از اسید بیشتری نسبت به مقدار فوق استفاده می‌گردد.

تردی هیدروژنی

آقای کارل زافه در مقاله‌ای در کنفرانس بین‌المللی انجمن مفتول بیان کرد: «تردی هیدروژنی چیزی نیست به جز محبوس شدن گاز هیدروژن تحت فشار بالا در داخل حفره‌های میکروسکوپی واقع در درون هر دانه. این حفره‌ها، وقتی به اندازه کافی از گاز پر شوند، دانه را تحت تنش سه بعدی قرار داده که مانع لغزش و تحرک پلاستیکی شده و استحکام کششی همزمان با کاهش شکل‌پذیری افزایش نمی‌یابد». این تشریح واژه عمومی‌تر آسیب هیدروژنی است که بیانگر آسیب مکانیکی فلز به دلیل حضور هیدروژن یا واکنش با آن است. آسیب هیدروژنی به چهار نوع مشخص طبقه‌بندی می‌شود:

- تاول زدن هیدروژنی
- تردی هیدروژنی
- کرین‌زدایی
- حمله هیدروژنی

شستشوی فولاد در اسید یک فرآیند الکتروشیمیایی است که شامل انحلال آندی آهن و تولید کاتدی هیدروژن طی دو مرحله زیر می‌باشد:



فرآیند آندی



فرآیند کاتدی

هیدروژن اتمی (H) تنها گونه هیدروژن قابل پخش در فولاد و فلزات دیگر است. اگر اتم‌های هیدروژن درون فلزی پخش شوند، ممکن است در حفره‌ها، آخال‌های سرباره، ریز حفره‌ها و ... به شکل مولکول هیدروژن (H_2) ترکیب شوند. به دلیل این‌که هیدروژن مولکولی نمی‌تواند در ریزساختار فلز پخش شود، فشار گاز هیدروژن درون حفره به حدی افزایش می‌یابد که باعث تشکیل تاول و ترک در فلز می‌شود.

مکانیزم تردی هیدروژنی با تاول زدن هیدروژنی متفاوت است، اگر چه هر دو به دلیل نفوذ هیدروژن اتمی (H) به ساختار فلز ایجاد می‌شوند. سه تئوری عموماً قابل قبول برای توضیح تردی هیدروژنی عبارتند از:

تئوری جذب: هیدروژن اتمی در نوک یک ترک موجود جذب شده و باعث کاهش انرژی سطحی موضعی می‌شود. بنابراین، انرژی لازم برای تشکیل یک ترک جدید متقابلاً کاهش می‌یابد.

تئوری نابجایی: هیدروژن اتمی حل شده نزدیک نابجایی‌ها یا ریز حفره‌ها جمع شده و با دخالت در تغییر شکل و لغزش، باعث کاهش شکل‌پذیری و استحکام کششی می‌شود.

تئوری پسیبندگی: یک اتم هیدروژن تنها الکترون خود را به «ابر الکترونی» داخل شبکه فلز واگذار می‌کند. بنابراین، یون هیدروژن (H^+) در اصل یک پروتون است.

پروتون‌های تشکیل شده (H^+) در نواحی پرتنش فلز پخش می‌شوند و در آنجا نیروهای پیوند بین اتم‌های فلز را کاهش و آمادگی رشد ترک را افزایش می‌دهند.

کاتالیزورهای سمی نظیر سولفور، آرسنیک، تلوریم، فسفر، آنتیموان، بیسموت، سرب و سلنیوم، ترکیب هیدروژن اتمی به هیدروژن مولکولی را محدود می‌کنند. لذا، با توجه به وجود هیدروژن اتمی بیشتر، جذب هیدروژنی ۱۰ تا ۱۰۰ برابر حد طبیعی اتفاق می‌افتد. سطوح زبر احتمالاً به

دلیل دارا بودن مناطق بیشتر برای ترکیب اتم‌های هیدروژن اولیه تولید شده طی فرآیند اسیدشویی و تشکیل مولکول‌های هیدروژن بزرگ‌تر، جذب هیدروژنی را کاهش می‌دهند. به طور خلاصه، تردی هیدروژنی در فولاد تابعی است از غلظت اسید مصرفی، دمای حمام، مدت زمان قرار گرفتن مواد در حمام، خواص شیمیایی فولاد، وجود بازدارنده‌ها، زبری سطح فولاد و حضور کاتالیزورهای سمی.

یک راه معمول برای از بین بردن هیدروژن در فولادها، گرم کردن در دمای نسبتاً کم می‌باشد. دمای انتخابی بستگی به زمان گرم کردن دارد و به طور تجربی به دست می‌آید. دماهای معمول ۲۰۰ تا ۶۰۰ درجه فارنهایت (۹۳ تا ۳۱۵ درجه سانتیگراد) با زمان گرم کردن به ترتیب ۵۰۰ تا ۱۵ دقیقه می‌باشد. تردی هیدروژنی مخصوصاً در فولادها، یک فرآیند تقریباً برگشت‌پذیر است. یعنی اگر هیدروژن از بین برود، خواص مکانیکی فولاد مورد عملیات قرار گرفته تنها مقدار کمی با فولادهای بدون هیدروژن تفاوت خواهد داشت.

فرآیند اسیدشویی

اسیدشویی: عملیات مرکزی در فرآیند اسیدشویی، غوطه‌وری میلگرد یا مفتول در محلول رقیق یک اسید معدنی به منظور از بین بردن پوسته اکسید می‌باشد. دو فرآیند اصلی برای اسیدشویی پس از آنیل‌کاری وجود دارد: اسیدشویی میلگرد و اسیدشویی مفتول اسیدشویی میلگرد عموماً شامل مراحل زیر است:

- شستشو برای از بین بردن آلودگی (غالباً حذف می‌شود)
- شستشو در اسید
- شستشو با آب (معمولاً حداقل دوبار)
- آهک پوشی

اسیدشویی مفتول می‌تواند شامل چند مرحله یا تمامی مراحل زیر باشد:

- شستشو برای از بین بردن چربی یا روانکار
- شستشو در اسید
- زنگ‌زدایی در پرمنگنات پتاسیم

- شستشو با آب (حداقل دو بار)
- پیش گرم کردن
- پوشش فسفاتی دادن
- شستشو با آب
- خنثی سازی (بوراکس)
- پوشش روانکار

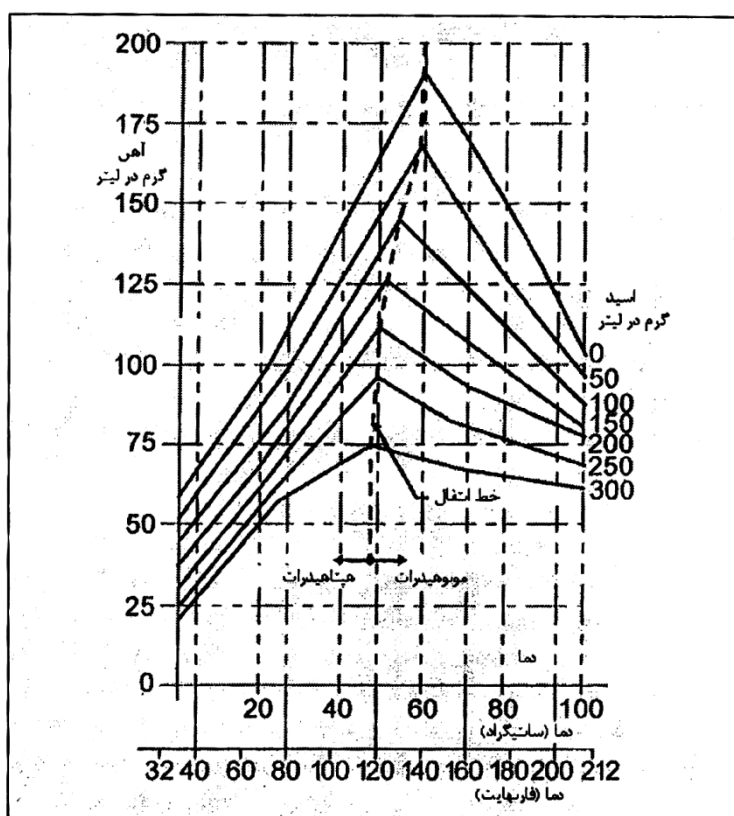
معمولاً، برای عملیات اسیدشویی میلگرد و مفتول خام از تجهیزات فرآیند مشترک در یک خط اسیدشویی مرکب استفاده می شود تا بتوان یک جریان مختلط میلگرد و مفتول را اسیدشویی نمود.

از بین بردن آلودگی: بسیاری از خطوط اسیدشویی به اشتباه «تمیزخانه» نامیده می شوند. این نام این مفهوم را ایجاد می کند که فرآیند اسیدشویی قابلیت از بین بردن آلودگی و ناخالصی را از فولاد دارد. در حقیقت، اسید تنها پوسته اکسید را از فولاد جدا می کند و خیلی در از بین بردن آلودگی، چربی، یا دیگر پوشش های آلی مؤثر نمی باشد. با این وجود اپراتورهای عملیات بر استفاده از مخازن اسیدشویی برای تمیز کردن میلگرد و مفتول اصرار دارند و از این راه باعث ورود آلودگی به اسید می شوند، در حالی که همچنان انتظار رسیدن به فولادی با سطح تمیز پس از اسیدشویی دارند.

برای اسیدشویی مؤثر، ضروری است که محصولات فولادی بدون آلودگی و کثیفی وارد اسید شوند. رسیدن به این امر با انبار کردن میلگرد در یک محل تمیز جهت جلوگیری از نشست آلودگی، اجتناب از انجام عملیات روی کلاف های روغنی یا پوشش دار، و ایجاد یک مرحله پیش شستشو برای از بین بردن آلودگی، چربی و پوشش ها، میسر خواهد شد. آلودگی را می توان توسط شستشو با آب گرم ساده در دمای حدود ۱۴۰ درجه فارنهایت (۶۰ درجه سانتیگراد) از بین برد، اما چربی و دیگر پوشش های آلی معمولاً نیاز به یک محلول تمیزکاری قلیایی در دمای ۱۶۰ تا ۱۸۰ درجه فارنهایت (۷۰ تا ۸۵ درجه سانتیگراد) دارند.

اسیدشویی با اسیدسولفوریک: غلظت اسیدسولفوریک عموماً در محدوده ۱۲ تا ۱۸ درصد وزن به حجم (۱۲۰ تا ۱۸۰ گرم در لیتر) و دمای اسیدشویی بین ۱۴۰ تا ۱۷۵ درجه فارنهایت (۴۰ تا

۸۰ درجه سانتیگراد) می‌باشد. این بدان معنا نیست که اسیدشویی با انتخاب شرایطی خارج از محدوده فوق قابل انجام نمی‌باشد، همانطور که برخی از کارخانجات، اسیدشویی را توسط تجهیزات و ملزومات کاربری ویژه انجام می‌دهند. شکل ۱، حدود انحلال‌پذیری سولفات آهن را با توجه به تغییرات دما و غلظت اسید نشان می‌دهد. انحلال‌پذیری آهن با دما افزایش و با غلظت اسید کاهش می‌یابد. در محدوده دما و غلظت اشاره شده در بالا، حد انحلال‌پذیری آهن در اسید مورد استفاده در اسیدشویی تقریباً ۱۰۰ گرم در لیتر می‌باشد.



شکل ۱- انحلال‌پذیری آهن در محلول‌های اسیدسولفوریک براساس تغییرات دما و غلظت اسید

وقتی فولاد اسیدشویی می‌شود، اسید آزاد در مخزن اسید مصرف و به سولفات آهن تبدیل می‌شود. لذا برای نگهداری سرعت اسیدشویی و غلظت اسید در اندازه مطلوب، اسید بیشتری باید اضافه شود. اگر چه، غلظت آهن در محلول نهایتاً به حد انحلال‌پذیری می‌رسد و به جای باقی ماندن در محلول، نمک آهن در مخزن و روی سطح میلگرد و مفتول متبلور می‌شود.

برداشت پوسته معمولاً زیر ۱۴۰ درجه فارنهایت (۶۰ درجه سانتیگراد) کاملاً آهسته انجام می‌شود، اما سرعت اسیدشویی با افزایش دمای اسید سریعاً افزایش می‌یابد. با این حال، چنان‌که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، انحلال‌پذیری آهن در اسید با افزایش دمای اسید به بالای ۱۲۰ تا ۱۴۰ درجه فارنهایت (۴۹ تا ۶۰ درجه سانتیگراد) سریعاً کاهش می‌یابد. اسیدشویی در دماهای بالاتر باعث ضعیف شدن اسید (اشباع شدن با سولفات آهن) می‌شود. اغلب خطوط اسیدشویی در دمایی حدود ۱۴۰ تا ۱۶۰ درجه فارنهایت (۶۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد) عمل می‌کنند، که علاوه بر ایجاد سرعت اسیدشویی قابل قبول، امکان افزایش غلظت آهن تا ۱۰۰ گرم در لیتر بدون هیچگونه مشکل تبلور را فراهم می‌نماید. غلظت بیشتر از ۱۰۰ گرم در لیتر آهن عملی نمی‌باشد، چرا که سولفات آهن سرعت اسیدشویی را کم می‌کند. علاوه بر این، دمای بالاتر مخزن اسیدشویی باعث تبخیر بیشتر سطح مایع می‌شود. این تبخیر به طور نامایی با افزایش دما شدت می‌یابد بنابراین برای کار در کمترین دمای ممکن یک انگیزه اقتصادی وجود دارد.

برعکس دما، غلظت اسید در محدوده ۱۰۰ تا ۱۸۰ گرم در لیتر تأثیر کمی بر سرعت اسیدشویی دارد. زیر غلظت ۱۰۰ گرم در لیتر، اسیدشویی کندتر و بالای غلظت ۱۰۰ گرم در لیتر، هجوم اسید به پوسته سخت‌تر، بیشتر بوده ولی به طور قابل ملاحظه‌ای سریع‌تر نمی‌باشد. شکل ۱ نشان می‌دهد که غلظت کمتر اسید باعث افزایش انحلال‌پذیری آهن می‌شود بنابراین می‌توان از دماهای بالاتر بدون ایجاد مشکلات تبلور سولفات آهن، استفاده نمود. همچنین استفاده از کمترین غلظت ممکن اسید باعث کاهش تلفات اسید به علت بخار شدن و تلفات خروجی می‌شود، که خود باعث کاهش هزینه‌های رفع آلودگی و زیان محیطی می‌شود. بنابراین، در اغلب اسیدشویی‌ها، غلظت اسید در محدود ۱۲۰ تا ۱۵۰ گرم در لیتر می‌باشد.

جلوگیری از افزایش مقدار آهن موجود در اسید مصرفی بسیار مهم است. مطابق شکل ۱، اگر در یک دما و غلظت معین اسید، آهن به حد انحلال برسد، مونویدرات فرو سولفات در مخزن و برروی فولاد تمیز شده رسوب می‌کند. این رسوب بسیار سخت و برداشتن آن بسیار دشوار است. در هنگام خروج کلاف میلگرد از مخزن اسیدشویی که به علت غلظت موضعی زیاد اسید باقی‌مانده از تبخیر، غلظت آهن نزدیک ولی هنوز کمتر از حد انحلال‌پذیری مخزن است، امکان تشکیل مونویدرات روی فولاد تمیز (به صورت یک لایه نسبتاً سفید) وجود دارد. زمان اسیدشویی بستگی به دمای اسید، نوع فولاد و باز یا بسته بودن کلاف‌ها برای اسیدشویی دارد. زمان اسیدشویی می‌تواند از پنج دقیقه برای پوسته‌زدایی مفتول آنیل شده تا بیش از یک ساعت برای اسیدشویی مقادیر سنگین کلاف‌های فولاد کم آلیاژ تغییر کند. درجات بالاتر کربن، مقادیر سبک‌تر و فولادهای ساده کربنی، سریع‌تر اسیدشویی می‌شوند. یک نمونه محدوده‌های زمان اسیدشویی در جدول ۱ نشان داده شده است.

نوع کلاف	زمان اسیدشویی (دقیقه)
مفتول آنیل شده - فولاد کربنی	۵ - ۱۰
کم آلیاژ	۱۵ - ۲۰
میلگرد خام، پر کربن، تا ۰/۵ اینچ	۱۵ - ۲۰
بالای ۰/۵ اینچ	۲۵ - ۳۰
میلگرد خام، کم کربن، تا ۰/۵ اینچ	۲۵ - ۳۰
بالای ۰/۵ اینچ	۴۵ - ۶۰
میلگرد خام، کم کربن	۴۵ - ۶۰+

جدول ۱- نمونه زمان‌های اسیدشویی

به دلیل این‌که پیش‌بینی زمان‌های دقیق اسیدشویی غیرممکن است، زمان‌های اشاره شده تنها یک نمونه زمان‌های اسیدشویی هستند.

دلیل این امر این است که زمان اسیدشویی برای یک کلاف برمبنای میانگین سرعت برداشتن پوسته نمی‌باشد، بلکه برمبنای زمان لازم برای برداشتن پوسته از تمام قسمت‌های کلاف می‌باشد.

این زمان، بیشتر از این که به میانگین سرعت پوسته‌زدایی بستگی داشته باشد، به محکم بسته شدن کلاف یا باز بودن آن در حین اسیدشویی و سهولت نفوذ اسید به فواصل بین حلقه‌های کلاف بستگی دارد. معمولاً در تست‌های آزمایشگاهی اسیدشویی، فولاد تمیز در یک سوم تا یک پنجم زمان لازم برای اسیدشویی کامل کلاف میلگرد در فرآیند واقعی، حاصل می‌گردد.

یک حالت غیرمتعارف در اسیدشویی با اسیدسولفوریک این است که یک مخزن اسید تازه تهیه شده بدون هیچ آهن حل شده، سرعت اسیدشویی خیلی کمی دارد تا زمانی که مقداری آهن در اسید حل شود. برای جلوگیری از این مشکل، بهتر است که مقداری اسید مصرف شده در مخزن باقی بماند تا مقداری آهن در محلول باشد که اسید تازه را آماده نماید.

اغلب اپراتورهای اسیدشویی زمان اضافی مورد نیاز برای اسیدشویی کلاف میلگرد را می‌پذیرند. با این وجود تلاش‌های بسیاری با بکارگیری ابزار مکانیکی مختلف مانند هم زدن اسید در مخزن برای حذف نقاط مرده، حرکت ارتعاشی چنگک‌های اسیدشویی برای جداسازی نقاط تماس و ریختن پوسته نرم شده توسط حمله اسید، وسایل اولتراسونیک برای تولید آشفستگی موضعی در سطح فولاد، و اسیدشویی الکترولیتی، برای افزایش سرعت اسیدشویی کلاف میلگرد صورت گرفته است. روش‌های ارتعاشی، اولتراسونیک و الکترولیتی به صورت گسترده جنبه تجاری ندارند. ظاهراً به دلیل این که کاهش زمان فرآیند، هزینه‌های سرمایه و عملیات را توجیه نمی‌کنند. عموماً شرکت‌های جدید از این روش‌ها برای بهره بردن از پیشرفت و بازیابی هزینه‌های توسعه استفاده می‌کنند.

هم‌زدن اسید در مخزن گسترده‌ترین روش کاربردی در تسریع سرعت اسیدشویی می‌باشد و یقیناً کمک می‌کند. اگر چه سوال برانگیز است که آیا پیشرفت قابل ملاحظه‌ای از هریک از دو روش‌های هم‌زدن یعنی پاشش هوا یا ایجاد جریان با استفاده از پمپ خروجی، حاصل می‌شود؟ هر دو سیستم نیاز به پشتیبانی تجهیزات اضافی دارند که بهبود زمان اسیدشویی را جبران کند.

زمان‌های اسیدشویی بیش از حد طولانی ممکن است منجر به ایجاد شرایطی به نام فوق اسیدشویی شود که مشخصه آن باقی ماندن یک لایه تیره از دوده لزج روی سطح فولاد است. این

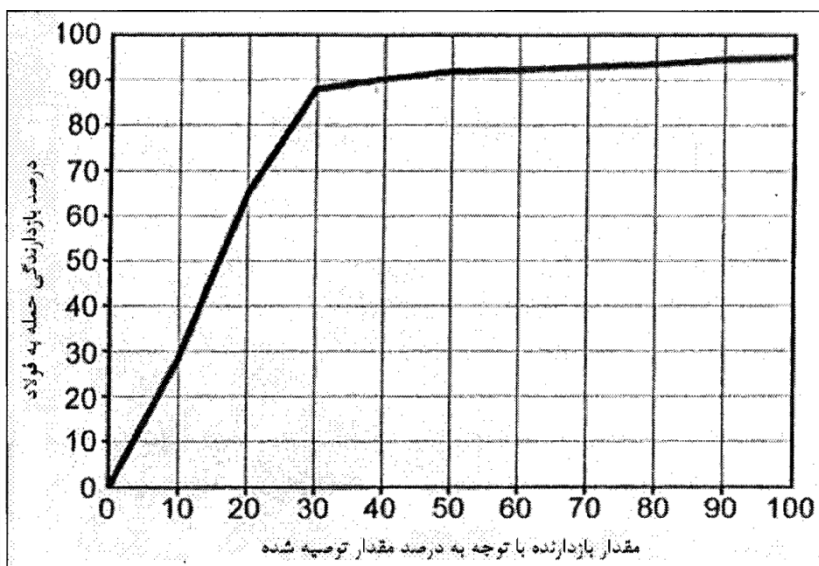
دوده از ذرات ریز و نامحلول کربن به جا مانده از حمله اسید به فلز پایه ایجاد می‌شود. برداشتن دوده فوق‌العاده سخت است.

اسیدشویی با اسید هیدروکلریک: غلظت اسید معمولاً در محدوده ۱۰۰ تا ۱۶۰ گرم در لیتر و درجه حرارت معمولاً بین ۱۲۰ تا ۱۴۰ درجه فارنهایت (۵۰ تا ۶۰ درجه سانتیگراد) می‌باشد. برخی اپراتورها استفاده از اسید غلیظتر (۲۰۰ تا ۲۵۰ گرم در لیتر) را در دمای اتاق ترجیح می‌دهند. در هر دو حالت، محدودیت اصلی در مورد زمان و قدرت اسید، تولید گاز کلرید هیدروژن از سطح مخزن و کلاف‌ها در حین خروجشان از مخزن می‌باشد، توانایی کنترل مؤثر این گازهای اسید هیدروکلریک و مقدار اسید موجود در هوای خروجی، مانع استفاده از دماهای بالاتر و غلظت‌های بیشتر می‌گردد. انحلال‌پذیری فروکلراید در اسید هیدروکلریک برخلاف انحلال‌پذیری فرسولفات در اسید سولفوریک، با افزایش دما کاهش نمی‌یابد. پس دماهای بالاتر منجر به تبلور در مخزن اسید نمی‌شود. غلظت آهن بالاتر از ۱۰۰ تا ۱۲۰ گرم در لیتر در صورت خنک شدن اسید، ممکن است منجر به تشکیل بلورهای تتراهیدرات فروکلراید گردد. اگر چه این بلورها به آسانی در آب گرم قابل حل بوده و مانند بلورهای سولفات آهن مشکلات تصفیه ایجاد نمی‌کنند.

بازدارنده‌ها: بخش قبلی در خصوص خواص شیمیایی اسیدشویی نشان داد که اسید همانند پوسته به فلز پایه نیز حمله می‌کند. در واقع حمله به فلز پایه یک بخش اساسی مکانیزم اسیدشویی در اسیدسولفوریک است. اگر چه، حمله بیش اندازه به فلز پایه که در زمان‌های طولانی اسیدشویی که برای پوسته‌زدایی کامل یک کلاف لازم است رخ می‌دهد، ممکن است باعث ایجاد حفره، مصرف بیش از حد اسید، افت وزن محصول و تشکیل دوده و تردی هیدروژنی گردد. برای جلوگیری از این مشکلات، بازدارنده‌ها به اسید برای کاهش حمله به فلز پایه اضافه می‌شوند. این بازدارنده‌ها معمولاً ترکیبات آلی با سطح فعال هستند، که یک لایه سدی مولکولی روی سطح فولاد تمیز شده ایجاد می‌کنند و در نتیجه در مقابل اسید از سطح محافظت می‌کنند، بازدارنده‌های تجاری دارای فرمول‌بندی اختصاصی هستند که ممکن است شامل عوامل مرطوب‌کننده یا کف‌زا باشند. این مواد به طور مشخص به مقدار ۰/۲۵ تا ۰/۵ درصد حجم اسید تازه (خریداری شده)

اضافه می‌شوند. خوب‌ترین بازدارنده یا نوع بازدارنده وجود ندارد و اغلب آنها به طور مشابه با همدیگر، به صورتی که در شکل ۲ نشان داده شده است عمل می‌کنند. شکل ۲ نشان می‌دهد که بازدارندگی کامل تقریباً در حدود ۳۰٪ مقدار توصیه شده به دست می‌آید، که غیرطبیعی نمی‌باشد. به این دلیل، و به دلیل اختصاصی بودن بازدارنده‌ها، لازم است مصرف‌کننده افزایش مقدار بازدارنده را آزمایش کند تا مقدار مناسب از نظر اقتصادی را پیدا کند.

کنترل بازدارنده می‌تواند در سیستم‌هایی که دستگاه بازیافت اسید دارند مشکل ایجاد کند، زیرا بازدارنده همراه با اسید بازیافت شده به مخزن اسیدشویی برگردانده می‌شود. با این‌که فروشنده خلاف آن را ادعا می‌کند، افزایش غلظت بازدارنده‌ها، اسیدشویی را کند ساخته و نهایتاً آن را کاملاً متوقف می‌نماید. بهترین راه ارزیابی سطح بازدارنده، کنترل کردن تلفات آهن در عملیات اسیدشویی است. کاهش تلفات آهن نشانه قطعی زیاد بودن بازدارنده است.



شکل ۲- بازدارندگی حمله به فلز پایه به عنوان تابعی از غلظت بازدارنده

گاهی اوقات از بازدارنده‌ها با عامل کف‌زا برای کنترل بخارات استفاده می‌شود، اما برای به دست آوردن محصول اسیدشویی شده با بهترین کیفیت، نباید از آنها استفاده نمود. چربی و آلودگی در اسید تمایل به تغلیظ در کف دارند که این امر در هنگام خروج کلاف از مخزن باعث نشست مجدد ناخالصی‌ها یا کف روی فولاد تمیز می‌شود.

تلفات آهن در اسیدشویی: مقدار آهنی که از کلاف در حین عملیات اسیدشویی برداشته می‌شود، پارامتر مهمی است که نشان‌دهنده راندمان فرآیند بوده و برای اندازه‌سازی برخی تجهیزات ضروری می‌باشد. کل آهن برداشته شده برابر است با مجموع آهن موجود در پوسته و آهن پایه‌ای که از سطح تمیز کننده شده است. به طور نمونه برای میلگرد خام، اتلاف آهن در حدود ۰/۷۵ درصد وزن میلگرد (۱۵ پوند بر تن یا ۷/۵ کیلوگرم بر تن) می‌باشد. در کارخانه‌ای که میلگرد خام و مفتول آنیل شده هر دو اسیدشویی می‌شوند، میانگین اتلاف آهن براساس وزن کلی مواد مخلوط تحت فرآیند، حدود ۰/۴۵ تا ۰/۵ درصد می‌باشد. عموماً اتلاف آهن با وزن فولاد اسیدشویی شده نسبت مستقیم دارد نه با سطح آن زیرا میلگرد سنگین‌تر پوسته بیشتری دارد. شکل ۳ محاسبات لازم را برای تخمین اتلاف آهن با استفاده از اطلاعاتی که به سادگی در دسترس بوده یا به سهولت قابل اندازه‌گیری است نشان می‌دهد.

شستشو با آب

پس از اسیدشویی میلگرد یا مفتول، مقداری از اسید مصرفی روی سطح فلز یا در فواصل بین حلقه‌ها باقی می‌ماند. این اسید که تلفات خروجی نامیده می‌شود نباید روی سطح فلز خشک شود زیرا می‌تواند باعث زنگ‌زدگی، حفره‌دار شدن و نشست نمک‌های آهنی شود که باعث تشکیل یک لایه بسیار ضعیف برای عملیات پوشش‌دهی یا کشش بعدی می‌شوند. برای برداشتن این اسید از فولاد، کلاف‌ها در آب شسته شده که باعث رقیق شدن اسید به غلظتی می‌شود که در آن، خسارت وارده به میلگرد یا مفتول فولادی ناچیز است. این امر وقتی رخ می‌دهد که PH در محدوده ۳ تا ۴ باشد. (رجوع شود به ضمیمه B)

می‌توان گفت که شستشو با آب مهمترین عملیات یک خط اسیدشویی است. بدون آبکشی مناسب چیزی به دست نمی‌آید. با این وجود، آبکشی مانند اسیدشویی یک عملیات جامع تمیز

کردن نمی‌باشد زیرا آب‌کشی، اسید باقی‌مانده را از بین می‌برد، اما چربی، رسوب‌های نمک مونوهیدرات و دوده را از بین نمی‌برد.

محاسبات تقریبی

A مقدار اسید خام مصرف شده بازای هر تن کلاف میلگرد اسید شویی شده پوند

B وزن آهن در ۱۰۰ CC اسید مصرف شده

C وزن اسید در ۱۰۰ CC اسید مصرف شده

D غلظت اسید خریداری شده (۹۳٪ برای اسید سولفوریک، ۳۲٪ برای اسید فسفریک)

F ضریب (۱/۷۵ برای اسید سولفوریک، ۱/۳ برای اسید فسفریک)

(نکته: اگر سیستم شامل بازیافت اسید باشد، در این حالت: C=۰)

$$\text{تلفات آهن در اسیدشویی} = \frac{A}{F} \times \frac{D}{100} \left(\frac{B}{C/F+B} \right) = - \frac{A}{100} \left(\frac{BD}{C+BF} \right) = E = \text{lb./ton}$$

بدلیل اینکه تاثیر تلفات خروجی در نظر گرفته نشده، این عدد کمی بالا است

$$\text{اسید مصرفی تولید شده} = \frac{0.9 \times E}{B \times 0.0833} = \text{gal./ton}$$

ضریب ۰/۹ در بیشتر عملیات معمولی برای تلفات خروجی صدق می‌کند

تلفات آهن

(با بازیابی اسید، روش تناوبی)

G مقدار نمک تولید شده به ازای هر تن کلاف میلگرد اسیدشویی شده پوند

$$\text{تلفات آهن} = \frac{G \times 56}{278} = \text{lb./ton}$$

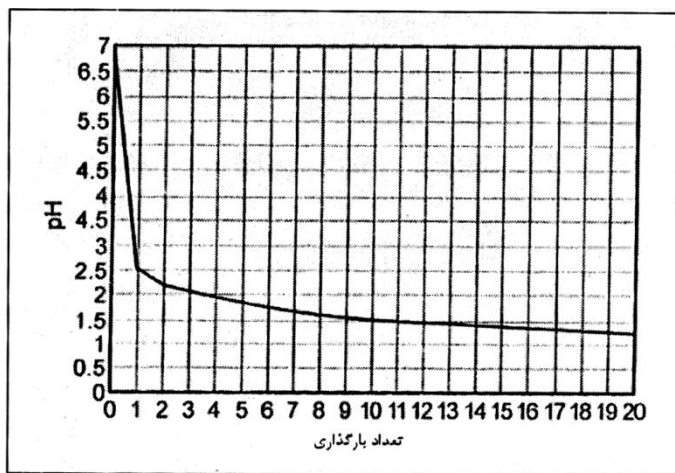
بدلیل اینکه تاثیر تلفات خروجی در نظر گرفته نشده، این عدد کمی پایین است

شکل ۳ - روش محاسبه تلفات آهن در خط اسیدشویی

مقدار آب لازم برای آب‌کشی خوب متناسب است با مقدار اسید به‌جا مانده روی سطح کلاف، پس کمینه کردن مقدار اسید باقی‌مانده مهم می‌باشد. جهت کم کردن مصرف آب، اگر کلاف در مدت زمان طولانی خشک شود، ممکن است باعث خشک شدن موضعی و مشکلات دیگری شود که

هدف از انجام آبکشی، جلوگیری از آنها می‌باشد. مقدار مطلوب تلفات خروجی اسید از مخازن اسیدشویی به طور نمونه در حدود ۲ تا ۵ گالن بر تن (۸ تا ۲۱ لیتر بر تن) فولاد است. آبکشی غوطه‌وری یا آبکشی پاششی دو روش شستشوی اسید از فولاد هستند. در آبکشی غوطه‌وری کلاف فولادی درون یک مخزن آب غوطه‌ور می‌شود تا اسید رقیق شود. در آبکشی پاششی، آب به روی سطح کلاف‌ها پاشیده می‌شود تا اسید رقیق شده و از کلاف جدا شود. هر دو روش از مزایایی برخوردارند.

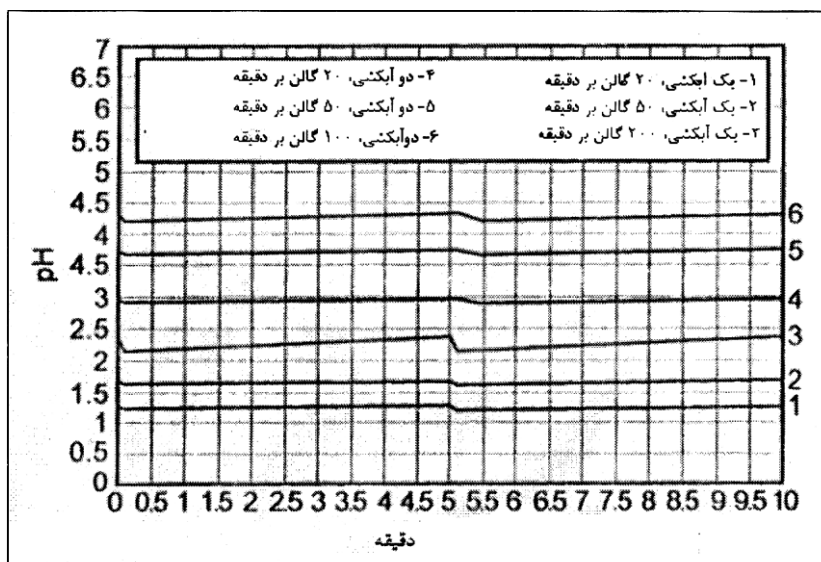
آبکشی غوطه‌وری: اطمینان می‌دهد که تمام قسمت‌های کلاف درون آب غوطه‌ور شده است اما یک مخزن آبکشی غوطه‌وری هیچوقت کاملاً تمیز نمی‌باشد. شکل ۴ نشان می‌دهد که چگونه PH در یک مخزن آبکشی ساکن تغییر می‌کند. پس از آبکشی مواد نوبت اول، مخزن هنوز به طور غیرقابل قبولی اسیدی است. (PH: ۲/۵) و اسیدیته با آبکشی مواد به طور متوالی، افزایش می‌یابد. (PH کم می‌شود)



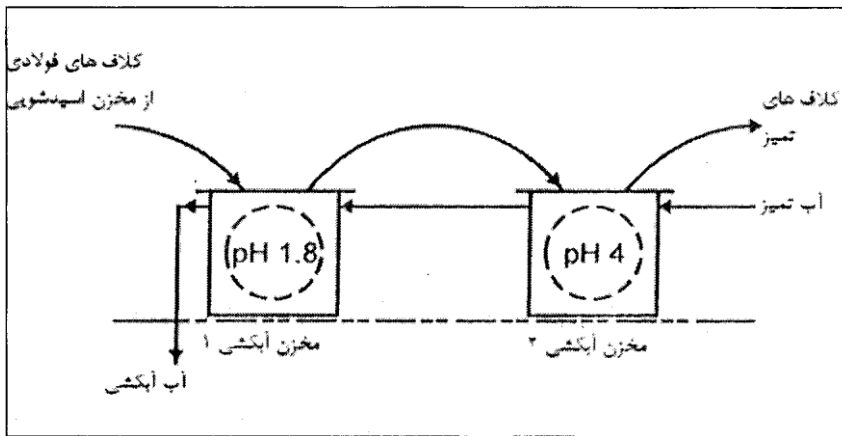
شکل ۴- PH مخزن آبکشی در آبکشی ساکن

حتی ریختن یک جریان قوی پیوسته آب در مخزن آبکشی غوطه‌وری تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی اسیدیته مخزن آبکشی نمی‌گذارد. نمودارهای ۱ و ۳ در شکل ۵ نشان می‌دهد که افزایش سرعت جریان از مقدار قابل قبول ۲۰ گالن در دقیقه تا مقدار غیرقابل قبول ۲۰۰ گالن در دقیقه تنها PH

حالت دائمی مخزن آبکشی را از ۱/۳ تا ۲/۳ افزایش می‌دهد که هنوز هم به مقدار کافی برای آبکشی تمیز نیست. دلیل این امر به نسبت رقیق‌سازی برمی‌گردد. نرمالیت‌ه یک مخزن آبکشی (رجوع شود به ضمیمه B) به طور نمونه حدود ۳ و نرمالیت‌ه آب شستشو وقتی PH آن ۴ است، 10^{-4} می‌باشد. پس نسبت رقیق‌سازی لازم برای شستن اسید $30000 = 10^{-4} \div 3$ می‌باشد. یعنی هر لیتر اسید باقی‌مانده روی کلاف به ۳۰۰۰۰ لیتر آب شستشو نیاز دارد تا آبکشی رضایت‌بخش حاصل گردد. از شکل ۵ که در آن هر ۵ دقیقه ۲ گالن اسید مطابق با ۰/۴ گالن در دقیقه به مخزن آبکشی اضافه می‌گردد، جریان آبی معادل $12000 = 0/4 \times 30000$ گالن در دقیقه آب لازم است تا PH مخزن در مقدار ۴ ثابت بماند. چنین مقادیر زیادی آب برای شستشو هم از نظر زیست محیطی و هم از نظر اقتصادی غیرقابل قبول می‌باشد. بنابراین معمولاً در خطوط اسیدشویی از آبکشی با جریان مخالف چند مرحله‌ای برای کاهش مصرف آب استفاده می‌شود.



شکل ۵ - تأثیر جریان آب و تعداد دفعات آبکشی روی PH در آبکشی غوطه‌وری



شکل ۶- آبکشی با جریان مخالف دو مرحله‌ای

این کار شامل شستشوی کلایف‌ها بیش از یک بار در مخزنی است که در آن آب در جهات مخالف با کلایف‌ها جریان دارد. به عنوان مثال در یک آبکشی دو مرحله‌ای، کلایف خروجی از مخزن اسیدشویی، در مخزن آبکشی که آب آن از مخزن آبکشی دوم تأمین شده و کمی آلودگی دارد، آبکشی می‌شود. تلفات خروجی باقی‌مانده روی کلایف پس از این آبکشی هنوز هم بسیار اسیدی است اما غلظت آن خیلی کمتر از غلظت تلفات خروجی مخزن اسیدشویی می‌باشد. نتیجتاً، در آبکشی دوم که از آب تازه استفاده می‌شود، اسید خیلی کمتری وارد می‌شود و عملیات در **PH** مطلوب ۴ انجام می‌گیرد. قانون کلی برای مصرف آب در آبکشی چند مرحله‌ای عبارت است از:

$$\frac{1}{n} (\text{نسبت رقیق‌سازی کلی لازم}) \times (\text{نرخ تلفات خروجی}) = \text{نرخ جریان آب}$$

که در آن n تعداد مراحل آبکشی می‌باشد.

با استفاده از مثال فوق، جریان آب لازم برای یک آبکشی دو مرحله‌ای مطابق زیر محاسبه می‌گردد:

$$\text{نرخ جریان آب} = (0.4 \times 30000)^{1/2} = 12/5 \text{ gpm}$$

در این محاسبات فرض بر این است که آبکشی و اختلاط به طور کامل صورت گرفته باشد، لذا این محاسبات تقریبی می‌باشند. در عمل، آب لازم برای آبکشی مطلوب ممکن است بسته به طراحی مخزن و صحت تخمین تلفات خروجی، ۲۰٪ بیشتر یا کمتر از مقدار محاسبه شده باشد.

بهترین تعداد مراحل آبکشی از توازن بین زمان فرآیند اضافی و هزینه تجهیزات اسیدشویی در مقابل هزینه آب لازم و افزایش اندازه مکان لازم برای عملیات حاصل می‌گردد که معمولاً از دو یا سه مرحله استفاده می‌شود.

آبکشی پاششی: این روش مانند روش آبکشی غوطه‌وری به آسانی با یک عملیات با جریان مخالف چند مرحله‌ای سازگار نمی‌شود. اگر چه برخی مزایا را دارا می‌باشد زیرا به دلیل پاشش آب روی کلاف، اسید مصرفی را به تدریج رقیق می‌نماید و آن را از سطح فولاد جدا می‌سازد. در آبکشی پاششی از آب استفاده بهتری می‌شود اما تماس دادن آب با حلقه‌های مخفی کلاف دشوار است و ممکن است گاهی منجر به باقی ماندن قسمت‌های آبکشی نشده شود. به این دلیل، بیشتر کسانی که از روش آبکشی پاششی استفاده می‌کنند، پس از آن آبکشی غوطه‌وری را نیز انجام می‌دهند.

انجام مرحله نهایی آبکشی در PH خیلی بالا تکنیک خوبی نمی‌باشد. آهن در محلول با PH کمتر از ۴/۸ باقی می‌ماند، بنابراین انجام آبکشی نهایی در PH کمتر از این مقدار از تشکیل هیدروکسید آهن جلوگیری می‌کند. اضافه کردن عامل خنثی کننده به آبکشی توصیه نمی‌شود زیرا هیدروکسید آهن ته‌نشین شده و باعث کثیف شدن سطح فولاد و ضعیف شدن عملیات پوشش‌دهی یا کشش بعدی می‌گردد.

در برخی خطوط اسیدشویی برای بهبود آبکشی، ماده کمکی آبکشی اضافه می‌گردد. مواد کمکی آبکشی معمولاً حاوی عوامل مرطوب‌کننده برای بهبود خشک کردن کلاف و عوامل کی‌لیت‌ساز برای جلوگیری از ته‌نشینی هیدروکسید آهن در آبکشی می‌باشند. استفاده از ماده کمکی آبکشی برای حصول آبکشی مطلوب ضروری نیست.

دوده‌زدایی: گاهی مفتول آنیل شده با دوده یا رنگ سیاهی پوشیده می‌شود که در اسیدشویی از بین نمی‌رود. در چنین مواردی یک مرحله دوده‌زدایی لازم است. دوده‌زدایی در یک محلول قلیایی گرم به طور نمونه شامل ۲ تا ۵ درصد پرمنگنات پتاسیم و ۶ تا ۱۰ درصد هیدروکسید سدیم صورت می‌گیرد. در این محلول حداقل نسبت ۲ به ۱ هیدروکسید سدیم به پرمنگنات پتاسیم و دمای ۱۹۰ تا ۲۰۵ درجه فارنهایت (۸۸ تا ۹۶ درجه سانتیگراد) می‌بایست حفظ گردد. برای حفظ

انرژی و اجتناب از تبخیر بیش از حد از سطح مخزن، عملیات باید در کمترین دمایی که تمیزکنندگی مطلوب کلاف را به دست می‌دهد انجام شود.

رنگ محلول مناسب برای دوده‌زدایی بنفش می‌باشد. اگر رنگ محلول به سمت سبز متمایل گردد، خصلت قلیایی (غلظت هیدروکسید سدیم) خیلی بالا بوده و فعالیت محلول کاهش می‌یابد. معمولاً برای دوده‌زدایی، کلاف به مدت چند دقیقه اسیدشویی و سپس آبکشی می‌شود (یک مرحله کافی است) و به مدت پنج تا ده دقیقه در محلول دوده‌زدایی غوطه‌ور می‌شود. پس از دوده‌زدایی، کلاف بدون آبکشی به مدت یک دقیقه به مخزن اسیدشویی منتقل شده و سپس کاملاً آبکشی می‌شود. وقتی مقدار دوده کلاف‌ها زیاد باشد، می‌توان آنها را بدون انجام اسیدشویی اولیه مستقیماً در مخزن دوده‌زدایی غوطه‌ور نمود. از مخزن دوده‌زدایی می‌توان برای از بین بردن دوده حاصل از اسیدشویی زیاد نیز استفاده نمود.

پوشش دهی

آهک پوشی: اکثر میلگردهای خام پس از اسیدشویی و آبکشی، آهک‌پوشی می‌شوند. آهک‌پوشی برای محافظت سطح تمیز از زنگ زدن، عمل کردن به عنوان حامل روانکار برای پایدارتر ساختن روانکار عملیات کشش، و کاهش احتمال خروج روانکار از دوزه کشش به خارج مورد استفاده قرار می‌گیرد. آهک نباید به عنوان یک عامل خنثی کننده برای اسید باقی مانده روی کلاف‌های میلگرد پس از آبکشی ناقص استفاده شود چرا که منجر به انباشتگی هیدروکسید آهن در مخزن آهک (با تغییر رنگ آن به قهوه‌ای) و آخال اکسید آهن ساینده در آهک‌پوشی می‌گردد.

آهک مورد استفاده برای پوشش دهی، هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2 می‌باشد. برخی کارخانجات مخصوصاً تولیدکننده‌های کوچک‌تر که نیاز به مقادیر کم هیدروکسید کلسیم دارند، از هیدروکسید کلسیم تجاری برای مفتول کشش سرد استفاده می‌کنند. با این وجود اکثر کارخانجات از اکسید کلسیم استفاده می‌کنند، که توسط آبدیده کردن به هیدروکسید کلسیم تبدیل می‌شود. هیدروکسید کلسیم تقریباً در آب نامحلول است (حلالیت حدود ۰/۰۸ درصد در آب داغ) بنابراین مایع مورد استفاده برای آهک‌پوشی میلگرد، تعلیقی از ذرات آهک در آب است. معمولاً حمام آهک حاوی ۲ تا ۱۰ درصد هیدروکسید کلسیم و دمای آن عموماً در ۱۷۶ تا ۱۹۴ درجه فارنهایت (۸۰ تا ۹۰ درجه

سانتیگراد) حفظ می‌شود. دلیل گرم نگه داشتن حمام آهک، افزایش سرعت خشک شدن محلول روی کلاف فولادی پس از خارج کردن آن از مخزن می‌باشد. معمولاً برای نشانیدن پوشش آهک روی کلاف‌ها، آنها را چند بار در آهک غوطه‌ور می‌نمایند به طوری که امکان خشک شدن کلاف‌ها بین هر بار غوطه‌وری وجود داشته باشد. با نصب یک پنکه روی جرثقیل، هوا به درون کلاف غوطه‌ور شده دمیده می‌شود و خشک شدن آن تسریع می‌گردد. برای پوشش‌دهی خوب، آماده‌سازی و نگهداری حمام آهک بسیار مهم می‌باشند. در ضمیمه C، اطلاعات مربوط به تکنیک‌های خوب برای آبدیده کردن و روش‌های جلوگیری از تشکیل نمک‌ها در مخزن آهک شرح داده شده است.

سه مشکل اصلی حمام‌های آهک عبارتند از: نگهداری آهک در حالت تعلیق، گرم نگه داشتن حمام و کمینه کردن تلفات سرریز. با وجود این‌که آماده‌سازی آهک، همانطور که در ضمیمه C شرح داده شده، می‌تواند سرعت ته‌نشینی ذرات را کاهش دهد، اما برای به دست آوردن یک تعلیق یکنواخت باید هم زدن مناسب در مخزن آهک انجام گیرد. روش‌های مورد استفاده شامل استفاده از هواپاش‌ها، پمپ‌های گردش مجدد و همزن‌های مکانیکی می‌باشد. از میان این سه روش، قرار دادن یک همزن مکانیکی در یک قسمت جداگانه در انتهای مخزن بهترین حالت هم زدن با کمترین تعمیرات را ایجاد می‌نماید. هواپاش‌ها ارزان هستند، اما نیاز به تمیز کردن و تعمیرات منظم دارند. سیستم گردش خارجی مواد مخزن آهک باعث خرابی پمپ و گرفتگی لوله‌ها توسط پوسته سولفات کلسیم حاصل از واکنش بین اسید باقی‌مانده روی فولاد و آهک می‌شود. دوغاب‌های آهکی به دلیل وجود ته مانده ماسه در آهک بسیار ساینده هستند، لذا تجهیزات مکانیکی در عملیات آهکی شدیداً نیاز به تعمیر دارند.

مخازن آهک عموماً در جهان با استفاده از پاشش بخار زنده گرم می‌شوند. سیم‌پیچ‌های حرارتی لوله‌ای یا صفحه‌ای در مخازن آهک سریعاً یک پوشش سولفات کلسیم پیدا کرده و بی‌اثر می‌شوند. پاشنده‌ها ارزان بوده و به آسانی تعمیر می‌شوند با این حال برخی اقدامات پیشگیرانه برای اجتناب از تبلور آهک به دلیل دمای بالای پاشنده لازم می‌باشد (رجوع شود به ضمیمه C). عیب پاشش بخار این است که پس از سرد شدن در وان آهک تبدیل به آب می‌شود و باعث

سرریز دوغاب آهک می‌گردد. معمولاً این مشکل در صورت تجهیز خط اسیدشویی به سیستم تصفیه، ضایعات ایجاد نمی‌کند زیرا آهک به خنثی‌سازی آب اسیدی آبکشی کمک می‌کند. نصب یک لوله بزرگ نزدیک ته مخزن و بالا بردن آن در خارج از مخزن درست تا زیر سطح سرریز شدن مایع، تلفات آهک ناشی از سرریز را به حداقل می‌رساند. این امر امکان ته‌نشینی مجدد ذرات آهک را در مخزن قبل از سرریز شدن محلول شفاف (آب آهک) حاوی آهک محلول، فراهم می‌نماید.

پوشش فسفاتی: سه نوع اصلی پوشش‌های فسفاتی عبارتند از آهن، منگنز و روی تولید شده با استفاده از محلول اسید فسفریک، فسفات فلز و عوامل تسریع‌کننده. امروزه از پوشش‌های فسفات آهن و منگنز زیاد استفاده نمی‌شود. پوشش‌های فسفات آهن، پوشش با وزن یا نوع مورد نظر را تولید نمی‌کند و در پوشش‌های فسفات منگنز واکنش کندتر، مصرف پرهزینه‌تر و کنترل آن سخت‌تر می‌باشد. پوشش‌های فسفات روی معروف‌تر بوده و به عنوان حامل روانکار برای بیشترین عملیات کشش، نظیر کاهش‌های شدید مفتول‌های فولادی پرکربن به کار می‌رود.

ترکیبات فسفات: روانکار دارای فرمول‌بندی اختصاصی بوده و هر فروشنده شرایط عملیات را برای پوشش‌دهی خوب مشخص کرده است. بنابراین، توصیه‌های تأمین‌کنندگان پوشش همیشه جایگزین راهنمایی‌های ارائه شده در زیر می‌گردد.

تکنیک پوشش فسفاتی فوب چهارگام عملیاتی دارد: پیش گرم کردن، پوشش‌دهی فسفاتی، آبکشی و خنثی‌سازی، پوشش فسفاتی سریعاً پس از اسیدشویی و آبکشی انجام می‌شود، بنابراین فولاد در هنگام ورود به محلول داغ فسفات، سرد می‌باشد. طراحی یک سیستم گرم‌کننده مخزن فسفات برای گرم کردن فولاد امکان‌پذیر می‌باشد. اگر چه، با انجام این کار، زمان غوطه‌وری در مخزن فسفات افزایش می‌یابد، فسفات بیشتری مصرف می‌شود و لجن فسفات بیشتری تولید می‌شود. پیش گرم کردن فولاد قبل از ورود آن به حمام فسفات باعث اجتناب از این ناکارایی‌ها می‌شود. پیش گرم کردن را می‌توان در دومین آبکشی گرم (غوطه‌وری) یک سیستم آبکشی دو مرحله‌ای انجام داد، که این راه باعث ذخیره هزینه تجهیزات و زمان عملیات می‌گردد.

حمام پوشش‌دهی فسفات روی مخلوطی اختصاصی از فسفات روی $[Zn_3(PO_4)_2]$ ، اسیدفسفریک (H_3PO_4) به همراه دیگر ترکیبات مختلف شیمیایی جزئی می‌باشد که برای ایجاد رسوب خوب فسفات روی سطح فولاد طراحی شده‌اند. پوشش‌های فسفات روی توسط واکنش‌های شیمیایی زیر تولید می‌شوند:

- اسید فسفریک موجود در حمام توسط یک واکنش اسیدشویی به فولاد حمله می‌کند.
- در لایه نازک محلول درست مجاور سطح فولاد مقدار PH به قدری افزایش می‌یابد ($PH > 3$) که فسفات روی دیگر نمی‌تواند به صورت محلول باقی‌ماند.
- فسفات روی به صورت نمک، روی سطح فولاد رسوب می‌کند..

در حین واکنش اسیدشویی غلظت یون فرو (Fe^{2+}) در حمام فسفات افزایش می‌یابد که باعث به تأخیر افتادن واکنش اسیدشویی و متوقف شدن فرآیند فسفات‌دهی می‌شود. عوامل اکساینده مانند نیتريت یا کلريت یون‌های فرو (Fe^{2+}) را به یون‌های فریک (Fe^{3+}) اکسید کرده و باعث می‌شود که به همراه اسیدفسفریک رسوب کرده و تشکیل لجن فسفات‌دهنده. به این صورت آهن از محلول خارج شده و فسفات کردن می‌تواند ادامه یابد. ته‌نشین شدن لجن ضروری است، چرا که چسبیدن لجن به فولاد می‌تواند باعث تولید پوشش ضعیف و غیریکنواخت شود. به این دلیل، مخازن پوشش‌دهی فسفات نیاز به گنجایش اضافی برای تأمین فضای لازم برای جمع‌آوری لجن فسفات دارند. مخازن نیاز به تمیز کردن منظم دارند و هرگز نباید هم زده شوند. به طور نمونه به ازای هر تن فولاد پوشش داده شده، حدود ۱ پوند (۰/۵ کیلوگرم) لجن فسفات تولید می‌شود.

حمام فسفات روی معمولاً در دمای حدود ۱۶۰ تا ۱۸۰ درجه فارنهایت (۷۱ تا ۸۲ درجه سانتیگراد) کار می‌کند. برای کشش مفتول، وزن پوشش به طور نمونه محدوده ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ mg/ft^2 (۵۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ mg/m^2) می‌باشد و به وسیله ۵ تا ۱۰ دقیقه غوطه‌وری حاصل می‌گردد. فولاد باید پس از پوشش‌دهی فسفاتی به منظور جابه‌جایی هرگونه محلول باقی‌مانده، آبکشی شود. به دلیل این که فولاد یک پوشش محافظ فسفات روی دارد، شدت ملزومات آبکشی پس از پوشش‌دهی کمتر از آبکشی پس از اسیدشویی است، لذا از پاشش یا غوطه‌وری در آب سرد استفاده می‌شود. فولاد پس از آبکشی در یک محلول قلیایی بسیار رقیق فرو می‌رود تا

هرگونه اثر باقی مانده از اسید ختشی گردد. ختشی کننده می تواند یک ماده شیمیایی اختصاصی یا محلول رقیق (۱٪) یک ماده قلیایی ملایم مانند بوراکس باشد. ضمیمه D جزئیات اطلاعات مربوط به پوشش های فسفاتی را در بردارد.

پوشش روانکار: امروزه رایج ترین پوشش مورد استفاده در کشش مفتول، یک روانکار واکنشی است که معمولاً یک صابون استارات می باشد که توسط واکنش با حامل فسفات به سطح فولاد می چسبد تا یک پوشش روانکار استارات روی شکل گیرد. مشابه پوشش های فسفاتی، فرمول بندی پوشش های روانکار در آب قابل حل است و باید گرم نگه داشته شود تا از ژلاتینی شدن آن جلوگیری به عمل آید. پوشش روانکار توسط غوطه وری کلاف ها به مدت ۲ تا ۵ دقیقه در یک محلول صابونی در دمای ۱۶۰ تا ۱۸۰ درجه فارنهایت (۷۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد) و سپس خشک شدن آنها در هوا حاصل می گردد.

مشکلات اصلی محلول های روانکار عبارتند از آلودگی مخازن و تشکیل تفاله صابون (کف) روی سطح. آلودگی مخزن به دلیل هزینه قابل ملاحظه مربوط به جایگزین کردن و دفع مواد شیمیایی از بین رفته در زمان تخلیه مخزن، نامطلوب می باشد. با اطمینان از تمیزی کامل کلاف های ورودی به مخزن و با استفاده از آب با ساختار نرم یا یون زدایی شده جهت جلوگیری از تشکیل صابون های منیزیم و کلسیم نامحلول، می توان از بروز آلودگی ممانعت نمود. تفاله های روی سطح به کلاف چسبیده و تشکیل رسوبات ناخوشایندی می دهند که تمایل به جذب آلودگی داشته و روانکاری ناهمواری را ایجاد می نمایند. تفاله را می توان با طراحی مناسب تجهیزات که بعداً اشاره می شود کنترل نمود.

اخیراً پوشش های روانکار بدون روی توسعه یافته اند که نیازی به زیر لایه فسفات ندارند و با حذف روی، از مشکلات کنترل آلودگی در حوزه هایی که محدودیت وجود روی در فاضلاب دارند، جلوگیری می گردد. طبق نتایج، پوشش های بدون روی، روانکاری بهتری ایجاد می نمایند، اما به طور قابل توجهی گران تر از پوشش های روانکار واکنشی روی حامل فسفات می باشند.

بوراکس: بوراکس، تترابورات سدیم هیدراته ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) است که وقتی ۱۰ مولکول آب در ترکیب هیدراته داشته باشد، بورات دکاهیدراته نامیده می شود. در دمای ۱۴۲ تا ۱۹۰ درجه

فارنهایت (۶۱ تا ۸۸ درجه سانتیگراد) دکاهیدرات تترابورات سدیم برای تشکیل پنتاهیدرات ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) که دارای ۵ مولکول آب می‌باشد، آب زدایی می‌شود. اگر چه به نظر می‌رسد که بوراکس دارای خواص ذاتی روانکاری درحین کشش مفتول باشد، اما از آن زیاد به عنوان یک پوشش برای کشش مفتول و میلگرد فولادی استفاده نمی‌شود. با این حال این ماده یک مزیت منحصر به فرد دارد. خصلت قلیایی آن می‌تواند هرگونه اسید از بین برفته توسط آبکشی را خنثی کند و بدین وسیله از فولاد در برابر خوردگی حفاظت نماید.

در روش مورد بحث، از ۸ تا ۱۹٪ بورات پنتاهیدرات در آب در دمای عملیات ۱۷۶ تا ۲۰۰ درجه فارنهایت (۸۰ تا ۹۳ درجه سانتیگراد) استفاده می‌شود. میلگرد یا مفتول باید آنقدر در حمام بوراکس بمانند تا به دمای محلول برسند. بنابراین، دمای حفظ شده در میلگرد و مقادیر زیاد مفتول برای خشک کردن پوشش کافی است. معمولاً رایج است که مفتول پوشش داده شده را در خشک‌کن‌های شعله‌ای در دمای ۵۵۰ تا ۶۰۰ درجه فارنهایت (۲۸۸ تا ۳۱۶ درجه سانتیگراد) به مدت ۱۵ دقیقه خشک می‌نمایند. زمان خشک شدن نباید بی‌جهت به طول انجامد چرا که خارج کردن تمام آب موجود در بورات هیدراته نامطلوب است.

شرایط خشک کردن مهم است چرا که در دمای زیر ۱۴۰ درجه فارنهایت (۶۰ درجه سانتیگراد) بوراکس با ۱۰ مولکول آب متبلور شده (دکاهیدرات) و در بالای این دما تنها ۵ مولکول آب (پنتاهیدرات) را نگه می‌دارد. بورات دکاهیدرات یک پودر بلورین سفید است و کاملاً به عنوان یک حامل روانکار، نامطلوب می‌باشد، در حالی که بورات پنتاهیدرات یک ماده شیشه‌ای شفاف است که حامل روانکار بسیار بهتری می‌باشد. پوشش پنتاهیدرات می‌تواند به اندازه ده برابر طول اولیه خود بدون این که پوسته پوسته شود یا از مفتول جدا شود، درحین کشش مفتول از دیاد طول دهد. ج.ف. ریچاردز نشان داد که وقتی وایرود از حمام بوراکس با دمای ۲۱۲ درجه فارنهایت (۱۰۰ درجه سانتیگراد) خارج می‌شود، ۱۰ ثانیه و یا در صورتی که دمای حمام ۱۴۰ درجه فارنهایت (۶۰ درجه سانتیگراد) باشد، ۳۰ ثانیه طول می‌کشد تا پوشش بورات پنتاهیدرات تشکیل شود. بورات دکاهیدرات و نه بورات پنتاهیدرات، در آخرین مرحله روی سطح میلگرد تشکیل

می‌شود. مقدار آب حفظ شده توسط بوراکس نه تنها به دمای تبلور پوشش، بلکه به شرایط پخت نیز بستگی دارد.

ممکن است بسته به رطوبت هوا، درحین نگهداری میلگرد یا مفتول با پوشش بوراکس در دمای اتاق مقداری آب جذب شود یا از دست برود. پوشش‌های پنتاهیدرات به مدت چندین هفته در هوا با رطوبت نسبی ۳۰٪ پایدار هستند. پوشش پنتاهیدرات در ۶۸ درجه فارنهایت (۲۰ درجه سانتیگراد) و رطوبت نسبی ۵۸٪، آب جذب کرده و تبدیل به دکاهیدرات می‌شود که باعث خرابی پوشش برای انجام کشش مفتول می‌گردد. یک طرح جدید، استفاده از تترابورات پتاسیم به جای تترابورات سدیم (بوراکس) می‌باشد. نم‌گیری ترکیب پتاسیم کمتر است و در کشش مفتول بسیار سودمند می‌باشد.

از پوشش‌های بوراکس می‌توان به تنهایی بر روی پوشش زنگ آهن یا پوشش فسفاتی استفاده نمود. معمولاً از یک پوشش بوراکس ساده برای فولاد کم کربن یا برای چند مرحله کم، کاهش سطح مقطع فولاد پرکربن استفاده می‌شود. معمولاً کاهش زیاد سطح مقطع فولاد پرکربن نیاز به پوشش زنگ آهن یا پوشش فسفات دارد. گاهی اوقات عوامل خیس کننده به بوراکس اضافه می‌شوند، که باعث بهبود خواص خیس کنندگی شده اما به علت خشک شدن بهتر، ضخامت پوشش را کاهش می‌دهند. تری سدیم فسفات، صابون‌ها، رنگدانه‌ها و امولسیون‌های مومی نیز به یک حمام بوراکس اضافه می‌شوند.

بوراکس یک پوشش قابل قبول برای کشش مفتول می‌باشد. اگر چه، در زمان کشش مفتول با پوشش بوراکس، تا حدی انتخاب روانکار با محدودیت بیشتری نسبت به پوشش آهک مواجه می‌شود. برای کشش مفتول فولادی از صابون‌های ساخته شده از یک فلز (سدیم، پتاسیم، کلسیم یا آلومینیوم) و یک اسیدچرب (استارات پالمیتیت، اولئیت و ...) استفاده می‌شود. مشخص شده است که صابون‌های نامحلول (مانند صابون‌های کلسیم یا آلومینیوم) بیشترین سازگاری را با این نوع حامل روانکار (بوراکس) دارند. صابون‌های حل شدنی سدیم و پتاسیم با پوشش بوراکس تا درجه‌ای واکنش می‌دهند که استحکام لایه درهم شکسته و امکان روانکاری کافی وجود ندارد. با این وجود، این موضوع مشکل غیرقابل حلی نیست چرا که صابون‌های نامحلول را می‌توان به طور

شیمیایی با آهک مخلوط کرد تا صابون‌های محلول مناسب جهت استفاده با پوشش‌های بوراکس تولید گردد.

پوشش مسی: تعداد کمی از کارخانجات کشش مفتول، مفتول‌های اسیدشویی شده را قبل از کشش با مس پوشش می‌دهند. پوشش مسی یک فرآیند تبادل یونی ساده در محلول اسیدی سولفات مس (Cu_2SO_4) می‌باشد. در حین غوطه‌وری، یون‌های مس در محلول آبکاری توسط آهن حل شده از فولاد، احیا شده و روی سطح فولاد مطابق واکنش زیر رسوب می‌کند:



ضخامت پوشش‌های مسی کمتر از $1 \mu\text{m}$ و وزن آنها در محدوده 0.1 تا 0.2 oz/ft^2 (3000 تا 6000 mg/m^2) می‌باشد. پوشش مسی متخلخل است و از زنگ‌زدگی جلوگیری نمی‌کند، بنابراین پس از پوشش‌دهی مسی باید پوشش‌دهی با آهک، بوراکس یا صابون صورت گیرد. در حقیقت، یک پوشش مسی متخلخل، خوردگی گالوانی فولاد زیرین را جلو خواهد انداخت. زمان لازم برای غوطه‌وری در محدوده 2 تا 7 دقیقه در محلول‌های سرد (زیر 120 درجه فارنهایت یا 50 درجه سانتیگراد) و 0.5 تا 2 دقیقه در دمای 120 تا 150 درجه فارنهایت (50 تا 65 درجه سانتیگراد) می‌باشد. غوطه‌وری به مدت طولانی ممکن است منجر به تولید پوشش‌های ترد یا حفره‌زایی شود. با انجام عملیات در دماهای بالاتر پوشش‌های روشن‌تر ایجاد می‌شود.

محلول مس کاملاً رقیق است و معمولاً حاوی 2 تا 12 گرم در لیتر مس و 10 تا 100 گرم در لیتر اسیدسولفوریک آزاد می‌باشد. در دماهای کمتر، غلظت‌های بالاتر مورد مصرف می‌باشد. با گذشت زمان، محلول با آهن اشباع شده و پوشش‌دهی مس را کند می‌سازد. در این زمان باید حمام آبکاری تعویض گردد.

خشک‌کردن: بعضی از انجام دهندگان این عملیات، کلاف‌ها را پس از پوشش‌دهی با آهک یا بوراکس، خشک می‌کنند. در کلاف‌های آهک‌پوشی شده، خشک کردن کامل پوشش آهکی بر روی کلاف‌هایی انجام می‌شود که باید برای فرآیندهای بعدی انبار شوند، مخصوصاً در آب و

هوای گرم و مرطوب. پوشش‌های بوراکس در دماهای بالای ۱۴۰ درجه فارنهایت (۶۰ درجه سانتیگراد) به منظور اطمینان از این‌که پوشش بوراکس، بورات پتاهیدرات باشد خشک می‌شود. گرم‌کن‌ها، کوره‌های بسته با شعله مستقیم هستند که از میان آنها گازهای احتراقی داغ به طور پیوسته جریان دارد تا کلاف‌ها را تا دمای بین ۴۵۰ تا ۶۰۰ درجه فارنهایت (۲۳۰ تا ۳۱۵ درجه سانتیگراد) گرم نماید. محدوده زمانی خشک کردن بین ۶ تا ۱۵ دقیقه می‌باشد. گرم‌کن‌ها معمولاً از بالا بارگذاری می‌شوند تا با مخازن فرآیندهای دیگر همخوانی داشته باشند، و برای کاهش تلفات حرارتی به درپوش‌های چرخان تعادلی مجهز هستند.

آنالیز و کنترل فرآیند

برای سازگاری اسیدشویی و پوشش‌دهی، کنترل ترکیب و دمای حمام‌های مختلف امری اساسی است. کنترل با شناخت ترکیب فعلی حمام آغاز می‌شود و این نیاز به آنالیز دارد. بیشتر حمام‌های اسیدشویی توسط روش‌های شیمی تر مانند تیتراسیون، توسط اپراتور خط اسیدشویی در آزمایشگاهی واقع در نزدیکی خط اسیدشویی آنالیز می‌شوند. حتی در کارخانجاتی که روش‌های آنالیز ابزاری دارند، قابلیت تیتراسیون دستی برای بررسی کالیبراسیون لازم است. روش‌های تحلیلی نیاز به حداقل تجهیزات و واکنشگرهایی دارند که به سهولت در دسترس باشند. این روش‌ها توسط آموزش مناسب به سادگی قابل یادگیری می‌باشند.

روش‌های تحلیلی برای محلول‌های اختصاصی نظیر فسفات و روانکارها بستگی به محصول تجاری داشته و معمولاً توسط فروشنده تهیه می‌شوند. در ضمیمه D یک راهنمای عمومی برای آنالیز حمام فسفات آورده شده است. روش‌های ویژه برای آنالیز حمام‌های اسیدشویی و پوشش‌دهی در ضمیمه E موجود می‌باشد.

ترکیب حمام به آرامی در طول عملیات تغییر می‌کند و تیتراسیون انجام شده در شرایط فرآیند تا حدود $\pm 0.05\%$ دقیق می‌باشد. بنابراین تکرار آنالیزها نباید بیشتر از زمان لازم برای تغییر حمام در حدود 0.05% ، که معمولاً حدود ۴ ساعت است، باشد. در عمل، تأثیر ترکیب حمام بر راندمان اسیدشویی آنقدر کم است که یک آزمایش در هر شیفت می‌تواند کافی باشد. در کارخانجاتی که

دارای امکانات بازسازی پیوسته اسید هستند، ترکیب اسید بازیابی شده و همچنین ترکیبات حمام اسیدشویی باید بررسی شود.

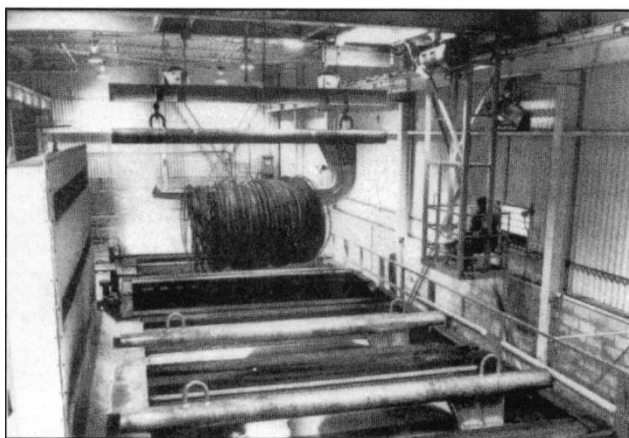
بسیاری شرکت‌ها به منظور کاهش ملزومات نیروی انسانی عملیاتی، تمایل به استفاده از روش‌های آبی یا غیرمستقیم آنالیز اسید دارند. متأسفانه، کنترل‌های ساده نظیر رسانایی سنج‌ها نتایج صحیحی به دست نمی‌دهند و هزینه خرید و نگهداری وسایل دقیق‌تر نظیر تیتراکننده اتوماتیک نیز بسیار بالا است. در تجهیزات اسیدشویی، تمیزنگه‌داشتن سنسورها و تجهیزات نمونه‌گیری و نیز درست کار کردن نیاز به تلاش قابل توجهی دارد. علاوه بر این، کنترل‌های اتوماتیک نیز برای کالیبراسیون نیاز به آنالیزهای شیمی‌تر دارند. به طور کلی، آنالیز دستی در فواصل مناسب، اقتصادی‌ترین فرآیند تحلیلی برای کنترل حمام‌های اسیدشویی می‌باشد.

برعکس، دمای حمام می‌تواند خیلی سریع تغییر کند و تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر انجام اسیدشویی دارد. به همین دلیل، برای ثابت نگه داشتن دما باید همواره از کنترل‌های تنظیمی اتوماتیک استفاده نمود. در صورت نیاز، کنترل روشن - خاموش بودن قابل قبول است، اما به قدر کافی رضایت‌بخش نمی‌باشد. اغلب مخازن خطوط اسیدشویی با استفاده از بخار گرم می‌شوند، بنابراین کنترل تنظیمی می‌تواند بدون تجهیزات پیچیده، با استفاده از شیر کنترل خودکار پر شده از مایع روی منبع بخار انجام گیرد.

تجهیزات اسیدشویی و پوشش‌دهی

در اکثر خطوط اسیدشویی میلگرد و مفتول، کلاف‌های میلگرد به‌طور دسته‌ای در مخازن باز مورد فرآیند قرار می‌گیرند. کلاف‌ها روی چنگک‌های اسیدشویی (که میله یا چنگک C شکل نیز نامیده می‌شوند)، متصل به چنگک‌های متحرک روی یک جرثقیل، بین مخازن حمل می‌شوند. (شکل ۷)

مزیت اسیدشویی دسته‌ای این است که کاملاً انعطاف‌پذیر بوده و می‌تواند فرآیند را روی مجموعه‌ای از کلاف‌ها با اندازه، معیار و وزن مختلف، در هر ترتیبی با حداقل آماده‌سازی و تمهیدات انجام دهد.



شکل ۷- سیستم اسیدشویی دسته‌ای کلاف

رایج‌ترین چیدمان طوری است که در آن مخازن اسیدشویی در یک خط مستقیم و کلاف‌ها به صورت عمودی نسبت به خط مرکزی مشترک مخازن قرار گرفته و پایه جرثقیل موازی با خط مرکزی جرثقیل حرکت می‌کند. این چیدمان با حذف نیاز به حرکت عرضی و حذف یک موتور و کنترل‌های آن، ساخت جرثقیل را ساده می‌کند.

جرثقیل‌های جایگاه اسیدشویی؛ جرثقیل‌های مورد استفاده در اسیدشویی دسته‌ای، به دلیل روشن و خاموش شدن مکرر موتور و خوردگی و رطوبت بسیار زیاد محیط مصرف، در شرایط کاری بسیار سختی قرار دارند. بسته به طراحی کارخانه، جرثقیل‌ها می‌توانند پلی، دروازه‌ای و یا نیمه دروازه‌ای باشند. عمومی‌ترین جرثقیل‌ها از نوع پلی هستند زیرا تجهیزات حرکت در محیط عملیات را به حداقل می‌رسانند. اغلب جرثقیل‌ها به قدر کافی سریع حرکت می‌کنند که به نصب کابین اپراتور و قابلیت بالا بردن با حرکت دو سرعت برای قرار دادن دقیق کلاف‌ها نیاز داشته باشند. به طور نمونه مشخصات این جرثقیل‌ها عبارتند از ۵-۱۵ فوت در دقیقه برای بالا بردن و ۲۵۰ تا ۳۰۰ فوت در دقیقه برای حرکت. جرثقیل باید برای نگهداری قلاب‌های متحرک در مراکز ثابت جهت حفظ پایداری، دارای بالابر دوتایی متصل به یک پایه تقویتی باشد.

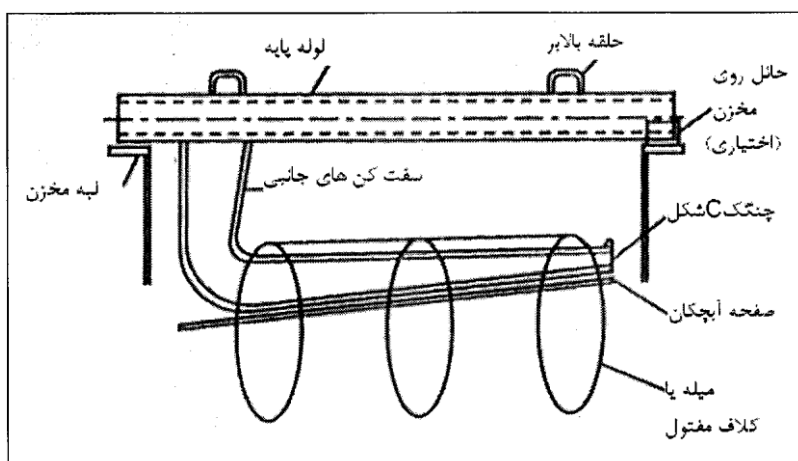
ساختار فولادی یک جرثقیل جایگاه اسیدشویی باید با یک پرداخت با کیفیت و مقاوم به اسید - مانند رنگ اپوکسی - پوشش دهی شود و پیکاپ الکتریکی باید به صورت سیستم حلقه‌ای یا

هلالی باشد، چرا که پیکاپ‌های آزاد خیلی زود در اتمسفر جایگاه اسیدشویی خورده می‌شوند. جرثقیل اغلب یک پنکه خشک‌کننده آهک در بالا یا کنار کابین حمل می‌کند و بسته به تعداد مراحل فرآیند، می‌تواند بین ۱۲ تا ۱۵ کلاف را در ساعت مورد فرآوری قرار دهد.

برخی کارخانجات با استفاده از سیستم کنترل منطقی برنامه‌پذیر (PLC) برای کنترل مراحل فرآیند، توانسته‌اند در استفاده از جرثقیل‌های اتوماتیک موفق عمل کنند. این موضوع مناسب تأسیساتی است که در آن مقادیر زیادی از مواد در یک مرحله فرآیند مشابه مورد عملیات قرار می‌گیرند. این روش اگرچه باعث ذخیره هزینه نیروی انسانی عملیاتی شده اما به ندرت باعث افزایش تولید محصول می‌گردد.

چنگک‌های اسیدشویی که در اسیدشویی دسته‌ای، کلاف‌ها را بین مخازن حمل می‌کنند، معمولاً به صورت چنگک‌های C شکل طراحی می‌شوند. (شکل ۸)

چنگک C شکل بسیار مورد توجه می‌باشد، زیرا کلاف می‌تواند مستقیماً از بازوی متحرک جرثقیل چنگک‌دار با حداقل کار دستی و بدون تماس کلاف با کف و آلوده کردن آن، بارگذاری شود. اگر چه، چنگک‌های C شکل به دلیل فشار پایه و تکان وارده در هنگام بالا بردن، پایین آوردن و غلطاندن کلاف‌ها، در معرض تنش‌های مکانیکی خیلی شدیدی قرار می‌گیرند. میله‌های اسیدشویی نیز به دلیل عبور مکرر از میان حمام‌های اسید، پوشش و آهک، شدیداً خورده می‌شوند.



شکل ۸ - چنگک اسیدشویی C شکل

به این دلایل، چنگک‌های اسیدشویی باید بسیار مستحکم بوده و از مواد با مقاومت در برابر خوردگی بالا ساخته شوند. در گذشته، چنگک‌های مورد استفاده در اسیدشویی با اسیدسولفوریک از برنز آلومینیوم ساخته می‌شدند، اما امروزه از آلیاژهای نیکل - کروم - آهن - مولیبدن مانند اینکولوی ۸۲۵ یا اینکونل ۶۲۵ استفاده می‌شود. آلیاژهای پایه نیکل در دماهای متوسط، مقاوم به اسیدسولفوریک هستند. آلیاژهای حاوی هر دو عنصر کروم و مولیبدن مقاومترین ماده به اسید هیدروکلریک هستند. اینکولوی ۸۲۵ برای اسیدسولفوریک زیر ۱۶٪ مناسب است. اینکونل ۶۲۵ برای اسیدسولفوریک قوی تر و برای اسیدشویی با اسیدهیدروکلریک استفاده می‌شود. در جدول ۲ ترکیب شیمیایی آلیاژهای پایه نیکل که دارای مقاومت در برابر خوردگی خوبی در اسیدهای معدنی هستند نشان داده شده است.

آلیاژ	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Fe (%)	سایر عناصر
اینکولوی ۸۲۵	۴۰	۲۲	۳/۲	۳۱	Cu
اینکونل ۶۲۵	۶۲	۲۳	۹	۳	Nb
C - ۲۷۶	۵۷	۱۶	۱۶	۵	W
کلوریمت ۳	۶۰	۱۸	۱۸	۳	Si
هاستلوی B	۶۲	-	۲۸	۵	Si
هاستلوی C	۵۶	۱۵	۱۷	۵	Cu
هاستلوی D	۸۵	-	-	-	Si

جدول ۲- آلیاژهای پایه نیکل با مقاومت در برابر خوردگی خوب در اسیدهای معدنی

چنگک‌های اسیدشویی دارای پایه در هر دو انتها، ارزان تر هستند اما نیاز به نیروی انسانی عملیاتی بیشتر دارند. در هنگام استفاده از این چنگک‌ها، کلاف روی زمین می‌ماند تا وقتی که سر آزاد متصل شود، پس کلاف‌ها ممکن است آلوده شوند.

طراحی مخزن اسیدشویی: مخازن خطوط اسیدشویی به طور مکانیکی باید بسیار محکم باشند. در اثر سوء مصرف‌های مختلفی نظیر ضربه چنگک‌های C شکل، تماس تصادفی کلاف‌ها با دیواره‌ها و غلطاندن کلاف‌ها روی لبه‌های مخزن، آسیب‌هایی به مخازن وارد می‌شود. معمولاً مخازن

اسیدشویی مستطیل شکل هستند و اندازه آنها می‌تواند برای جا دادن یک تا چهار کلاف میلگرد طراحی شود که معمولاً دو یا سه کلاف در نظر گرفته می‌شود. ابعاد مخزن بستگی به اندازه بزرگترین کلاف دارد، دیواره‌های مخزن می‌بایست حدود ۱۵۰ تا ۲۲۵ میلیمتر با مفتول و لبه‌های چنگک C و ارتفاع آن می‌بایست حدود ۲۲۵ تا ۳۰۰ میلیمتر تا سطح اسید، فضای باز داشته باشد. چنگک‌های C شکل حامل کلاف‌ها روی لبه مخزن یعنی جایی که حائل‌هایی برای حفاظت از مخزن ساخته شده است، قرار می‌گیرند. اگر از حائل استفاده نشود، یک تخته از جنس چوب یا پلی‌پروپیلن از لبه مخزن حفاظت می‌کند.

ساختمان مخزن اسیدشویی به طور عادی یک پوسته فولادی است که از درون با یک پوشش آجری اسیدی تقویت شده و با لاستیک (نئوپرن یا تریفلکس) پوشیده شده است. لاستیک از فولاد در برابر خوردگی محافظت کرده و لایه آجری باعث حفاظت لاستیک در برابر آسیب‌های حرارتی و مکانیکی می‌شود. چنین مخازنی بسیار محکم هستند و در صورت تعمیرات مناسب، به طور بالقوه عمر مفیدی بیش از ۲۰ سال دارند نقطه ضعف آنها خوردگی پوسته فولادی و تشدید آن توسط ریزش و سرریز شدن اسید است. همچنین بسیار سنگین هستند و پوشش آجری باید در محل نصب شود که باعث طولانی شدن زمان نصب می‌گردد.

طی ۱۰ سال گذشته، استفاده از مخازن اسیدشویی ساخته شده از پلی‌پروپیلن با تقویت کننده خارجی پلی‌پروپیلن یا فولاد رایج‌تر شده است. مخازن پلی‌پروپیلن سبک بوده و کاربری آسان‌تر، نصب سریع و مقاومت در برابر خوردگی داخلی و خارجی دارند و معایب آنها به آسانی در محل تعمیر می‌شود. بدون شک استحکام این مخازن کمتر از مخازن فولادی است و احتمالاً عمر کوتاه‌تری دارند. پلی‌پروپیلن ضریب انبساط حرارتی بالایی دارد، به همین دلیل مخزن در زمان کار به مقدار قابل توجهی منبسط می‌شود که این امر باید در زمان نصب در نظر گرفته شود. اگر کلاف‌ها در زمان اسیدشویی بچرخند، لبه مخزن باید حفاظت و تقویت گردد. این کار به‌سادگی توسط نصب یک کلاهک گردان از جنس پلی‌پروپیلن یا چوب روی لبه مخزن انجام می‌شود.

معمولاً مخازن اسیدشویی با دمای گرم کار می‌کنند. مناسب‌ترین وسیله گرم کردن بخار است. در صورت تأمین یک دیگ بخار اختصاصی برای اسیدشویی، به منظور اجتناب از نیاز به مهندسی

عملیاتی و به ثبت رساندن مخزن تحت فشار، معمولاً طراحی به گونه‌ای است که عملیات زیر یک بار (۱۵ پوند بر اینچ مربع) انجام گیرد. بسیاری از گرمکن‌های مخازن اسیدشویی به فشارهای پایین محدود شده‌اند لذا بخار با فشار بالا مزیت بالایی برای گرم کردن مخازن اسیدشویی نمی‌باشد. به دلیل شدت حمله خورنده اسیدها روی کویل‌های در معرض بخار داغ، گرم‌کن‌های مخازن اسیدشویی از پلاستیک یا فلزات نامتعارف ساخته می‌شوند. گرمایش می‌تواند با گرم کردن کویل‌های درون مخزن (گرم‌کن‌های دیواری) یا با پمپ کردن اسید از میان یک گرم‌کن خارجی انجام گیرد. در حال حاضر از روش اول پخش بخار زنده به داخل مخزن اسیدشویی به ندرت استفاده می‌شود زیرا مقادیر زیادی سرریز اسیدی ایجاد می‌کند که باعث اتلاف اسید مورد نیاز عملیات می‌گردد. معمولاً پخش بخار، محدود به گرم کردن سریع مخازن سرد شده است.

گرم‌کن‌های دیواری کمترین هزینه نصب و عملیات را دارند، اما نیاز به حفاظت از آسیب ناشی از حرکت کلاف‌های فولادی دارند. معمولاً با قرار دادن دستگاه گرمایش در یک قسمت مجزا در مخزن اسیدشویی، می‌توان از آن حفاظت نمود. غالباً در این قسمت یک پاشنده هوا برای به گردش در آوردن حمام بین قسمت گرمایش و مخزن اسیدشویی وجود دارد. گرم‌کن‌های دارای شبکه صلب از جنس پلی‌وینیل‌فلوراید (PVDF-Kynar) و کلاف‌های مارپیچ از جنس زیرکونیوم یا تانتال برای اسیدهایروکلریک می‌باشند. اغلب گرم‌کن‌های خارجی برای مخازن با سیستم گردش مجدد اسید از جنس گرافیت غیرقابل نفوذ می‌باشند. نقطه ضعف چنین سیستم‌هایی تعمیر پمپ جریان‌دهنده و کنترل سیستم برای جلوگیری از گرم کردن زیاد و تبلور نمک‌های آهن در لوله‌های گرم‌کن می‌باشد.

مخازن آبکشی نیز در معرض خوردگی اسیدی هستند و جنس و روش‌های ساخت آنها مشابه مخازن اسیدشویی می‌باشد. در اسیدشویی با اسیدسولفوریک، فولاد ضدزنگ **AISI 316** ($18\%Cr + 10\%Ni + 3\%MO$) ماده مناسبی است زیرا این آلیاژ، اسیدسولفوریک خیلی رقیق و سرد را در شرایطی که شدیداً احیا نمی‌شود، تحمل می‌کند. فولاد ضدزنگ را نمی‌توان با اسید هیدروکلریک به کار برد، با این‌که از **AISI 316** می‌توان برای اسید با غلظت‌های بسیار کم استفاده نمود. کلوریمت ۲ و هاستلوی **B** به طور متوسط مقاومت در برابر خوردگی خوبی به تمام

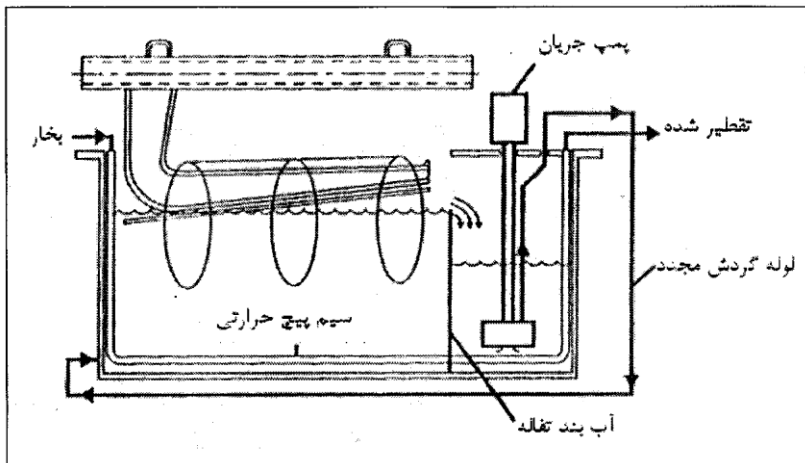
غلظت‌های اسید هیدروکلرویک تا نقطه جوش نشان می‌دهند. اگر چه، این آلیاژها در صورت هوادهی یا حضور عوامل اکسیدکننده ممکن است مورد حمله واقع شوند. کلوریمت ۳ و هاستلوی C در اسید رقیق در دماهای معمولی خوب هستند و به دلیل درصد کروم بالایی که دارند، مقاومت بهتری به محیط‌های اکسیدکننده نشان می‌دهند.

اندازه مخازن آبکشی معمولاً در حد آبکشی یک کلاف است. اندازه آبکشی غوطه‌وری مشابه اندازه یک مخزن اسیدشویی تکی است. مخازن آبکشی پاششی معمولاً عمیق‌ترند و طوری تنظیم شده‌اند که به منظور جلوگیری از پاشش آب روی مخازن و تجهیزات مجاور، کل پایه حمل مفتول را می‌توان به درون مخزن فرو برد. برای مخازن شستشوی پاششی می‌توان از آب تازه یا آب در گردش پمپ شده استفاده نمود. در هر دو مورد، آب فقط وقتی پاشیده می‌شود که کلاهی درون مخزن باشد. پاشش آب توسط یک کلید محدود کننده که توسط کلاف میلگرد یا اپراتور به کار می‌افتد آغاز شده و جهت کاهش مصرف آب، توسط یک تایمر قطع می‌شود.

مخازن فسفات معمولاً برای کمیته کردن خوردگی و تشکیل لجن آهن از فولاد ضد زنگ AISI316 ساخته می‌شوند. مشکل طراحی خاص مخازن فسفات، تصفیه و از بین بردن لجن فسفات آهن تشکیل شده در زمان عملیات فسفاته کردن می‌باشد. این لجن سبک است و ویژگی‌های جریان‌ی بسیار ضعیفی دارد به همین دلیل معمولاً برای خارج کردن لجن باید مخزن را تخلیه نمود. دو روش پیشنهادی برای رفع لجن وجود دارد. هر دو روش مخزنی با کف مخروطی دارند که در آن، پمپ کردن پیوسته یا مرحله‌ای لجن را از ته مخزن به یک مخزن ته‌نشینی می‌فرستد. روش دیگر استفاده از مخزن مستطیل شکل با عمق اضافی برای امکان انبار کردن لجن ته‌نشین شده می‌باشد. در این روش زمان تمیزکاری افزایش می‌یابد. گرم‌کن‌های مخازن فسفات معمولاً کویل صفحه‌ای از جنس فولاد ضدزنگ و نوع دیواری می‌باشند. با گذشت زمان، روی کویل‌های حرارتی پیوسته تشکیل می‌شود که نیاز به تمیزکاری دوره‌ای دارد.

مخازن روانکار از فولاد کربنی ساخته شده و نیاز به سیستم پمپ گردش، هم برای آماده‌سازی حمام و هم رفع تفالله دارد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، تفالله به‌طور پیوسته توسط به گردش در آوردن محلول روانکار درون مخزن و در بالای یک آب‌بند، کف‌گیری می‌شود.

فضای آب‌بند باید کافی باشد تا در هنگام فرو بردن کلاف در روانکار، حداکثر مقدار مایع جابه‌جا شده را جای دهد. کویل‌های لوله‌ای فولادی حمام را گرم کرده و انتقال حرارت باعث گرم شدن کل مخزن می‌شود. به علاوه، لوله‌های بخار باید نزدیک به مجرای ورودی پمپ باشند تا محلول سرد را ذوب کرده و مایع مورد نیاز پمپ برای گردش را تأمین کند.



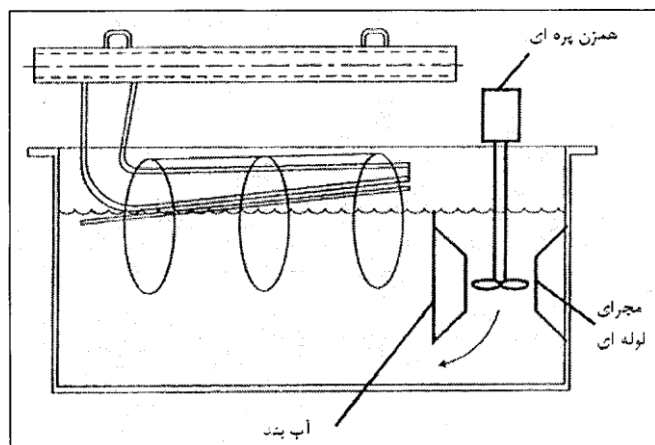
شکل ۹- مشخصات مخزن روانکار

مخازن آهک از فولاد کربنی ساخته شده‌اند و برای ممانعت از ته‌نشینی ذرات آهک، نیاز به هم زدن خوب دارند. مطابق آن چه در بخش پوشش‌دهی آهکی گفته شد، بهترین حالت هم زدن توسط یک همزن عمودی پره‌ای در یک مجرای لوله‌ای در انتهای مخزن حاصل می‌شود. (مطابق شکل ۱۰)

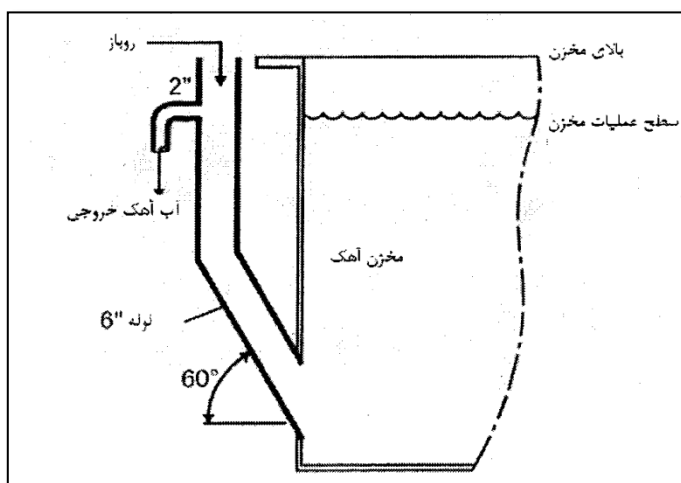
روش دیگر هم زدن، شامل پاشش هوا از میان سوراخ‌های تعبیه شده در لوله‌ای می‌باشد که هوا با سرعت زیاد از داخل آن در حال عبور است. هر دو روش نیاز به تعمیرات خیلی زیاد و قابلیت اطمینان کمی دارند، اما در مواقعی که فضا اجازه استفاده از همزن پره‌ای را نمی‌دهد پاشش هوا مفید می‌باشد.

مخازن آهک باید با پاشش بخار گرم شوند زیرا روی گرم‌کن‌های محصور در حمام‌های آهک، سریعاً پوسته تشکیل می‌شود. این پاشش باعث انباشتگی در مخزن و سرریز شدن آن می‌شود. یک

لوله سرریز از نوع نشان داده شده در شکل ۱۱ توسط امکان سرریز شدن محلول آهکی بسیار ضعیف و برگشت آهک معلق به مخزن، باعث کمینه شدن اتلاف آهک می شود.



شکل ۱۰- هم زدن مخزن آهک با استفاده از پروانه



شکل ۱۱- سیستم سرریز مخزن آهک

ضمیمه C شامل اطلاعات مربوط به طراحی پاشنده و چگونگی جلوگیری از تبلور آهک می باشد.

سیستم‌های اسیدشویی پیوسته

سیستم‌های اسیدشویی پیوسته در عملیاتی که در آن تمام مواد اساساً مورد فرآیند اسیدشویی یکسانی قرار می‌گیرند، باعث کاهش هزینه نیروی انسانی و افزایش تولید می‌شود. برخی از این سیستم‌های پیوسته اختصاصی و برخی دیگر عمومی‌تر می‌باشند.

دو سیستم اسیدشویی پیوسته خوب وجود دارد. در مورد میلگردهای سنگین‌تر، کلاف‌ها با حرکت حلقه‌های متداخل روی یک نقاله مقاوم به خوردگی (نظیر نقاله لوپرو) از مخازن فرآیندهای مختلف عبور می‌کنند و روی یک میله تخلیه می‌شوند. در مورد مفتول‌های نازک‌تر، سیستم چند رشته‌ای رایج عبارت است از عبور هم‌زمان ۱۰ تا ۴۰ مفتول به ترتیب از مخازن اسیدشویی، آبکشی و پوشش‌دهی. برای اسیدشویی از اسیدهای کلوئیدی استفاده می‌شود زیرا از اسیدسولفوریک سریع‌تر بوده و سطح بهتری برای فرآیند بعدی ایجاد می‌کند. اسیدشویی چند رشته‌ای به صورت هم‌راستا بین کوره آنیل و گالوانیزه کردن، آبکاری الکتریکی یا دیگر عملیات پوشش‌دهی استفاده می‌شود. ابداع اخیر در اسیدشویی رشته‌ای، اسیدشویی «بدون تصاعد بخار» می‌باشد. رشته‌ها از میان جدارهای آب داخل و خارج حمام می‌شوند، که بدون نیاز به سیستم گران‌اگزوز، بخارات اسیدی ناشی از مخزن اسیدشویی را حمل می‌کنند.

سایر سیستم‌های پیوسته در واقع سیستم‌های مرحله‌ای اتوماتیک هستند. شرکت کرامکمی یک فرآیند اسیدشویی تونلی دارد که در آن مخازن اسیدشویی مرحله‌ای به صورت یک حلقه قرار گرفته‌اند که جرثقیل‌های کنترل بی‌سیم روی یک نقاله بالای مخازن حرکت می‌کنند. هر جرثقیل کلاف میلگرد را به داخل فرآیند حمل می‌کند به طوری که کلاف را در مخزن مناسب برای زمان برنامه‌ریزی شده غوطه‌ور می‌نماید. گازها درون یک محوطه تونلی پیوسته نگه داشته می‌شوند و ریل‌ها و حامل جرثقیل در خارج از محوطه، و بازوی بالابر و حامل از میان یک شیار متوالی در بالا داخل می‌شود.

در بعضی جاها از جرثقیل‌های برنامه‌ریزی شده PLC همراه فرآیند مرسوم مرحله‌ای کلاف‌ها استفاده می‌شود. این امر هزینه اپراتور جرثقیل را حذف می‌کند. اگرچه، تجربه اپراتور نیز برای

تشخیص مشکلات اسیدشویی و اولویت بندی حمل کلاف‌ها برای افزایش بهره‌وری حذف می‌شود.

کنترل بخار

این بخش در مورد کنترل بخارات اسیدی (نه تقطیر آن) در خطوط اسیدشویی با مخازن روباز می‌باشد. واژه «تقطیر بخار» گمراه کننده است. مسأله، جلوگیری از داخل شدن بخارات اسیدی به محیط کار است و اجازه دادن به فرار آنها و سپس تقطیر هوای آلوده صحیح نمی‌باشد.

دو دلیل برای اهمیت کنترل بخار در عملیات اسیدشویی وجود دارد: اولاً، حفاظت از سلامت و ایمنی کارکنان، و دوماً، محافظت از ساختمان. تجهیزات اسیدشویی (مخصوصاً جرثقیل)، تجهیزات تولید، و موجودی محصول تمام شده از آسیب اسیدی. حفاظت از کارکنان مهمتر است زیرا معمولاً خسارت بخار اسیدی به تجهیزات و محیط کاملاً موضعی است. بخار اسید هیدروکلریک خیلی نافذتر است و می‌تواند پشت ایزولاسیون یا به داخل جعبه‌های الکتریکی نفوذ کند و به صورت یک اسید بسیار خورنده متراکم شود.

بخارات اسیدی در سطح مایع حمام‌های اسیدشویی و نیز از سطح فولاد تمیز شده در حال خروج از مخازن اسیدشویی تولید می‌شوند. نوع و مقدار بخارات بستگی به اسید مصرف شده دارد. بیشتر بخارات اسیدی تولید شده از اسیدسولفوریک در سطح مایع، از متلاشی شدن حباب‌های بسیار کوچک هیدروژن تولید شده در فرآیند اسیدشویی به وجود می‌آیند. وقتی فولاد از اسیدسولفوریک بیرون کشیده می‌شود بخار بسیار کمی تولید می‌شود و به دلیل فرار نبودن اسیدسولفوریک در دماهای اسیدشویی، بخارات به صورت قطرات کوچک اسید به اندازه آبروسول می‌باشند. برعکس، اسید هیدروکلریک گاز محلول در آب است که سه نوع بخار تولید می‌کند: قطرات آبروسول، تولید بخار از سطح آزاد محلول و تولید بخار از فولاد هنگامی که از اسید بالا می‌آید.

این بخارات وقتی فولاد از اسید بالا کشیده می‌شود، با هوای نزدیک به سطح یا بالای حمام مخلوط می‌شوند. هدف از کنترل خوب بخار، کمینه کردن حجم هوای آلوده به وسیله جلوگیری از مخلوط شدن بخارات با هوای ساختمان اصلی می‌باشد. این امر با ایجاد خروج موضعی، مانند

گیرانداختن هوای آلوده در نزدیک‌ترین نقطه پیدایش ممکن حاصل می‌شود. بزرگی زیاد یک سیستم منجر به هزینه سرمایه‌گذاری بالاتر و اتلاف بیشتر اسید در پساب دستگاه تصفیه گاز می‌شود.

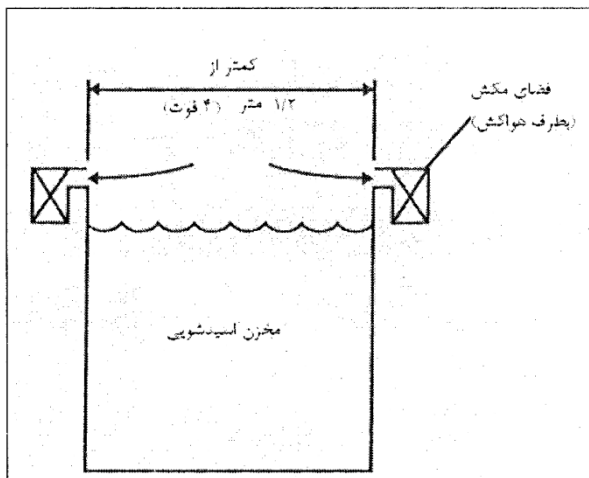
جابه‌جایی هوا: با این‌که کنترل بخار نیاز به آگزوز حجم بالا دارد، سرعت هوا به سمت نقطه تجمع خیلی بالا نیست و به طور نمونه در حدود $2/5$ فوت بر ثانیه ($0/75$ متر بر ثانیه) می‌باشد. این معادل بادی با سرعت $1/9$ مایل بر ساعت ($2/7$ کیلومتر بر ساعت) است، لذا جلوگیری از جریانات عرضی که می‌تواند باعث آشفته‌گی جریان مطلوب شود، مهم می‌باشد. حتی وزش یک نسیم آرام در منطقه اسیدشویی روی سیستم جمع‌آوری بخار تأثیر خواهد گذاشت.

جریان هوای دمیده شده روی فاصله خیلی طولانی‌تری اثر می‌کند تا یک جریان هوای القایی. معمولاً مکش در فاصله دورتر از 2 تا $2/5$ فوت ($0/6$ تا $0/75$ متر) از هود یا کانال بی‌تأثیر است، در حالی که جریان دمیده شده، 20 تا 30 فوت (6 تا 10 متر) ادامه می‌یابد. همین‌که جریان دمیده شده حرکت کند، هوای محیط را به دام می‌اندازد و بدین ترتیب توسعه یافته و حرکت آن آهسته می‌شود تا با حجم افزایش یافته هوا مطابقت نماید.

تأمین هوای جبرانی در ساختمان اسیدشویی برای جایگزین کردن با هوای خارج شده به منظور کنترل بخار مهم است. در حالت ایده‌آل، این هوا باید از ساختمان اصلی کارخانه بیاید تا جریان هوا به سمت مخزن اسیدشویی ایجاد کند و فرار بخارات از منطقه اسیدشویی را به حداقل برساند. نکته احتیاطی - برای کاهش هزینه‌های گرمایش، هوای خروجی را پس از تصفیه کردن به عنوان هوای جبرانی برنگردانید. این هوا 100% رطوبت دارد و هنوز مقداری اسید دارد که صدمه خواهد رساند.

روش‌های کنترل بخار: روش‌های کم اثری برای کنترل بخار وجود دارد مانند لایه‌های گلوله شناور روی سطح مایع، یا استفاده از بازدارنده‌های کف‌زا. اما این روش‌ها به تنهایی برای اسیدشویی با اسیدسولفوریک به ندرت و برای اسیدشویی با اسیدهای دیگر هیچ‌وقت رضایت‌بخش نیستند. نوعی سیستم گرفتار کردن هوا برای کنترل قابل قبول بخار لازم است. هودهای مکش در هر دو طرف مخزن، بخارات متصاعد از مخازن باریک با عرض حداکثر 4 فوت

(۱/۲ متر) را کنترل می‌کنند (مطابق شکل ۱۲). اگر چه، مکش به تنهایی برای مخازن عریض تر که مورد مصرف بیشتری در خطوط اسیدشویی صنعتی دارند، کافی نمی‌باشد.

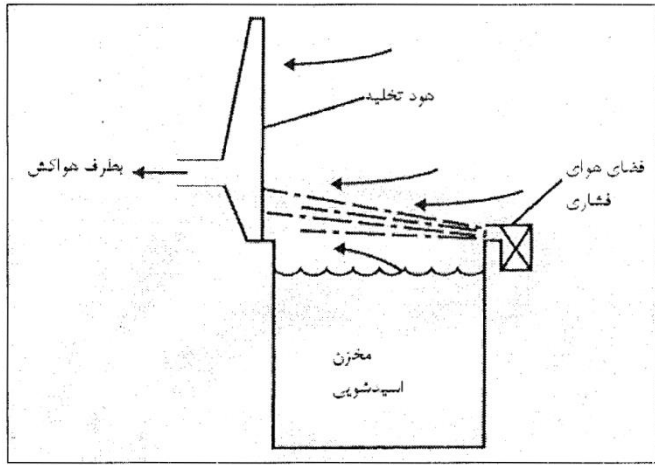


شکل ۱۲- خروج از دو طرف مخزن

برای مخازن عریض تر از سیستم فشاری - کششی استفاده می‌شود. (شکل ۱۳) هود جمع‌کننده به طور عمودی نسبت در یک طرف مخزن که جرثقیل و کلاف‌ها نباشند، نصب می‌شود و هواکش هوا را از میان این هود می‌کشد. بخارات تولید شده در سطح مایع توسط جریان افقی هوا (هوای فشاری) به طرف هود رانده می‌شوند.

به طور نمونه یک سیستم خروجی فشاری - کششی شامل موارد زیر می‌شود:

- دمنده هوای فشاری
- محفظه هوای فشاری نصب شده روی لبه مخزن یا ساخته شده در آن
- یک یا چند هود جمع‌کننده
- هدایت هوای جمع‌شده
- تصفیه‌کننده بخار
- هواکش تخلیه



شکل ۱۳- خروج فشاری - کششی

اندازه تمهیزات: حجم هوایی که باید برای کنترل مناسب بخار جمع آوری شود بستگی به چند عامل شامل موارد زیر دارد:

- مساحت سطح مخزن
- نوع اسید
- دمای اسید
- نسبت ابعاد محیط تحت کنترل
- ارتفاع یا موقعیت هود جمع کننده

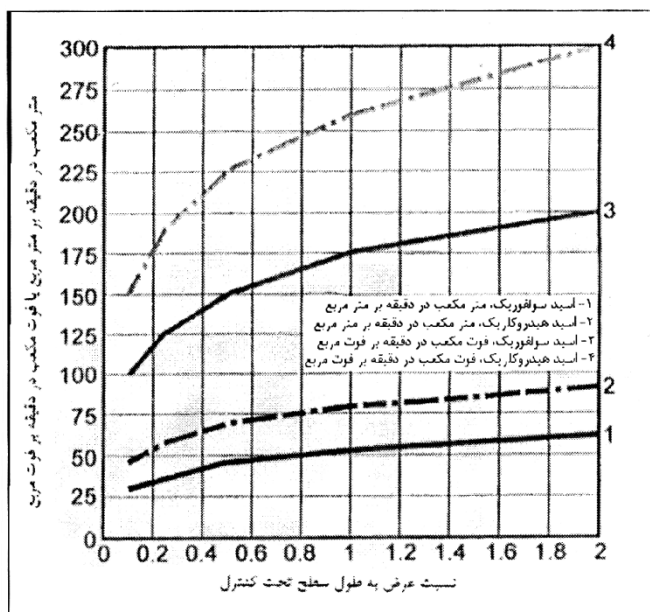
به طور نمونه مقادیر کنترل سطح مخزن بر واحد سطح عبارتند از:

- برای اسیدسولفوریک، ۱۰۰ تا ۱۷۵ فوت مکعب بر فوت مربع (۳۰ تا ۵۵ متر مکعب بر مترمربع) در دقیقه.
- برای اسیدهیدروکلریک، ۱۵۰ تا ۲۲۵ فوت مکعب بر فوت مربع (۴۵ تا ۷۰ متر مکعب بر مترمربع) در دقیقه.

حجم هوای فشاری به طور نمونه ۵ تا ۱۰ درصد حجم هوای خروجی می باشد. شکل های ۱۴ و ۱۵ می توانند برای برآورد حجم مورد نیاز هوای فشاری و هوای خروجی به کار روند. بهترین راه برای به حداقل رساندن هوای خروجی، حفظ نسبت ابعادی یعنی نسبت عرض (در جهت جریان

هوا) به طول (با زاویه قائمه نسبت به جریان هوا) در کمترین مقدار ممکن است. هر چه نسبت ابعادی کمتر باشد، هوای خروجی کمتری بر واحد سطح لایه تحت کنترل لازم است. توجه داشته باشید که مقدار مکش، بر واحد سطح لایه تحت کنترل است نه بر واحد سطح لایه مایع. سطح تحت کنترل، کل سطح بین دهانه هوای فشاری و سطح هود تخلیه برای کل طول مخزن شامل فلانچ‌های هر مخزن یا فضاهای بین مخازن می‌باشد. عوامل مهم عبارتند از:

- خروج همیشه در طول بُعد کمتر مخزن انجام گیرد.
- اگر چند مخزن پهلو به پهلو هم قرار دارند، از هود و سیستم هوای فشاری مشترک استفاده شود و به صورت یک مخزن بزرگ کنترل شوند.

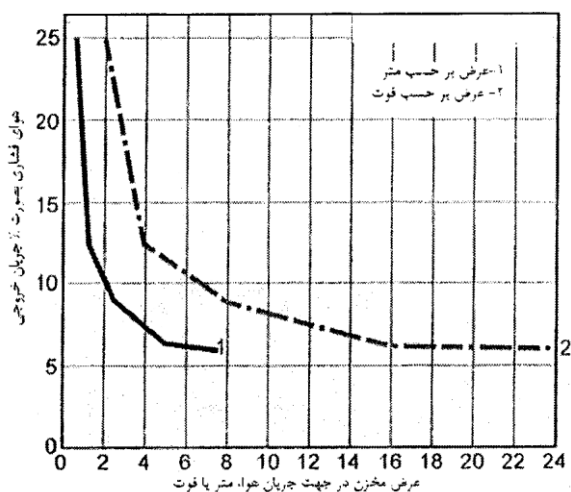


شکل ۱۴- سرعت‌های تخلیه در اسیدشویی

در ویرایش‌های اخیر نظام‌نامه کنفرانس متخصصین بهداشت صنعتی دولت آمریکا روش متفاوتی برای برآورد اندازه سیستم‌های فشاری - کششی با استفاده از سرعت‌های کم تخلیه در محدود ۷۵ تا ۹۰ فوت مکعب بر فوت مربع (۲۳ تا ۲۷ مترمکعب بر مترمربع) از مساحت مخزن و با حجم

هوای فشاری بسیار پایین تر مشخص شده است. دلایل درست فنی مختلفی برای مناسب نبودن این رویکرد جهت تخلیه گاز از مخازن اسیدشویی وجود دارد، اما بحث درباره این دلایل فراتر از موضوع این فصل می‌باشد.

انتخاب تجهیزات: سیستم تخلیه باید در نقشه خط اسیدشویی برای کنترل مؤثر طراحی شود. مانند اغلب طراحی‌های مهندسی، تنها یک راه صحیح وجود ندارد، اما برخی نکات در مورد تجهیزات وجود دارد که مفید بودن آنها طی سال‌ها ثابت شده است.

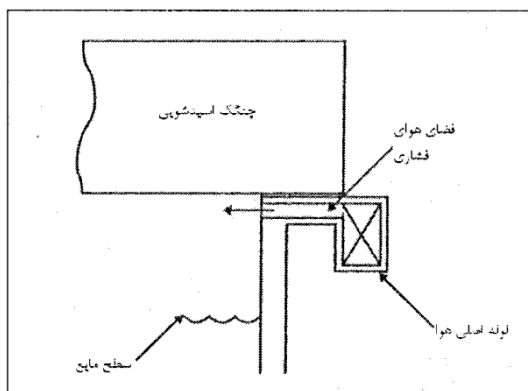


شکل ۱۵- سرعت‌های هوای فشاری برای اسیدشویی

هوای فشاری: تأمین هوای فشاری توسط یک دمنده گریز از مرکز جداگانه بهتر از استفاده از هوای فشرده می‌باشد. هوای فشرده گران است و در هنگام استفاده به عنوان هوای فشاری، بیشتر انرژی فشاری هدر می‌رود. کارخانجات کمی توانایی تهیه هوای تراکم لازم برای سیستم خروج فشاری - کششی خوب را دارند، به همین دلیل سیستم‌های فشاری با هوای فشرده کارخانه به ندرت خوب عمل می‌کنند. استفاده از دمنده جداگانه باعث جریان یافتن حجم زیادی از هوای طول سطح مخزن در یک لایه یکنواخت و کنترل بهتر بخارات می‌گردد. هرچه موانع کمتری در

مسیر این لایه هوا وجود داشته باشد، بخارات بهتر کنترل خواهند شد. وقتی هیچ راهی برای اجتناب از تداخل چنگک‌های C شکل و کلاف‌های میلگرد با جریان هوا وجود نداشته باشد، تأثیر آن را می‌توان با ساختن کانال هوای فشاری درون مخزن یا نصب آن زیر لبه‌ای که چنگک بر روی آن می‌نشیند، به حداقل رساند. (شکل ۱۶)

هودها: هود به منظور جمع‌آوری هوای آلوده‌ای که توسط لایه هوای فشاری به سمت آن فشار داده می‌شود و سپس هدایت هوا به طرف کانال جمع‌کننده به کار می‌رود. هود باید به بلندی عرض مخزن باشد و از هر طرف حداقل ۶ اینچ (۱۵۰ میلی‌متر) بیشتر از سطح تحت کنترل باشد تا هوای کشیده شده در اطراف لبه‌های هود را به حداقل برساند. هود باید تا حد ممکن نزدیک به جداره مخزن قرار گیرد و فاصله بین ته هود و لبه مخزن مسدود شود. این امر باعث جلوگیری از جریان هوا از میان این فضا و جاری شدن هر نوع مایعی از سطح هود می‌گردد.



شکل ۱۶- فضای هوای فشاری ساخته شده درون مخزن

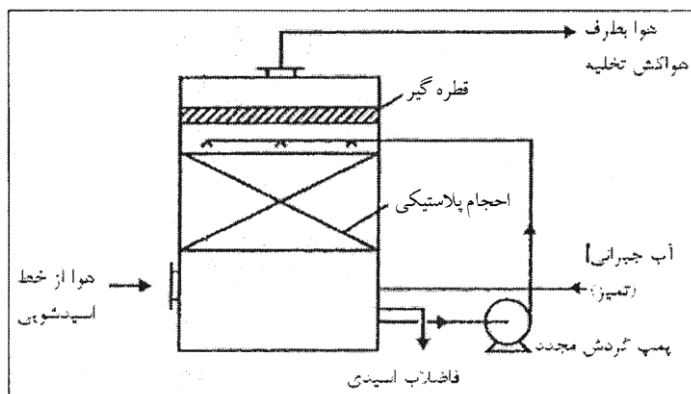
کشش یکنواخت توسط هود در امتداد طول مخزن امری مهم است، لذا هودها معمولاً مجهز به یک صفحه نظام با شیارهای افقی هستند که برای یکنواخت کردن جریان هوا به کار می‌رود. با طراحی مناسب عرض مخزن و فاصله‌گذاری شیارها، امکان تخلیه در سطوح بالاتر برای جمع کردن بخارات حاصل از کلاف‌ها فراهم می‌شود. اگر چه، بیشترین تخلیه در ۲۰ درصد قسمت

تحتانی هود یعنی جایی که لایه هوای فشاری به آن حمله می‌کند انجام می‌شود. همیشه باید یک آب‌گذر در تمام نقاط ضعیف هود - شیار آب‌چکان درون هود با قطرات ریز مایع که از هوا جدا شده‌اند - تهیه شود.

هدایت هوا: معمولاً کانال گرد اقتصادی‌تر از کانال مستطیلی است. کانال باید تا حد ممکن کوتاه و بدون نقاط ضعیف باشد و باید ۰/۵ درصد یا بیشتر به سمت هود و دستگاه تصفیه گاز شیب داشته باشد. اگر کانال طولانی باشد یا بیش از یک خم داشته باشد، نیاز به دریچه بازدید دارد. نباید از دمپرها برای تنظیم یا کنترل جریان استفاده شود، زیرا آنها خورده شده یا با بلورهای نمک‌های آهن درگیر می‌شوند. به جای آن، اندازه کانال باید متناسب با توزیع جریان لازم تعیین گردد.

دستگاه‌های تصفیه گاز: اغلب سیستم‌های تخلیه بخارات نیاز به یک دستگاه تصفیه گاز برای جدا کردن اسید از هوای خروجی به منظور مطابقت با قوانین محیط‌زیست دارد. دستگاه تصفیه گاز وسیله‌ای است که تماس نزدیک بین آب و هوای آلوده برقرار می‌کند تا آب بتواند بخارات اسیدی را حل کند و طی این فرآیند هوا را مرطوب نماید.

دو نوع اصلی دستگاه‌های تصفیه گاز مورد مصرف در اسیدشویی عبارتند از: دستگاه‌های تصفیه گاز بسته‌ای و دستگاه‌های تصفیه گاز صفحه‌ای. دستگاه‌های تصفیه گاز بسته‌ای، ظرف‌هایی هستند که با لایه‌ای از اشکال پلاستیکی با قطر ۲ تا ۳ اینچ (۵ تا ۸ سانتیمتر) که از میان آنها هوا در مسیری پیچ و خم‌دار جریان دارد، پر شده‌اند. آب بر بالای لایه بسته پوشش اشکال پلاستیکی اسپری می‌شود، به سمت پایین جاری شده و درحین حرکت، بخارات اسیدی را حل می‌کند و از کف به صورت محلول اسیدی خارج می‌شود. دستگاه‌های تصفیه گاز بسته‌ای را می‌توان برای جریان گاز عمودی (روبه‌بالا) (جریان معکوس، شکل ۱۷)، یا جریان گاز افقی (جریان عرضی، شکل ۱۸) شکل‌بندی نمود، دستگاه‌های تصفیه گاز بسته‌ای برای مرطوب نگه داشتن بسته مخصوص، نیاز به جریان آب زیادی دارند. بنابراین، آب باید از پایین به بالای بسته پمپ شود تا مصرف آب و حجم فاضلاب کاهش یابد. آب تازه به طور پیوسته اضافه می‌شود تا انباشته شدن اسید در مایع را رفع نماید.

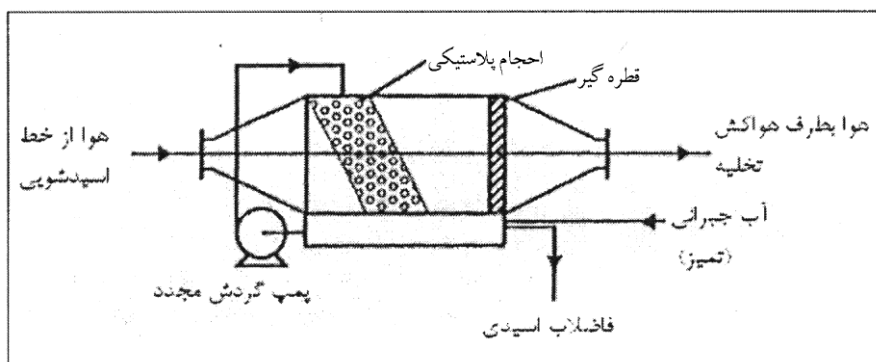


شکل ۱۷- دستگاه تصفیه گاز بسته‌ای جریان معکوس

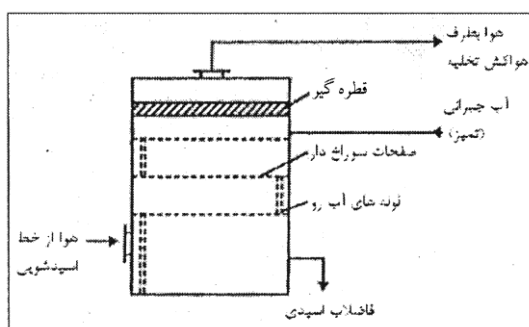
دستگاه‌های تصفیه گاز صفحه‌ای (شکل ۱۹) را می‌توان فقط برای جریان گاز عمودی با جریان آب به سمت پایین شکل‌بندی نمود. آب از وسط یک سری صفحات سوراخ‌دار جاری می‌شود و تماس بین هوا و آب شروع می‌شود. سرعت زیاد هوا از سوراخ‌ها - به قطر یک هشتم تا یک چهارم اینچ (۳ تا ۶ میلیمتر) - از جاری شدن آب از سوراخ‌ها جلوگیری کرده و اغتشاش لازم برای تماس خوب بین هوا و آب را ایجاد می‌کند. دستگاه‌های تصفیه گاز صفحه‌ای تنها نیاز به یک جریان آب کوچک و یک باره دارنده و پمپ گردش لازم ندارند.

هر دو نوع دستگاه‌های تصفیه گاز به منظور گرفتن ذرات کوچک آب کشیده شده در هوا، یک غبارگیر قبل از خروج گاز دارند. این امر برای به حداقل رساندن انباشته شدن رسوب باران اسیدی بسیار مهم است.

دستگاه تصفیه گاز، اسید موجود در هوا را از بین نمی‌برد، بلکه فقط اسید را از هوا به آب منتقل می‌کند. از این رو، فاضلاب دستگاه تصفیه گاز با اسید آلوده شده و باید تصفیه یا دفع گردد. در برخی خطوط اسیدشویی، می‌توان یک دستگاه تصفیه گاز صفحه‌ای که تنها نیاز به حجم کمی آب دارد طراحی نمود، تا فاضلاب دستگاه تصفیه گاز را به منظور تصحیح تبخیر یا برای رقیق‌سازی مخزن اسیدشویی بازگرداند. این امر باعث اجتناب از نیاز به تصفیه فاضلاب شده و نیز اسید موجود در فاضلاب را بازسازی می‌کند.



شکل ۱۸- دستگاه تصفیه جریان عرضی



شکل ۱۹- دستگاه تصفیه صفحه‌ای

هواکش‌ها: برای به کار بردن تمیزترین هوا، و نیز برای حفظ دستگاه‌های تصفیه گاز، باید پس از دستگاه‌های تصفیه گاز هواکش‌هایی قرار بگیرند و هدایت هوا تحت فشار منفی انجام شود به طوری که هیچگونه نفوذ آب به داخل انجام نشود. هواکش‌ها باید مقاوم به خوردگی بوده زیرا هیچ‌یک از دستگاه‌های تصفیه گاز ۱۰۰٪ موثر یا ۱۰۰٪ قابل اطمینان نمی‌باشند. این هواکش‌ها نیاز به زیرآب دارند تا تقطیر از بین رفته یا منتقل شود و این زیرآب باید به صورت لوله‌ای آب‌بندی و U شکل باشد تا از ورود هوا و بسته‌شدن جریان آب جلوگیری شود.

عموماً، یک هواکش گریز از مرکز با فشار به طور نمونه ۱۵ تا ۲۳ mbar (۶ تا ۹ اینچ w.c) لازم است، که این مقدار فشار برای سایر انواع هواکش بسیار بالا است. هواکش‌های گریز از مرکز

ظرفیت ثابت ندارند، بلکه یک متغیر طراحی دارند که عبارت است از ظرفیت در فشار تخلیه مشخص، عموماً فشار ایجاد شده از هواکش با افزایش عملکرد، افت می‌کند. اگر افت فشار سیستم کمتر از حد مورد نظر باشد، هواکش بیشتر از ظرفیت طراحی شده مکش دارد. برعکس، اگر افت فشار سیستم بیشتر از حد مورد نظر باشد، هواکش کمتر از ظرفیت مورد نظر مکش می‌کند.

دودکش‌ها: هواکش معمولاً هوای خروجی را درون یک دودکش با تنوره تخلیه می‌کند. ارتفاع تنوره بستگی به موقعیت آن، شکل ساختمان، باد غالب، و قوانین محلی دارد. تنوره باید اتصال آبگذر (زیرآب) داشته باشد و اگر ارتفاع آن بیشتر از ۲۰ فوت (۷ متر) باشد، باید برای از بین بردن قطرات ریز متراکم که در سیستم بعد از دستگاه تصفیه گاز تشکیل می‌شوند، در نزدیک یا در قسمت بالا دارای حذف کننده قطرات ریز باشد.

مواد ساختمانی: اغلب در سیستم‌های تخلیه بخارات خطوط اسیدشویی از مواد پلاستیکی نظیر پلی‌وینیل کلراید (PVC)، پلی‌پروپیلین (PP)، یا پلاستیک مسلح به پشم شیشه (FRP)، استفاده می‌شود. مواد پلاستیکی اقتصادی و از داخل و خارج مقاوم به خوردگی هستند. PVC کم هزینه‌ترین ماده است، اما کوتاهترین طول عمر را دارد، به طوری که پس از چند سال شکننده می‌شود (مخصوصاً اگر در هوای آزاد مصرف شود) و نیاز به تعمیرات شدید دارد. PP طول عمر خوب و در صورت خراب شدن، تعمیر آن آسان است، اما برای استفاده در هوای آزاد، جهت جلوگیری از فساد در مقابل نور خورشید، نیاز به لایه‌های مخصوص دارد. PP مقاومت به سایش خوبی دارد، اما خیلی مستحکم نیست و نیاز به مواد ضخیم‌تر قابل مقایسه با فلز یا FRP دارد. FRP ماده‌ای است با استحکام بالاتر و ماده مورد انتخاب برای هواکش‌ها و کانال‌ها، هودها و دستگاه‌های تصفیه گاز می‌باشد. استحکام خوب و عمری طولانی دارد، اما احتمال خرابی آن از پلاستیک‌های دیگر بیشتر است و تعمیر آن نیاز به مهارت‌های خاص دارد.

مفط سیستم در حالت کار: سیستم تخلیه بخار گران است، لذا اطمینان یافتن از ادامه فعالیت آن به منظور حفاظت از کارخانه، تجهیزات و کارکنان ایده خوبی است. بازرسی و تعمیرات دوره‌ای لازم شامل موارد زیر است:

- تمیز کردن هودها و کانال‌ها یکبار در ماه، شستشوی قسمت داخلی توسط شلنگ در هنگام تخلیه مخزن اسیدشویی (آب شستشو را می‌توان برای پر کردن مخزن جدید به کار برد)
- چک کردن ماهانه یاطاقان و تسمه‌های هواکش
- تعمیر فوری خرابی هودها، اطمینان از درست بودن لقی‌ها پس از تعمیر هواکش و در صورت قطع کردن موتور، چک کردن جهت چرخش
- تعمیر فوری خرابی هودها و کانال - هر چه نشستی طولانی‌تر شود، تعمیر آن سخت‌تر شده و خرابی بیشتری به ساختمان و تجهیزات اطراف وارد می‌شود.
- بررسی و تمیز کردن سالانه دستگاه تصفیه گاز
- بررسی روزانه پمپ دستگاه تصفیه گاز جهت اطمینان از گردش واقعی آب (حتی اگر روشن باشد به معنی پمپ کردن نمی‌باشد). اگر گردشی صورت نگیرد، باید به دنبال افشانک پاشش مسدود شده، لوله‌های گرفته یا پمپ آسیب دیده گشت.

کنترل آلودگی

کنترل آلودگی در خط اسیدشویی بسیار مهم است و باید در فرآیند طراحی شود. در بخش قبل، کنترل خروج هوا در قسمت کنترل بخار مورد بحث قرار گرفت و این بخش به فاضلاب‌های مایع می‌پردازد. فاضلاب‌های مایعی که باید در خط اسیدشویی تصفیه شوند عبارتند از:

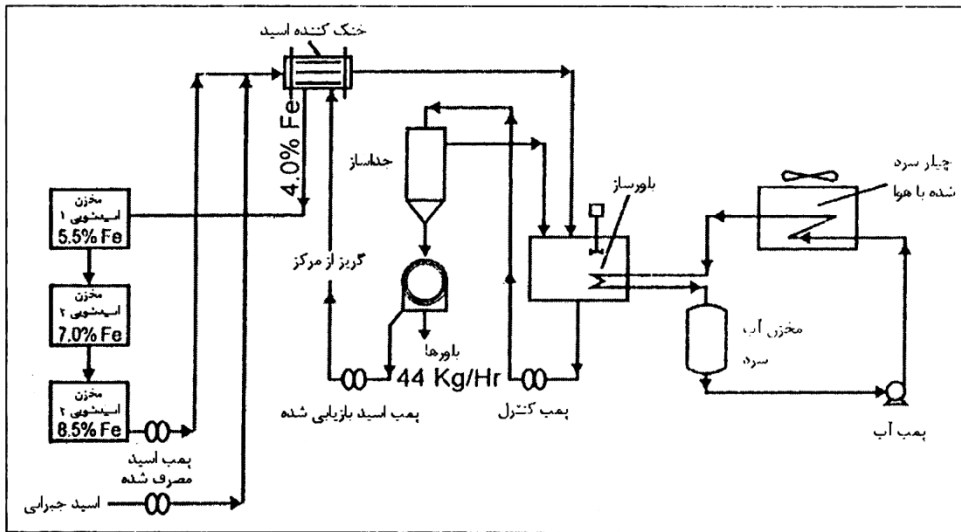
- اسید مصرف شده برای اسیدشویی
- حمام‌های پوشش‌دهی مصرف شده
 - فسفات
 - روغن روانسازی
 - بوراکس
 - آهک
- محلول دوده‌زدایی مصرف شده (پرمنگنات)
- لجن فسفات

- آب مورد مصرف در آبکشی اسید
- فاضلاب دستگاه تصفیه گاز
- آب مورد مصرف در آبکشی فسفات

از میان این موارد، تنها جریان‌های رقیق (فاضلاب‌های دستگاه تصفیه گاز و آب‌های مورد مصرف برای آبکشی) باید به دلایل اقتصادی در محل تصفیه شوند. بقیه موارد را می‌توان از نظر اقتصادی توسط شرکت‌های حمل‌ونقل معتبر به بیرون حمل کرد. با این وجود، بسیاری از کارخانجات اسیدشویی، هم برای دلایل اقتصادی و هم برای کنترل بهتر، ضایعات غلیظ خود را در محل فرآیند می‌کنند.

اسید مصرف شده برای اسیدشویی: آهن موجود در پوسته برداشته شده از میلگرد و مفتول در اسید اسیدشویی حل می‌گردد تا حدی که به حداکثر مقدار حلالیت نزدیک شود (شکل ۱) که در این زمان برای از بین بردن نمک‌های آهن، اسید باید دورریز و یا در غیر این صورت تصفیه شود. پیشنهاد حمل به بیرون هم به منظور بازیافت و هم به منظور بازسازی است. بازیافت به معنی تصفیه اسید جهت از بین بردن نمک‌های آهن به شکل قابل مصرف است. بازسازی به معنی معکوس کردن واکنش اسیدشویی برای تولید اسید تازه و اکسید آهن می‌باشد.

اسیدسولفوریک: بازیافت ساده است اما بازسازی اقتصادی نیست. در اسیدشویی با اسیدسولفوریک، نمک‌های آهن را می‌توان با سرد کردن اسید مصرف شده به ۴۰ تا ۵۰ درجه فارنهایت (۵ تا ۱۰ درجه سانتیگراد)، که در آن (مطابق قسمت چپ شکل ۱) انحلال پذیری آهن بسیار کاهش می‌یابد، جدا نمود. در سرد کردن، سولفات آهن موجود در اسید به صورت فرسولفات هپتاهیدرات ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) متبلور می‌شود، که می‌توان آن را توسط صاف کردن یا گریز از مرکز از اسید سرد جدا نمود. بلورهای جدا شده در حالی که محصول گرانی نیستند، اما برای مصرف در تصفیه فاضلاب، تغذیه حیوانی، کودها، تولید رنگدانه و برخی محصولات الکترونیک قابل فروش می‌باشند. شکل ۲۰ نمونه دیاگرام کلی فرآیند بازیابی اسیدسولفوریک را نشان می‌دهد.



شکل ۲۰- دیاگرام فرآیند بازیابی اسیدسولفوریک

سیستم بازیابی اسید می‌تواند به طور پیوسته یا مرحله‌ای عمل کند. در حالت پیوسته، اسید به طور ثابت از مخازن اسیدشویی به بلورساز پمپ شده و در آنجا توسط سرمایش مکانیکی به دمای ۴۰ تا ۵۰ درجه فارنهایت (۵ تا ۱۰ درجه سانتیگراد) سرد می‌شود. بلورهای نارس نمک آهن از محلول فوق اشباع اسیدشویی ته‌نشین می‌شوند و تا حدود اندازه بلورهای شکر رشد می‌کنند. سپس دوغاب سرد اسید/بلور برای جداسازی بلورها گریز از مرکز شده و در یک ظرف قبل از حمل به بیرون انبار می‌شوند، و اسید بازیابی شده برای استفاده مجدد به مخازن اسیدشویی برمی‌گردد. اگر بازیابی در حالت مرحله‌ای انجام شود، اندازه تجهیزات باید برای نگه داشتن محتویات یک مخزن اسیدشویی مناسب باشد. اسید مصرف شده از مخزن اسیدشویی درون بلورساز تخلیه و سرد می‌شود تا بلورهای نمک تولید کند، سپس از اسید بازیابی شده تصفیه می‌شوند. سیستم مرحله‌ای برای افزایش سرعت زمان گردش مخزن، یک مخزن ذخیره گرم برای اسید بازیابی شده دارد، که آماده پر کردن دوباره مخزن اسیدشویی از مواد انبار شده قبلی است.

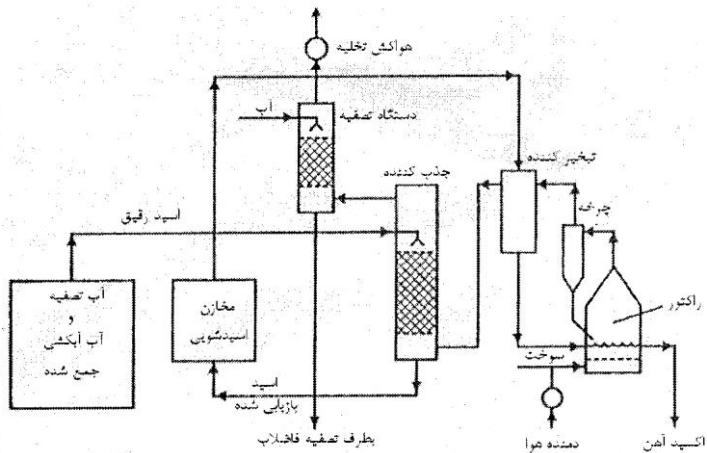
در سیستم بازیابی پیوسته اسید دارای بیش از یک مخزن اسیدشویی، اسید به طور متوالی درون مخازن جاری می‌شود و دائماً از مخزن آخر خارج شده و به مخزن اول برمی‌گردد. تحت این

شرایط، غلظت آهن در حمام‌های اسیدشویی معمولاً در محدوده ۵۰ تا ۷۰ گرم در لیتر (۵ تا ۷ درصد) با مقدار اسید ۱۲۰ تا ۱۵۰ گرم در لیتر (۱۲ تا ۱۵ درصد) می‌باشد. با بازیابی مرحله‌ای، غلظت اسید مصرف شده به ۹۰ تا ۱۰۰ گرم در لیتر (۹ تا ۱۰ درصد) افزایش یافته و اسید بازیابی شده دارای ۲۰ تا ۳۰ گرم در لیتر (۲ تا ۳ درصد) آهن می‌باشد. چون اسید بازیابی شده کاملاً بدون آهن نمی‌باشد، لذا دستگاه بازیابی اسید باید حجم بیشتری از اسید را نسبت به حالت نرمال مورد فرآیند قرار دهد. یعنی در عملیات مرحله‌ای، مخازن نسبت به وقتی که اسید مصرف شده به بیرون حمل می‌شود، باید بیشتر تعویض شوند.

حتی با بازیابی اسید، ضروری است که یک مخزن اسید مصرف شده یک تا چهار بار در سال به بیرون حمل شود یا خنثی گردد، تا آلودگی انباشته شده در اسید، مخصوصاً کربن ریز حاصل از آهن اسیدشویی شده از کلاف‌ها، پاکسازی شود. اسید هیدروکلریک مصرف شده می‌تواند بازسازی یا بازیابی شود، اما هر دو فرآیند، به طور نمونه در مقیاس فرآیند میلگرد و مفتول، تنها تأثیر حاشیه‌ای بر هزینه دارند.

بازسازی اسید هیدروکلریک: عبارت است از حرارت دادن اسید مصرفی در کوره با دمای بالا، تا فرو کلراید درون محلول مجدداً به اکسید آهن و کلرید هیدروژن (HCL) تبدیل شود. HCL بازسازی شده به دلیل گاز بودنش به همراه تمام HCL های آزاد در اسید مصرف شده در اسیدشویی، در کوره از اکسید آهن جامد جدا شده و همراه با محصولات احتراقی کوره به خارج رانده می‌شود. اسید هیدروکلریک برای استفاده مجدد، توسط تصفیه آب بازیابی می‌شود. دو نوع اصلی فرآیند وجود دارند که تنها تفاوت آنها در نوع کوره و شرایط عملیاتی کوره می‌باشد. یک فرآیند از حرارت دهنده پاششی و دیگری از حرارت دهنده بستر سیال استفاده می‌کند. در فرآیند حرارت دهنده پاششی که توسط چندین شرکت ارائه شده است، اسید مصرف شده درون محفظه خالی کوره برخلاف جریان گازهای احتراقی داغ پاشیده می‌شود. واکنشی در این محفظه انجام می‌شود، و ذرات اکسید آهن به طرف کف سقوط می‌کنند، در حالی که گازهای احتراقی، بخار، و گاز HCL از بالا خارج می‌شوند. در فرآیند حرارت دهنده پاششی، محصول اکسید آهن قهوه‌ای

رنگ، با چگالی حجمی کم و ساخته شده از کره‌های تو خالی تولید می‌شود. حرارت دهنده‌های پاششی در دمای حدود ۱۱۰۰ درجه فارنهایت (۶۰۰ درجه سانتیگراد) کار می‌کنند. در فرآیند بستر سیال که تنها توسط یک شرکت ارائه شده است، اسید مصرف شده درون بستری از ذرات اکسید آهن سیال شده توسط گازهای احتراقی، تزریق می‌شود. آهن اکسید شده در واکنش، روی سطح بیرونی ذرات بستر سیال که به طور پیوسته از بستر سیال سرریز می‌شوند، رسوب می‌کند. گازهای احتراقی، بخار، HCL، همراه با ذرات ریز که جدا شده و به صورت ذرات اکسید آهن به بستر برگشته‌اند، از بالای راکتور خارج می‌شوند. محصول بستر سیال سیاه رنگ، با چگالی حجمی بالا و ساخته شده از کره‌های جامد با ساختار لایه‌لایه مانند پیاز می‌باشد. کوره‌های بستر سیال در دمای حدود ۱۴۷۰ درجه فارنهایت (۸۰۰ درجه سانتیگراد) کار می‌کنند. شکل ۲۱ به طور ساده دیاگرام کلی فرآیند بازسازی اسید هیدروکلریک را نشان می‌دهد.



شکل ۲۱- دیاگرام فرآیند بازسازی اسید هیدروکلریک

اسید مصرف شده به سیستم سردکن، که در آن از حرارت گازهای خروجی از کوره برای تغلیظ خوراک کوره استفاده می‌گردد، فرستاده می‌شود. این خوراک غلیظ شده، به درون کوره پمپ شده و در آنجا برای تشکیل اکسید آهن و HCL واکنش می‌دهد. گاز خروجی کوره پس از سرد شدن،

به جذب کننده می رود که در آن، HCL موجود در گاز در آب حل می شود و اسید هیدروکلریک بازسازی شده برای برگشت به مخزن اسیدشویی تولید می کند. گازهای خروجی از جذب کننده برای رعایت استانداردهای زیست محیطی، قبل از عبور از هواکش تخلیه به هوای محیط، تصفیه می شوند.

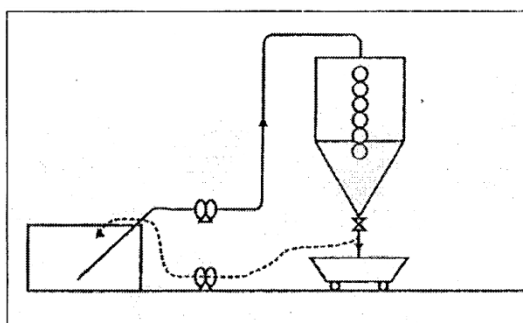
این فرآیند حدود ۹۸ درصد اسید ورودی را بازیابی می کند. اما، اسید بازیابی شده در مقایسه با اسید خریداری شده که ۳۷۰ گرم بر لیتر (۳۷ درصد) اسید دارد، فقط ۱۸۰ تا ۲۰۰ گرم بر لیتر (۱۸ تا ۲۰ درصد) اسید دارد. اسید بازیابی شده داغ است.

دستگاه های بازسازی اسید هیدروکلریک گران هستند و به تعمیرات اساسی و مراقبت عملیاتی نیاز دارند. هزینه مستقیم عملیات کاملاً پایین است. اما هزینه های ثابت عملیات بسیار بالا می باشد و این تکنولوژی را تنها برای عملیات بزرگ مناسب می سازد. برای غلبه بر این محدودیت، اخیراً کارخانجات بزرگ بازسازی در محل هایی نزدیک به چندین عملیات اسیدشویی ساخته شده است. این کارخانجات بازسازی، بر مبنای سیستم اجرتی، جمع آوری اسید مصرف شده از کارخانجات اسیدشویی اطراف و بازگرداندن اسید بازسازی شده به آنها را به وسیله کامیون انجام می دهند.

بازیابی اسید (هیدروکلریک) آزاد در مایعات مصرف شده در اسیدشویی، توسط تغلیظ اسید مصرف شده برای خارج کردن گاز HCL انجام می شود. در این عملیات گاز HCL جذب آب می گردد و به مخزن اسیدشویی برگشت داده می شود. محصول جانبی، محلول غلیظ فروکلراید (حدود ۳۵ درصد فروکلراید) است که برای تصفیه فاضلاب یا به عنوان ماده خام برای ساخت فریک کلراید قابل فروش می باشد. این نوع سیستم بیشترین جذابیت را برای کارخانجاتی دارد که دارای سیستم اسیدشویی ردیفی هستند که در آن اسید مصرف شده دارای اسید آزاد بالا و آهن کم است. این فرآیند، زیاد نظیر بازسازی، سرمایه بر نیست و برای عملیات کوچک تر مناسب تر است. اگر بازسازی یا بازیابی اسید مصرف شده اقتصادی نباشد، اسید مصرف شده را می توان در یک دستگاه تصفیه فاضلاب متعارف خنثی نمود. خنثی سازی اسید مصرف شده به طور مستقیم، عملیاتی دشوار و خطرناک است. هر چند، با سنجش اسید مصرف شده و تزریق آن با سرعت کم به درون دستگاه تصفیه فاضلاب، می توان آن را به آسانی و با ایمنی فرآیند نمود.

محلول‌های مصرف شده در پوشش‌دهی

مواد شیمیایی پوشش‌دهی فسفات آن‌قدر گرانند که تخلیه حمام فسفات باید به ندرت انجام گیرد. به همین دلیل، باید از تجهیزات تصفیه در محل استفاده شود که غیر اقتصادی می‌باشد. بنابراین، بهتر است که حمام‌های فسفات به بیرون حمل شود. آلودگی اصلی در حمام فسفات لجن فسفات آهن است که در فرآیند پوشش‌دهی تولید می‌شود. خارج کردن منظم این لجن فسفات آهن امری اساسی است. (فرآیند خارج کردن لجن در شکل ۲۲ نشان داده شده است).



شکل ۲۲- فرآیند خارج کردن لجن فسفات

لجن فسفات خیلی کم جاری می‌شود و جدا کردن کامل آن از حمام فسفات سخت است. رضایت‌بخش‌ترین شیوه یافت شده عبارت است از تأمین گنجایش کافی در مخزن فرآیند برای نگهداری لجن در فاصله بین هر تخلیه. در فواصل زمانی، مخزن متوقف شده و محتویات آن درون مخزنی با کف مخروطی پمپ می‌شود. به دلیل خصوصیات سیالیت ضعیف لجن، ممکن است لازم باشد که از جاروی مکنده یا دیگر وسایل جمع‌آوری دستی برای جمع کردن لجنی که به دریاچه تخلیه جاری نمی‌شود استفاده گردد. مایع به مدت چهار ساعت یا بیشتر پس از انتقال لجن و محلول فسفات به مخزن ته‌نشینی، باقی می‌ماند. سپس لجن از کف مخزن کشیده می‌شود و محلول شفاف به مخزن فرآیند بازگردانده می‌شود.

لجن هنوز حاوی مقادیر قابل توجهی از محلول شیمیایی فسفات است، اما بازیابی اقتصادی تقریباً ناممکن است زیرا لجن خواص آبگیری بسیار ضعیفی دارد. معمولاً، حمل لجن به بیرون، اقتصادی‌ترین راه است. همچنین لجن را می‌توان همانند آن چه در بالا برای اسید مصرف شده شرح داده شد، درون یک دستگاه تصفیه فاضلاب متعارف جاری نمود. این امر ممکن است با کور کردن صافی فیلترپرس، یا با ایجاد سطوح بالای روی در کیک تصفیه شده یا در فاضلاب فرآیند، بر عملیات اثر مضر بگذارد.

روانساز: حمام‌های روانساز ممکن است با مقادیر فوق‌العاده کم مواد خارجی آلوده شده و نیاز به تخلیه در فواصل منظم داشته باشند. تنها روش عملی دفع، حمل روانساز مصرف شده به بیرون است زیرا هرگونه تلاش برای فرآیند کردن این ضایعات در دستگاه تصفیه فاضلاب، مشکلات بزرگتری ایجاد می‌نماید.

بوراکس: تاکنون هیچ مشکل دفعی از بوراکس ظاهر نشده است، اما در حال حاضر محدودیت‌هایی در مقدار بور درون فاضلاب وجود دارد زیرا غلظت‌های خیلی کم بور می‌تواند مضر باشد. متأسفانه، روش‌های آزمایش شده‌ای برای از بین بردن بور از فاضلاب به طور اقتصادی وجود ندارد. از این رو، در حال حاضر در صورت روبرویی با محدودیت‌های فاضلابی بور، بهترین راه استفاده از یک پوشش دیگر است.

آهک: در صورت کافی نبودن آبکشی، امکان آلودگی حمام‌های آهک با اکسید آهن وجود دارد. در هر صورت، باید حمام‌های آهک را یک یا دو بار در سال به منظور حذف شن و ماسه انباشته شده که جزئی از آهک خام هستند، تخلیه نمود. آهک مصرف شده را می‌توان به عنوان عامل خنثی‌کننده در دستگاه تصفیه فاضلاب به جای هیدروکسید سدیم یا آهک خریداری شده به کار برد. هر چند، استفاده از آهک به جای هیدروکسید سدیم برای خنثی‌سازی اسیدسولفوریک، باعث افزایش مقدار مواد جامد به دلیل ته‌نشینی سولفات سدیم می‌شود.

تمیزکننده قلیایی: در برخی از عملیات اسیدشویی، از تمیزکننده‌های قلیایی برای از بین بردن پوشش‌ها یا روغن از روی کلاف‌های فولادی ورودی استفاده می‌شود. توصیه می‌شود که این

مواد مصرف شده به بیرون حمل شود تا این که در دستگاه تصفیه فاضلاب تصفیه شود، زیرا آزاد شدن روغن‌ها، گریس‌ها و روانساز باقی مانده، باعث ایجاد مشکلاتی در عملیات می‌شود.

مملول دوده‌زدا (پرمنگنات): همانند حمام‌های فسفات، به دلیل هزینه بالای پرمنگنات مصرف شده در محلول‌های دوده‌زدا، لزوم به حداقل رساندن آلودگی وجود دارد. هر چند، حمام باید در زمان‌هایی که اسید از حمام‌های اسیدشویی به درون آن منتقل شده و واکنش‌های آن را کند می‌سازد، تخلیه شود. مانند اسید مصرف شده در اسیدشویی، پرمنگنات مصرف شده را می‌توان به سادگی با تخلیه آن در دستگاه تصفیه فاضلاب قبل از خنثی‌سازی، فرآیند نمود. در اینجا، پرمنگنات با نمک‌های آهن موجود در جریان‌های رقیق واکنش داده و تشکیل سولفات پتاسیم و سولفات منگنز می‌دهد و متعاقباً منگنز همراه با آهن ته‌نشین می‌شود.

جریان‌های فاضلابی رقیق

آب آبکشی: در اغلب خطوط اسیدشویی، مقدار آب تولید شده توسط آبکشی اسید، آبکشی فسفات، و تصفیه هوا، آنقدر زیاد است که حمل آن به بیرون اقتصادی نمی‌باشد، لذا بیشتر عملیات اسیدشویی نیاز به تصفیه در محل دارند. در بعضی جاها، امکان حذف تخلیه محلول اسیدی رقیق توسط استفاده معقولانه مجدد و بازیافت آب، وجود دارد. اما این امر بیشتر استثنا است تا قانون. خوشبختانه، دستگاه تصفیه فاضلاب برای ضایعات اسیدشویی نسبتاً ساده، کم قیمت، و با عملکرد آسان هستند. هر چند، هزینه نسبت مستقیم با ظرفیت جریان هیدرولیک این دستگاه‌ها دارد، بنابراین با استفاده مجدد و بازیافت آب برای کاهش حجم فاضلاب نهایی، کاهش هزینه قابل توجهی می‌توان انجام داد. برخی شیوه‌های مفید برای حفاظت آب عبارتند از: استفاده از آب آبکشی برای تأمین آب دستگاه تصفیه بخارات اسید، انجام آبکشی چند مرحله‌ای با جریان مخالف، مصرف آب آبکشی برای اصلاح سطح مخازن اسیدشویی، ذخیره آب آبکشی به منظور ساخت حمام‌های جدید اسید. شکل ۲۳ نمودار جریان یک نمونه دستگاه تصفیه فاضلاب مورد مصرف در فاضلاب اسیدشویی را نشان می‌دهد.

فاضلاب‌های رقیق، نظیر آب آبکشی اسید، آب آبکشی فسفات، فاضلاب‌های دستگاه تصفیه، و فاضلاب انبار مایعات آلوده، در یک مخزن معادل‌سازی جمع می‌شوند تا تغییرات ناگهانی ترکیب

شیمیایی، که باعث سختی کنترل می‌شود، به حداقل برسد. ضایعات غلیظی که باید تصفیه شوند (اسید مصرف شده، آهک، یا پرمگنات) در مخازن جداگانه ذخیره شده و به صورت جریان خروجی به مخزن تعادل‌سازی اضافه می‌شوند. مایع خروجی از دستگاه تعادل‌سازی به یک خنثی‌کننده دو یا سه مرحله‌ای پمپ می‌شود، که در آنجا پمپ‌هایی که کارکرد آنها وابسته به PH مخزن می‌باشد، یک ماده قلیایی اضافه می‌کنند که PH را تا محدوده هشت تا نه بالا می‌برد. این امر باعث خنثی شدن هرگونه اسید آزاد می‌شود و ته‌نشین شدن فلزات سنگین (آهن، منگنز، نیکل و غیره) به صورت هیدروکسیدهای نامحلول می‌شود. از خنثی‌سازی چند مرحله‌ای به دلیل طبیعت لگاریتمی PH (رجوع شود به ضمیمه B) استفاده می‌شود. خنثی‌سازی یک مرحله‌ای نیاز به افزایش دقیق واکنشگر دارد که غیرممکن است، اما با استفاده از دو یا سه مرحله، دقت لازم در هر مرحله قابل دسترسی می‌باشد.

عوامل فزونی‌کننده: برای فاضلاب‌های اسیدی عبارتند از: سود سوزآور ۵۰ درصد، دوغاب آهک، دوغاب هیدروکسید منیزیم و گاز آمونیاک. اکثر کارخانجات از سود سوزآور مایع که بسته به مقدار مصرف در بشکه یا به صورت عمده ارسال می‌گردد استفاده می‌کنند زیرا کار با آن و کنترل نرخ افزایش آن، آسان است. هر چند، به عنوان یک عامل خنثی‌کننده، سود سوزآور در مقایسه با آهک بسیار گران است. به همین دلیل، در تأسیسات بزرگ‌تر، با وجود نیاز به نیروی انسانی اضافی برای ساخت و کار با دوغاب، اغلب از دوغاب آهک استفاده می‌شود. برای خنثی‌سازی می‌توان دوغاب آهک را از آهک آبدیده ساخت و نیاز به پیروی از دستورالعمل‌های سخت آماده‌سازی که در ضمیمه C شرح داده شده نمی‌باشد، زیرا این دستورات برای استفاده شیمیایی است. ملزومات واکنشگر مورد نیاز برای خنثی‌سازی اسیدسولفوریک عبارتند از: هیدروکسید سدیم ۵۰ درصد، آهک آبدیده و آهک زنده. از هیدروکسید منیزیم و آمونیاک خیلی استفاده نمی‌شود و عموماً مزیتی بر آهک یا سود سوزآور ندارند.

فاضلاب خنثی شده شامل ذرات هیدروکسیدهای فلزی معلق است که باید از آب جدا شوند. یک محلول پلیمری اضافه می‌شود تا ذرات جامد به صورت ذرات بزرگ‌تر به هم بچسبند و سپس با به کارگیری یک صاف‌کننده (کلاریفایر) جدا شوند. ذرات جامد ته‌نشین شده بسیار بزرگ هستند.

لجن کاملاً ته‌نشین شده شامل ۱ تا ۲ درصد ذرات جامد خشک و ۹۸ تا ۹۹ درصد آب می‌باشد. سرریز کلاریفایر (صاف‌کننده) معمولاً دارای کمتر از ۲۰ ppm ذرات جامد معلق بوده و برای تخلیه به فاضلاب به قدر کافی تمیز است. برای ایمنی، برخی فرآیندها یک صافی زلال‌سازی روی جریان سرریز دارند تا این ذرات جامد را در هنگام بروز اختلال جدا کند.

لجن هیدروکسید رقیق از کف کلاریفایر برداشته شده و به یک فیلترپرس پمپ می‌شوند که در آنجا پس از آبگیری بیشتر به لایه‌ای خشک شامل ۲۵ تا ۴۰ درصد ذرات جامد خشک (بسته به اسید مورد مصرف در اسیدشویی و عامل خنثی‌کننده مصرف شده) تبدیل می‌شود. دفع این لایه به صورت تخلیه منظم، تا زمانی که مقدار روی حاصل از آبکشی فسفات در کمترین حالت باشد، امکان‌پذیر است.

عموماً، مقدار نمک حل شده در فاضلاب نهایی خروجی از دستگاه تصفیه فاضلاب آنقدر زیاد است که نمی‌توان از آن مجدداً در فرآیند اسیدشویی استفاده نمود. اگرچه، در تجهیزات اسیدشویی با اسیدسولفوریک که از آهک برای خنثی‌سازی استفاده می‌شود، در صورت محدودیت در تأمین آب تازه، می‌توان از فاضلاب نهایی برای آب دستگاه تصفیه و آبکشی استفاده نمود.

پوسته‌زدایی میلگرد و مفتول فولاد ضدزنگ

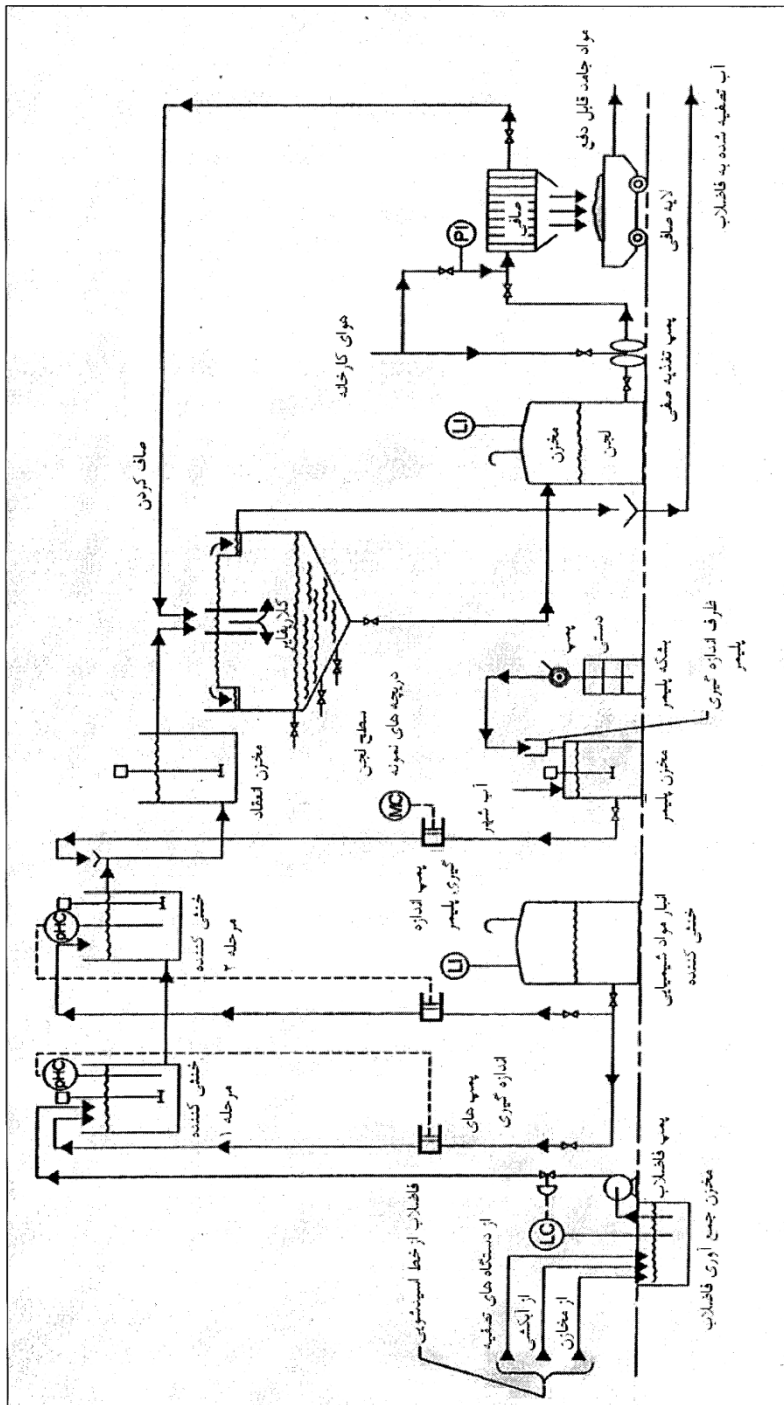
فولاد ضدزنگ، رفع پوسته و تجهیزات آن در بسیاری موارد مشابه اسیدشویی فولاد کربنی می‌باشد. در این بخش فقط به تفاوت‌ها اشاره می‌شود. پوسته اکسید روی اغلب فولادهای ضدزنگ مخلوط پیچیده‌ای از اکسیدهای کروم و آهن با مقدار کمی نیکل است. رفع این پوسته خیلی سخت‌تر از پوسته فولاد کربنی است. به همین دلیل، رفع بخش عمده پوسته به طریق مکانیکی و به دنبال آن اسیدشویی برای تمیز کردن سطح، در اغلب موارد بهترین راه اقتصادی می‌باشد.

پوسته‌زدایی شیمیایی کامل فولاد ضدزنگ شامل عملیات زیر است:

- نرم کردن یا حالت دادن پوسته
- پیش اسیدشویی در اسیدسولفوریک
- اسیدشویی نهایی در اسید نیتریک / هیدروفلوئوریک یا اسیدهای مخلوط مشابه

نرم کردن یا حالت دادن پوسته تنها در صورتی لازم است که کلاف به طور مکانیکی پوسته‌زدایی نشده باشد. این کار را می‌توان در یک حمام نمک داغ یا در یک حمام محلول پرمنگنات پتاسیم خیلی داغ انجام داد. نمک داغ مصرفی غالباً هیدروکسید سدیم و نیترات سدیم مذاب با مقداری افزودنی‌ها، در دمای حدود ۸۰۰ درجه فارنهایت (۴۳۰ درجه سانتیگراد) می‌باشد. زمان فرآیند ۱۰ تا ۱۵ دقیقه می‌باشد. این عمل نه تنها باعث حالت دادن پوسته می‌شود، بلکه پوشش‌ها، روغن، گریس، دوده آنیل و روانسازهای کشش را از بین می‌برد. در این عملیات باید مراقب شدیدی انجام شود مخصوصاً در زمان تخلیه لجنی که در کف مخزن پوسته جمع شده است. پس از حالت‌دهی در حمام نمک، کلاف سریعاً سرد شده و در آب آبکشی می‌شود. این فرآیند باعث تولید جریان فاضلابی شدیداً قلیایی می‌شود که ممکن است شامل کروم شش ظرفیتی باشد که روش تصفیه ضایعات را پیچیده می‌سازد. غوطه‌وری در یک محلول خیلی داغ قلیایی پرمنگنات پتاسیم (۲۰۰ درجه فارنهایت - ۹۵ درجه سانتیگراد) نیز همان نتایج را به دست می‌دهد، اما نیاز به زمان خیلی بیشتر بین ۳۰ و ۶۰ دقیقه دارد. هر چند، این عملیات به دلیل عدم تولید فاضلاب قلیایی به مقدار تولید شده در حمام نمک داغ، ایمن‌تر می‌باشد.

در اسیدشویی فولاد ضدزنگ با اسیدسولفوریک، برای رفع بخش عمده پوسته اکسید آهن معمولاً از اسیدسولفوریک با غلظت‌های بالاتری نسبت به فولاد کربنی - حدوداً ۲۰٪ - استفاده می‌شود. معمولاً، از اسید هیدروکلریک نباید برای اسیدشویی انواع ضدزنگ آستنیتی استفاده نمود زیرا محیطی کلرایدی می‌تواند باعث ترک حاصل از خوردگی تنش‌ی شود. پس از اسیدشویی با اسیدسولفوریک، عملیات پوسته‌زدایی با غوطه‌وری در مخزنی حاوی ۲۰ تا ۵۰ گرم بر لیتر (۲ تا ۵ درصد) اسید هیدروفلوئوریک (HF) و ۱۲۰ تا ۱۵۰ گرم بر لیتر (۱۲ تا ۱۵ درصد) اسیدنیتریک در دمای حدود ۱۲۰ درجه فارنهایت (۵۰ درجه سانتیگراد)، به پایان می‌رسد. اسیدشویی با اسیدنیتریک و اسید هیدروفلوئوریک عملیاتی خطرناک و تهدیدکننده محیط‌زست است. اسید هیدروفلوئوریک و فلئور سمی هستند و در زمان کار با این مواد مراقبت شدیدی لازم است چرا که سوختگی با اسید هیدروفلوئوریک دردآور بوده و دیر التیام می‌یابد. تحت برخی



شکل ۲۳- نمودار جریان خط اسیدشویی دستگاه تصفیه فاضلاب

شرایط، در عملیات اسیدشویی ممکن است بخارات متراکم قهوه‌ای رنگ اکسیدنیترژن (NO_x) تولید شود که از بین بردن آنها بدون تجهیزات خیلی گران تقریباً غیرممکن است. اخیراً، برخی کارخانجات برای جلوگیری از مشکل بخارات قهوه‌ای رنگ، سعی به استفاده از پراکسید هیدروژن، همراه با اسیدنیتريك یا به جای آن نموده‌اند. اما تاکنون هیچ راهی برای اجتناب از مصرف اسید هیدروفلوئوریک پیدا نشده است.

مواد ساخت

عملیات بسیار زیان‌آور اسیدشویی با اسیدنیتريك و اسید هیدروفلوئوریک، نیاز به مواد ساخت متفاوت با آنچه عموماً در اسیدشویی فولاد کربنی به کار می‌رود، دارد. مخازن اسیدشویی با اسیدنیتريك و اسید هیدروفلوئوریک، از جنس فولاد با لایه لاستیک هستند که حداقل دو ردیف آجر کربنی قرار گرفته در ملات فوران مصنوعی (در آجرهای اسیدی معمولی، اسید هیدروفلوئوریک به سیلیس حمله می‌کند) یا پلی‌پروپیلن دارند، که هیچ کدام ایده‌آل نمی‌باشد. برای مخازن فولادی، پیدا کردن فرمولبندی لاستیک با مقاومت بلند مدت در برابر اسیدنیتريك دشوار است. برعکس آن، پلی‌پروپیلن در شرایط اکسیدکنندگی قوی، عمر محدودی دارد. خصوصاً جوش‌ها بسیار حساس هستند. با این وجود، به دلیل هزینه بسیار بالای آجر کربنی، مزیت قابل توجه پلی‌پروپیلن قیمت آن است.

انتخاب مواد به ویژه برای چنگک‌های C شکل مشکل است زیرا مواد فلزی کمی وجود دارند که در برابر مخلوط اسیدنیتريك و اسید هیدروفلوئوریک مقاومت کنند و آن موادی هم که این خاصیت را دارند، بسیار گران هستند. فولادهای ضدزنگ پرآلیاژ مانند دوریمت ۲۰ و CD_4MCu می‌توانند مناسب باشند. راه‌حل‌های معمولی عبارتند از استفاده از چنگک‌های کم دوام از جنس فولاد کم‌ارزش، چنگک‌های پلاستیکی یا با پوشش پلاستیک، و تسمه‌هایی از جنس پلی‌استر یا پروپیلن.

برای سیستم‌های تخلیه بخار، پلاستیک‌های گرمانرم نظیر پلی‌وینیل کلراید و پلی‌پروپیلن، بهتر از پلاستیک‌های تقویت شده با فیبر می‌باشند، زیرا اسید هیدروفلوئوریک به شیشه حمله می‌کند.

گرچه معمولاً برای هواکش‌ها، از پلاستیک‌های تقویت شده با فیبر که دارای فرمول مخصوص ضد خوردگی هستند، استفاده می‌شود.

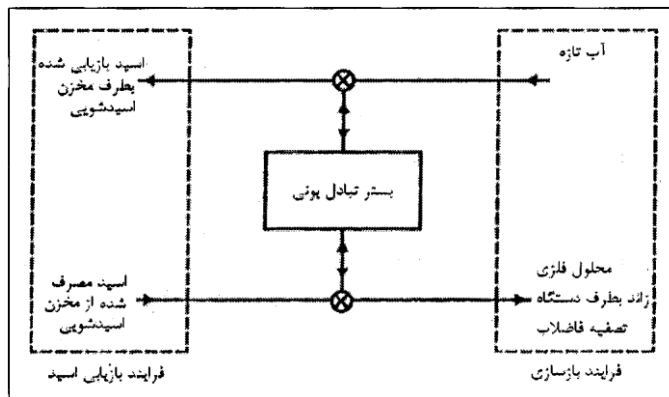
تخلیه بخار

الزامات تخلیه بخار عموماً مشابه موارد مربوط به اسیدشویی فولادکربنی با اسیدهایدروکلریک می‌باشند. دستگاه‌های تصفیه بخار مشکلی با رفع بخارات اسیدی ندارند، اما همانطور که در بالا اشاره شد، بخارات قهوه‌ای رنگ اکسیدهای نیتروژن که در هنگام کار با برخی فولادهای ضدزنگ از مخازن اسیدهایدروفلوئوریک و اسیدنیتریک تولید می‌شوند، مشکل تصفیه پرهزینه و بسیار سخت ایجاد می‌کنند. محلول‌های اسیدشویی با پایه پراکسید هیدروژن می‌توانند راه‌حل احتمالی برای مشکل اکسیدهای نیتروژن باشند.

تصفیه فاضلاب

تعدادی فرآیند بازیابی و بازسازی برای اسیدهایدروفلوئوریک و اسیدنیتریک ایجاد شده است اما بیشتر آنها پیچیده و گران هستند. اگرچه، موفقیت روش تبادل یونی در زمان کوتاه (اکو - تک) برای بازیابی این اسیدها به اثبات رسیده است. در این فرآیند (که در شکل ۲۴ نشان داده شده است)، اسید مصرف شده از میان یک بستر تبادل یونی عبور می‌کند، که در آن بخش زیادی از فلزات حل شده، توسط رزین جدا می‌شود، در نتیجه یک محلول اسیدی بدون فلز تولید می‌شود که می‌توان آن را مستقیماً به مخزن اسیدشویی بازگرداند. در فواصل معین، فلزات جدا شده از اسید مورد مصرف در اسیدشویی، از رزین جدا می‌شوند و تولید جریان فاضلابی دارای اسید کم و فلز زیاد می‌کنند که می‌توان آن را در دستگاه تصفیه فاضلاب، خنثی نمود.

اسیدهایدروفلوئوریک و اسیدنیتریک هر دو بسیار گران هستند بنابراین بازیابی اسید، علاوه بر کاهش تولید فاضلاب، برگشت اقتصادی خوبی نیز ایجاد می‌کند. فاضلاب‌های آبکشی رقیق و دستگاه تصفیه در اسیدشویی فولاد ضدزنگ و اسید مصرف شده یا محصول جانبی تبادل یونی را می‌توان با فرآیندی مشابه آن چه قبلاً برای اسیدشویی فولاد کربنی شرح داده شد، تصفیه نمود. اگرچه، برای اسیدهایدروفلوئوریک یا محلول‌های اسیدی مخلوط، باید از آهک به عنوان عامل خنثی‌کننده استفاده شود تا ته‌نشینی فلئوریدها تا سطوح تخلیه قابل قبول انجام گیرد.



شکل ۲۴- بازیابی تبادل یونی اسید هیدروفلوئوریک و اسید نیتریک مصرف شده در اسیدشویی

ضمیمه A: معادلات و نشانه‌های شیمیایی

مبحث شیمی ساده زیر برای بهره‌مندی کسانی که با معادلات و فرمول‌های شیمیایی آشنایی ندارند تهیه شده است.

فلز نقره‌ای	آهن	Fe
گاز بی‌رنگ	هیدروژن	H
گاز بی‌رنگ	اکسیژن	O
جامد زرد	گوگرد	S
گاز سبز	کلر	CL

یک ماده خالص که با روش‌های شیمیایی بتوان آن را با دو یا چند ماده ساده‌تر تجزیه نمود، ماده مرکب نامیده می‌شود. مواد مرکب معمولاً خواص یکنواخت و کاملاً متفاوت با عناصر شیمیایی که از آن ساخته شده‌اند، دارند. مواد مرکب مهم در اسیدشویی عبارتند از:

اسیدسولفوریک	H ₂ SO ₄	مایع روغنی شفاف
فرو سولفات	FeSO ₄	جامد متبلور سبز
فریک سولفات	Fe ₂ (SO ₄) ₃	جامد قهوه‌ای
کلرید هیدروژن	HCL	گاز بی‌رنگ، که در صورت انحلال در آب، اسید هیدروکلریک تولید می‌کند.
کلر	CL	گاز سبز
فرو کلراید	FeCL ₂	جامد متبلور سبز
فریک کلراید	FeCL ₃	جامد قهوه‌ای
آب	H ₂ O	مایع شفاف

وزن اتمی مربوط به هر عنصر است. وزن اتمی، میانگین جرم (میانگین وزن) تمام ایزوتوپ‌های موجود به طور طبیعی یک عنصر شیمیایی می‌باشد، برخلاف جرم اتمی، که جرم هر ایزوتوپ به طور انفرادی می‌باشد. وزن اتمی جمع نوترون‌ها و پروتون‌ها در هسته اتم است. سبک‌ترین عنصر، هیدروژن (وزن اتمی=۱) است که فقط یک پروتون در هسته دارد. وزن مولکولی یک ماده مرکب، مجموع وزن اتمی عناصر تشکیل‌دهنده آن می‌باشد. وزن‌های اتمی و مولکولی مواد مهم در اسیدشویی عبارتند از:

۹۸/۰۹	H ₂ SO ₄	۵۵/۸۵	Fe
۱۵۱/۹۲	FeSO ₄	۱/۰۱	H
۳۶/۴۷	HCL	۱۶/۰۰	O
۱۲۶/۷۷	FeCL ₂	۳۲/۰۷	S
۱۸/۰۲	H ₂ O	۳۵/۴۶	CL

ضمیمه B: PH

نمایش دقیق غلظت‌های بسیار کم یون هیدروژن در نشان‌گذاری دهنده معمول، دشوار است. از این رو، چنین غلظت‌هایی برحسب سیستمی به نام مقیاس PH بیان می‌شوند. مقدار PH یک محلول به عنوان لگاریتم معکوس غلظت یون هیدروژن (برحسب مول بر لیتر) موجود در آن تعریف می‌شود. PH معمولاً به عنوان لگاریتم منفی (مبنای ۱۰) غلظت یون هیدروژن بیان می‌شود:

$$pH = \frac{\log 1}{-(H^+)} = \log(H^+)$$

برای آب خالص یا یک محلول خنثی، غلظت یون هیدروژن 1×10^{-7} مول بر لیتر می‌باشد. بنابراین، PH آب ۷ است. محلول‌های اسیدی، که بیشترین کاربرد را در اسیدشویی دارند، PH کمتر از ۷ دارند. محلول‌های قلیایی (یا بازی) PH بالاتر از ۷ دارند. هر چه فاصله PH از ۷ بیشتر باشد، محلول اسیدی‌تر یا قلیایی‌تر است، لذا وقتی PH از ۷ به سمت صفر کاهش می‌یابد،

اسیدیته محلول افزایش پیدا می‌کند. به دلیل این که تولید غلظت‌های هیدروژن (H^+) و یون‌های هیدروکسید (OH^-) در یک محلول آبی در دمای اتاق باید همیشه 1×10^{-14} باشد، PH را می‌توان از غلظت یون هیدروکسید نیز محاسبه نمود. یون‌های هیدروکسید و هیدروژن، اگر چه، یون‌های یک آب الکترولیت بسیار ضعیف هستند و تمایل زیادی به واکنش با یکدیگر دارند. از نقطه نظر کمی، تولید غلظت‌هایی از این یون‌ها نمی‌تواند به‌طور دائم از 1×10^{-14} بیشتر شود. اگر غلظت‌های یونی بسیار کم باقی بماند، محدوده قابل استفاده PH از صفر (خیلی اسیدی) تا ۱۴ (خیلی قلیایی) می‌باشد.

حتی در رقیق‌ترین حمام اسیدشویی، غلظت یون هیدروژن بزرگتر از ۱ است، یعنی PH کمتر از صفر می‌باشد. بنابراین، اسیدیته اسید مورد مصرف در اسیدشویی را نمی‌توان با عبارت PH به‌طور مفید گزارش نمود. معمولاً PH آب‌های آبکشی و فاضلاب‌ها در محدوده صفر تا ۴ است، بنابراین در این موارد، PH مقیاس مفید است.

از آنجایی که مقیاس PH لگاریتمی است، افزایش ۱ واحد در PH برابر با کاهش (PH یک مقیاس منفی است) غلظت اسید توسط ضربی از ۱۰ می‌باشد. این یک مزیت است چرا که درک تغییر در PH از ۱ تا ۴ (۳ درجه شدت کاهش غلظت یون هیدروژن) تا تغییر در غلظت از ۰/۴۹ تا ۰/۰۰۰۴۹ آسان‌تر است. عیب مقیاس PH نیز لگاریتمی بودن آن است. به عنوان مثال، تغییر ۱ واحد در PH در $PH = 1$ ، باعث تغییر بیشتری در مقدار اسید می‌شود تا تغییر یک واحد در $PH = 4$ ، که باعث ایجاد برخی مشکلات در کنترل آبکشی و تصفیه فاضلاب می‌شود.

ضمیمه C: تعلیق‌های آهکی

تعلیق‌های اکسید کلسیم حامل‌های اقتصادی و مناسبی برای کشش سرد هستند. اکسید کلسیم قابلیت انحلال بسیار کمی در آب دارد، بنابراین یک حمام آهک شامل یک تعلیق مکانیکی است که نیاز به هم زدن، پمپ کردن، یا در غیر این صورت حرکت سریع مایع برای افزایش یکنواختی و اجتناب از ته‌نشینی سریع مواد جامد دارد. تولیدکننده‌های کوچکتر که نیاز به مقادیر کم هیدروکسید کلسیم دارند، از هیدروکسید کلسیم تجاری برای کشش مفتول سرد استفاده می‌کنند. اگر چه، اکثر کارخانجات نورد از اکسید کلسیم استفاده می‌کنند، که با آبدیده شدن (کشتن) در

آب، به آسانی به هیدروکسید کلسیم تبدیل می‌شود. مشکل اصلی در کشش مفتول، که از روش‌های نامناسب آبدیده کردن یا نگهداری نامناسب وان غوطه‌وری ایجاد می‌شود، عدم امکان تولید پوشش آهکی مناسب در یک بار غوطه‌وری می‌باشد. کیفیت ضعیف هیدروکسید کلسیم نیاز به غوطه‌وری مکرر دارد، که باعث افزایش هزینه نیروی انسانی، کاهش نرخ تولید و پوشش‌های ضعیف مفتول می‌شود. بنابراین، نگهداری صحیح حمام هیدروکسید کلسیم به منظور اجتناب از تباهی، امری مهم می‌باشد.

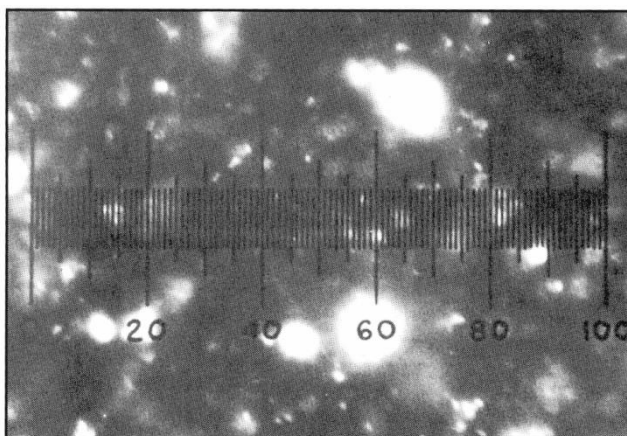
مطلوب‌ترین مشخصات هیدروکسید کلسیم برای پوشش‌دهی مفتول این است که باید دارای اندازه ذره کوچک و مساحت سطح مخصوص عالی باشد. مساحت سطح مخصوص (که از این به بعد سطح مخصوص نامیده می‌شود) نسبت معکوس با قطر ذره دارد. هر چه ذره کوچک‌تر شود، سطح مخصوص بزرگ‌تر می‌شود. بنابراین، چسبندگی هیدروکسید کلسیم به مفتول نسبت مستقیم با سطح مخصوص دارد. یعنی، چسبندگی با افزایش سطح مخصوص یا کاهش متناظر اندازه ذره، افزایش می‌یابد.

سطح مخصوص هیدروکسید کلسیم تجاری در مقایسه با سطح مخصوص به دست آمده از آبدیده کردن اکسید کلسیم در آب، در شرایط ایده‌آل برای تولید اندازه هیدروکسید کلسیم ریزدانه، نسبتاً پایین است. وقتی مطلوب‌ترین انواع اکسید کلسیم در آب تحت شرایط ایده‌آل آبدیده شوند، می‌توان هیدروکسیدهای کلسیمی با سطح مخصوص تقریباً ۶۰۰۰۰ سانتیمتر مربع بر گرم به دست آورد. این سطح مخصوص با ذره‌ای با میانگین قطر تقریباً ۰/۴۴ میکرون مطابقت دارد. بهترین هیدروکسیدهای کلسیم تجاری نمی‌توانند سطح مخصوص بالاتر از ۳۵۰۰۰ سانتیمتر مربع بر گرم که مطابق با میانگین قطر ذره تقریباً ۰/۷۶ میلی‌متر یا تقریباً ۱/۷۵ برابر قطر ذره با سطح مخصوص ۶۰۰۰۰ سانتیمتر مربع بر گرم داشته باشند.

همچنین مهم است که ذرات هیدروکسید کلسیم در تعلیق نرخ ته‌نشینی [آهک] کمتری داشته باشند، تا ذرات با هماهنگی خودشان، بدون صرف مقادیر زیاد انرژی برای تجهیزات هم‌زدن یا ایجاد جریان، در تعلیق باقی بمانند. هیدروکسید کلسیم با قطر کم یا سطح مخصوص زیاد این ملزومات را به طور رضایتبخش‌تری برآورده می‌سازد.

دومین خصوصیت مطلوب هیدروکسید کلسیم در پوشش دهی مفتول این است که نباید دارای ذرات هیدروکسید کلسیم متبلور، با بزرگی قابل رؤیت توسط نور پلاریزه شده میکروسکوپ با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر باشد. مشخص شده است که اکسیدهای کلسیم تولید شده تحت شرایط خاص تکلیس (تبدیل به آهن شدن)، دارای کریستالیت‌های اکسید کلسیم هستند که به محض آبدیده کردن، حتی تحت شرایط ایده آل، تولید هیدروکسید کلسیم متبلور می‌نمایند. بنابراین، هیدروکسیدهای کلسیم تجاری ممکن است به دلیل طبیعت اکسید کلسیمی که از آن ساخته شده‌اند، دارای مقداری مواد متبلور بزرگ باشند. تمام هیدروکسیدهای کلسیم متبلور هستند. اگرچه، وقتی از اکسید کلسیم **Soft burned** با واکنش‌پذیری عالی تحت روش آبدیده کردن مناسب از محدوده سطح مخصوص کم تا سطح مخصوص زیاد تولید شوند، هنوز آن‌قدر کوچک هستند که در نور پلاریزه با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر غیرمشهود باشند. غالباً به این‌گونه هیدروکسیدهای کلسیم، هیدروکسیدهای کلسیم بی‌شکل گفته می‌شود.

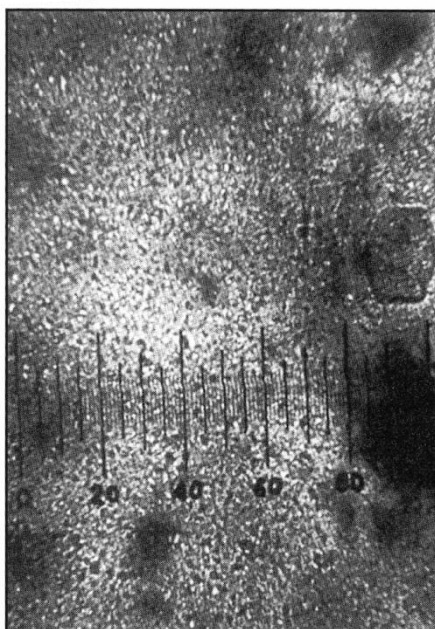
این مشکل رشد بلور ممکن است شدیدترین مشکل موجود در تقریباً تمام کارخانجات کشش مفتول باشد. مطالعه‌ای بر روی علت و کنترل رشد بلور هیدروکسید کلسیم در طول آبدیده کردن و حرارت دادن انجام شده و روش‌های جلوگیری از تبلور ارائه شده است. کنترل دما در هنگام تبدیل اکسید کلسیم با واکنش‌پذیری عالی به هیدروکسید کلسیم (آبدیده کردن) و روش کنترل دمای حمام تنها اقدامات پیشگیرانه لازم برای جلوگیری از رشد بلور [آهک] می‌باشند. این کنترل‌ها تنها با تجهیزات آبدیده کردن مناسب و استفاده صحیح بخار در حمام هیدروکسید کلسیم برای جلوگیری از زیاد گرم شدن موضعی، ممکن می‌باشند. کنترل اخیر عموماً حمامی با طراحی مناسب جهت تأمین گردش جریان و توزیع بخار خوب ایجاب می‌کند. مثال‌هایی از هیدروکسیدهای کلسیم تجاری بدون بلور در شکل C۱ نشان داده شده است. مثال‌هایی از هیدروکسیدهای کلسیم تجاری دارای مواد متبلور در شکل C۲ نشان داده شده است.



شکل C۱ - عکس میکروسکوپی Ca(OH)_2 تجاری که تراکم Ca(OH)_2 را

نشان می‌دهد، اما Ca(OH)_2 متبلور وجود ندارد.

مقیاس: ۱ اینچ معادل ۵۳/۴ میکرون است.

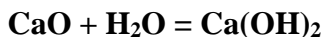


شکل C۲ - عکس میکروسکوپی Ca(OH)_2 تجاری که تبلور Ca(OH)_2 را نشان می‌دهد.

مقیاس: ۱ اینچ معادل ۱۰۰ میکرون است.

طبقه‌بندی و آبدیده کردن اکسید کلسیم: آبدیده کردن آهک، واکنش آهک زنده (اکسید کلسیم

CaO) با آب به منظور تولید آهک آبدار (هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2) می‌باشد:



این یک واکنش گرمازا است که به ازاء هر پوند CaO ، 490 Btu گرما آزاد می‌کند. گرمای آزاد شده از یک پوند CaO برای بالا بردن دمای $3/5$ پوند آب از دمای اتاق (70°C درجه فارنهایت یا 21°C درجه سانتیگراد) تا دمای جوش (212°C درجه فارنهایت یا 100°C درجه سانتیگراد) کافی می‌باشد. برای استفاده از این گرما جهت تولید مناسب‌ترین نوع هیدروکسید کلسیم برای پوشش آهکی، چهار عامل باید در نظر گرفته شود:

- طبیعت اکسید کلسیم
- نسبت آب به اکسید کلسیم
- دمای آب
- سرعت هم‌زدن در حین آبدیده کردن

این عوامل سرعت آزادسازی گرما را، که تعیین کننده سطح مخصوص و دیگر مشخصات هیدروکسید کلسیم تولید شده می‌باشد، معین می‌نمایند.

اکسیدهای کلسیم عموماً بر مبنای درجه فعالیتشان طبقه‌بندی می‌شوند. درجه فعالیت، مقدار واکنش اکسید کلسیم با آب طبق روش تست استاندارد می‌باشد. درجه فعالیت، نتیجه روش و دمای سوختن یا تکلیس است. اکسید کلسیم می‌تواند بسته به واکنش آن با آب، یا سرعتی که در آن گرمای آبدهی آزاد می‌شود، کامل پخته شده، فرا پخته شده، یا نیم پخته شده باشد. در اکسید کلسیم کامل پخته شده یا فراپخته شده، سرعت واکنش در آب آن قدر کم است که ممکن است روزها و ساعت‌های زیادی لازم باشد تا آن را به هیدروکسید کلسیم تبدیل نماید. سرعت آزادسازی گرما در این نوع اکسیدهای کلسیم آن قدر کم است که ارزشی در صنایع کشش مفتول ندارند. اکسید کلسیم نیم پخته شده دارای فعالیت زیاد یا سرعت بالای آزادسازی گرما در آب می‌باشد. این نوع اکسید کلسیم آن قدر گرما آزاد می‌کند که دمای آب در 30°C ثانیه اول از 9 تا 18

درجه فارنهایت (۵ تا ۱۰ درجه سانتیگراد) و در تبدیل نهایی به هیدروکسید کلسیم از ۱۸ تا ۳۶ درجه فارنهایت (۱۰ تا ۲۰ درجه سانتیگراد) بالا رود. پس این طبقه بندی اکسید کلسیم، بر مبنای سرعتی که در آن با آب واکنش می دهد انجام شده است. اکسید کلسیمی که با آب در کوتاه ترین دوره زمانی برای آزاد سازی بیشترین مقدار گرما واکنش دهد، بالاترین فعالیت را دارد. در شرایطی که نسبت آب به CaO یکسان و دمای آب برابر باشد، اکسید کلسیم با فعالیت بالا، که با سرعت زیادی گرما آزاد می کند، هیدروکسید کلسیم با سطح مخصوص بالاتری تولید می کند تا اکسید کلسیم با فعالیت پایین که با سرعت کمی گرما آزاد می کند. فعالیت بالای اکسید کلسیم رعایت احتیاط را الزامی می سازد زیرا آبدیده کردن آهک برای تولید هیدروکسید کلسیم با سطح مخصوص بالا، نیاز به توافق بین دو عامل مخالف، یعنی نسبت کم آب و بیشتر نبودن دمای آبدیده کردن از ۲۱۲ درجه فارنهایت (۱۰۰ درجه سانتیگراد) دارد. مشخص شده است که تبلور هیدروکسید کلسیم در دمای ۲۱۴ درجه فارنهایت (۱۰۱ درجه سانتیگراد) صورت می گیرد. برای جلوگیری از رشد هیدروکسید کلسیم متبلور، دمای آبدیده کردن در طول زمان آبدیده کردن نباید هیچ گاه به ۲۱۲ درجه فارنهایت (۱۰۰ درجه سانتیگراد) برسد. بنابراین، در هنگام چرخه آبدیده کردن باید سرعت آزاد سازی گرما تعیین و کنترل شود تا هیدروکسید کلسیم با کیفیت پایدار تولید گردد. به دلیل این که هیدروکسید کلسیم با سطح مخصوص بالا چسبندگی بیشتری به مفتول دارد، اکسید کلسیم با فعالیت بالا لازم است، تا این نوع هیدروکسید کلسیم را تولید نماید. فعالیت اکسید کلسیم برای تعیین مناسب بودن آن جهت تولید هیدروکسید کلسیم با سطح مخصوص بالا باید اندازه گیری شود. این امر با افزودن ۱۸۰ گرم اکسید کلسیم به ۹۰۰ میلی لیتر آب مقطر (۵ به ۱) در دمای ۷۵ درجه فارنهایت (۲۴ درجه سانتیگراد) در بشر یک لیتری عایق از جنس فولاد ضد زنگ همراه با به هم زدن شدید، انجام می شود. سپس افزایش دما توسط دماسنج اندازه گیری می شود. اکسید کلسیمی که بتواند هیدروکسید کلسیم با سطح مخصوص بالا تولید کند، باید ظرف ۳۰ ثانیه پس از افزودن اکسید کلسیم به آب، حداقل افزایش دمای ۳۶ درجه فارنهایت (۲۰ درجه سانتیگراد) را نشان دهد و دما باید ظرف تقریباً ۵ دقیقه یا کمتر، حداقل به ۱۰۴ درجه فارنهایت (۴۰ درجه سانتیگراد) برسد.

دمای آب مصرفی در آبدیده کردن و نسبت H_2O به CaO باید طوری انتخاب شود که دمای کل آبدیده کردن کمتر از ۲۱۲ درجه فارنهایت (۱۰۰ درجه سانتیگراد) باشد. مطالعه واکنش بین CaO و H_2O نشان داده است که این دما را می‌توان توسط تعادل حرارتی محاسبه نمود. دماهای محاسبه شده برای آب، که جهت آبدیده کردن آهک زنده با نسبت‌های مختلف به منظور نگهداری حداکثر دما در پایین‌تر از ۲۱۲ درجه فارنهایت (۱۰۰ درجه سانتیگراد) توصیه می‌شود، در جدول C۱ نشان داده شده است.

زمانی که در آن این گرما آزاد می‌شود و بیانگر سرعت است، در تمام عملیات آبدیده کردن مهم است. سطح مخصوص هیدروکسید کلسیم به دست آمده، تا حد زیادی بستگی به این سرعت گرمایش دارد. هرچه زمان کوتاه‌تر باشد، یا هر چه سرعت آزادسازی گرما برای آب در هر دمای آبدیده کردن معین، بیشتر باشد، سطح مخصوص هیدروکسید کلسیم بزرگ‌تر خواهد بود. برعکس، هر چه زمان آبدیده کردن طولانی‌تر باشد، یا سرعت آزادسازی گرما برای آب در هر دمای آبدیده کردن معین، کمتر باشد، سطح مخصوص هیدروکسید کلسیم کمتر خواهد بود. تأثیر سرعت آزادسازی گرما بر سطح مخصوص برای تعدادی از اکسیدهای کلسیم در جدول C۲ نشان داده شده است.

نسبت وزن آب مصرفی در آبدیده کردن به وزن اکسید کلسیم برای هر دمای معین نیز به عنوان روشی برای کنترل سطح مخصوص هیدروکسید کلسیم به دست آمده به کار می‌رود. عموماً، سطح مخصوص با کاهش نسبت، افزایش می‌یابد و با افزایش نسبت، کاهش می‌یابد.

جدول C۱- حداکثر دمای تقریبی آب مصرفی در آبدیده کردن به طور نظری، برای چندین نسبت H₂O به CaO

نسبت H ₂ O به CaO (R)	حداکثر دمای آب پیشنهادی (F°)	سطح مخصوص (cm ² /g)
۲	۳۹	۵۲۰۰
۲/۵	۵۰	۵۴۰۰
۳	۶۸	۵۱۵۰۰
۳/۵	۸۶	۵۲۰۰۰
۴	۱۰۴	۵۲۵۰۰
۵	۱۲۲	۵۱۰۰۰
۶/۵	۱۴۰	۵۰۰۰۰
۸/۵	۱۵۸	۵۰۵۰۰
۱۳/۵	۱۷۶	۵۱۰۰۰
۲۵	۱۹۴	۵۴۰۰۰

جدول C۲ - تأثیر افزایش دما (سرعت گرمایش) در هنگام آبدیده کردن CaO بر سطح مخصوص Ca(OH)₂

دمای آب: ۲۴ درجه سانتیگراد - R=۵

افزایش دما (ΔT)			سرعت آزادسازی گرما (E/min)	سطح مخصوص (cm ² /g)	قطر ذره
۱/۲ حداقل (C°)	کل (C°)	زمان حداقل (t)			
۳/۳	۳۸/۹	۱۴ ۱۱	۲/۷۸	۲۰۳۱۱	۱/۸۰
۵/۰	۳۹/۵	۱۱	۳/۵۹	۱۹۷۴۲	۱/۸۶
۷/۱	۳۹/۸	۹	۴/۴۲	۲۱۰۲۸	۱/۷۴
۱۰/۹	۴۲/۲	۹	۶۹/۴	۴۵۰۳۹	۰/۵۹
۲۱/۹	۴۲/۸	۴	۱۰/۷	۵۷۵۰۸	۰/۴۷
۲۶/۱	۴۴/۵	۳	۱۴/۸	۵۹۹۷۲	۰/۴۵
۲۸/۱	۴۳/۵	۳	۱۴/۵	۵۴۱۱۸	۰/۴۹
۲۸/۱	۴۳/۵	۳	۱۴/۵	۵۴۱۱۸	۰/۴۶
۲۶/۵	۴۵/۶	۳	۱۵/۲	۵۸۰۷۹	۰/۴۶

بنابراین، برای تولید هیدروکسید کلسیم با سطح مخصوص بالا، نسبت وزنی آب به اکسید کلسیم (R) تا حد ممکن باید کم باشد. اگر چه به منظور حفظ حداکثر دمای آبدیده کردن درست زیر ۲۰۰ درجه فارنهایت (۹۲ درجه سانتیگراد)، در هنگام انتخاب نسبت آب به CaO باید دمای اولیه آب مصرفی در آبدیده کردن در نظر گرفته شود. نسبت وزنی آب به اکسید کلسیم به دلیل امکان تولید نقاط گرم و موضعی در تعلیق در حین آبدیده کردن، نباید خیلی از پنج کمتر باشد. با استفاده از $R=5$ به منظور حفظ حداکثر دمای آبدیده کردن در کمتر از ۲۰۰ درجه فارنهایت (۹۲ درجه سانتیگراد)، دمای آب مصرفی در آبدیده کردن نباید از ۱۲۲ درجه فارنهایت (۵۰ درجه سانتیگراد) بالاتر رود. می توان از ترکیبات دیگر نسبت آب (R) و دما برای تولید هیدروکسید کلسیم با سطح مخصوص نسبتاً بالا استفاده نمود. به عنوان مثال، می توان از $R=13/5-14$ با دمای آب ۱۷۶ درجه فارنهایت یا ۸۰ درجه سانتیگراد استفاده نمود. سطح مخصوص هیدروکسید کلسیم حاصل از این ترکیبات ممکن است کمی از هیدروکسید کلسیمی که از ترکیب قبل به دست می آید کمتر باشد، اما اختلاف سطح مخصوص احتمالاً کمتر از ۱۰ درصد می باشد. مثال هایی از تغییرات در سطح مخصوص در جدول C۱ دیده می شود.

تولید سریع گرما از این واکنش گرمازا نیاز به خوب هم زدن در طول فرآیند آبدیده کردن دارد. این امر لازم است، زیرا هر ذره اکسید کلسیم باید در محلولی جدا از دیگر ذرات اکسید کلسیم معلق شود، تا از انباشتگی ذراتی که به خوبی پخش شده اند جلوگیری شود تا واکنش آبدیده کردن تکمیل شود. هم زدن کم ممکن است باعث زیاد گرم شدن موضعی اکسید کلسیم قبل از تبدیل آن به هیدروکسید کلسیم و تشکیل کلوخه های بزرگ و خمیری شکل شود. این کلوخه های بزرگ اکسید کلسیم هیچ گونه قابلیت پوشش دهی در عملیات غوطه وری ندارند. هم زدن را می توان با استفاده از یک همزن چهارشاخه یا ترجیحاً یک همزن با پره صاف انجام داد. در هنگام استفاده از هر دو این همزن ها، باید نسبت مناسب قطر همزن به قطر مخزن و سرعت مناسب همزن رعایت شود.

هر دو این همزن ها (همزن های آهک) با قطر از ۸ تا ۱۸ اینچ در مخازن آبدیده کردن استفاده شده و نتایج رضایت بخش بوده، اما همزن با پره صاف بهتر شناخته شده است. در مخزن آبدیده کردن

به قطر ۸ اینچ، برای ایجاد تلاطم لازم، ضروری است که همزن با پره صاف با سرعت تقریباً ۱۲۰۰ دور در دقیقه کار کند. در این سرعت، یک همزن با پره صاف به قطر ۳ تا ۳/۵ اینچ تلاطم لازم را ایجاد می‌کند.

می‌توان سرعت همزدن را در شرایطی با اندازه همزن و قطر مخزن مشخص توسط اطلاعات فوق به طور ریاضی محاسبه نمود. معادله محاسبه سرعت‌های همزدن برای مخازن با هر اندازه قطر، توسط فرمول زیر بیان می‌شود:

$$S_1 R_1 = S_2 R_2$$

S_1 و R_1 به ترتیب سرعت و شعاع همزن برای سیستمی به قطر ۸ اینچ و S_2 و R_2 سرعت و شعاع همزن در هر سیستم دیگر می‌باشند. به عنوان مثال، سرعت لازم برای مخزنی به قطر ۳۰ اینچ عبارت است از:

$$(1200 \text{ rpm}) \times (8/2 \text{ in.}) = (S_2) \times (30/2 \text{ in.})$$

یا

$$S_2 = \frac{1200 \times 4}{15} = 320 \text{ rpm}$$

همچنین سرعت مخزنی به قطر ۱۱ فوت (۱۳۲ اینچ) عبارت است از:

$$S_2 = \frac{1200 \times 4}{66} = 73 \text{ rpm}$$

مخازن غوطه‌وری: تعلیق گرم هیدروکسید کلسیمی که به خوبی آبدیده شده باشد، در مخازن غوطه‌وری انجام می‌شود. اقدامات پیشگیرانه مشخصی باید در طول گرم کردن صورت گیرد تا از خرابی حمام هیدروکسید کلسیم جلوگیری شود. اعمال بخار به وان برای گرم کردن باید با دقت انجام شود زیرا Ca(OH)_2 در دمای ۲۱۴ درجه فارنهایت (۱۰۱ درجه سانتیگراد) متبلور می‌شود. سطوح گرمی که در معرض تعلیق قرار می‌گیرند نباید به این دما برسند.

اگر بخار زنده از طریق یک اتصال عایق به تعلیق هیدروکسید کلسیم اضافه شود، تبلور هیدروکسید کلسیم صورت نمی‌گیرد، پس هیچ‌گونه انتقال دما از خط بخار به وان انجام نمی‌شود.

بنابراین خود لوله بخار مورد مصرف برای گرم کردن وان را باید با استفاده از مواد عایق نظیر چوب یا پلاستیک، از وان جدا نمود. گرمای بخار زنده به سرعت پراکنده خواهد شد. لذا هیچ گرمایش موضعی ایجاد نمی‌شود تا رشد بلوری را تسریع کند. هیدروکسید کلسیم باید ویژگی‌های پوشش و سطح مخصوص خود را به طور نامحدودی حفظ کند و از حمام هیدروکسید کلسیم می‌توان برای دوره‌های زمانی طولانی استفاده نمود.

غوطه‌وری مجدد میلگرد و مفتول آهک‌پوشی شده: اگر میلگردهایی با پوشش آهک گرم پس از پختن و خروج از کوره، برای اعمال پوشش آهکی اضافه مجدداً غوطه‌ور شوند، ممکن است در حمام، آهک بلوری تشکیل شود. اگر قرار است غوطه‌وی مجدد روی میلگردها انجام گیرد، باید آنها را قبل از قرار دادن مجدد در حمام آهک، تا دمای اتاق خنک نمود.

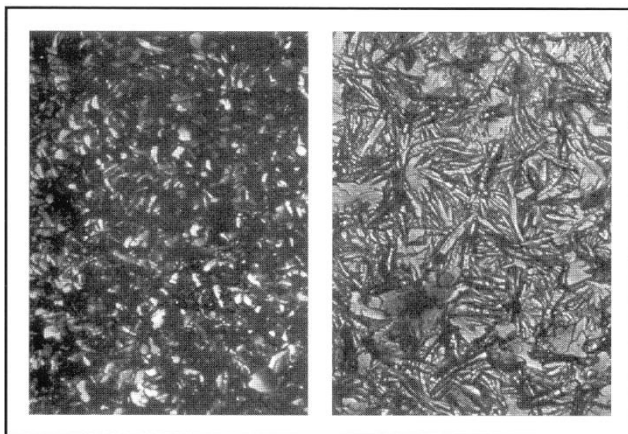
ضمیمه D: پوشش‌دهی فسفاتی به منظور کمک به عملیات کشش مفتول

استفاده از پوشش‌های فسفاتی یک روش تولید محرز است که به طور وسیعی هم برای کشش خشک و هم برای کشش تر مفتول‌های پرکربن و کشش مفتول شکل‌دار استفاده می‌شود. استفاده گسترده و رو به افزایش پوشش‌های فسفاتی به عنوان عامل کمکی در کشش مفتول به دلیل پایین بودن قیمت آنها نیست، زیرا در واقع آنها از پوشش‌های آهک، بوراکس و اغلب فرآیندهای پوشش‌دهی دیگر گران‌تر هستند. عملیات کشش تا حدی پیشرفت کرده است که هزینه اضافی این پوشش‌ها را تضمین می‌کند، لذا مصرف این مواد توجیه شده است. پوشش‌های فسفاتی به بهبود عملیات کشش از طریق امکان افزایش سرعت کشش، ایجاد عمر مفید طولانی‌تر و بهبود راندمان ماشین‌آلات به دلیل وقفه کمتر برای جابه‌جایی قالب‌ها، کمک می‌کنند. علاوه بر این، کاهش هزینه‌های تعمیرات قالب، شرایط ظاهری و سطح بهتر مفتول کشیده شده، یکنواختی بیشتر سطح مقطع و افزایش مقاومت در برابر خوردگی، دیگر مزایای پوشش‌های فسفاتی هستند. قابلیت کشش مفتول با مقدار کربن بیشتر و استحکام کششی بالاتر در سرعت‌های زیاد نیز دیگر مزیت آنها است.

بحث شیمی پوشش‌های فسفات روی پیچیده است. به بیان ساده عبارت است از تماس سطوح فولادی با فسفات‌های اسیدی روی اولیه و اسید فسفریک آزاد در یک محلول آبی. به محض تماس با فولاد، اسید فسفریک آزاد طوری به سطح حمله می‌کند که مشابه محلول اسیدشویی، یک لایه نازک آهن را حل می‌کند و گاز هیدروژن آزاد می‌کند و بدین ترتیب اسیدپته لایه محلول درست نزدیک به سطح فلز کاهش می‌یابد. در PH بالاتر از ۳ حد حلالیت فسفات روی در این لایه کاهش می‌یابد و بر روی سطح فولاد به صورت مخلوط آهن فرو ثانویه و فسفات‌های روی رسوب می‌کند. پوششی که بدین گونه تشکیل می‌شود متبلور بوده و در مجاورت فلز، دارای فسفات آهن بالا و نزدیک سطح غنی از فسفات روی می‌باشد. پوششی که به روش شیمیایی تشکیل می‌شود سطح فلز را به یک ساختار بلوری غیرفلزی نامحلول در آب که خاکستری رنگ است تبدیل می‌کند. پوشش‌های فسفات روی، فولادهای کم کربن، کربن متوسط و پرکربن را به خوبی محدوده وسیعی از فولادهای کم آلیاژ پوشش می‌دهد. کروم پرزحمت‌ترین عنصر آلیاژی است. پوشش‌دهی فولادهای دارای ۰.۵٪ کروم یا بیشتر، مخصوصاً اگر سایر عناصر آلیاژی هم حضور داشته باشند، دشوار خواهد بود.

پوشش‌های فسفات روی با فرمول‌های مختلفی وجود دارند. همه آنها یک پوشش فسفات روی تولید می‌کنند و اگر پوشش‌های مختلف به‌طور شیمیایی مورد آنالیز قرار گیرند، دیده می‌شود که اساساً مشابه هستند. اختلافات اصلی عبارتند از: خصوصیات فیزیکی پوشش، وزن پوشش، شکل، اندازه، چسبندگی، چگالی، سختی و ساختار بلور. تنوع و مقدار افزودنی‌های شیمیایی وارد شده به فرمولاسیون فسفات روی این خواص را کنترل می‌کند. افزودنی‌های اصلی، عوامل اکسیدکننده نظیر نیترات‌ها، نیتريت‌ها، کلرات‌ها و ترکیبات این مواد همراه با تسريع کننده‌های فلزی مانند مس، نیکل، کلسیم و ديگر فلزات می‌باشند. درصد افزودن این مواد به فرمولاسیون فسفات روی و نسبت این افزودنی‌ها به همدیگر، تاثیر بسیار زیادی بر ساختار پوشش، وزن پوشش، سرعت تشکیل پوشش و دمایی که در آن پوشش‌ها تشکیل می‌شوند دارد. شکل‌های D1 و D2 ساختار بلوری دو پوشش فسفات روی را که با استفاده از چرخه فرآیند یکسان ایجاد شده‌اند نشان می‌دهد. تغییر زیاد در اندازه بلور به آسانی مشهود است و این تغییر کلاً از تغییر ترکیب شیمیایی

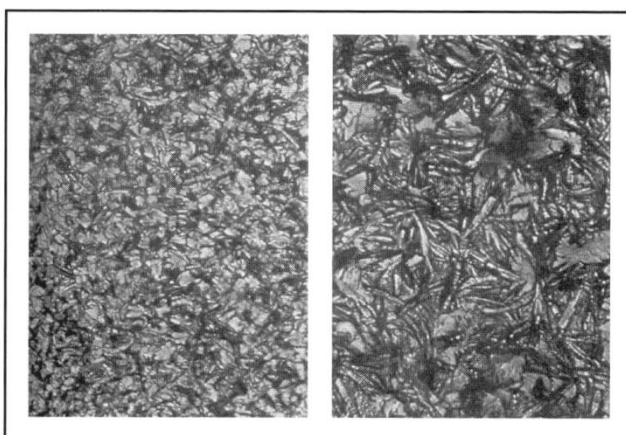
پوشش فسفات روی ایجاد گردیده است. عموماً ساختار بلوری کوچک تر و متراکم تر برای کشش مفتول بهتر است. اساساً می توان با انجام یک آبکشی اولیه خاص که اغلب دارای نمک های تیتانیوم می باشد، درست قبل از وان پوشش فسفات، به تشکیل یک ساختار بلوری کوچک و متراکم کمک نمود.



شکل D۱ (چپ) و D۲ (راست) - ساختار بلوری دو پوشش فسفات

روی با استفاده از چرخه فرآیند یکسان. بزرگنمایی: ۱۰۰×

شکل های D۳ و D۴ تغییر اندازه بلوری را نشان می دهد که در حمام پوشش فسفات یکسان، با استفاده و بدون استفاده از عامل بهینه سازی آبکشی اولیه ایجاد شده است. تفاوت در اندازه بلور کلاً به دلیل استفاده از این ماده در آبکشی اولیه ایجاد می شود.



شکل D۳ (چپ) و D۴ (راست) - تغییر اندازه بلور حاصل از حمام پوشش فسفات یکسان، با استفاده و بدون استفاده از عامل بهینه‌سازی آبکشی اولیه

معمولاً به فرمولاسیون پوشش‌های فسفات روی که در آنها نیتريت به کار می‌رود «حمام نیتريت» و به آن دسته که در آنها کلرات به کار می‌رود «حمام کلرات» گفته می‌شود. هر دو نوع مناسب و برای کشش مفتول بسیار استفاده می‌شوند. عموماً نوع نیتريت از سه ماده شیمیایی در عملیات استفاده می‌کند: ماده اول برای ساخت اولیه حمام یا محلول، ماده دوم برای شارژ کردن دوباره این حمام و ماده سوم که به ندرت و در مقادیر کم استفاده می‌شود برای حفظ حمام در شرایط به اصطلاح «بدون آهن» (حذف یون آهن) می‌باشد. به‌طور کلی حمام‌های پوشش فسفات روی از نوع نیتريت، پوشش‌های سنگین‌تری تولید کرده و سریع‌تر پوشش می‌دهند. با وجود واکنش پوشش‌دهی سریع‌تر، زمان غوطه‌وری کلاف‌ها معمولاً به دلیل تماس حلقه‌های مفتول، کاهش نمی‌یابد. این تماس نیاز به جابه‌جایی کلاف‌ها در حین فرآیند دارد تا سطوح تماس تغییر یافته و امکان دسترسی محلول به کل سطح فراهم گردد. واکنش پوشش‌دهی سریع‌تر حمام‌های نوع نیتريت، عامل مهمی در فرآیند رشته‌ای که در آن سطح مفتول به راحتی در هنگام عبور تک رشته مفتول از درون محلول در دسترس است، می‌باشد. فرمولاسیون‌هایی موجود هستند که پوشش مطلوبی را در مدت ۱۰ ثانیه تشکیل می‌دهند.

معمولاً فرمولاسیون‌های پوشش فسفات روی از نوع کلرات به عنوان یک ماده (یک جزئی) به کار می‌روند. یعنی تنها یک ماده برای ساختن و دوباره پر کردن حمام‌های عملیات لازم است و به افزودنی‌های دیگر نیازی نیست. به‌طورکل کار با حمام‌های کلرات ساده‌تر است، رنگ پوشش تولید شده تا حدی تیره، وزن آن کمتر و برای کشش تر مناسب‌تر می‌باشند. هر چند با فرمولاسیون مناسب، هر دو نوع را می‌توان برای کشش خشک، تر و شکل‌دار به کار برد.

در هنگام فرآیند پوشش‌دهی فسفات روی، لجن به عنوان محصول جانبی اکسیداسیونی که آهن حل شده (Fe^{2+}) از سطح فولاد را به آهن فریک نامحلول (Fe^{3+}) تبدیل می‌کند، تشکیل می‌شود. باید شرایطی در مخزن پوشش فسفات و طراحی سیستم حرارتی رعایت شود که امکان ته‌نشین شدن این لجن در کف مخزن ایجاد شود، تا بتوان آن را در هنگام مزاحمت در فرآیند و کیفیت کلاف‌های مفتول خارج نمود.

مبحث شیمی پوشش فسفات روی کاملاً پیچیده است. بنابراین کار با تأمین‌کننده معتبر این مواد به منظور حصول پوشش‌هایی با کیفیت ثابت و بهره‌وری عملیات، امری ضروری است. کار با حمام‌های پوشش فسفات با فرمول مناسب ساده است. با حفظ دمای مناسب حمام، سطح آب، زمان‌های غوطه‌وری و جمع‌آوری لجن، پوشش‌های فسفات روی با کیفیت بالا تولید خواهد شد.

معمولاً کنترل شیمیایی حمام‌های فسفات روی فقط شامل آزمایش غلظت حمام تحت عنوان «درجات اسید کل» می‌شود. با تیتراسیون ۱۰ میلی‌لیتر نمونه محلول حمام فسفات با هیدروکسید سدیم ۰/۱ نرمال، توسط معرف فنل فتالین، رسیدن به نقطه صورتی روشن پایدار، سطح اسید کل به دست می‌آید. مواد شیمیایی حمام درحین پوشش‌دهی مصرف می‌شوند. کاهش «درجات» یا غلظت اسید کل را می‌توان با افزودن محلول فسفات روی به مقدار تعیین شده ترمیم نمود. بعضی مواقع مقدار اسید آزاد با تیتراسیون ۱۰ میلی‌لیتر نمونه حمام با هیدروکسید سدیم ۰/۱ نرمال، توسط معرف بروموفنل بلو اندازه‌گیری می‌شود. سپس نسبت اسید آزاد به درجات اسید کل محاسبه شده و در محدوده مورد تأیید سازنده حفظ می‌گردد. برای تشکیل پوشش پایدار و آشکارسازی بازرسی مواد خارجی وارد شده به حمام، مانند کشیده شدن زیاد اسید مورد مصرف در اسیدشویی به دلیل آبکشی ضعیف، نظارت بر نسبت اسید آزاد به اسیدکل به داخل مفید می‌باشد. عمر کاری حمام‌های

پوشش فسفات روی، که به طور مناسب نگهداری شوند، عملاً نامحدود است. حمام‌های بسیاری سال بدون خرابی کار کرده‌اند که این امر باعث پایین ماندن هزینه عملیات می‌شود. پر کاربردترین بررسی‌های انجام شده برای پوشش‌های فسفات روی عبارتند از کیفیت ظاهر، «تست ناخن که سطح پوشش با ناخن خراشیده می‌شود» و وزن پوشش. پوشش باید یک پوشش بلوری یکنواخت، به رنگ خاکستری تیره روی کل سطح و عاری از هرگونه ذرات ته‌نشین‌گرده به رنگ روشن‌تر باشد. گرده از لجن ته‌نشین شده روی سطح ایجاد می‌شود و احتمال پیدا شدن آن بر قطر داخلی و خارجی رو به بالای کلاف‌های مفتول بیشتر است. در طول فرآیند، گرده روی سطوح روبه بالا در حالت افقی مشهودتر است تا در حالت عمودی. این رسوب‌گرده یا لجن ساینده است و تأثیر مضر بر عمر مفید و قابلیت کشش می‌گذارد.

به چند دلیل مقدار زیادی لجن بر روی مفتول می‌نشیند؛ یک دلیل عمده، انباشتگی زیاد لجن در مخزن عملیات است. انباشتگی لجن می‌تواند تا حدی برسد که کلاف‌های مفتول با لجن کف مخزن تماس پیدا کنند، یا تلاطم شدید مفتول‌ها در زمان فرآیند ممکن است لجن را هم‌زند یا به سمت حمام فسفات روی به گردش در آورد. با جمع‌آوری لجن این مشکل باید حل شود.

برای یک پوشش معمولی فسفات روی، علامت یا خط سفید حاصل از آزمایش ناخن، حضور پوشش و تا حدی سختی پوشش را نشان می‌دهد. این آزمایش ارزش مقداری کمی دارد، اما عموماً در عملیات پوشش‌دهی فسفات به کار می‌رود و حضور پوشش را حتماً معلوم می‌کند.

آزمایش‌های شیمیایی متعددی را می‌توان روی پوشش فسفات روی انجام داد، اما تعیین وزن پوشش اغلب انجام می‌شود. وزن پوشش را نمی‌توان به طور دقیق با بازرسی چشمی اندازه گرفت. اغلب برآورد چشمی انجام می‌شود و مشخص شده که تغییر آن بقدری قابل توجه است که غیرقابل اطمینان می‌باشد. در بازرسی چشمی وزن پوشش‌های بلوری ریز و متراکم همواره سبک به نظر می‌رسد، اما در واقع ممکن است شدیداً سنگین باشد. وزن پوشش‌های بلوری بزرگ و خشن که اغلب ظاهر پوشش‌های سنگین را دارند، می‌تواند عملاً سبک باشد. وزن پوشش‌هایی که اساساً دارای اندازه بلور یکسان هستند، ممکن است از خیلی سبک تا خیلی سنگین تغییر کند. هیچ راهی برای تعیین آن به غیر از اندازه‌گیری وزن پوشش با روش‌های ثقل‌سنجی یا رنگ‌سنجی

وجود ندارد. روش‌های استاندارد ثقل‌سنجی برای تعیین وزن پوشش فسفات روی در فولادها به طور خلاصه در زیر بیان شده‌اند.

تعیین وزن پوشش فسفات در مفتول فولادی با استفاده از اسید کرومیک

دامنه: این روش عموماً برای پوشش‌های فسفاتی فولادها قابل اجراست.

نمونه: یک نمونه مفتول با پوشش فسفات را پس از آب‌کشی در آب تمیز، ولی قبل از هرگونه آب‌کشی خنثی‌کننده، آهک، بوراکس، یا غوطه‌وری روانکار بپزید. آن را به وسیله هوای خشک تمیز یا در کوره کنترل شده ترموستاتیک به مدت ۵ دقیقه در ۲۰۰ درجه فارنهایت (۹۳ درجه سانتیگراد) خشک نمایید. نکته: بهتر است اندازه نمونه تا حد امکان بزرگ باشد، اما وزن معمولی آزمایشگاهی محدود به ۱۰۰ گرم است.

لوازم:

- ترازوی دقیق - برخی مدل‌های ترازوهای مغناطیسی میرا نیاز به روش وزن کردن خاص دارند.
- بشر پیرکس یا فولاد ضدزنگ (۲۰۰۰ یا ۴۰۰۰ میلی‌لیتر)
- صفحه گرم‌کننده
- دماسنج
- گیره‌های بوت، فولاد ضدزنگ
- سینک با آب جاری سرد
- وسایل خشک کردن قطعات لایه‌برداری شده

واکنشگر (محلول لایه‌بردار): ۸۰۰ گرم اسید کرومیک را در آب کافی برای درست کردن ۳۸۰۰-۴۰۰۰ میلی‌لیتر محلول حل نمایید. محلول در عمل مصرف می‌شود و باید وقتی که دیگر نمونه تمیزی به دست نمی‌آید آن را تخلیه نمود.

روش آزمایش: بخشی از محلول لایه‌بردار را در بشر ریخته و تا دمای ۱۸۰ تا ۲۰۰ درجه فارنهایت (۸۲ تا ۹۳ درجه سانتیگراد) حرارت دهید. مفتول تست را با دقت ۰/۱ میلی‌گرم وزن نموده و سطح مقطع آن را به اینچ مربع حساب نمایید. مفتول را به مدت دو دقیقه در محلول

لایه بردار داغ غوطه‌ور کنید، آن را خارج کرده و با آب سرد جاری آبکشی نمایید و سپس توسط هوای فشرده خشک و تمیز و یا با غوطه‌ور کردن در استون و نگهداشتن مفتول در جلوی دمنده خشک نمایید. مجدداً مفتول لایه‌برداری شده را وزن نمایید.

محاسبه:

$$\text{وزن پوشش } (mg/ft.^2) = \frac{\text{کاهش وزن } (mg) \times 144}{\text{مساحت سطح } (in^2)}$$

نکته:

۱- استفاده از بشر پیرکس از نظر شیمیایی مقاوم، اما تا حدی خطرناک است. یک بشر از جنس فولاد ضدزنگ ۸-۱۸ به آرامی در معرض خوردگی واقع می‌شود و لذا یک عمر مفید دارد، اما معمولاً هزینه آن کمتر از هزینه تعویض بشرهای شکسته است. ثابت شده است که بشرها و چنگک‌هایی که از جنس فولاد ضدزنگ هستند و برای برداشتن پوشش از مفتول فولادی به کار می‌روند، برای کارهای عادی رضایت‌بخش بوده‌اند. به دلیل امکان افزایش میزان خوردگی به علت تماس فلزی مفتول فولادی با فولاد ضدزنگ، در بیشتر کارهای دقیق به منظور جلوگیری از چنین سلول‌های خوردگی گالوانیک، مفتول از یک چنگک شیشه‌ای آویزان می‌شود.

۲- مطالعات مختلف روی روش آزمایش، زمان‌ها، دماها و غلظت‌های مختلف CrO_3 را معرفی می‌نماید و این نشان می‌دهد بهترین شرایط بستگی به نوع فولاد و خصوصیات پوشش دارد. وقتی نیاز به نتایج دقیق باشد، توصیه می‌شود که از CrO_3 با غلظت ۲۰ درصد وزن به حجم در ۱۸۰ درجه فارنهایت (۸۲ درجه سانتیگراد) برای کمترین زمان لازم برای لایه‌برداری کامل پوشش استفاده شود. علاوه بر این، لایه‌برداری حداقل هر ده تست یک‌بار باید به تعداد کافی تکرار شود تا امکان بررسی مفتول خام میسر شود. کاهش متغیر وزن نمونه مفتول در هنگام لایه‌برداری مجدد نشان می‌دهد که برداشتن پوشش به طور کامل انجام نشده است. اگر وزن نمونه مفتول در هنگام لایه‌برداری مجدد به مقدار ثابت کاهش یابد یعنی اتلاف فلز در حال انجام است. اتلاف معمولی فلز به مقدار کم و ثابت است. اگر اتلاف فلز افزایش یابد، باید محلول لایه‌بردار را تخلیه کرده و یک محلول لایه‌بردار تازه تهیه نمود.

می‌توان به طور دلخواه از روش آزمایش در دمای اتاق شبیه روش شرح داده شده در بالا، اما با یک محلول لایه‌بردار متفاوت، استفاده نمود. ۵ گرم هیدروکسید سدیم (ورقه‌ای یا دانه‌ای) و ۱ تا ۲ گرم تارترات سدیم را به ۱۰۰ میلی‌لیتر آب اضافه نمایید. اجازه دهید نمونه مفتول به مدت ۱ تا ۲ دقیقه خیس بخورد تا پوشش آن سست شود. توسط یک دستکش لاستیکی نمونه مفتول را از یک انتها نگهدارید و در همان حال از یک وسیله ساینده استفاده کنید تا پوشش سست شده، توسط سایش جدا شود. وقتی این انتها تمیز لایه‌برداری شد، سایش را در انتهای دیگر مفتول تکرار کنید. پس از تمیز کردن هر دو انتها، کاملاً آن را در آب جاری سرد آبکشی کرده، خشک و وزن نمایید و وزن پوشش را با استفاده از همان روش محاسبه که در بالا برای محلول لایه‌بردار اسید کرومیک ارائه گردید، محاسبه کنید.

برای ارتباط دادن وزن پوشش به کیفیت پوشش، باید احتیاط نمود. کاملاً ممکن است که یک پوشش فسفات با کیفیت پایین که واکنش آن به طور کامل انجام نشده، در محدوده وزنی پوشش مورد انتظار قرار گیرد. این امر می‌تواند ارتباط ضعیف بین وزن‌های گزارش شده توسط آزمایشگاه و قابلیت کشش عملی توسط پرسنل تولید را توجیه نماید. علاوه بر وزن پوشش، سایر عوامل مانند شکل ظاهری پوشش، حضور غبار روی سطح، دمای عملیات و غلظت حمام فسفات در زمانی که قطعه کار پوشش داده شده نیز باید در نظر گرفته شوند. اساساً مقدار کربن فولاد روی وزن پوشش فسفات تأثیر می‌گذارد. پوشش‌های سنگین‌تر، روی فولادهایی با مقدار کربن بیشتر تشکیل می‌شوند.

در کشش پیوسته مفتول که شامل چندین کاهش می‌باشد، پوشش فسفات با وزن بهینه، باعث می‌شود که در آخرین قالب نیز همانند قالب اول عملکرد خوبی مشاهده شود. پوشش‌های فسفاتی با وزن‌های بیش از حد زیاد، لرزش ایجاد می‌کنند که باعث تولید صدای جیغ مانند می‌شود. سبک بودن زیاد پوشش باعث عملکرد ضعیف در قالب آخر می‌شود زیرا پوشش و روانکار کافی بین قالب و مفتول برای جلوگیری از خراشیدگی یا استهلاک وجود ندارد. معمولاً اگر پوشش خیلی سبک باشد، در مقایسه با رنگ خاکستری یا تیره طبیعی که در مفتول کشیده شده با وزن پوشش مناسب ایجاد می‌شود، مفتول خروجی از قالب آخر سطح ظاهری بسیار روشنی خواهد داشت.

اگر چه، ممکن است عملکرد ضعیف در قالب آخر به جای وزن کم پوشش فسفات، به علت طراحی نامناسب قالب هم باشد. شکل قالب کشش تأثیر بسیار مهمی در فشردن یا صاف کردن روانکار روی سطح مفتول و یا تراشیدن آن دارد. اگر زاویه قالب از حد بهینه بیشتر شود، پوشش زیاد فسفات تراشیده شده که می‌تواند علت کم بودن لایه باقی‌مانده در قالب آخر باشد. برای مثال؛ آزمایش انجام شده روی ماشین کشش هفت مرحله‌ای که در آن از قالب‌هایی با زوایای کاهش بزرگ استفاده می‌شود، نشان داد که روی سطح مفتولی که در هنگام ورود به قالب اول وزن پوشش آن ۶۰۰ یا ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر فوت مربع بوده است، پس از کشش سوم هیچ پوشش فسفاتی باقی نمانده یا مقدار آن بسیار کم است. اما استفاده از قالب‌هایی با زاویه کمتر عملاً نشان داد که در کشش مفتول با پوششی به وزن ۶۰۰ یا ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر فوت مربع، پس از کشش هفتم، هیچ کاهش وزنی در پوشش فسفات بازای هر پوند مفتول انجام نمی‌شود. استفاده از قالب با زاویه ۱۰ تا ۱۴ درجه (نصف زاویه= ۵ تا ۷ درجه) و با تماس درست زاویه با ناحیه ساینزکن دوزه، رضایت‌بخش بوده است. با طراحی مناسب قالب، پوشش‌های فسفاتی توانایی قابل ملاحظه‌ای در افزایش سطح مقطع درحین تغییر شکل هم‌زمان با حفظ پیوستگی دارند. این خصوصیت در اکستروژن سرد فولاد که در آن سطح پوشش فسفات، بدون گسیختگی لایه به مقدار ۲۰ برابر یا بیشتر افزایش می‌یابد، استفاده می‌شود.

برای کشش مفتول باید وزن پوشش در محدوده ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر فوت مربع باشد، هر چند کشش مفتول‌هایی با وزن پوشش بالاتر و پایین‌تر از این محدوده نیز با موفقیت انجام شده است. از پوشش‌هایی به وزن ۳۰۰۰ میلی‌گرم بر فوت مربع نیز استفاده شده است. به طور معمول از نقطه نظر هزینه و عملکرد، پوشش‌هایی با وزن بیش از ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر فوت مربع لازم یا مطلوب نیستند. از این پوشش‌ها تا حدی برای تهیه میله‌هایی با اندازه قطر بالاتر که در کارخانجات تولید پیچ، مهره و بست تحت کله‌زنی سرد قرار می‌گیرند، استفاده می‌شود.

ضمیمه E: روش های تحلیلی

بررسی اسید مصرفی در اسیدشویی

اسید آزاد

۱. دقیقاً ۵ میلی لیتر از نمونه را در بشر ۲۵۰ میلی لیتری بریزید.
۲. ۳۰ تا ۵۰ میلی لیتر آب (در صورت امکان مقطر) اضافه کنید.
۳. ۳ تا ۵ قطره معرف متیل اورانژ اضافه نمایید.
۴. در حالی که محلول را دائماً می چرخانید، آن را با محلول ۱ نرمال کربنات سدیم از یک بورت ۲/۵ میلی لیتری تیترا نمایید تا رنگ محلول از قرمز به نارنجی تغییر کند.
۵. میلی لیتر حجم کربنات سدیم مصرف شده را بخوانید و مطابق زیر محاسبه کنید:

درصد وزن به حجم H_2SO_4 = میلی لیتر کربنات سدیم مصرف شده
برای اسید هیدروکلریک: درصد وزن به حجم HCl = $۰/۷۳ \times$ میلی لیتر کربنات سدیم
مصرف شده

آهن

۱. دقیقاً ۵ میلی لیتر از نمونه را در بشر ۲۵۰ میلی لیتر بریزید.
 ۲. ۳۰ تا ۵۰ میلی لیتر آب (در صورت امکان مقطر) اضافه کنید.
 ۳. در صورت لزوم تقریباً ۵ میلی لیتری تثبیت کننده رنگ اضافه کنید (به پایین رجوع شود).
 ۴. در حالی که محلول را دائماً می چرخانید، آن را با محلول ۱ نرمال پرمنگنات پتاسیم از یک بورت ۲/۵ میلی لیتری تیترا نمایید تا رنگ محلول از شفاف به قرمز تغییر کند و به مدت ۳۰ ثانیه باقی بماند. (محلول ممکن است پس از ۳۰ ثانیه مجدداً شفاف شود).
 ۵. درصد وزن به حجم Fe = $۱/۱ \times$ حجم پرمنگنات پتاسیم مصرف شده.
- اگر غلظت آهن کم است می توان از نمونه ۱۰ میلی لیتری به جای ۵ میلی لیتری استفاده نمود.
در این صورت: درصد وزن به حجم Fe = $۰/۵۶ \times$ حجم پرمنگنات پتاسیم مصرف شده.

بعضی مواقع، تعیین تغییر رنگ در این روش، به دلیل وضعیت تیره یا تعریف ضعیف رنگ که اغلب به علت مقدار کم اسید، مقدار زیاد آهن یا غلظت زیاد ناخالصی‌هایی نظیر هیدروکربن‌ها یا فلزات جزئی ایجاد می‌شود، دشوار است. در چنین شرایطی می‌توان برای بهبود تغییر رنگ، در مرحله ۲ از مراحل فوق، ۵ تا ۱۰ میلی‌لیتر محلول تثبیت کننده رنگ به نمونه اضافه نمود. این امر باعث می‌شود که تغییر رنگ در نقطه نهایی به سادگی قابل تشخیص گردد. ممکن است در شرایط معمولی استفاده از محلول تثبیت کننده رنگ ضروری نباشد.

مملول تثبیت کننده رنگ

۱۶۰ گرم بلور سولفات منگنز ($MnSO_4 \cdot 4H_2O$) را در ۱۷۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل کنید. ۳۰۰ میلی‌لیتر اسید فسفریک و ۳۲۰ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک (هر دو قوی) اضافه نمایید. خوب هم بزنید.

احتیاط: اسید را به آرامی اضافه کنید تا از پاشش جلوگیری شود.

بررسی آهک

۱. دقیقاً ۵ میلی‌لیتر از نمونه را در بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری بریزید.
۲. ۳۰ تا ۵۰ میلی‌لیتر آب (در صورت امکان مقطر) اضافه کنید. مقداری از این آب را برای شستن آهک باقی مانده از وسیله اندازه‌گیری به داخل بشر استفاده کنید.
۳. ۳ تا ۵ قطره معرف متیل اورانژ یا فنل فتالین اضافه نمایید.
۴. در حالی که محلول را دائماً می‌چرخانید، آن را با محلول ۱ نرمال اسید هیدروکلریک از یک بورت ۲/۵ میلی‌لیتری تیترا کنید تا رنگ محلول تغییر کند. (متیل اورانژ از نارنجی به قرمز و فنل فتالین از صورتی به بی رنگ تغییر می‌کند).
۵. میلی‌لیتر حجم اسید مصرفی را بخوانید و مطابق زیر محاسبه کنید:
درصد وزن به حجم هیدروکسید کلسیم = $1/48 \times$ میلی‌لیتر اسید مصرف شده
(آهک هیدراته).

پوسته زدایی مکانیکی مفتول

تاریخچه

مواد خام اولیه برای یک کارخانه مفتول، میلگرد نورد گرم شده می باشد. تمامی میلگردهای فولادی کربنی نورد گرم شده پوشیده از پوسته اکسید آهن کاملاً شناخته شده می باشند. پوسته بر روی میلگرد فولادی در اثر اکسیداسیون در دمای بالا در حین نوردکاری و خوردگی جوی (زنگ زدگی) در حین حمل و نقل و انبار کردن، شکل می گیرد. مقدار پوسته بر سطح میلگرد متناسب با عملیات مختلف نوردکاری متغیر می باشد. از اواسط دهه ۱۹۶۰ تاکنون این امکان فراهم گردیده است که با تغییر دما و زمان از مرحله کوره پیش گرم تا مرحله کلاف کردن، ضخامت پوسته سطح مفتول کنترل گردد. زبری نسبی سطح مفتول نورد گرم شده با میزان پوسته و دمای مرحله آخر نوردکاری تغییر می کند. برخی تولیدکنندگان برای داشتن میلگرد نهایی با سطح زبر خواهان پوسته سنگین تری بر روی میلگرد هستند.

برای تولید مفتول فولادی اقتصادی و با صرفه، پوسته اکسید تولید شده حین نوردکاری و زنگ ناشی از آب و هوا می بایست در حد امکان کاملاً از سطح میلگرد برطرف گردد. شستشوی شیمیایی (به فصل قبل نگاه کنید) از ۱۸۶۰ تاکنون برای برطرف نمودن پوسته و زنگ مورد استفاده بوده است و تمیزکاری شیمیایی هنوز اصلی ترین روش پوسته زدایی میلگرد است. افزایش مقررات زیست محیطی برای خطوط اسیدشویی از اوایل دهه ۱۹۸۰ به بعد و هزینه زیاد استفاده از این روش تمیزکاری، مشوقی برای اجرای سایر روش های پوسته زدایی مفتول گردیده است. یک جایگزین مهم برای تمیزکاری شیمیایی، تمیزکاری مکانیکی یا به عبارت بهتر پوسته زدایی مکانیکی می باشد.

تولیدکنندگان سیم پنجاه سال است که از پوسته زدایی مکانیکی آگاهی دارند، اما یک درک مناسب از فرآیند و انگیزه تجاری استفاده از آن در ۲۵ تا ۳۰ سال گذشته افزایش یافته است. علاقه اولیه

نسبت به این فرآیند مربوط به تولیدکنندگان محصولات مفتولی کم قیمت، با حاشیه سود کم و با الزامات خیلی کم کیفی بود. آماده سازی میلگرد خیلی مورد توجه نبود و قیمت کم هدف اصلی این محصولات بود. برای اغلب کاربردها فقط شکستن پوسته های درشت مورد نیاز بود. تجهیزات مورد استفاده برای پوسته زدایی دست ساز و ابتدایی بود، اغلب با قرار دادن چند چرخ قرقره و در برخی موارد استفاده از رینگ اتومبیل به جای چرخ قرقره استفاده می شد. از دهه ۱۹۵۰ تاکنون پوسته زدایی مکانیکی با پیشرفت در شکست پوسته های درشت، بر طرف نمودن پسماندهای پوسته، مدیریت ضایعات پوسته و فرآیندهای پرتکاپوی میلگرد، تکامل یافته است. در دهه ۱۹۹۰ پیشرفت های زیادی در تمیزکاری پیوسته مفتول با روش پرتاب ساچمه (Shot blast) به دست آمد. تمیزکاری پرتاب ساچمه در خطوط پیوسته روکش کاری، دستگاه های کشش سرعت بالا و خطوط پرسرعت گالوانیزه نصب گردیدند. در ده سال اخیر تولیدکنندگان روانکارها ترکیباتی مخصوص فولادهای پوسته گیری شده مکانیکی (کم تا پرکربن) طراحی نموده اند که هم در فرآیندهای روکش پیوسته تک رشته ای و هم روکش های غوطه وری از آنها استفاده می شود. تجربیات تولیدی نشان داده است که پوسته گیری مکانیکی برای تولید محصولات پرحجم مفتولی به لحاظ اقتصادی قابل دوام هستند؛ از این رو پوسته گیری مکانیکی به یک عملیات استاندارد در اغلب کارخانه های مفتول تبدیل شده است. فرآیندهای مدرن پوسته گیری مکانیکی به طور عادی سطح کیفی را به وجود می آورند که اساساً با مفتول های اسیدشویی و روکش شده برابری می کند.

انواع پوسته گیری مکانیکی

پوسته گیری مکانیکی سطح میلگرد را برای زدودن پوسته نورد و یا زنگ سطح درگیر تغییر شکل یا سایش می نماید. روش های مختلف پوسته گیری مکانیکی عبارتند از:

(روش های سنتی)

- خم معکوس
- برس و ماسه زنی
- ساچمه زنی
- روش های ترکیبی

روش‌های غیرمتعارف

- جت هوا - آب
- وزش
- ترکاندن برودتی
- تمیزکاری الکترولیت - فراصوتی (اولتراسونیک)

وسعت و ماهیت پوسته

وسعت یا مقدار (ضخامت) پوسته میلگرد یک فاکتور کلیدی مؤثر در کیفیت میلگرد پوسته‌زدایی شده می‌باشد. بهترین میلگرد برای عملیات تمیزکاری شیمیایی میلگردی است که کمترین میزان پوسته را داشته باشد. جهت ارتقاء تمیزکاری اسیدی، تولیدکنندگان میلگرد به وسیله کنترل دمای نورد گرم، به ویژه در قسمت انتهایی خط (ریختن میلگرد بر روی نقاله)، شکل‌گیری پوسته ناشی از نورد گرم را به حداقل می‌رسانند. به طور مثال میزان پوسته میلگرد با ۰/۲۵ درصد وزنی در عملیات شیمیایی قابل تمیز شدن می‌باشد.

مقادیر بیشتر پوسته نیاز به پوسته‌زدایی مکانیکی دارند زیرا چنین پوسته‌هایی به راحتی متناسب با ضخامت و چسبندگی‌شان در اثر تغییر شکل ریزش خواهند داشت.



شکل ۱- پوسته ریخته شده میلگرد فولادی در حین خمش

چسبندگی پوسته به عوامل متعددی بستگی دارد، عوامل اولیه عبارتند از:

- صافی سطح بین فلز و پوسته
- تنش‌های مربوط به رشد پوسته
- تنش‌های حرارتی
- ترکیبات لایه اکسید

جنیو و فرانسوا تحقیقی در مورد تأثیر خنک‌کاری بر چسبندگی پوسته بر میلگرد فولادی پرکربن انجام دادند. آنها دریافتند که با کاهش دما در قسمت ریختن میلگرد بر روی نقاله، چسبندگی می‌تواند کاهش یابد و همچنین با کنترل زمان رشد پوسته در شروع خنک‌کاری میلگرد و خنک‌کاری میانی در هنگام شکل‌گیری پرلیت می‌توان چسبندگی پوسته را کاهش داد.

ریزش قابل اطمینان پوسته نیازمند یک حداقل ضخامت آن می‌باشد، که توسط درصد وزنی پوسته موجود تعریف می‌گردد. برای بهترین پوسته‌زدایی مکانیکی، پوسته روی میلگرد می‌بایست حداقل ۰/۵ درصد وزن آن را تشکیل دهد و در بسیاری از مشخصات تجاری محدوده ۰/۵ تا ۰/۷۵ درصد برای پوسته‌زدایی مکانیکی در نظر گرفته شده است. این بدان معنا نیست که میلگرد با پوسته کمتر از ۰/۵ درصد یا بیشتر از ۰/۷۵ درصد قابل پوسته‌زدایی مکانیکی نیست. بلکه به معنی این است که محدوده ۰/۵ تا ۰/۷۵ درصد وزنی بهترین میزان پوسته برای نتیجه کلی تولید می‌باشد. پوسته کمتر از ۰/۵ درصد اغلب به طور کامل شکسته نمی‌شود و پوسته بیشتر از ۰/۷۵ درصد به واسطه اکسیداسیون بیش از حد باعث اتلاف فولاد می‌گردد. مشخصات خرید برای میلگردی که می‌بایست پوسته‌زدایی مکانیکی گردد عبارتند از:

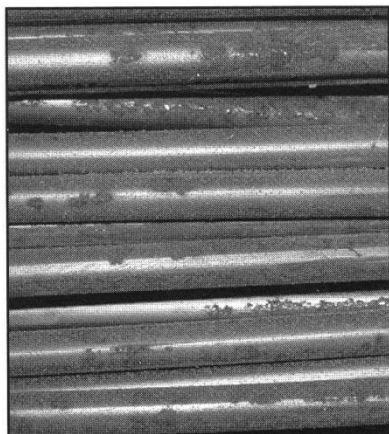
- میلگرد برای پوسته‌زدایی مکانیکی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.
- میزان پوسته می‌بایست ۰/۵ تا ۰/۷۵ درصد وزنی باشد.

فاکتور کلیدی دیگر در عملیات پوسته‌گیری مکانیکی ماهیت پوسته می‌باشد. به طور ایده‌آل پوسته می‌بایست خاکستری متالیک براق باشد و بعد از پوسته‌زدایی سطح فلز خاکستری نقره‌ای بماند. ولی در واقع در همه موارد اینگونه نخواهد بود. پوسته ثانویه درحین عملیات تولید میلگرد می‌تواند شکل بگیرد. جایی که بعد از شکسته شدن پوسته اولیه، یک پوسته تیره و دوده مانند بر

سطح میلگرد ظاهر می گردد. این وضعیت نامطلوب می باشد. وجود پوسته ثانویه می تواند مشکلات پیچیده تولید مانند فرسایش سریع دوزه و مشکلات کیفی سطح نهایی مفتول را باعث شود. چنانچه نیازهای مشتری برطرف نمودن کلیه پوسته های ثانویه باشد، یک عملیات پوسته گیری مکانیکی فعال تر از روش های ساده می بایست مورد استفاده قرار گیرد.

ماهیت زنگ سطح نیز می تواند بر نتایج پوسته گیری مکانیکی تأثیرگذار باشد. اکسید فریک (Fe_2O_3) زنگ قرمز رنگ معمولاً براساس شرایط زیر رو داری می گردد:

- وسعت ایجاد حفره های خوردگی (به شکل ۲a نگاه کنید)
- وسعت خوردگی معمولی جوی (به شکل ۲b نگاه کنید)
- کیفیت مورد نیاز مفتول پوسته گیری شده
- کیفیت مورد نیاز سطح مفتول نهایی



شکل ۲a - سطح میلگرد حفره دار



شکل ۲b - خوردگی معمولی جوی

چنانچه سطح با رنگ قرمز زنگ زدگی کمی قابل قبول باشد، میلگرد با عملیات پوسته زدایی مکانیکی معمولی (برس زنی) می تواند به طور متوسط زنگ زدایی گردد. از طرفی چنانچه سطح تمیز، براق و بدون رنگ قرمز زنگ زدگی مورد نیاز باشد، آنگاه یک عملیات پیشرفته پوسته زدایی مانند پرتاب ساچمه می بایست مورد استفاده قرار گیرد. در برخی موارد که امکان تمیز کردن سطح میلگرد با چاله های عمیق به وسیله پوسته گیری مکانیکی وجود ندارد و حتی امکان استفاده از

عملیات شستشوی اسیدی نیز امکان پذیر نباشد، در آن صورت عملیات ساچمه زنی به کار گرفته می شود.

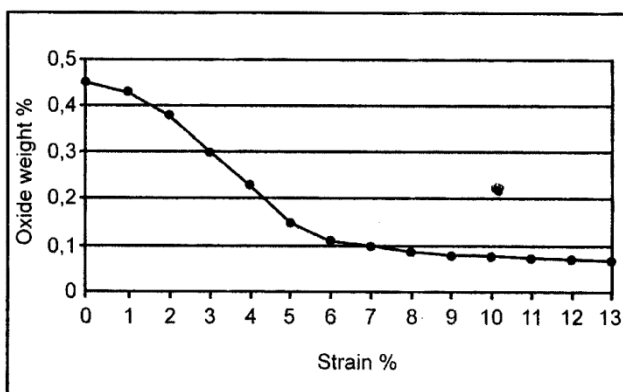
پوسته زدایی خم معکوس

در اوایل دهه ۱۹۵۰ اولین وسیله مکانیکی به رسمیت شناخته شده برای بر طرف نمودن پوسته، خم معکوس بود، زمانی که در نشریات تجاری مقالاتی راجع به روش های مکانیکی برای تمیز کردن مفتول در کارخانجات اروپایی به چاپ رسید. این روش های تمیزکاری مکانیکی مبتنی بر پیچیدن مفتول به دور غلطک ها و پولی های جهت شکستن و ریختن پوسته سخت و شکننده از سطح بود. روش های اولیه این سیستم بسیار ساده و معمولاً شامل دو قرقره بود که نسبت به هم زاویه ۹۰ درجه داشتند یا یک سری غلطک بود که مفتول پس از عبور از میان آنها وارد دستگاه کشش می شد. این واحدها را به عنوان پوسته گیرهای مکانیکی خم معکوس می شناختند تا از پوسته گیرهای مکانیکی پرتاب ساچمه تمایز داده شوند.

پوسته گیری مکانیکی با خم معکوس بر این حقیقت استوار است که مفتول شکل پذیر و پوسته اکسید شکننده می باشد. فولاد موقعی که میلگرد تغییر شکل می یابد، ازدیاد طول پیدا می کند، اما پوسته نورد می شکند و در صورتی که مقدار پوسته و مقدار تغییر شکل به اندازه معقول (کافی) باشد، پوسته از سطح مفتول جدا گشته و پایین می ریزد.

تغییر شکل خم معکوس که با دستگاه کشش مفتول توأمأ به کار گرفته می شود، روش معمول برای پوسته زدایی در خطوط تولید می باشد. اگرچه ممکن است افزایش طول کششی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

مقدار تغییر شکل مفتول (کرنش) یکی از مهمترین فاکتورهای موثر در پوسته زدایی مکانیکی خم معکوس می باشد. کرنش ضروری برای پوسته زدایی مکانیکی را می توان به وسیله کشش مفتول در دستگاه تست کشش تعیین نمود. (به شکل ۳ نگاه کنید)



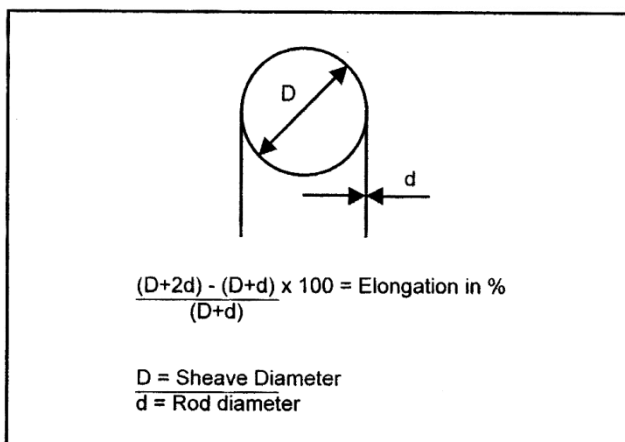
شکل ۳- جدا شدن پوسته اکسید به وسیله کشش در دستگاه تست کشش.

وزن اکسید به عنوان درصدی از وزن میلگرد تعریف می‌گردد.

وزن پوسته جدا شده به محض اینکه تغییر بعد نسبی کششی (کرنش کششی) به بالاتر از ۶ درصد برسد، سریعاً کاهش می‌یابد و به طور متوسط بین ۶ تا ۱۳ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین یک حداقل کرنش کششی ۶ درصدی بر تارهای خارجی مفتول برای بر طرف نمودن پوسته ضروری می‌باشد. ضمناً برس‌زنی بعدی نیز برای برطرف نمودن کامل پوسته ضروری می‌باشد.

عملکرد میلگرد در عبور از غلطک‌ها باعث کشیده شدن سطح میلگرد می‌گردد که این خود باعث ترک خوردن پوسته و ریختن آن می‌شود. تست‌های آزمایشگاهی نشان داده است که شروع ترک خوردن پوسته و ریزش آن در کرنش کششی ۳ تا ۵ درصد رخ می‌دهد. بیشتر پوسته در کرنش ۸ تا ۹ درصدی می‌ریزد ولی برخی پوسته‌های تا قبل از رسیدن ازدیاد طول به ۱۲ درصد همچنان باقی می‌مانند. جهت به حداقل رساندن شکست‌های جوش و آسیب‌های سطحی در حین پوسته‌زدایی مکانیکی، ازدیاد طول ۸ تا ۱۰ درصدی بهترین مقدار برای تغییر شکل میلگرد در عملیات تجاری می‌باشد. کمتر از ۸ درصد می‌تواند موجب پوسته‌زدایی ناکامل و باقی ماندن پوسته چسبیده شود. بیشتر از ۱۰ درصد افزایش طول شکستن بیشتر پوسته را باعث نمی‌شود اما کار سختی غیرمطلوب بر روی فولاد را افزایش می‌دهد. اثر تغییر شکل زیاد غیرمطلوب (خیلی بیشتر از ۱۰ درصد) پس کشش را افزایش می‌دهد و می‌تواند باعث کش آمدن و گلوئی دادن

میلگرد گردد. این عمل باعث تأثیر بر برنامه کشش بعدی می‌گردد و قدرت بیشتری برای موتور بلوک اول کشش جهت کشیدن مفتول از میان زنگ‌گیر دستگاه مورد نیاز خواهد بود. کرنش الاستیکی می‌تواند کارایی فرآیند پوسته‌زدایی را افزایش دهد، در حالی که تغییر شکل پلاستیکی بیش از اندازه همانگونه که قبلاً تذکر داده شد، اثرات غیرمطلوبی خواهد داشت. مقدار کرنش تارهای خارجی با نسبت بین قطر مفتول و قطر قرقره‌های زنگ‌گیر تعیین می‌گردد. وقتی یک مفتول به دور قرقره پیچیده می‌شود طول آن در خط مرکزی تغییر نمی‌یابد بلکه تارهای سطح خارجی کشیده و تارهای سطح داخلی فشرده می‌شوند. کرنش سطحی به صورت درصد افزایش طول داده می‌شود که به وسیله قطر غلطک و قطر میلگرد همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده است محاسبه می‌گردد.



شکل ۴- محاسبه ازدیاد طول حین خمش

این محاسبات فرض را بر این نهاده که اصطکاک بین مفتول و قرقره قابل اغماض می‌باشد. اگر اصطکاک وجود داشته باشد، خط خنثی در خط مرکزی مفتول نخواهد بود بلکه نزدیک‌تر به قرقره می‌باشد. بنابراین تارهای خارجی بیشتر از آن چه در شکل ۴ محاسبه گردیده است، کشیده خواهد شد. کرنش سطحی (درصد افزایش طول) ایجاد شده در حین خم برای قطرهای مختلف قرقره (D) و قطر میلگرد (d) در جدول (۱) داده شده است.

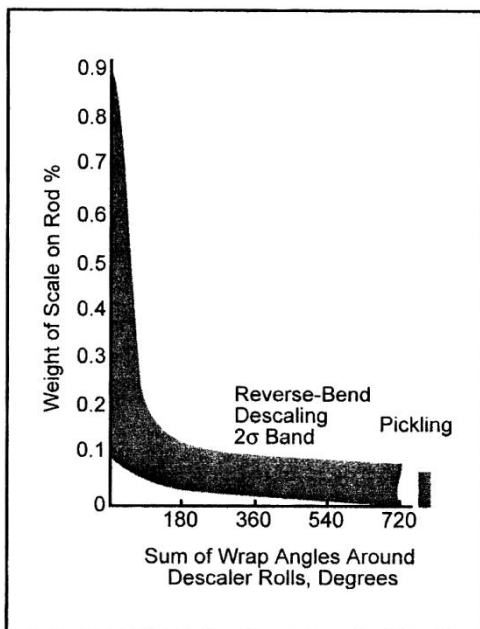
Wire Diameter (d = 5.5 mm)		Wire Diameter (d = 0.5 in.)	
Sheave (d=mm)	Elongation (%)	Sheave (D=inches)	Elongation (%)
40	12.1	4.0	11.1
50	9.9	4.5	10.0
60	8.4	5.0	9.1
80	6.4	6.0	7.7
100	5.2	7.0	6.7
120	4.4	8.0	5.9
140	3.8	10.0	4.8
160	3.3	12.0	4.0

جدول ۱- درصد ازدیاد طول محاسبه شده برای قطرهای مختلف قرقره و مفتول

طراحی پوسته‌گیر (زنگ‌گیر) مکانیکی - هلمن و اشنايدر با تحقیق بر روی اثرات تغییرات قطر غلطک، تعداد غلطک‌ها و زاویه پیچش بر تمیزی مفتول فولادی ساده خم معکوس خورده برای زدودن موثر پوسته، طراحی پوسته‌گیر مکانیکی را بهینه‌سازی نمودند. روش‌های زدودن پوسته و اندازه‌گیری نیروی مورد نیاز برای بیرون کشیدن مفتول از میان پوسته‌گیر خم معکوس مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج طراحی برای سه قطر مفتول ساده کربنی به شرح زیر بودند.

- مهم‌ترین پارامتر طراحی زاویه پیچش بود. شکل ۵ نشان می‌دهد که تمیزی قابل ملاحظه میلگرد تحت پیچش ۳۶۰ درجه‌ای به دست می‌آید. بنابراین حداقل زاویه پیچش ۳۶۰ درجه بود.
- قطر غلطک می‌بایست ۱۸ تا ۲۳ برابر قطر مفتول باشد تا ضمن پیشگیری از شکست مفتول در موارد مفتول‌های پرکربن، بهترین تمیزی حاصل شود. استفاده از غلطک‌های کوچک‌تر به ندرت باعث تمیزی می‌گردد.
- تمیزی مفتول با پوسته‌گیر چهارغلطکی با ۳۶۰ درجه پیچش بهتر از حالت استفاده از دو غلطک با همان زاویه پیچش می‌باشد.
- استفاده از دو صفحه تغییر شکل کمی مفیدتر می‌باشد زیرا معمولاً میلگرد درحین عبور از میان غلطک‌ها دچار پیچش می‌گردد.
- ساده‌ترین و ارزان‌ترین روش برای تمیزکاری ثانویه جهت زدودن ذرات پوسته و غبار روی مفتول استفاده از هوای فشرده می‌باشد.

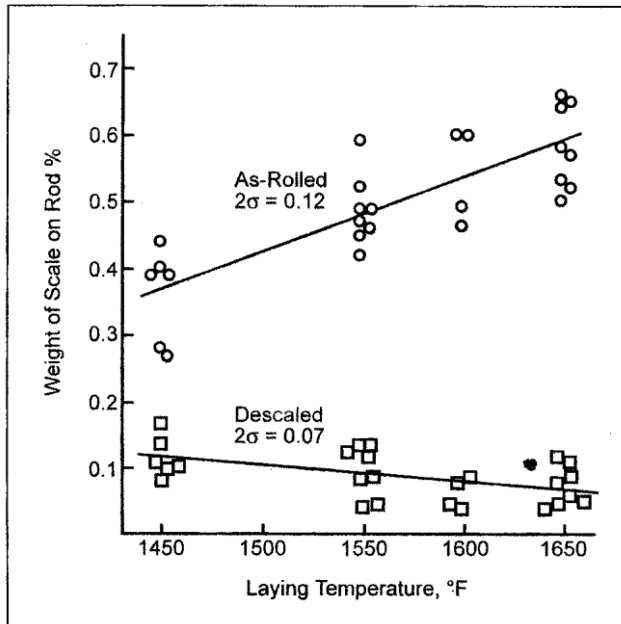
- با استفاده از طراحی بهینه شده پوسته گیر، میلگردهای کم کربن دچار آسیب سطحی یا ریزساختاری نگردیدند.
- نیروی پس کشش زنگ گیر با افزایش میزان کربن و زاویه پیچش و کاهش قطر غلطک افزایش یافت.



شکل ۵ - مقایسه تمیزی توسط پوسته گیری خم معکوس

و شستشوی شیمیایی برای تمامی میلگردها و قطره‌های غلطک و گریدهای فولاد کربنی ساده برای فولادهای کم و پر کربن دستیابی به تمیزی میلگرد به وسیله پوسته گیر خم معکوس با طراحی بهینه، به مقدار زیادی مستقل از ضخامت پوسته می‌باشد. شکل ۶ درصد افزایش وزن پوسته براساس دمای ناحیه کلاف کردن میلگرد در خط نورد برای فولاد کم کربن را نشان می‌دهد. افزایش دما در این ناحیه از ۷۸۷ درجه به ۸۹۸ درجه سانتی‌گراد باعث افزایش وزن پوسته به میزان ۰/۲ درصد می‌گردد. وزن پوسته باقی‌مانده بر روی میلگرد بعد از پوسته‌زدایی خم معکوس در پایین شکل ۶ نشان داده شده است. وزن پوسته باقی‌مانده بر روی مفتول اندکی به دمای ناحیه کلاف‌کن مرتبط می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که میلگردهای کلاف شده در دمای پایین‌تر

دارای پوسته نازکتری نسبت به حالت عادی مورد نظر نورد میلگرد می‌باشند، کار در دمای پایین‌تر برای کلاف کردن بهبود در شرایط عملیاتی و اقتصادی نورد را باعث می‌شود.



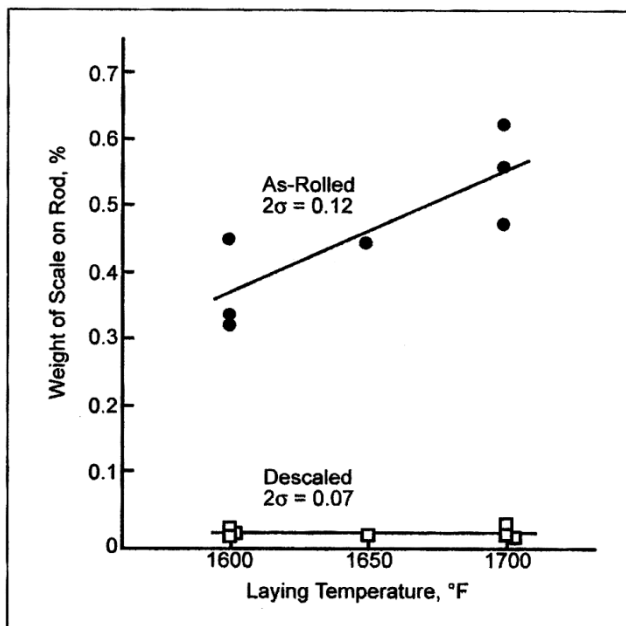
شکل ۶- تأثیر دمای کلاف کردن بر وزن پوسته و تمیزکاری

با پوسته‌گیری خم معکوس برای مفتول ۵/۵ میلیمتر کم‌کربن

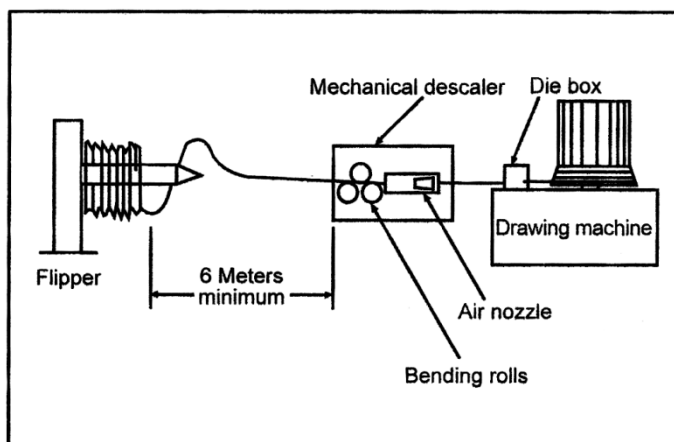
بعداز ۴ خم ۱۸۰ درجه‌ای بر روی غلطک‌هایی با قطر ۱۲۷ میلیمتر

نتایج برای مفتول پرکربن در شکل ۷ نشان داده شده است. تفاوت قابل توجه در ضخامت پوسته ایجاد شده در حین نورد اثری بر تمیزی مفتول بعداز پوسته‌گیری خم معکوس نخواهد داشت. پوسته‌گیرهای تجاری معمولاً بین سه تا شش غلطک دارند و در برخی موارد دارای هشت غلطک یا بیشتر هستند که در دو صفحه متفاوت قرار گرفته‌اند. خمش مفتول در غلطک‌های زنگ‌گیر (پوسته‌گیر) معمولاً بر کار انجام شده توسط بلوک اول دستگاه کشش تأثیر می‌گذارد. اگر یک مفتول قطر ۵/۵ میلیمتر در دستگاه پوسته‌گیر ۱۸۰ درجه خم گردد، اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که یک بار اضافی معادل ۵۰ تا ۸۰ پاندر در هر مرحله ایجاد می‌گردد. به فرض اینکه سرعت مفتول

۲ متر برتانیه باشد و پنج خم ۱۸۰ درجه‌ای بخورد، بار موتور حدود ۴ تا ۵ اسب بخار افزایش می‌یابد. شکل ۸ یک نمونه قرار گرفتن پوسته‌گیر مکانیکی در جلو دستگاه کشش را نشان می‌دهد.



شکل ۷- تأثیر دمای ناحیه کلاف کردن میلگرد بر وزن پوسته حین نوردکاری و تمیزی پوسته‌گیری خم معکوس برای مفتول ۵/۵ میلیمتر پرکربن بعد از چهار خم ۱۸۰ درجه‌ای بر روی غلطک‌هایی با قطر ۱۲۷ میلیمتر



شکل ۸ - نمونه قرار گرفتن پوسته‌گیر در جلو دستگاه کشش

علاوه بر قدرت اضافی مورد نیاز موتور بلوک اول، مفتولی که از جعبه قالب (دوزه) اول بیرون می‌آید نیروی لازم جهت تغییر شکل میلگرد در پوسته‌گیر را منتقل می‌نماید. این بدان معناست که کاهش‌هایی که بر روی میلگردهای اسیدشویی شده صورت می‌گیرد نمی‌توانند برای مفتول‌های زنگ‌زدایی شده به صورت مکانیکی مورد استفاده قرار گیرند. برای مثال؛ اگر یک کاهش ۴۰ درصدی حداکثر پیشنهاد برای مفتول اسیدشده باشد، حداکثر قابل قبول برای مفتول پوسته‌گیری شده به روش مکانیکی، حدود ۳۵ درصد خواهد بود. به عبارتی دیگر پس کشش ایجاد شده توسط پوسته‌گیر مکانیکی به وسیله کاهش تنش متقابل مورد نیاز برای تغییر فرم میلگرد، به عملکرد دوزه (قالب‌کشش) اول کمک می‌نماید.

تحقیق و توسعه اخیر و همچنین آزمون‌های تولیدی نشان داده است که بهترین پوسته‌شکن خم معکوس، یک ساختار سه غلطکی می‌باشد. در یک ترکیب سه غلطکی، غلطک میانی تحت یک چرخش ۹۰ درجه‌ای نسبت به غلطک ورودی و خروجی قرار گرفته است. (به شکل ۹ نگاه کنید). سطح میلگرد در صفحات مختلف خم می‌گردد، بنابراین تمامی سطح تغییر شکل پیدا می‌کند. میلگرد وقتی به دور این سه غلطک پیچیده می‌شود دچار حداقل ۳۶۰ درجه پیچش می‌گردد و این می‌تواند با تنظیمات راهنماهای ورودی و کشش به حدود ۴۰۰ درجه افزایش یابد.

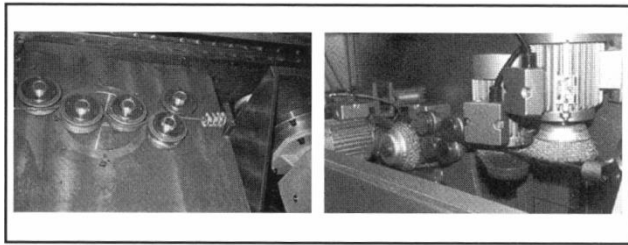
بیش از سه غلطک و پیچش بیشتر اثراتی مانند افزایش بیش از ده درصد تغییر شکل، کار سختی غیرضروری، پس کشش زیادی و توان مورد نیاز بیشتر برای موتور بلوک اول دستگاه کشش را خواهد داشت. تجهیزات خم معکوس که به درستی براساس اصول اولیه شکستن پوسته طراحی گردیده‌اند جهت انجام موفقیت‌آمیز پوسته‌گیری مکانیکی ضروری می‌باشند.



شکل ۹ - یک پوسته گیر (پوسته شکن) خم معکوس سه غلطکی

برس سیمی پوسته گیر مکانیکی

پوسته گیری با فرچه سیمی یک روش سنتی و رایج در فرآیند پوسته گیری مکانیکی می باشد. درحین این فرآیند مفتول از میان یک سری فرچه سیمی درحال چرخش یا صفحات سنبناده عبور می کند که این صفحات به وسیله تماس خود با مفتول بقایای پوسته را از سطح مفتول می زدایند. برس زنی اصولاً در ترکیب با پوسته گیری خم معکوس مورد استفاده قرار می گیرد تا پوسته های شل شده توسط عملیات خم کاری که هنوز بر سطح مفتول باقی مانده اند را از سطح جدا نماید و سطح را برای گرفتن روانساز آماده نماید. (به شکل ۱۰ نگاه کنید). استفاده از فرچه ها یا سنبناده می تواند یک سطح صاف مفتول را که خود مناسب گرفتن روانساز نمی باشد، فراهم نماید. کارایی تمیزکاری بنابر فرسایش فرچه و سنبناده متغیر خواهد بود. به علاوه، اگر پوسته بر روی سطح چسبیده باشد و شل نشده باشد در اینجا توسط فرچه و سنبناده سطح آن پولیش می گردد و از سطح میلگرد جدا نمی گردد.



شکل ۱۰- پوسته گیری مکانیکی سنتی با خم معکوس و فرچه سیمی

انواع متعددی پوسته گیر فرچه‌ای برای تمیز کردن مفتول ساخته شده است. با این حال بسیاری از آنها به دلایل زیر نمی‌تواند جهت تست در خط تولید مستقر گردند.

- تمیزکاری به دلیل فرسایش فرچه‌ها و صفحه سنباده‌ها یکنواخت نمی‌باشد و باعث آسیب سطح مفتول می‌گردد.
 - ابزار تمیزکاری به دلیل فرسایش نیاز به تنظیمات پیوسته دارند.
 - تجهیزات برای انواع مفتول‌ها مناسب نمی‌باشد.
 - فرچه‌ها به وسیله پوسته‌های اکسید ساییده شد و غیرفعال می‌گردند.
 - تعمیرات و تعویض مکرر فرچه‌ها باعث خواب بیش از حد دستگاه می‌گردد.
- طراحی‌های مدرن پوسته گیر فرچه‌ای با دانستن این مشکلات و انواع جدید فرچه‌ها با کارایی ارتقاء یافته، توسعه یافته‌اند. رشته‌های نایلونی با اکسید آلومینیوم یا سیلیکون کارباید بسیار مؤثر می‌باشند به طوری که پوسته اکسید تقریباً به طور کامل به وسیله فرچه‌زنی از مفتول جدا می‌گردد. تجهیزات تمیزکاری کارآمد شامل اهداف طراحی زیر می‌باشند.
- واسطه‌های تمیزکاری می‌بایست به آسانی در دسترس بوده و دارای استانداردهای صنعتی باشند.
 - واسطه‌های تمیزکاری نباید سطح مفتول را خراب کنند.
 - تجهیزات می‌بایست خود تنظیم بوده و به حداقل توجه اپراتور نیازمند باشد.
 - تجهیزات می‌بایست به حداقل تعمیرات معمول نیاز داشته باشد.
 - مفتول تمیز شده می‌بایست به آسانی روانساز کشش را جذب نماید.

یک پوسته‌گیر فرچه‌ای (برسی) که موارد بالا را در بردارد در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این واحد از ۸ برس استفاده کرده است که عمود بر جهت حرکت مفتول نصب گردیده‌اند و تنظیمات برای سایش برس به طور اتوماتیک صورت می‌گیرد. به دلیل چرخش برس‌ها به دور مفتول، خطوطی بر روی محیط مفتول ایجاد می‌گردد که به جذب روانساز کمک می‌کنند. مهمترین دلیل استفاده از تمیزکننده‌های برسی مفتول این است که با وجود متغیر بودن کیفیت سطح مفتول ورودی، تمیزی سطح مفتول پردازش شده یکنواخت خواهد بود.



شکل ۱۱- پوسته‌گیر مکانیکی هشت برسی

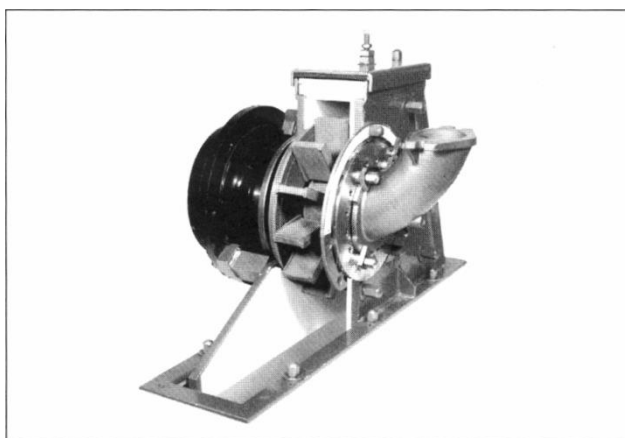
پوسته‌گیری مکانیکی پرتاب ساچمه

این سیستم با تأثیرگذاری بر ذرات چسبیده بر سطح مفتول باعث جدایش پوسته اکسید و زنگ می‌گردد. واسطه‌های تمیزکاری (معمولاً ساچمه فولادی) توسط هوای فشرده یا سیستم بدون هوای فشرده مانند چرخ دوار پرتاب می‌گردند. مانند اسیدشویی زمان در معرض تمیزکاری قرار گرفتن متأثر از کیفیت مورد نظر میلگرد می‌باشد.

پرتاب ساچمه با استفاده از چرخ گریز از مرکز الکتریکی (سانتریفیوژ) برای اولین بار در دهه ۱۹۰۰ برای تمیز کردن ماسه از روی قطعات ریخته‌گری شده مورد استفاده قرار گرفت این تکنولوژی در دهه ۱۹۵۰ به سایر حوضه‌های صنعت فولاد نیز رسید. پرتاب ساچمه در آماده‌سازی سطح بسیاری از محصولات مورد استفاده قرار گرفت. در صنعت سیم و کابل، مفتول مواد اولیه (وایرود) که با عبور مستقیم از زنگ‌گیر یا به وسیله فرآیند دسته‌ای (Batch process) کل کلاف مفتول تمیز می‌گردید، اینک به وسیله پرتاب ساچمه (Shot blasting) مورد تمیزکاری قرار گرفت.

فن‌آوری چرخ پرتاب ساچمه بین دهه ۱۹۴۰ تا ۱۹۸۰ پیشرفت چندانی نداشت اما طی ۲۰ سال اخیر، عرضه دستگاه‌های پرتاب ساچمه سرعت بالا تأثیر شگرفی بر صنعت فولاد داشته است. تا اواخر دهه ۱۹۸۰ استاندارد قابل قبول صنایع آمریکای شمالی سانتریفیوژی با قطر ۱۹ اینچ و سرعت ۲۲۵۰ دور دقیقه بود. معرفی دستگاه شات بلاست با سرعت ۳۰۰۰ تا ۳۶۰۰ دور در دقیقه قدم اصلی نوآوری به سمت مدرن کردن این دستگاه‌ها بود. (به شکل ۱۲ نگاه کنید)

یک دستگاه سرعت بالا فضا و قدرت کمتری نیاز دارد تا همان کارایی دستگاه سرعت پایین را داشته باشد. نتیجتاً کاهش انرژی و لوازم مصرفی تمیزکاری سودمندی مشابه یا بهتری را به دنبال خواهد داشت.



شکل ۱۲- چرخ پرتاب ساچمه سرعت بالا

پوسته‌گیری پرتاب ساچمه‌ای پیوسته - یک دستگاه پوسته‌گیر شلات بلاست با سایر تجهیزات کشش مفتول پشت سرهم قرار می‌گیرند به طوری که به صورت پیوسته مفتول قبل از روکش‌کاری یا کشش تمیز می‌گردد. قرقره‌های صاف‌کن و تجهیزات تنش‌گیر قبل از دستگاه شات بلاست نصب می‌گردند. مفتول از طریق راهنما وارد ناحیه شات بلاست می‌گردد که در این ناحیه در معرض بمباران شدید و با سرعت بالای ساچمه و مخلوطی از واسطه‌های تمیزکاری قرار می‌گیرد که پوسته اکسید و زنگ از سطح مفتول جدا می‌گردد. مخلوط واسطه‌های تمیزکاری یکی از اجزاء کلیدی برای رسیدن به سطح مطلوب یا زبری دلخواه سطح حین پوسته‌زدایی می‌باشد. در خروجی دستگاه، مفتول تمیز وارد محفظه روانساز و دستگاه کشش می‌گردد.

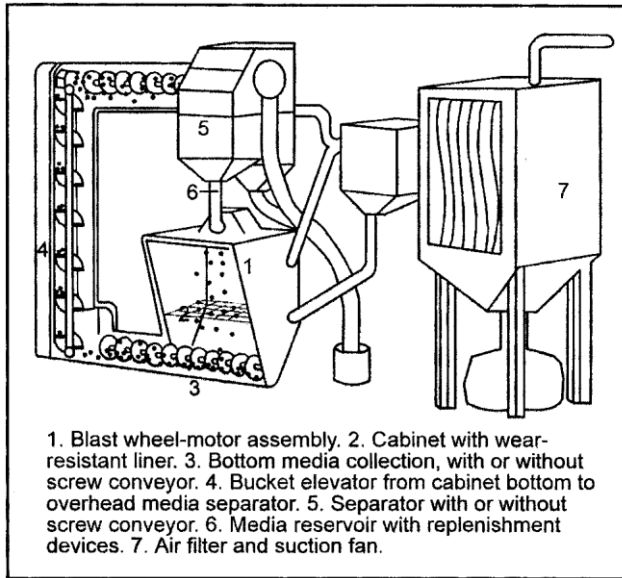
ماشین‌های مدرن شات بلاست پیوسته چه تک محوری و یا چند محوری دارای دو تا شش چرخ پرتاب ساچمه در هر دستگاه می‌باشند. قطر مفتول، میزان کربن و سرعت مورد نظر نوع دستگاه مورد نیاز را تعیین می‌نمایند. تمامی دستگاه‌های شات بلاست شامل هفت قسمت اصلی نشان داده شده در شکل ۱۳ می‌باشند.

ماشین‌های دارای یک چرخ پرتاب یک چرخ ۲۵ اسب بخار یا کوچک‌تر را مورد استفاده قرار می‌دهند که در کابینی در بالای سر مفتول قرار گرفته است. (به شکل ۱۴ نگاه کنید)

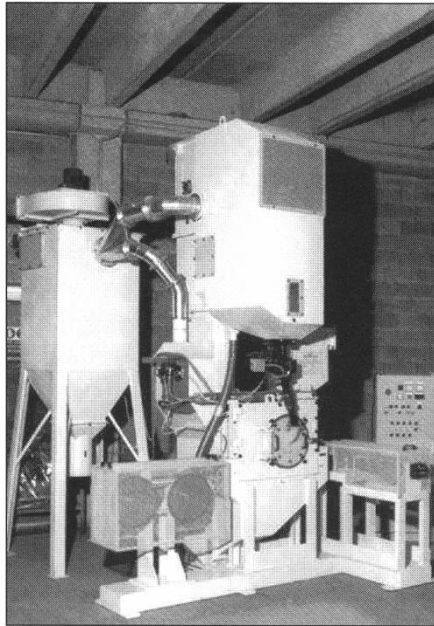
در این دستگاه میلگرد یکبار از کابین دستگاه عبور می‌کند و بلافاصله توسط غلطک‌هایی چرخانده شده و مجدداً وارد کابین می‌گردد با این کار یک دستگاه یک چرخ دو طرف مفتول را در یک فاصله ۱۸۰ درجه‌ای پوسته‌گیری می‌نماید.

چرخ‌های پرتاب در ماشین‌های چند چرخه‌ای به طور شعاعی و به دنبال هم نسبت به خط مرکزی میلگرد قرار گرفته‌اند. بنابراین در یک دستگاه با سه چرخ پرتاب، چرخ‌ها با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم نصب گردیده‌اند و در دستگاه چهارچرخه این زاویه ۹۰ درجه می‌باشد تا یکنواختی در پرتاب نسبت به میلگرد فراهم گردد. (به شکل ۱۵ نگاه کنید)

اغلب در خروجی چرخ‌های پرتاب، صفحات راهنمایی نصب می‌گردد تا ساچمه‌ها را به خوبی به سمت میلگرد هدایت کنند تا کارایی بیشتر حاصل شود. همچنین در مواردی که زنگ مفتول زیاد

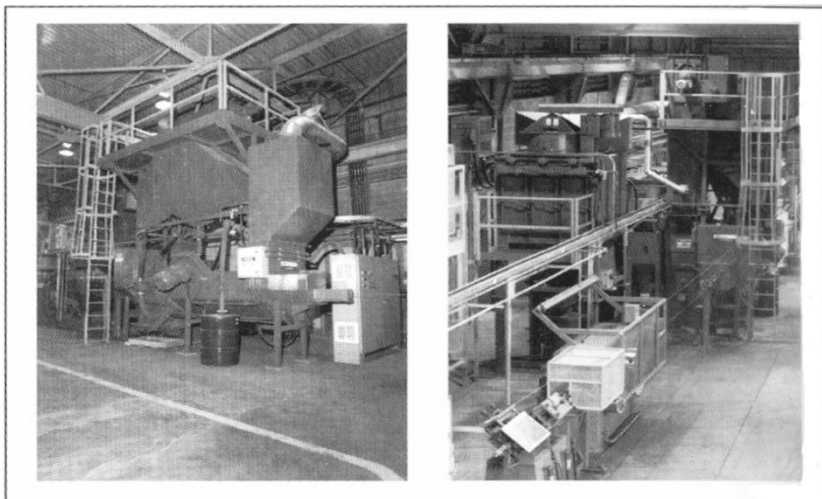


شکل ۱۳- اجزاء اصلی یک دستگاه شات بلاست مدرن



شکل ۱۴- دستگاه شات بلاست تک چرخ

می‌باشد و سرعت خط بالاست، از غلطک‌هایی برای برگشت دادن مفتول استفاده می‌شود تا زمان مورد پرتاب قرار گرفتن مفتول دو برابر گردد و کارایی افزایش یابد.



شکل ۱۵- دستگاه شات‌بلاست با سه چرخ پرتاب

مهندسین و طراحان تجهیزات می‌بایست بدانند که مفتول در حین عبور می‌بایست کاملاً به صورت افقی و صاف و کشیده باشد. این مسأله در طراحی و ساختار دستگاه مهم می‌باشد. چیدمان چرخ‌های پرتاب در یک دستگاه شات‌بلاست تعیین می‌کند که مفتول در حین عبور از ناحیه پرتاب چه مدت زمانی تحت پرتاب قرار می‌گیرد. رایج‌ترین ساختار برای دستگاه‌های پیوسته، شات‌بلاست‌های سه چرخ هستند که هر چرخ یک بخش ۱۲۰ درجه‌ای از سطح مفتول را پیوسته برداری می‌کند.

سرعت خط، تعداد و سایز چرخ پرتاب و درجه تمیزکاری مورد نظر زمان تحت پاشش قرار گرفتن را تعیین می‌کند. خواه دستگاه دارای یک چرخ پرتاب باشد و یا تا هشت چرخ پرتاب داشته باشد، سرعت نقش مهمی در تعیین این‌که چه مفتولی می‌تواند پیوسته‌زدایی گردد، ایفا می‌نماید. در عمل سرعت دستگاه کشش تعیین کننده سرعت خط شات‌بلاست می‌باشد.

توان چرخ پرتاب - این توان تعیین کننده حجم واسطه‌های تمیزکاری (ساجمه و غیره) که بر سطح مفتول پرتاب می‌گردد تا پیوسته‌گیری به درستی انجام گیرد، می‌باشد. در اینجا محدودیتی برای

مقدار ساچمه‌ای که یک چرخ می‌تواند پرتاب کند وجود دارد، این مسأله با سرعت دلخواه خط همسو شده و بر انتخاب توان و تعداد چرخ‌های پرتاب‌کننده تاثیرگذار می‌باشند. شدت پرتاب و موقعیت چرخ پرتاب نسبت به مفتول تعیین‌کننده سائز چرخ پرتاب می‌باشد. طراحان ماشین به طور طبیعی تلاش می‌کنند که قدرت مورد نیاز و سائز چرخ پرتاب را برای اطمینان از کارآیی و هزینه کم به حداقل برسانند.

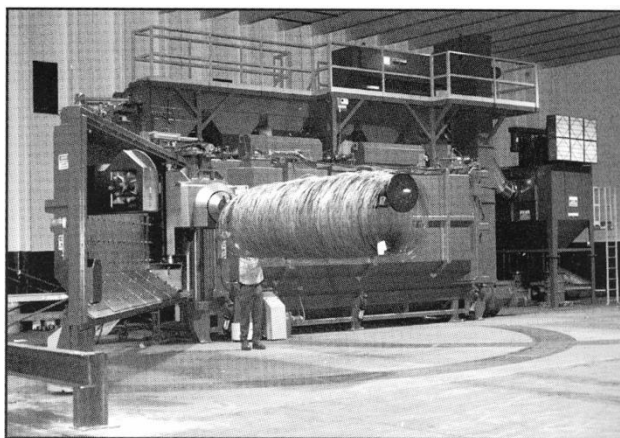
غلطک‌های برگشت دهنده - اضافه نمودن غلطک‌هایی به دستگاه شات‌بلاست جهت برگشت دادن مفتول این اجازه را می‌دهد که مفتول دو یا چند بار از دستگاه عبور داده شود تا تمیزی بهبود یافته و یا سرعت خط افزایش یابد. غلطک‌های برگشت‌دهنده بدون افزایش توان دستگاه می‌توانند سرعت عبور را دو تا سه برابر افزایش دهند. سائز غلطک‌ها می‌بایست دسترسی آسان را فراهم نموده در ضمن به اندازه‌ای قطر آنها بزرگ باشد تا ازدیاد طول ناشی از پیچیدن مفتول به دور آنها به حداقل برسد. (به شکل ۴ نگاه کنید)

تشدیدکننده‌های پرتاب - همچنین متمرکزکننده نیز نامیده می‌شوند، تشدیدکننده‌های پرتاب قطعاتی هستند که بر روی چرخ پرتاب نصب می‌شوند و از آلیاژی به همان سختی جنس چرخ پرتاب ساخته شده‌اند. آنها به صورت قیف ساچمه‌ها را به سمت میلگرد هدایت می‌کنند، بنابراین استفاده بهینه انرژی و در پاره‌ای موارد کاهش توان، تضمین می‌گردد. در دستگاه‌هایی که از شاخه تغذیه می‌شوند، این صفحات قابل تنظیم بوده تا برای شاخه‌های نازک و کلفت درحال پوسته‌گیری در دستگاه شات‌بلاست مناسب شوند. در تمامی موارد، این قطعات در معرض فرسایش زیاد هستند و نیازمند یک بازرسی منظم می‌باشند تا اطمینان حاصل شود که آنها هدف اصلی را که کاهش انرژی می‌باشد فراهم می‌سازند.

میله‌های برگشت دهنده - آنها نیز از همان آلیاژ سخت چرخ پرتاب ساخته شده‌اند که پشت مفتول نصب می‌گردند تا ساچمه‌هایی را که به مفتول برخورد نکرده‌اند را مجدداً به طرف دیگر مفتول برخورد دهند. اینها نیز مانند صفحات متمرکزکننده ساچمه در کاهش انرژی بسیار مؤثر هستند و اطمینان از کارکرد صحیح در نظر گرفته شده برای آنها نیازمند بازرسی منظم می‌باشند.

مزیت یک دستگاه شات بلاست پیوسته این است که تنظیم یا آماده‌سازی اضافه بر روی مفتول مورد نیاز نمی‌باشد زیرا دستگاه شات بلاست جزئی از خط کشش می‌باشد. برای تمیزکاری یکنواخت تنظیم بسیار مهم می‌باشد از این رو مفتول می‌بایست صاف و بدون پیچ و تاب در مسیر عبور از دستگاه شات بلاست باشد. هرگونه نامنظمی یا نوسان می‌تواند باعث تمیزکاری ضعیف و محصول نامرغوب گردد. ایراد یک دستگاه شات بلاست پیوسته این است که این بخش از خط اختصاصی بوده و تطبیق‌پذیری آن با برنامه‌های تولیدی محدود می‌باشد. دستگاه‌های پیوسته قادرند مفتول از قطر ۵/۵ میلیمتر تا ۱۲ میلیمتر را پوسته‌زدایی نمایند. کالیبراسیون تجهیزات به طور کلی تابعی از کیفیت سطح نهایی و سرعت خط می‌باشد. دستگاه‌های شات بلاست پیوسته می‌توانند به صورت سفارشی بوده تا بیشترین نیازمندی‌ها را پاسخگو باشند.

پوسته‌گیری گروهی شات بلاست - یا شات بلاست کلاف، برای پوسته‌گیری و زنگ‌زدایی کل کلاف در یک زمان طراحی گردیده است. (به شکل ۱۶ نگاه کنید) کلاف بر روی یک محور یا تیر که بر روی درب دستگاه نصب گردیده قرار می‌گیرد. محور طوری طراحی گردیده که درحین عملیات دوران داشته باشد و در نتیجه کل سطح خارجی و داخلی کلاف یا بندیل در معرض پرتاب ساچمه یا دیگر واسطه‌های تمیزکاری قرار گیرد. (به شکل ۱۷ و ۱۸ نگاه کنید)



شکل ۱۶- دستگاه شات بلاست گروهی (کلاف)

وقتی از یک دستگاه دو درب استفاده می‌شود یک درب می‌تواند در حال تخلیه و بارگیری کلاف و دیگری در حال عملیات باشد. سیکل زمانی برای اینگونه تجهیزات وقتی مفتول نازک را تحت عملیات دارند با عملیات اسیدشویی قابل مقایسه می‌باشد. از طرف دیگر وقتی قطر میلگرد افزایش می‌یابد سیکل زمانی برای همان درجه از تمیزی به مقدار زیادی کاهش می‌یابد.

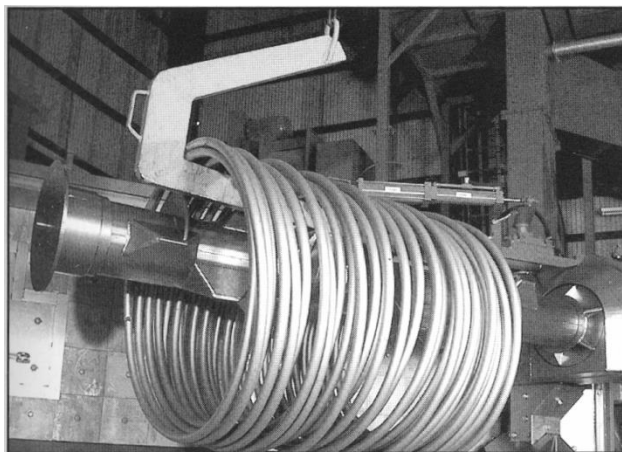
محورها در این دستگاه‌ها قادرند کلاف تا وزن ۳۶۲۸ کیلوگرم را تحمل نمایند. از آنجایی که سیستم گروهی یک روش غیرپیوسته می‌باشد، دستگاه نیازی به تنظیمات اضافی به استثنای تنظیم سیکل زمانی برای قطره‌های مختلف مفتول، ندارد. این یک مزیت بزرگ در واحدهایی است که مفتول با قطره‌های مختلف را در یک زمان مورد استفاده قرار می‌دهد.



شکل ۱۷- نمای داخلی کلاف شات‌بلاست شده کلافی

دستگاه‌های شات‌بلاست کلاف برای جایگزینی پوسته‌گیری به روش اسیدشویی طراحی گردیده‌اند. در بسیاری موارد به خصوص برای پوسته‌های زیاد این روش به خوبی با عملیات اسیدشویی برابری می‌کند. در محدوده آزمایشی، عملیات شات‌بلاست کلافی از نظر تمیزی سطح برای مفتول و زمان پوسته‌گیری مشابه نسبت به اسیدشویی، برتری دارد. باید دانست که هرچند این روش نمی‌تواند جایگزین عملیات روکش غوطه‌وری گردد، اما ممکن است به مقدار زیادی زمان عملیات را کاهش دهد. مفتول بعد از خروج از دستگاه شات‌بلاست مستقیماً وارد وان فسفات یا

آهک قبل از عملیات کشش می‌گردد. حتی در موارد آب‌شویی یا اسیدشویی پاششی نیز شات‌بلاست کلافی زمان پوسته‌گیری را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد.



شکل ۱۸- نمای بیرون کلاف شات‌بلاست شده

جنبش‌شناسی واسطه‌های پاششی - درک جنبش‌شناسی واسطه‌های پاششی برای عملیات تمیزکاری موفق ضروری می‌باشد. به عنوان اولین توجه، بهترین شکل، اندازه و سختی می‌بایست انتخاب گردد. شکل ذرات عموماً عبارتند از: گوی فولادی از سایز $0/42$ تا $0/18$ میلیمتر که S-170 و S-70 نامیده می‌شوند و ماسه سنگ فولادی (با سطوح زاویه‌دار) از سایز $0/42$ تا $0/3$ میلیمتر که G-40 و G-50 نامیده می‌شوند. ماسه‌سنگ‌های فولادی با سختی‌های متفاوت وجود دارند از GP با سختی ۵۰ تا C تا GH با سختی ۶۶ را کول C .

اندازه ذرات و شکل آنها مستقیماً بر نتیجه شکل سطح تأثیرگذار می‌باشند. ذرات درشت و با شکل خیلی تهاجمی، زبری سطح را افزایش می‌دهند. سختی ماسه‌ها می‌بایست فقط برای سطوح سخت مثل مفتول فولاد پرکربن افزایش یابد. ماسه‌های سخت‌تر دستگاه را فرسوده می‌نماید و فقط در مواردی که ماسه‌های نرم‌تر کارایی ندارند می‌بایست مورد استفاده قرار گیرند.

مسأله مهم که می‌بایست مورد توجه قرار گیرد این است که دستگاه شات‌بلاست نو که با ساچمه یا ذرات نو شارژ گردیده است می‌بایست حدود ۴۰ ساعت یا بیشتر کار کند و سپس تلاش‌های جدی جهت تنظیمات مشخصات سطح، خاکه‌ها، میزان مصرف ساچمه و میزان شارژ مجدد به کار گرفته شود. این زمان به کارگیری اجازه می‌دهد تا ساچمه‌های نو و سالم مانده با ساچمه‌های خرد شده یک مخلوط تشکیل دهند. با یک مدیریت ساده و دقیق «مخلوط ساچمه‌ها»، توزیع سایز ذرات می‌تواند ابقاء گردد و ادامه یکنواختی سطح قابل دسترس می‌باشد. در واقع یکی از مزایای شات‌بلاست تداوم یکنواختی سطح در طول زمان می‌باشد. کنترل چنین مشخصه سطحی را نمی‌توان به وسیله فرچه، تسمه یا سنباده فراهم نمود زیرا در موقع نو بودن بسیار مفید و در صورت فرسایش غیرکارآمد می‌باشند.

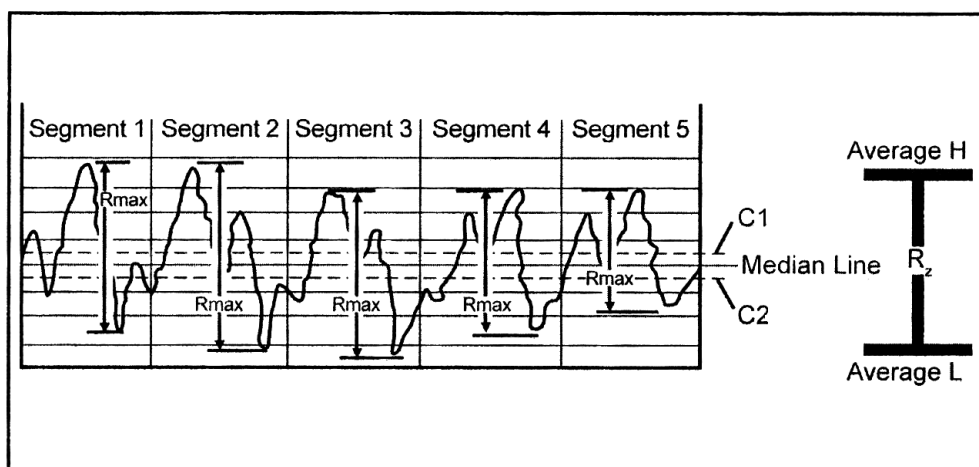
برای هر کاربردی بهترین سرعت ساچمه می‌بایست انتخاب گردد. سازندگان دستگاه شات‌بلاست می‌توانند به این امر کمک نمایند. اساساً سرعت ذرات با قطر چرخ پرتاب‌کننده و سرعت آن (RPM) تعیین می‌گردد. یک چرخ با قطر زیاد و سرعت کم همان سرعت ذره را دارد که یک چرخ با قطر کم و سرعت زیاد دارا می‌باشد، اما یک چرخ بزرگ جرم بیشتری از ذره را در دقیقه پرتاب می‌کند. این نسبت‌ها برای سازندگان این دستگاه‌ها به خوبی شناخته شده می‌باشند. جدول ۲ نشان‌دهنده آمیزه‌ای از انتخاب دستگاه و ذرات پرتابی برای یک تعداد قطر و میزان کربن مفتول می‌باشد.

Rod Diameter (mm)	Carbon (%)	Rod Speed (M/Min)	Media Designation	R _z (microns)	Particle Speed (M/Sec)
5.5	0.06	175	GP 50	20	200
5.5	0.80	100	GL 50	25	220
10.0	0.40	80	GP 50	25	180
12.0	0.80	70	GL 50	30	220

جدول ۲- برنامه‌های کاربردی موفق تمیزکاری پیوسته با شات‌بلاست

شناخت و تشخیص سطح - اجراء صحیح تمیزکاری شات‌بلاستی مفتول نه تنها پیوسته و زنگ روی فولاد را بر طرف می‌نماید بلکه پستی و بلندی‌هایی بر روی سطح آن ایجاد می‌نماید. این پستی و بلندی‌ها می‌توانند به وسیله دستگاه پرتابل به نام پروفیلومتر محاسبه و اندازه‌گیری گردند.

پروفیلومتر یک نوک سوزنی را بر روی سطح مفتول عبور می‌دهد و با ردیابی پستی و بلندی‌ها به طور فوری یک مقدار متوسط برای عمق زبری را با ارزیابی طول پارامتر R_z محاسبه می‌نماید. طول ارزیابی شده بر پنج قسمت مساوی تقسیم می‌گردد. بلندترین و عمیق‌ترین نقطه در هر قسمت اندازه‌گیری می‌گردد و میانگین آنها R_z را تعیین می‌کند که به صورت هزارم یا میکرون خوانده می‌شود. شکل ۱۹ نشان‌دهنده یک تشخیص پروفیلومتر است که پارامتر R_z را تعیین می‌نماید. پس از اینکه مقدار R_z برای عملیات کشش، پیش پوشش یا گالوانیزه کاری مشخص گردید، با خواندن دوره‌ای عدد پروفیلومتر می‌توان مطمئن شد که ساچمه‌ها و دیگر پارامترهای دستگاه شات بلاست تحت کنترل می‌باشند.



شکل ۱۹- پارامترهای تشخیص سطح حاصل از ردیابی پروفیلومتر

واسطه‌های پرتاب (ساچمه‌ها) یا مخلوط کاری - مخلوط کاری (مخلوطی از ساچمه‌های سالم و شکسته) از اجزاء اساسی کارکرد خوب دستگاه شات بلاست می‌باشد. در مقایسه با تمامی اجزاء دیگر پوسته‌گیر، مخلوط کاری متغیری است که به طور قابل ملاحظه‌ای بر محصول تأثیرگذار می‌باشد و فقط نیاز به توجه دارد. معمولاً پیشنهاد می‌گردد کارکرد صحیح آن حداقل روزی یک بار کنترل گردد. یک کیت آزمایشی ساده مانده نمونه‌ای که صنایع اروین ارائه نموده است تمامی آن چیزی است که برای اطمینان از کارکرد صحیح ماشین مورد نیاز می‌باشد. در تمامی

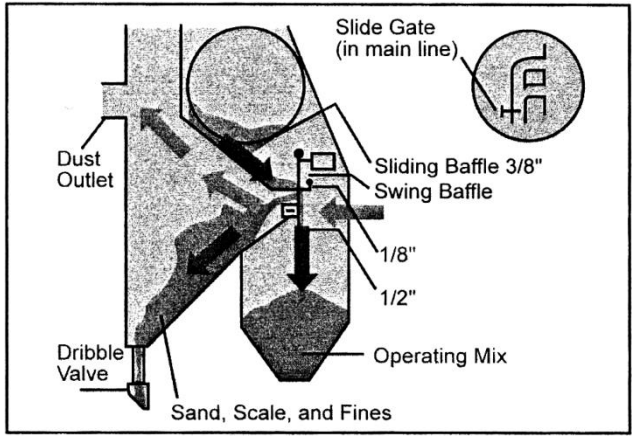
دستگاه‌های پوسته‌گیر شات‌بلاست ساچمه‌ها و واسطه‌های دیگر خرد می‌شوند و از بین می‌روند و تعویض آنها ضروری می‌باشد.

تفکیک واسطه - در یک ماشین پوسته‌گیر شات‌بلاست، سیستم تفکیک و جداسازی واسطه (ساچمه‌ها و دیگر عوامل پرتابی) از اجزاء کلیدی محسوب می‌گردد. تفکیک کننده (به شکل ۲۰ نگاه کنید) اجازه می‌دهد که واسطه حین عبور از سیستم تمیزکننده هوایی، تمیز شده به طوری که زنگ، پوسته و ساچمه (واسطه‌های از بین رفته جداسازی گردند تا مخلوط واسطه‌ها در تمیزکاری محصول کارآمد باقی بماند. واحد تفکیک کننده قلب سیستم می‌باشد و مشکل پیش آمده در تمیزکاری می‌تواند مربوط به این واحد باشد. ذرات بازیافتی قبل از ورود به مخزن ذخیره از سپراتور (تفکیک کننده) عبور می‌کنند. در اینجا مانع قابل تنظیم کشویی وجود دارد که میزان عبور ذرات را تنظیم می‌نماید. به منظور ایجاد حالت آبشار، یک لبه وجود دارد که ذرات (ساچمه‌ها) به وسیله جریان هوای تمیز از روی آن آبشارگونه می‌ریزند، این جریان هوا به وسیله افت فشار در کلکتور گرد و غبار به وجود می‌آید. یک مانع نوسانی قابل تنظیم برای تنظیم جریان ذرات از روی لبه سپراتور مورد استفاده قرار می‌گیرد و دو عملکرد مهم دارد؛ اطمینان از اینکه یک لایه ساچمه در تمامی مسیر عبور از سپراتور وجود دارد و کنترل ضخامت لایه برای حصول اطمینان از اینکه این لایه آن قدر بزرگ نباشد که مانع جریان هوا به سمت خروجی گرد و غبار گردد. در حالی که سپراتور (تفکیک کننده) نصب شده باشد، تعمیر و نگهداری کمتری برای تضمین کارکرد خوب مخلوط ساچمه‌ها مورد نیاز می‌باشد.

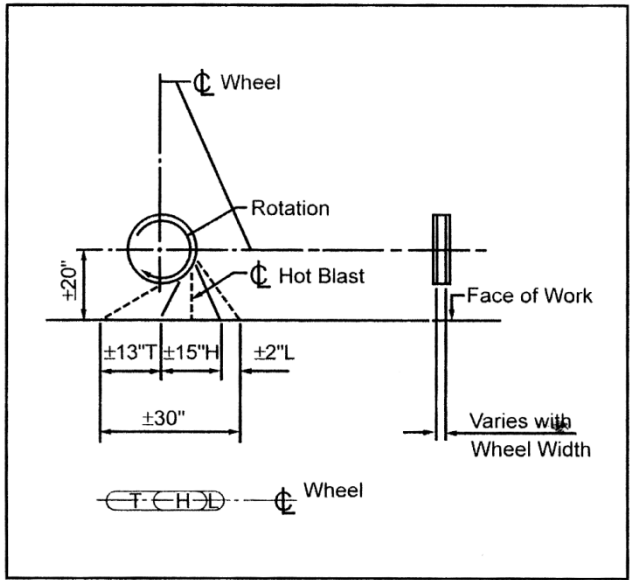
الگوهای چرخ‌های پرتاب - تمامی چرخ‌های پرتاب ساچمه، بدون در نظر گرفتن سائز آنها از طریق نیروی گریز از مرکز یک جریان پرتابی تولید می‌نمایند که یک الگوی مشخص مانند آن چه در شکل ۲۱ نشان داده شده است، دارند.

کاربرد این الگو این است که کارایی شات‌بلاست را کنترل می‌نماید.

الگوی پرتاب شامل سه ناحیه پرتاب سایشگر با فشرده‌گی متفاوت می‌باشد. از راست به چپ در شکل ۲۱ ناحیه‌ای که با حرف L مشخص گردیده و ناحیه پرتاب مقدم نامیده می‌شود، اولین بخشی است که در معرض پرتاب توسط چرخ پرتاب قرار می‌گیرد.



شکل ۲۰- سیستم تفکیک



شکل ۲۱- نمودار الگوی پرتاب

این ناحیه تحت پرتاب با فشردگی متوسط می باشد و معمولاً پیش درآمدی برای ناحیه کاملاً تحت پرتاب قرار گرفته **H** می باشد که پرتاب تند نامیده می شود یعنی جایی که ماده تحت زاویه ۹۰

درجه با جریان پرتاب قرار می‌گیرد. بنابراین اگر الگوی پرتاب به صورت پیوسته به کار گرفته شود، همواره مورد استفاده می‌باشد.

«پرتاب تند» بالاترین دانسیته را دارد و منبع اصلی انرژی تمیزکاری را فراهم می‌سازد در هر فرآیندی استفاده کامل از این ناحیه در کارآیی عملیات بسیار مهم می‌باشد. آخرین منطقه پرتاب که «T» یا «پس پرتاب» نامیده می‌شود، آخرین پرتاب چرخ می‌باشد با کاهش دانسیته و حجم ساچمه‌ها و همانگونه که در شکل ۲۱ نشان داده شده است نیمه انتهایی این ناحیه کمترین پرتاب را دارد و به دلیل زاویه برخورد حداقل اثرات تمیزکاری را در بر خواهد داشت.

الگوی پرتاب سایشگر ابزاری است برای زدودن پوسته از محصولات نورد گرم شده، این الگو نشان‌دهنده انرژی جنبشی و در واقع از طریق ضربه جدا شدن پوسته از میلگرد فولادی می‌باشد. میزان این جدا شدن پوسته بستگی به مشخصه پوسته دارد. اغلب پوسته‌های فولادهای کربنی بسیار سخت بوده و در اثر ضربه پودر می‌گردند. درجه پودر شدن پوسته‌ها بستگی به متغیرهایی از قبیل شیمی فولاد، دمای نورد، دمای پایانی، روش خنک‌کاری، اندازه محصول و غیره دارد. میلگردهای خنک شده در دمای نسبتاً پایین ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد دارای پوسته‌ای می‌باشند که نسبت به میلگردهای خنک شده در دمای ۸۹۹ درجه سانتی‌گراد، راحت‌تر جدا می‌شوند. این تغییرات در پوسته و جداسازی آن همواره فاکتوری در اسیدشویی و فاکتور اصلی در میزان تمیزکاری با روش شات‌بلاست می‌باشد. تجربه ثابت کرده است که یک ذره ساینده تحت زاویه ۳۰ تا ۹۰ درجه به سطح پوسته برخورد می‌نماید که در هر صورت زاویه ۹۰ درجه برای برطرف نمودن پوسته بسیار کارآمدتر خواهد بود. شکل ۲۱ نشان می‌دهد که سایشگر (ساچمه) در ناحیه «پرتاب تند» نزدیک‌ترین فاصله با این ناحیه را دارد و این قسمتی از الگوی پرتاب است که بیشترین کار تمیزکاری در آن صورت می‌گیرد.

بدیهی است چنانچه فقط ناحیه «پرتاب تند» در فرآیند مورد استفاده قرار گیرد، صرفه اقتصادی وجود نخواهد داشت. اغلب کاربردها نیاز به چرخ‌های پرتاب متعدد دارند تا نیازهای تولید پاسخ داده شوند. بنابراین ترکیبی از چند چرخ به کار گرفته می‌شود و تقریباً تمام الگوی پرتاب مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت اطمینان از استفاده کامل از الگوی پرتاب، یک تونل پرتاب در

ماشین‌های شات بلاست میلگرد یک یا چند خطی، گنجانیده شده است. این تونل شامل صفحات مجزا منحنی شکل آلیاژی است که در مقابل هر چرخ دستگاه قرار دارند. میلگرد در این ناحیه پرتاب از وسط تونل عبور می‌کند و تحت بمباران اضافی ساچمه‌هایی قرار می‌گیرد که در ابتدای امر به مفتول برخورد نکرده‌اند، بنابراین کارآیی تمیزکاری افزایش می‌یابد. چنین صفحاتی در ماشین‌های چند خطی نیز گنجانیده شده‌اند جایی که الگوی پرتاب به صورت عمودی برای خطوط عبوری مفتول‌ها به کار گرفته شده است.

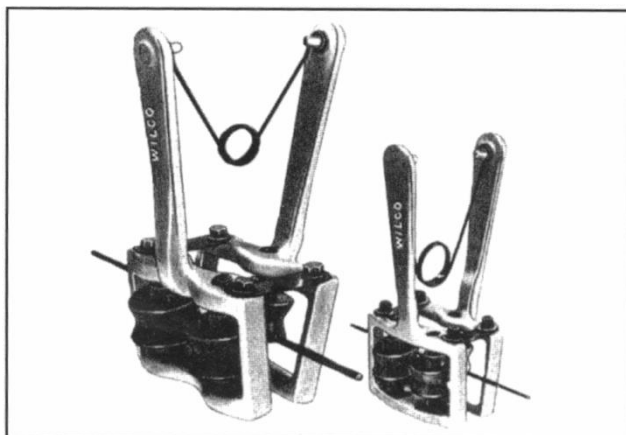
روکش آهک - در فصل شستشو و روکش، مشارکت بین تمیزکاری شیمیایی و روکش مورد بحث قرار گرفت. روکش بر روی مفتول برای کشش معمولاً بعد از تمیزکاری شیمیایی در وان‌های غوطه‌وری صورت می‌گیرد. به طور سنتی این روکش کاری به حدی با تمیزکاری شیمیایی قرابت دارد که به نظر می‌رسد آنها برای کشش مفتول موفق، ضروری می‌باشند.

روکش‌ها ضروری نمی‌باشند. دوزه معمولاً سخت می‌باشد و باور این که روکش‌ها به سادگی به کار کشش کمک می‌نمایند برای برخی دشوار می‌باشد. خوشبختانه تلاش‌های اپراتورهای کشش مفتول منجر به توسعه سایر کمک کشش‌ها گردیده است به طوری که همان تأثیر پوشش سنگین بوراکس یا آهک را دارا می‌باشند. در غیاب پوشش کاری و نیاز به تمیزی کافی مفتول، یک یا چند کمک کشش می‌توانند همان ضریب اطمینان عملیات کشش را فراهم نمایند و مشخصه‌هایی مفتول کشیده شده شبیه آن‌چه با عملیات پوشش کاری سنتی به دست می‌آید را فراهم نمایند.

کمک کشش‌ها - پودر هم‌زن‌ها در پوسته‌گیری مکانیکی همان کاری را انجام می‌دهند که روکش‌ها در مفتول‌های اسیدشویی شده انجام می‌دهند. (به شکل ۲۲ نگاه کنید) مهمترین و اساسی‌ترین عملکرد، افزایش جذب روانساز توسط میلگرد در دوزه اول می‌باشد و این به خصوص می‌تواند در کشش فولادهای پرکربن که با سرعت بالا و در چند مرحله کشیده می‌شوند، مفید باشد.

اگر چه در ابتدا پودر هم‌زن‌ها برای عملیات پوسته‌زدایی مکانیکی به عنوان کمک کشش مورد استفاده قرار می‌گرفتند، امروزه در دامنه وسیعی از کشش مفتول به کار می‌آیند. علاوه بر استفاده در دوزه اول، در صورت نیاز می‌توانند در تمامی جعبه‌های روانساز به کار گرفته شوند. در حقیقت

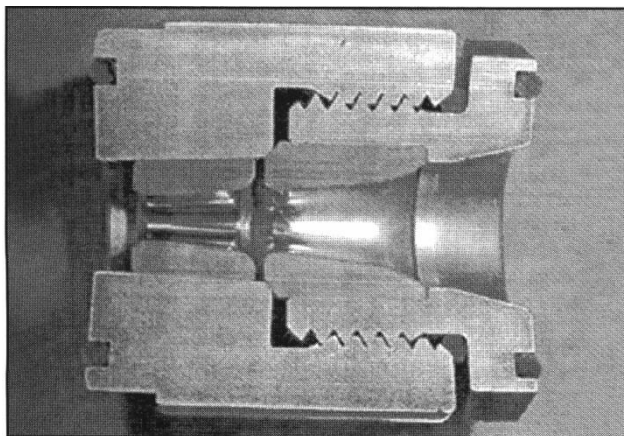
آنها در ماشین‌های چند کششی به عنوان کمک کشش که جذب روانساز در دوزه‌های میانی را بهتر می‌کند، شناخته می‌شوند.



شکل ۲۲- پودر هم‌زن که برای جذب بهتر پودر در محفظه پودر قرار می‌گیرد

محفظه دوزه فشار (**Pressure die**) برای کمک به کشش میلگردهای پوسته‌گیری شده مکانیکی توسعه یافته‌اند (به شکل ۲۳ نگاه کنید)، مانند پودر هم‌زن‌ها، یک محفظه دوزه فشاری ساده و محکم هم بستگی قوی با زنگ‌زدایی مکانیکی خواهد داشت مانند رابطه پوشش با اسیدشویی. استفاده از دوزه فشار در کشش مفتول دو هدف را دنبال می‌کند؛ یکی کمک به جذب روانساز و تولید لایه روانساز در دوزه اول و دیگری حفظ و ابقاء لایه روانساز در دوزه‌های بعدی است. روانکاری هیدرودینامیکی که توسط دوزه فشاری فراهم می‌گردد این دو هدف را قابل دسترس می‌سازد. فشار در این محفظه به دلیل هندسه دو قالب قرار گرفته در محفظه به وجود می‌آید. سایز اولین دوزه قرار گرفته در محفظه کمی بیشتر از مفتول ورودی به دوزه می‌باشد تا فضایی بین دوزه و مفتول وجود داشته باشد. دومین دوزه جاسازی شده در محفظه همان سایز مورد نظر مفتول را خواهد داشت. انتخاب فاصله دو سایز دوزه بسیار مهم می‌باشد. اگر فاصله خیلی کم باشد، جذب روانساز کاهش می‌یابد. از طرفی اگر فاصله زیاد باشد، در مقایسه با دوزه کشش معمولی بهبودی حاصل نمی‌گردد. جدول ۳ فاصله سایز دو دوزه برای کشش مفتول‌های نورد گرم را نشان می‌دهد. جدول ۴ این فاصله را برای مفتول‌های کشیده شده نشان می‌دهد. این دو جدول

به دلیل تغییرات در سایز مفتول‌های نورد گرم در مقایسه با مفتول‌های کشیده شده ضروری می‌باشند.



شکل ۲۳- یک محفظه دوزه فشار شامل یک دوزه فشاری

و یک دوزه کشش جهت افزایش جذب روانکار در دوزه اول و ابقاء لایه روانکار برای کشش‌های بعدی

Nominal Rod Diameter, Inches		Add This Amount to Nominal Rod Diameter to Obtain Pressure Die Size
From 6 gauge to 17/64	(0.192-0.2656)	0.027
Over 17/64 to 3/8	(0.2656-0.3750)	0.037
Over 3/8 to 1/2	(0.3750-0.5000)	0.050
Over 1/2 to 11/16	(0.5000-0.6875)	0.070
Over 11/16	(0.6875-0.9375)	0.095
Over 15/16 to 1-19/64	(0.9375-1.2969)	0.130
Over 1-19/64 to 1-3/4	(1.2969-1.7500)	0.175

جدول ۳- برنامه تعیین سایز دوزه فشار برای کشش میلگرد

Entering Wire Size, Inches	Add This Amount to Entering Wire Size to Obtain Pressure Die Size
From 0.030 to 0.062	0.002
Over 0.062 to 0.112	0.004
Over 0.112 to 0.192	0.008
Over 0.192 to 0.320	0.014
Over 0.320 to 0.520	0.022
Over 0.520 to 0.678	0.036

جدول ۴ - برنامه تعیین سایز دوزه فشار برای مفتول کشیده شده

شکست پوسته در بخش پوسته‌گیری مکانیکی به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

- طراحی تجهیزات
- تغییر شکل ۸ تا ۱۰ درصدی مفتول
- تغییر شکل اصلی خمش با کمی کشش
- ۳۶۰ تا ۴۰۰ درجه کل پیچش میلگرد
- تعادل شکست پوسته در مقابل عوارض جانبی دیگر
- وضعیت میلگرد
- میزان پوسته ۰/۵ تا ۰/۷۵ درصد وزنی
- حداقل پوسته ثانویه
- حداقل زنگ سطح

نگهداری - دستگاه زنگ‌گیر شات بلاست یکی از تجهیزات خود مخربی است که نیاز به بازرسی منظم دارد. طبیعت زنگ‌گیر به گونه‌ای است که دستگاه حین کار کردن مسلماً تخریب می‌گردد و اگر بدون بازرسی رها گردد، پتانسیل آسیب‌رسانی به تجهیزات دیگر را دارد. بنابراین وقتی اینگونه دستگاه‌ها طراحی می‌گردند، چنین فرسایش‌هایی مورد توجه خواهند بود. قطعاتی که فشار سایش را تحمل می‌کنند طوری طراحی می‌گردند که پس از سررسیدن عمر مفید قابل تعویض باشند. هزینه فرسایش قطعات در اقتصادی بودن دستگاه شات بلاست حیاتی می‌باشد. متناسب با محصول تولید شده، پارامترهای متعدد کشش مانند روانکاری، هندسه دوزه، برنامه کشش، سرت خط و دستگاه‌های کشش در طراحی و استقرار موفق زنگ‌گیر مکانیکی دخیل می‌باشند.

تأمین‌کنندگان تجهیزات زنگ‌گیر مکانیکی می‌بایست اطلاعات و مساعدت در این زمینه را فراهم نمایند.

اگر چه مبنای عملیات پوسته‌گیری شات بلاست در دهه‌های اخیر تغییراتی نداشته است ولی تکنولوژی چنان پیشرفتی کرده است که در فرآیند شات بلاست مسیر حرکت توسط کامپیوتر و نرم‌افزار قابل مشاهده و کنترل می‌باشد. ابداع اینورترهای فرکانسی به طور متفاوتی کارایی چرخ

پرتاب را افزایش داد و تغییرات بزرگی در سرعت آن و بازده پوسته‌زدایی ایجاد نمود که قبل از آن قابل دسترس نبود. سطح تمیز حاصل از اسیدشویی را می‌توان با کمکی دستکاری در مخلوط کاری (ساجمه‌های شات‌بلاست) با روش شات‌بلاست به دست آورد. این پیشرفت‌ها همراه با تعمیرات پیشگیرانه موجود و برنامه‌های نرم‌افزاری مدیریت تولید، اجازه می‌دهد که اطلاعات و داده‌های با کیفیت در یک محیط - زمان واقعی به وجود آیند. بزودی روش اسیدشویی از تولید مفتول به طور کامل حذف می‌گردد. شات‌بلاست میلگرد بدون پوشش، کاهش زیادی در هزینه‌های تولید را ارائه خواهد نمود.

روش‌های ترکیبی

ترکیب سه مرحله - اسیدشویی پوسته و زنگ را از بین می‌برد. مقادیر زیاد پوسته، مقادیر زیاد اسید و دیگر مواد اسیدشویی را به دنبال خواهد داشت. پوسته‌گیری مکانیکی صرف نظر از کم یا زیاد بودن پوسته، درصد زیادی از آن را می‌زداید. دفع پوسته خشک و جامد حاصل از پوسته‌گیری مکانیکی ساده و ارزان‌تر از دفع مایعات مصرف شده اسیدشویی می‌باشد. ترکیب شیمیایی پوسته حدوداً ۷۵ درصد آهن و ۲۵ درصد اکسیژن می‌باشد که با ترکیب سنگ آهن مرغوب قابل قیاس می‌باشد. از این رو در عملیات فولادسازی قابل بازیافت می‌باشند.

به این دلایل اقتصادی، یک روش ترکیب سه مرحله‌ای پوسته‌گیری مکانیکی، اسیدشویی معمولی و پوشش کاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. میلگرد به صورت پیوسته پوسته‌زدایی مکانیکی می‌شود و به وسیله یک طبله یا کویلر کلاف می‌گردد و سپس به صورت کلافی در یک خط معمولی اسیدشویی شده و پوشش داده می‌شود. در این روش یک زنگ‌گیر خم معکوس ساده با ۲ تا ۱۲ غلظک یا قرقره، مناسب می‌باشد. قطر قرقره‌ها نسبتاً کم اهمیت می‌باشد. به عبارت دیگر انواع خم معکوس‌ها می‌تواند مقدار کافی اکسید یا زنگ مفتول را از بین ببرد تا در عملیات بعدی اسیدشویی مصرف مواد کاهش یابد.

بنابراین، جدا از این که آیا خم معکوس نقصی دارد یا نه، ترکیب پوسته‌گیری مکانیکی، اسیدشویی، پوشش کاری و پخت (حرارت دادن بعد از پوشش) می‌تواند موادی تولید کند که کاملاً با مواد فرآیندهای معمولی برابری نماید و کاملاً با شیوه‌های کشش سازگاری داشته باشد.

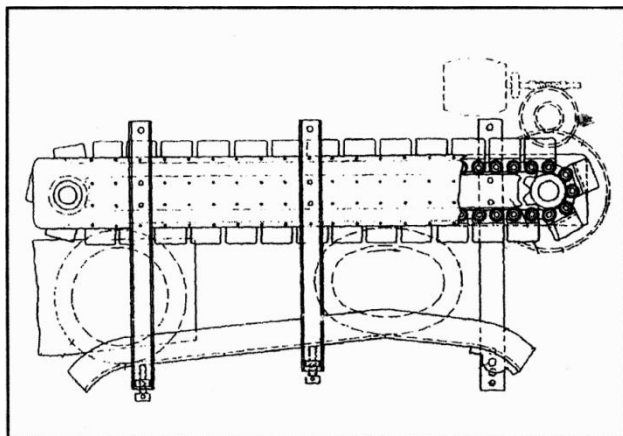
در این روش تفکر منطقی، سیستم عملی و نتایج رضایت‌بخش می‌باشند. با این حال، معیار اصلی مثل همیشه هزینه کل می‌باشد. در این روش در هزینه اسید و دفع آن صرفه‌جویی وجود خواهد داشت اما هزینه عملیات اضافی به آن اضافه می‌گردد. استفاده از روش ترکیب سه مرحله بستگی به شرایط مشخص دارد.

روش ترکیب دو مرحله - تمیزکاری و پوشش‌دهی میلگرد معمولاً عملیات دسته‌ای می‌باشد. روش‌های عملی پوسته‌گیری مکانیکی عملیات پیوسته هستند. ترکیب روش پیوسته و گروهی بدون حمل مواد در مرحله میانی غیرممکن است. با این حال پوسته‌گیری مکانیکی را می‌توان به عنوان یک عملیات گروهی انجام داد.

جالب است اشاره گردد که پوسته‌گیری مکانیکی در واقع قدیمی‌تر از تمیزکاری شیمیایی می‌باشد. یکصد و پنجاه سال پیش (خیلی پیشتر از زمانی که اسیدسولفوریک یا اسیدکلریدریک به صورت تجاری به کار گرفته شوند) میلگردها یا دسته‌های میلگرد (faggots) به صورت مکانیکی پوسته‌گیری می‌شدند. میلگردها بزرگ و سخت بودند و کلاف‌ها فقط هر کدام حدود ۶/۳۵ کیلوگرم وزن داشتند. آنها با دست کوبیده شده و یا در یک بشکه با ماسه یا آب مورد سقوط قرار می‌گرفتند و پوسته‌گیری مکانیکی می‌شدند تا آماده کشش گردند.

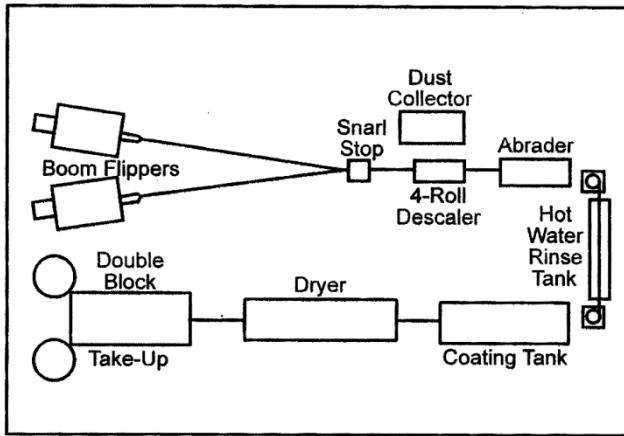
روش‌هایی برای پوسته‌گیری مکانیکی گروهی کلاف میلگرد وجود دارد. دستگاه‌های شات‌بلاست گروهی برای تمیز کردن پوسته و زنگ از کل کلاف مفتول در یک زمان طراحی گردیده‌اند (به شکل ۱۶ نگاه کنید). کلاف بر روی یک محور که بر روی درب دستگاه نصب گردیده است، قرار می‌گیرد. محور طوری طراحی گردیده که می‌تواند چرخش داشته باشد تا درحین کار تمامی سطح داخلی و خارجی مفتول در معرض پرتاب قرار گیرد (به شکل ۱۷ و ۱۸ نگاه کنید). برای پوسته‌گیری گروهی به وسیله خم معکوس، بندیل میلگرد بین سنبه و سندان یک پرس بزرگ قرار می‌گیرد. سپس پرس بندیل را به شکل بیضوی تغییر شکل می‌دهد. بندیل ۹۰ درجه می‌چرخد و دوباره تغییر شکل می‌یابد. هر بندیل حداقل پنج مرحله تغییر شکل نیاز دارد تا اطمینان حاصل شود که پوسته از محیط مفتول جدا شده است. یک ماشین صرفه‌جو در نیروی کار اختراع آلمان

اینگونه عمل می‌نماید که مفتول بین یک نقاله دوار و یک خط راهنمایی مقاوم و همگرا فشرده می‌شود. (به شکل ۲۴ نگاه کنید)



شکل ۲۴- دستگاه اتوماتیک پوسته‌گیری مکانیکی بندیل مفتول به وسیله خم معکوس

هدف هر یک از این روش‌های پوسته‌گیری مکانیکی گروهی تسریع در عملیات تمیزکاری گروهی شیمیایی بعدی می‌باشد به نسبت حالتی که تمیزکاری شیمیایی به تنهایی صورت می‌گیرد. از طرف دیگر اسیدشویی می‌تواند به صورت پیوسته صورت گیرد به خصوص اگر پوسته‌گیری مکانیکی پیوسته کارآمد بتواند زمان غوطه‌وری و دمای مورد نیاز اسید را به حداقل برساند. یک سیستم دو مرحله‌ای پوسته‌گیری مکانیکی و شستشوی پیوسته، مرحله جابه‌جایی مفتول در مرحله میانی سیستم سه مرحله‌ای را حذف می‌نماید. اغلب این سیستم با پوسته‌زدایی مکانیکی توسط شات‌بلاست برای مفتول‌های قطر بزرگ با یک خط عبوری انجام می‌گیرد و در صورت نازک بودن قطر مفتول (۵/۵ میلیمتر) دستگاه می‌تواند با چند خط عبوری پوسته‌زدایی مکانیکی را انجام دهد. از آنجایی که اسیدشویی، پوشش‌دهی و خشک کردن وابسته به زمان می‌باشد، این خطوط کاملاً طولی خواهند بود. چیدمان تجهیزات به صورت نعل اسبی یا U شکل می‌تواند طول خط را کوتاه‌تر نماید. همچنین در چنین خطوطی، اسیدشویی می‌تواند کاملاً حذف شده و خم معکوس و تسمه سنباده‌زن مورد استفاده قرار گیرد. (شکل ۲۵)



شکل ۲۵- دیاگرام زنگ‌گیری مکانیکی با تجهیزات پوشش‌کاری به شکل U

پوسته‌گیری مکانیکی به وسیله خم معکوس و تسمه سنباده نیاز به شستشوی اسیدی را حذف می‌نماید. خطوط متعدد این چینی با ویژگی‌های مطلوب وجود دارند. محصولات خطوط پیوسته معمولاً خیلی یکنواخت‌تر از محصولات فرآیندهای گروهی (batch) می‌باشند. مشکلات آلودگی به وضوح کمتر می‌باشد. حتی خطوطی با یک مفتول عبوری به حدی با سرعت بالا می‌توانند کار کنند که چند دستگاه کشش مفتول را تغذیه نمایند. محصولات این خطوط (وقتی به درستی کار کنند) همیشه بالاترین کیفیت را دارند و در مقایسه با خطوط اسیدشویی و پوشش‌دهی معمولی بهتر یا برابر هستند. کارآیی و سودمندی خطوط اسیدشویی مسلم است ولی به دلیل بخارات و دود، این خطوط در مکان‌های مخصوص و منفک کار می‌کنند در نتیجه محصولات می‌بایست تا محل ماشین‌آلات کشش مفتول حمل گردند.

روش‌های ترکیب یک مرحله - اگر نرخ‌های تولید پی‌درپی نسبتاً یکنواخت باشند، آنها جاذبه اقتصادی جهت ترکیب شدن و حذف هزینه حمل را خواهند داشت. اگر تمیزکاری و پوشش‌دهی با عملیات کشش ترکیب گردند، عملیات حمل و نقل می‌تواند حذف گردد. با این وجود حتی نگاه گذرا به خط که شامل تخلیه‌کن مفتول (payoff)، پوسته‌گیر مکانیکی، تمیزکاری شیمیایی، شستشو، پوشش، پخت و کشش مفتول می‌باشد، به دلیل فضا، طول خط، کنترل، نیروی انسانی

مورد نیاز دلسرد کننده می باشد. بنابراین اگر اسیدشویی بتواند حذف گردد، آلودگی کاملاً حذف شده و طول خط کاهش می یابد.

پوسته گیری مکانیکی جایگزین اصلی تمیزکاری شیمیایی می باشد. نظر به اینکه شات بلاست یک روش پوسته گیری با ثبات و مورد توجه می باشد می تواند واجد شرایط برای واگذاری تمیزکاری به این سیستم بدون کمک اسید باشد. بنابراین در بسیاری از کاربردها، یک پوسته گیری مکانیکی می تواند کاملاً جایگزین تمیزکاری شیمیایی گردد و در صنعت به عنوان یک عمل خوب مورد قبول می باشد.

با این حال، براساس روش های مرسوم مواد تمیز شده همچنان می بایست با یک حامل روانساز مثل آهک، براکس یا فسفات روکش گردد. شیوه طبیعی پوشش دادن در سیستم ترکیب دو روش به وسیله عبور از تشتک مواد و خشک کن طویل می باشد. وقتی که شات بلاست در سیستم ترکیب یک مرحله انجام می شود، یک اسپری کننده الکترواستاتیکی می تواند جایگزین تشتک و خشک کن شود. این وسیله یک جانشین خشک و اختصاصی به جای آهک به کار می گیرد که هم به صورت روکش و هم به صورت روانکار عمل می نماید. وقتی مفتول به وسیله خم معکوس پوسته گیری مکانیکی شد، در سیستم تشتک و بعد خشک کن ابتدا روکش آهک می گیرد و سپس به دور طبله ای که از داخل حرارت می بیند و قطر آن ۲ متر می باشد پیچیده می شود.

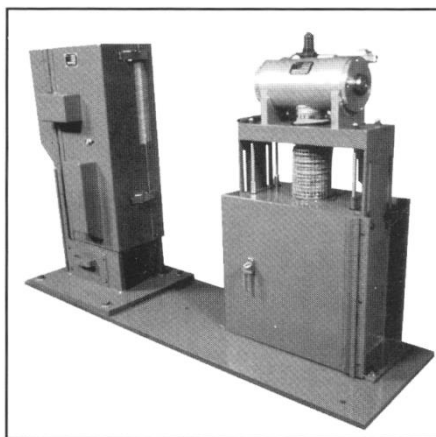
روش دیگر ترکیب یک مرحله، پوشش خشک می باشد که می تواند با عبور مفتول پوسته گیری شده مکانیکی از وسط بشکه ای در حال دوران حاوی توده های آهک صورت پذیرد. از نقطه نظر فضای مورد نیاز شاید مبتکرانه ترین سیستم، ترکیب فشرده ای از تخلیه کن عمودی مفتول، تمیزکاری با دو روش خم معکوس و تسمه سنباده، روکش براکس به صورت غوطه وری و خشک کن الکتریکی باشد. این سیستم به نام **mechanaclean** شناخته شده می باشد.

خلاصه ترکیب روش ها - تمام سیستم های فوق ترکیب تمیزکاری و پوشش می باشد. آنها مشکلات آلودگی را به نسبت روش های سنتی اسیدشویی جهت پوسته زدایی، کاهش داده و برخی کاملاً حذف نموده اند. بعلاوه شایستگی مواد تمیز و پوشش شده برای کشش مفتول را به چالش کشیده اند. محصولات این روش ها به حدی نزدیک به محصولات روش های معمولی و سنتی

تمیزکاری هستند که برای کشش مفتول با روش‌های قدیمی موجود تغییرات کوچکی در آنها مورد نیاز می‌باشد.

پوسته‌گیری با جت هوا - آب

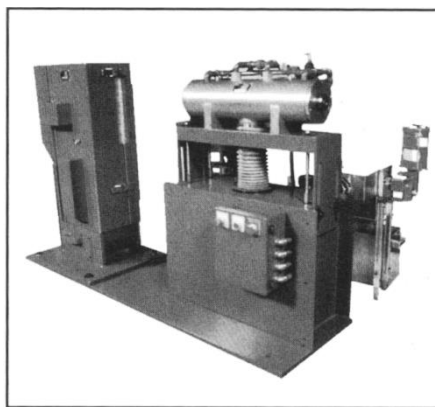
در پوسته‌گیری مکانیکی جت هوا - آب، دستگاه کشش مفتول را از میان قرقره پوسته‌شکن خم معکوس می‌کشد تا بیشتر پوسته مفتول جدا گردد. سپس باقی مانده پوسته‌ها با استفاده از جت هوا یا اسپری آب و به دنبال آن خشک کردن توسط هوا، از سطح مفتول جدا می‌شوند. اغلب سیستم‌های پوسته‌گیری با جت هوا، بقایای پوسته از سطح مفتول را با استفاده از جت هوای فشرده و عبور مستقیم از نازل‌های لوله‌ای جدا می‌کند. جت هوا همچنین در ورودی و خروجی مکشی ایجاد می‌کند به طوری که هیچگونه مخلوطی از پوسته و هوا وارد محیط کار نمی‌گردد. (به شکل ۲۶ نگاه کنید)



شکل ۲۶- سیستم پوسته‌گیری جت هوا

پوسته‌گیری مکانیکی جت آب خیلی شبیه پوسته‌گیری جت هوا می‌باشد با این تفاوت که برداشتن بقایای پوسته توسط آب با فشار خیلی زیاد صورت می‌گیرد. پوسته‌گیرهای جت آبی قادر به تمیز کردن مفتول‌های خیس محوطه باز نیز هستند. آب تمیزکاری در یک مدار بسته به طور مداوم گردش می‌نماید و تمام پوسته‌ها به وسیله فیلترهای مگنت‌دار جداسازی می‌گردند. (به شکل ۲۷ نگاه کنید)

جت هوای فشرده با سرعت بالا مفتول را خشک می کند در نتیجه مفتول آماده کشش می گردد. پوسته حاصل از پوسته شکن ها می توانند در پوسته گیری مکانیکی مورد استفاده قرار گیرند. پرتاب پوسته خیس با به کارگیری جت سرعت بالای مایع سایشگر شامل هوا، آب و پوسته، سطح مفتول را تمیز می نماید. سیستم می تواند برای ثبات جریان و رسیدن به تمیزکاری کامل تنظیم گردد. تجهیزات مورد استفاده در یک سیستم پرتاب دوغاب نیازمند نگاهداری بیشتری نسبت به دستگاه پوسته گیر شات بلاست نمی باشد.



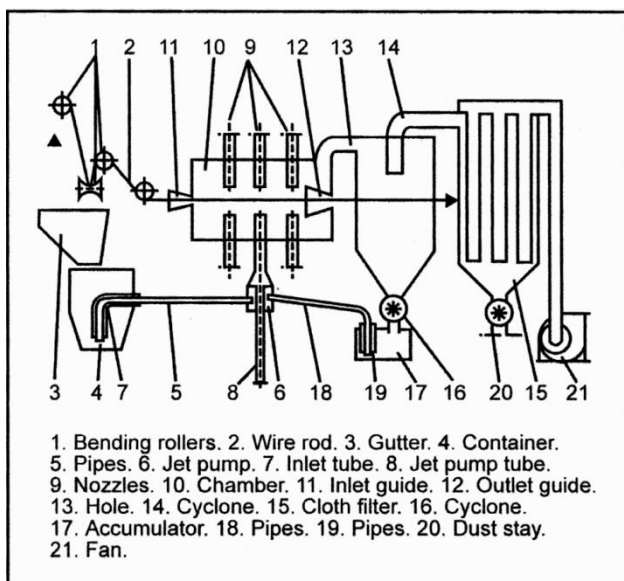
شکل ۲۷- سیستم پوسته گیری جت آب

پوسته گیری وزشی - پوسته گیری مکانیکی مفتول فولادهای کربنی با استفاده از پرتاب پوسته خشک را پوسته گیری وزشی می نامند. یک وسیله پوسته گیر وزشی قبل از دستگاه کشش نصب می گردد به طوری که پوسته گیری مکانیکی و کشش مفتول به صورت پیوسته کار می کنند. این روش پوسته گیری مکانیکی خشک مفتول ترکیبی از پوسته گیری خم معکوس و شات بلاست می باشد. ابتدا پوسته اکسید به وسیله خم کاری از سطح میلگرد جدا می گردد و پوسته های شکسته شده در جریان هوای فشرده با فشار سه اتمسفر شتاب داده می شوند و با سرعت ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر بر ثانیه جریان پیدا می کنند. جریان پوسته شتاب یافته مستقیماً به طور عمودی به سطح مفتول برخورد کرده و هرگونه باقی مانده پوسته را جدا می کند. این پوسته های اضافی سپس توسط هوای فشرده به مخزن غبارگیر رانده می شوند که در آنجا ذرات بزرگ تر باردیگر برای پرتاب به نازلها هدایت می گردند.

یک پوسته‌گیر وزشی (به شکل ۲۸ نگاه کنید) شامل چهار قسمت اصلی زیر می‌باشد:

یک سری غلطک خم معکوس برای بر طرف نمودن اولیه پوسته، ظرف جمع‌آوری پوسته‌های شکسته شده، سیستم سیلان با پمپ‌های جت و نازل‌های پرتاب و مخزن نهایی جمع‌آوری غبار. مفتولی که با این روش پوسته‌گیری شده باشد به نسبت مفتول شسته شده با HCL بسیار مناسب‌تر برای جذب روانکار خواهد بود. بنابراین با انتخاب روانکار مناسب، پوسته‌گیری وزشی قادر است دامنه وسیعی از مفتول کربنی با قطرهای متفاوت را بدون حامل روانکار آماده عملیات کشش نماید.

پوسته‌گیری وزشی مزایای زیادی دارد. اثرات تجهیزات بر روی مفتول کم است. نیازی به واسطه‌های پرتابی مانند ساچمه ندارد و فقط از پوسته‌های شکسته شده حاصل از خمش اولیه استفاده می‌کند. دوستدار محیط‌زیست است و سرمایه‌گذاری اولیه کمی نیاز دارد. ضایعات پوسته‌های ریز می‌تواند در تولید رنگ مورد استفاده قرار گیرد و این سیستم هزینه پوسته‌گیری میلگرد را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد.



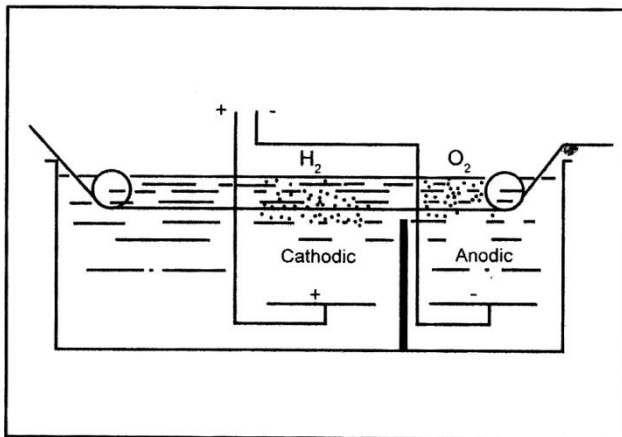
شکل ۲۸- دیاگرام شماتیک عملیات پوسته‌گیری وزشی

پرتاب برودتی

گوی‌های دی‌اکسیدکربن (یخ خشک) می‌توانند در پوسته‌گیری مکانیکی به کار گرفته شوند. پوسته اکسید وقتی مورد اصابت گوی‌ها قرار گیرد از سطح میلگرد جدا شده و یخ خشک تبدیل به گاز دی‌اکسیدکربن می‌گردد. در این سیستم واسطه پرتابی که خراب شود و از بین برود وجود ندارد. در حالی که پرتاب برودتی دو ایراد دارد - سطح صدای زیاد (۱۲۵ دسی‌بل) و هزینه بالا. نیتروژن مایع نیز ممکن است در پرتاب برودتی پوسته‌گیری فولاد کربنی مورد استفاده قرار گیرد.

تمیزکاری الکترولیت - اولتراسونیک

پوسته‌گیری الکترولیتی به طور موثر می‌تواند پوسته اکسید از سطح مفتول فولادی را زدوده و بسیاری از معایب معمول اسیدشویی را حذف نماید. یک سلول دو قطبی الکترولیتی حاوی اسیدسولفوریک به عنوان الکترولیت در شکل ۲۹ نشان داده شده است.



شکل ۲۹- یک سلول دو قطبی الکترولیتی

در قسمت اول سلول، الکتروود به قطب مثبت مولد برق (رکتیفایر) متصل شده است و مفتول عبوری کاتد می‌گردد و باعث می‌شود هیدروژن شدیدی از سطح مفتول برخیزد. عمل حباب‌های گاز هیدروژن سطح مفتول را تکان داده و باعث شکسته شدن پوسته اکسیدترد می‌گردد. در قسمت دوم سلول، الکتروود به قطب منفی متصل است و مفتول را آند می‌سازد و باعث ایجاد

حباب‌های اکسیژن در سطح مفتول می‌گردد که باقی‌مانده پوسته‌های شل شده را جدا می‌سازد. در اینجا وقتی مفتول آندی می‌شود مقدار کمی تجزیه آهن صورت می‌گیرد که باعث می‌شود در عملیات بعدی سطح مفتول جذب روانساز بیشتری داشته باشد. الکترولیت با اسیدسولفوریک بخارت مضرى که اسیدکلریدریک در عملیات معمولی اسیدشویی دارد را نخواهد داشت.

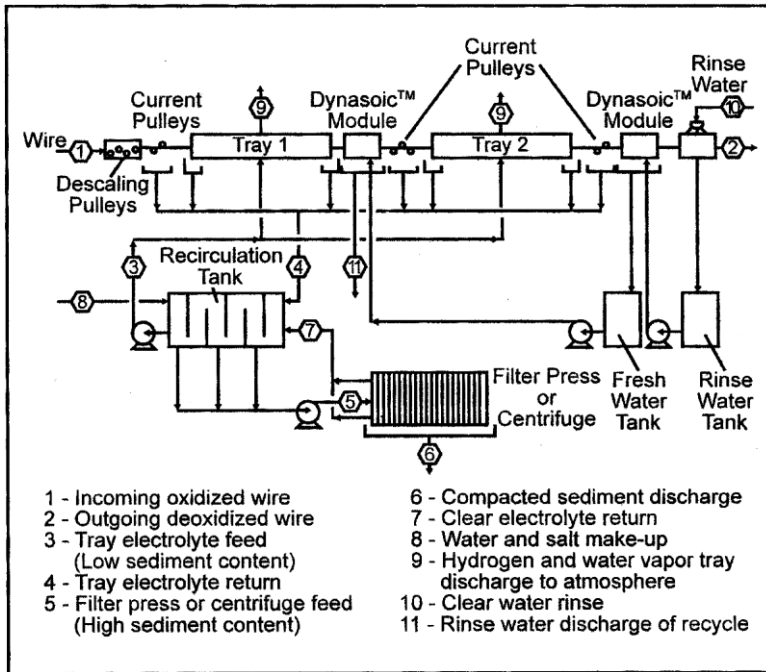
پوسته‌گیری الکترولیتی سازگار با محیط‌زیست و الکترولیت‌های خنثی مانند محلول‌های نمک (سدیم کلراید) زیان‌های بهداشتی و اثرات خوردگی بخارات اسیدی را ندارد ضمناً هزینه‌های پوسته‌گیری در این روش کمتر از هزینه‌های پوسته‌گیری به روش اسیدشویی خواهد شد. یک مولد برق جریان مستقیم جهت کنترل عملکرد الکترولیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. تنظیم فرکانس، ولتاژ پالس و مدت زمان پالس جریان الکترولیز، تجزیه آهن در زیر پوسته اکسید را کنترل می‌نماید. هیدروژن در کاتد و دور از سیستم تشکیل می‌گردد. پیوندهای ضعیف پوسته اکسید با استفاده از فرکانس‌های زیاد متمرکز شده و اولترا سوند ضعیف جدا می‌گردند.

یک سیستم تمیزکاری مداربسته الکترولیتی در شکل نشان داده شده است که شامل دو مرحله الکترولیز و دو مرحله عملیات اولترا سونیک و یک مرحله آب‌شویی می‌باشد.

عملیات پلاسما نیز جهت برطرف نمودن پوسته به صورت الکترولیتی از سطح میلگرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فرآیند، میلگرد در یک سلول الکترولیتی به عنوان کاتد متصل گردیده است. یک الکترولیت خنثی با پایه سدیمی (مانند کربنات سدیم) از آندی تحت ولتاژ DC بالا (مثلاً ۱۵۰ تا ۲۰۰ ولت) عبور کرده و به سطح میلگرد اسپری می‌گردد. حباب‌های ریز اکسیژن در لایه (پلازما) بین آند و کاتد (مفتول) شکل می‌گیرد. وقتی این حباب‌ها می‌ترکند، یک موج شوک قوی در مقابل مفتول باعث شکسته شدن پوسته از سطح مفتول می‌گردد.

تمیزکاری الکترولیتی یا الکتراسونیکی به تنهایی نمی‌تواند به اندازه کافی پوسته اکسید را از سطح مفتول جدا سازد. بنابراین یک ترکیب از انرژی فراصوتی و جریان الکترولیتی (۰/۵ تا ۲/۵ آمپر بر سانتی مترمربع) در یک الکترولیت خنثی یا نزدیک به خنثی ($\text{PH} = 3-10$) می‌تواند در چند ثانیه پوسته اکسید از سطح مفتولی را که کمی پوسته دارد تمیز کند. نه الکترولیز و نه فراصوت به تنهایی نمی‌توانند پوسته‌گیری قابل اندازه‌گیری داشته باشند، نشان داده شده است که الکترولیز

قادر است پوسته‌ها را ضعیف یا شل نماید و فراصوت قادر به جداسازی پوسته بعد از شل شدن توسط الکترولیز می‌باشد. بنابراین، تمیزکاری پیوسته نمی‌تواند به وسیله تمیزکاری الکترومکانیکی به تنهایی انجام شود. برخی انواع انرژی مکانیکی مورد نیاز می‌باشد.

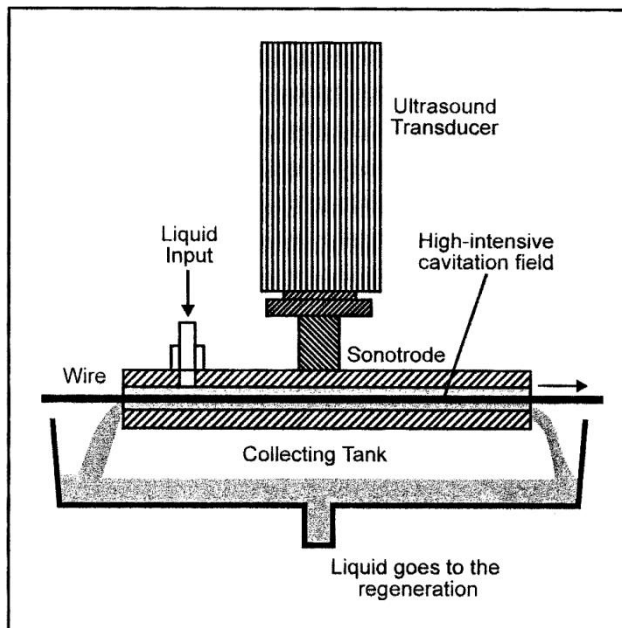


شکل ۳۰- سیستم تمیزکاری مدار بسته الکترولیت - اولتراسونیک

سنباده، برس یا فراصوت انرژی مکانیکی لازم برای بر طرف نمودن پوسته را ایجاد می‌نمایند. از طرفی فقط فراصوت است که فرسایشی در سطح قطعات ایجاد نمی‌نماید، تا نیاز به تعمیر و جایگزینی داشته باشند. فراصوت یک روش تمیزکاری بدون تماس و غیرمخرب می‌باشد که از امواج صوتی به عنوان یک وسیله برای دستیابی به حباب‌سازی در یک مایع استفاده می‌کند. حباب‌سازی، شکل‌گیری و انفجار داخلی کیسه‌های بخار است که نتیجه آن انتشار انرژی ذخیره شده به شکل آبی دمای بالای $20/000$ درجه فارنهایت و فشار $10/000$ پاند بر اینچ مربع می‌باشد. حباب‌سازی عمل سایش را به وجود می‌آورد که پوسته را شل و پراکنده می‌سازد. ترکیب انرژی اولتراسونیک (حباب‌سازی) با الکتروشیمی مناسب، پوسته‌گیری کارآمد را باعث می‌گردد.

حباب‌سازی در پوسته‌گیری اولتراسونیک براساس دو اصل زیر می‌باشد:

- حجم مایع در بر گیرنده مفتول حداقل می‌باشد. متناسب با تمرکز فراصوت در حداقل ممکن حجم مایع، تراکم بسیار زیاد فراصوت حاصل خواهد شد و بنابراین حباب‌سازی خیلی شدید به وجود می‌آید.
- مایع تمیزکننده به صورت پیوسته تا این حجم کم تغذیه می‌گردد. به این ترتیب ذرات کثیف جدا شده از مفتول به سرعت شسته شده و دفع می‌گردند و نمی‌توانند دوباره به سطح مفتول بچسبند. کارایی تمیزکاری اولتراسونیک بستگی دارد به تعداد انفجارهای حباب‌ها و تراکم بالاتر فراصوت و عملیات صوتی طولانی‌تر تمیزکاری بیشتر و کارآمدتری را به دنبال دارد. (به شکل ۳۱ نگاه کنید)



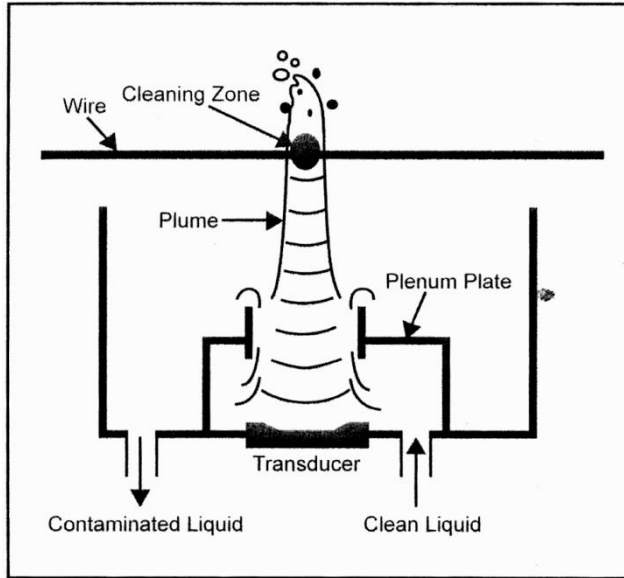
شکل ۳۱- قاعده تمیزکاری اولتراسونیک با شدت بالا

یک سیستم اولتراسونیک که مخصوصاً برای تمیز کردن مفتول طراحی شده باشد از یک اشعه متمرکز اولتراسونیک شدید با فرکانس بالا برای فراهم شدن تمیزکاری موثر، استفاده می‌نماید.

دامنه فرکانس استفاده شده بین ۵۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلوهرتز بوده و شدت در مرکز منطقه کانونی بیش از ۵۰۰ وات بر سانتی مترمربع است. شکل ۳۲ یک سیستم تمیزکاری اولتراسونیک با شدت بالا را نشان می‌دهد. مبدل تمرکز در ته وان نصب گردیده است که از بالا به وسیله فضایی که توسط لوله‌های کوچک ایجاد گردیده، پوشیده شده است و از طریق این فضا مایع تمیزکننده و انرژی اولتراسونیک به سمت مفتول در حال تمیز شدن هدایت می‌گردد. محلول تمیزکاری از ته وان تغذیه می‌گردد، از مبدل عبور می‌کند و از طریق یک لوله کوچک خارج می‌شود. محلول تمیز به وسیله صفحات جداکننده بالای مبدل از محلول آلوده جدا گردیده است.

وقتی مبدل دارای انرژی گردید (در مدار قرار گرفت) انرژی اولتراسونیک به ناحیه کوچکی در اطراف میلگرد که ناحیه تمیزکاری نامیده می‌شود، متمرکز می‌گردد و با فشار زیاد صوتی ایجاد شده یک فواره یا ستون صوتی در اطراف مفتول شکل می‌گیرد و مایع با فشار به سمت مفتول حرکت می‌نماید. در ناحیه تمیزکاری، شدت فراصوت خیلی زیاد است (بیشتر از ۵۰۰ وات بر سانتی مترمربع) به طوری که آستانه حباب‌سازی تا فرکانس ۱۰۰۰ کیلوهرتز تجاوز می‌کند. از این رو تعداد بیشماری حباب با قطرهای ۴ تا ۶ میکرون شکل می‌گیرد و در زیر یا روی پوسته سطح می‌ترکد. این فواره صوتی به پوسته‌زدایی کمک می‌نماید.

تمیزکاری اولتراسونیک برای برطرف نمودن دوده غبار پوسته ناشی از زنگ‌گیری مکانیکی سنگین و الکترولیز و غبار ناشی از انبارش برای مفتول‌هایی از قطر ۰/۵ تا ۶ میلیمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. ولی با انتخاب مبدل صوتی مناسب از نظر قطر و فرکانس می‌توان مفتول تا قطر ۱۵ میلیمتر را تمیز نمود. در بسیاری از کاربردها، تمیزکاری اولتراسونیک زمان عملیات را کاهش می‌دهد، سرعت فرآیند را زیاد می‌کند و آسیب‌های مکانیکی به سطح مفتول وارد نمی‌نماید. بعلاوه موادشیمیایی حذف گردیده و فرآیند بسیار کارآمد و قابل کنترل و سازگار با محیط‌زیست می‌باشد. این مزایا تضمین می‌کنند که تمیزکاری الکترولیتی - اولتراسونیکی یک مکمل بادوام اقتصادی نسبت به روش‌های سنتی پوسته‌گیری مکانیکی خواهد بود.



شکل ۳۲- سیستم تمیزکاری مدار بسته الکترولیت - اولتراسونیک

تغییر شکل در کشش سرد

تغییر شکل پلاستیکی

تغییر شکل پلاستیکی خاصیتی است که کشش مفتول را ممکن می‌سازد و به میزان زیادی پاسخگوی نیاز تکنولوژیکی و تجاری بشر به این صنعت است.

ظرفیت تحمل یک مفتول فولادی برای کاهش سطح مقطع زیاد بدون شکستن و همچنین حفظ مقاومت و دیگر خواص، صفات اولیه‌ای است که محصولات مفتول کشیده شده را قادر می‌سازد که در هر جای جامعه حاضر باشند. اگر چه عملیات اصلی از زمانی که برای اولین بار دوزه‌های کشش در رومن امپایر مورد استفاده قرار گرفتند، تغییر کوچکی کرده است ولی کشش مفتول از شروع تاکنون متحول گردیده و به صورت یک تکنولوژی تجربی قوی که پایه محکم علوم گردیده، در آمده است.

گسترش تحقیقات فهم اساس فرآیند تغییر شکل را بالا برده است و در نتیجه این بصیرت، بسیاری از اصلاحات تکنولوژیکی در کشش مفتول در چند دهه گذشته صورت گرفته که خیلی از آنها اکنون بدیهی دانسته می‌شوند.

تئوری‌های تغییر شکل پلاستیکی

به دلیل اینکه کشش مفتول اساساً کاهش سطح مقطع را به دنبال دارد و در برخی موارد هندسه مواد را تغییر می‌دهد، فهم فرآیند فیزیکی اولیه که باعث تغییر شکل یا فرم می‌شود بسیار مهم است. این فهم نه تنها برای تعیین حد تغییر شکل و احتیاجات پروسه کشش بلکه برای کنترل این تغییر شکل و خواص مکانیکی و کیفیت سطح نیز بسیار مهم است.

نظریه تاریخی

با اینکه صدها سال از شناخت انسان از تغییر شکل فلزات می‌گذرد ولی تا اواسط قرن بیستم هیچ پیشرفت واقعی برای فهم این پدیده صورت نگرفته بود. کوشش‌های فراوانی برای توضیح

چگونگی تغییر شکل فلزات وجود داشته است. برخی تئوری‌های بسیار جالب توجه که در گذشته نمایان شدند عبارت بودند از تئوری چسب بی‌شکل و تئوری فصل مشترک لغزشی.

تئوری چسب بی‌شکل که به وسیله **Rosenhim, Beilby** و دیگران ارائه شد، اظهار می‌دارد که یک قشر نازک از اتم‌های بی‌شکل یا بی‌نظم بین دانه‌ها یا کریستال‌های منفرد فلز وجود دارند. استدلال می‌شد که این لایه بی‌شکل خواصی دارد شبیه یک فلز مایع که نقطه انجماد بسیار پایینی دارد و اجازه می‌دهد که شبیه یک ماده ویسکوز روان باشد.

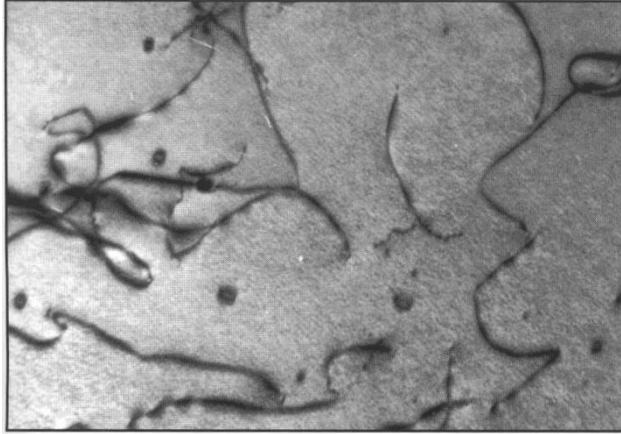
در حالی که ممکن بود این نظریه تابعیت تغییر شکل به دما را توضیح دهد ولی جوابگوی علت افزایش حجم که در اغلب فلزات در دمای اتاق روی می‌دهد، نبود. این کاستی با مطالعات پرتونگاری اشعه ایکس که آشکار ساخت فلزات دارای ساختمان کریستالی هستند موجب ظهور تئوری فصل مشترک لغزشی شد.

تئوری فصل مشترک لغزشی اظهار می‌دارد که دانه‌های منفرد در هنگام تغییر شکل قطعات کریستالی تولید می‌کنند و افزایش حجم متناسب با حجم این قطعات می‌باشد. تا موقعی که این قطعات با دانه‌های مجاور در یک صف قرار نگرفته‌اند به صورت گوه‌های میکروسکوپی که تحرک ماده در جهات معین را محدود می‌کند، عمل می‌نمایند. سخت گرداندن در اثر تغییر شکل با این ایده توضیح داده می‌شد که افزایش سطوح تغییر شکل باعث تشکیل حجم زیادی از قطعات می‌شود که از دانه‌های موجود جدا شده‌اند و موجب افزایش مقاومت ماده می‌گردند. یک ایده نقل شده این بود که وقتی کریستالی به چند قطعه خرد می‌شود در آن مکان که این تغییر صورت می‌گیرد بهم ریختگی جزئی بین بلوک‌های مجاور مانعی برای تغییر شکل به وجود می‌آورد. (ادامه تغییر شکل مشکل‌تر می‌شود به عبارتی سخت شدن در اثر تغییر شکل این‌گونه حاصل می‌شود - مترجم) به هر حال تئوری فصل مشترک لغزشی به‌طور رضایت‌بخشی جوابگوی مشاهدات متالوگرافیکی عملیات آنیل‌کاری نبود.

هر دو این تئوری‌های تاکنون رد شده‌اند و نظریه پذیرفته شده توسط دانشمندان مواد و فلزشناسان مبتنی بر تئوری نابه‌جایی می‌باشد که ابتدا توسط **Taylor** و **Orowan** ارائه شد و توسط **Read** و **Frank** و دیگران در دهه ۱۹۵۰ پیشرفت مهمی کرد.

تئوری مدرن نابه‌جایی

جزئیات اطلاعات در مورد تئوری نابه‌جایی در کتاب‌های جدید علوم مواد و مهندسی مواد موجود می‌باشد. در اینجا یک نظریه وجود دارد که به‌طور خلاصه چگونگی رفتار تغییر شکل در کشش سرد و اثر آن بر خواص مواد را شرح می‌دهد. (به شکل ۱ نگاه کنید)



شکل ۱- عکس نابه‌جایی‌ها که به وسیله دستگاه (TEM) گرفته شده است.

بزرگ‌نمایی: $\times 60000$

ساختمان کریستالی فلزات

گرچه با چشم معمولی یک مفتول فولادی ممکن است به صورت یک تکه پیوسته و همگن از ماده به نظر برسد ولی در حقیقت ترکیبی است از ذرات میکروسکوپی زیادی که دانه نامیده می‌شوند. دانه‌ها را به راحتی بر روی یک نمونه با میکروسکپ متالوگرافی می‌توان دید. هر دانه از واحدهای کوچک‌تر یا بلوک‌هایی که نمایانگر ترتیب خاص اتمی است تشکیل شده که در سه بعد قرار گرفته‌اند و به وسیله مرزهای دانه حد و مرزشان مشخص می‌شود. به استثناء سایز، تنها تشخیص شکل و ترکیب دانه‌ها از یکدیگر تعیین موقعیت آنها است. براساس پرتونگاری اشعه ایکس چهارده ترتیب مجزا اتمی تشخیص داده شده است و فقط سه ساختمان اساسی مهم در فلزات کشیده شده تجاری وجود دارد. آنها عبارتند از FCC و BCC و HCP. علاوه بر تفاوت‌های

ترتیب ساختمانی اتم‌ها دیگر تفاوت مهم که تأثیر اساسی در رفتار تغییر شکل فلزات دارد، فشردگی دانسیته و فضای بین اتمی در صفحات و جهات مختلف است.

در بحث عمومی اغلب مواد تغییر شکل‌پذیر یا دارای قابلیت تغییر شکل مانند مس و آلومینیوم دارای ساختمان FCC هستند و تنگستن و مواد آهنی مانند فولاد که کاملاً شکل‌پذیر نیستند دارای ساختمان BCC و مواد حداقل شکل‌پذیر دارای ساختمان HCP هستند مانند تیتانیوم و منیزیم و برلییم. این نکته را می‌بایست متذکر شد که برخی مواد مانند فولاد، آلوتروپیک هستند یعنی دارای گوناگونی ساختمان کریستالی می‌باشند و قادرند به شکل‌های BCC یا FCC بنابه فرآیند تولیدشان ظاهر شوند.

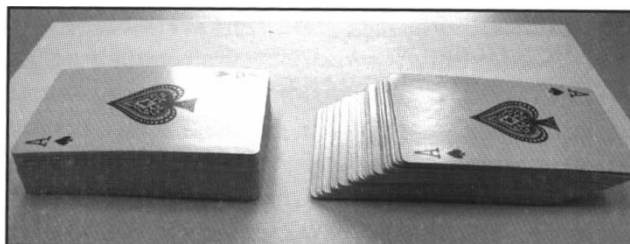
لغزش صفحات و تغییر شکل

گرچه فلزات می‌توانند در اثر کشش، فشار یا برش تغییر شکل بدهند ولی در واقع تغییر شکل در سطح اتمی به وسیله یک فرآیند برش که لغزش نام دارد رخ می‌دهد. یک شباهت خوب که فرآیند لغزش را نشان می‌دهد، در شکل ۲ به وسیله لغزش کارت‌های بازی نشان داده شده است که حرکت هر یک از کارت‌ها نشان‌دهنده لغزش یک صفحه اتمی است. یک مشخصه فرآیند تغییر شکل این است که حجم همواره ثابت می‌ماند هر چند که شکل تغییر می‌کند. بنابراین برای یک تغییر شکل در ماده، ترکیب مجدد اتمی در موقع تغییر شکل روی می‌دهد وقتی لایه‌های اتم‌ها یکی روی دیگری لغزش پیدا می‌کنند، تا با شکل جدید منطبق شوند. (به شکل ۳ نگاه کنید)

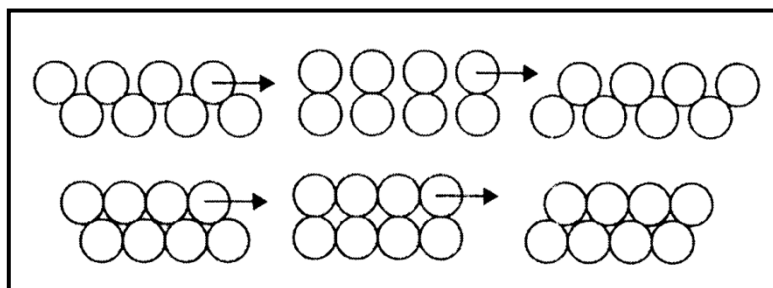
اگر چه به نظر می‌رسد که این پدیده به‌طور یکنواخت و همزمان در قطعه کار روی می‌دهد ولی در حقیقت در صفحات دلخواه به‌طور یکنواخت اتفاق نمی‌افتد. اگر تمام صفحات به‌طور یکنواخت و همزمان لغزش پیدا کنند، باید نیروی بیشتری نسبت به آنچه در واقع اندازه‌گیری می‌شود اعمال گردد.

عکس برداری کریستالی نشان داده است که دو صفحه اتمی که دارای فضای خالی بین اتمی کم یا متراکم هستند نسبت به دو صفحه‌ای که دارای فضای خالی بین اتمی زیاد یا کم تراکم هستند، بهتر لغزش می‌کنند. همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است. بنابراین در فلزات تغییر شکل مختص به جهات کریستالی است که تراکم بیشتری دارند اگر چه لغزش در دیگر صفحات

کم تراکم در شرایط اختصاصی نیز ممکن است روی دهد، شکست وقتی اتفاق می افتد که تعداد کمی از صفحات لغزش قادر به انطباق خود با بار اعمال شده باشند. بنابراین بین صفحات اتمی شکاف رخ می دهد.



شکل ۲- مکانیزم لغزش تغییر شکل پلاستیکی نشان داده شده توسط کارت های بازی



شکل ۳- فرآیند لغزش در سطح اتمی نشان داده شده به وسیله عبور گوی ها از روی یکدیگر

بر اساس تئوری نابه جایی امکان توضیح تفاوت های مشاهده شده بین خاصیت شکل پذیری و نیروی کشش وجود دارد. فلزات FCC از قبیل آلومینیوم و مس دارای تراکم زیاد بین صفحات / جهات هستند. این تراکم اجازه می دهد وقتی لغزش در جهت اصلی با مانعی روبرو می شود با تغییر کوچکی در نیرو، لغزش در مسیر صفحات / جهات متراکم متناوب روی دهد، در مواردی از قبیل فولاد که ساختمان BCC دارند، تراکم صفحات و جهات کمتری وجود دارد و وقتی در جهت اولیه تغییر شکل مانعی به وجود آمد، اغلب می بایست این تغییر شکل در صفحه / جهتی با تراکم کم ادامه یابد که اساساً لازمه آن اعمال نیروی بیشتری می باشد.

مقاومت نظری (تئوریک)

وقتی که دانشمندان مواد ساختمانی فلزات را پذیرفتند **frenkel** و دیگران مبادرت به محاسبه نظری نیروی لازم برای تغییر شکل ورزیدند. به سرعت کشف گردید که نیرویی که هنگام تست مکانیکی مشاهده می شود از حیث بزرگی چندین مرحله از نیروی پیش بینی شده تئوریک پایین تر است.

مقاومت برشی تئوریک نمایانگر نیروی لازم برای نابه جایی یک صفحه اتمی نسبت به دیگری است. (به شکل ۳ نگاه کنید)

بر مبنای رفتار اساسی اتمی، مقاومت برشی تئوریک t_c می تواند به روش زیر به دست آید.

معادله (۱)

$$t_c = \frac{b}{a} \times \frac{G}{2\pi}$$

که a فاصله بین ردیف های اتم ها در جهت عمود بر لغزش، b فاصله بین هر یک از اتم ها و G مدول برش می باشد. وقتی که a و b تقریباً مساوی باشند معادله (۱) تنش برشی معادل $\frac{G}{2\pi}$ را می دهد یا به عبارتی تنش تقریباً معادل دو میلیون پاند بر اینچ مربع ($10^4 \times 13/8$ Mpa) است. در حالی که در مقایسه با مقداری که توسط تست کشش فولادهای کشیده شده تجاری به دست می آید. به شکل غیر منتظره ای زیاد به نظر می رسد.

بنابراین معادله (۱) حقیقتاً مقدار واقعی را ارائه نمی دهد، اختلاف بین مقدار واقعی و نظری در نتیجه پیدایش نواقص ذاتی شبکه کریستالی مواد است که مشخصاً عیوب نامیده می شود. عیوب در فلزات شامل نابجایی ها، حفره ها و درزها می باشد که در رابطه با تغییر شکل پلاستیکی نابجایی حائز اهمیت است.

مکانیزم مقاومت‌سازی و نابه‌جایی

درحالی که نابه‌جایی‌ها مانع دستیابی به مقاومت تنوریکی در فلزات می‌شوند، برعکس آنها عامل بالا رفتن مقاومت در موقع تغییر در دمای اتاق می‌شوند. رفتار و عملکرد آنها همچنین در دماهای بالا خواص مکانیکی به دست آمده بعد از آنیل‌کاری را کنترل می‌نماید.

اکثر روش‌های بهبود مقاومت در فلزات ذاتاً شامل جلوگیری از فرآیند لغزش است به طوری که بیشتر از بخش ذاتاً مقاوم کریستال استفاده می‌شود و این به وسیله کاهش تحرک نابه‌جایی با یک یا چند روش به دست می‌آید.

دانسیتته نابه‌جایی - تعداد نابه‌جایی‌ها در یک ماده ثابت نیست و در واقع با تغییر شکل ماده می‌تواند افزایش یا چند برابر شود. کاربرد انرژی حرارتی می‌تواند یک اثر معکوس داشته باشد. با حرارت تعداد نابه‌جایی‌ها کاهش یافته و یا از بین می‌روند. دانسیته نابه‌جایی در فلزات آنیل شده به طور نمونه حدود 10^6 تا 10^8 در یک سانتی‌متر مربع می‌باشد درحالی که دانسیته نابه‌جایی در فلزاتی که کار سرد سنگین بر روی آنها انجام شده بسیار بیشتر می‌باشد. به دلیل اینکه فلزاتی که کار شدید بر روی آنها انجام شده قوی‌تر از فلزات آنیل شده هستند این نتیجه را می‌توان گرفت که مقاومت نسبت مستقیم با دانسیته نابه‌جایی دارد. به علاوه وقتی یک تنش اعمال می‌شود در جاهای مشخص می‌تواند نابه‌جایی تولید شود. به محض اینکه تعداد نابه‌جایی‌ها در هنگام لغزش افزایش می‌یابد، آنها شروع به کند کردن تحرک نابه‌جایی‌های مجاور می‌کنند، در مقیاس بزرگتر مانند همان کاری است که اتومبیل‌ها در یک تراکم ترافیک انجام می‌دهند.

کاهش تحرک نابه‌جایی در ارتباط با افزایش نیروی مورد نیاز برای لغزش به حساب این واقعیت گذاشته می‌شود که اغلب فلزات بعد از تغییر شکل یافتن در دمای اتاق کار سخت یا قوی‌تر می‌شوند. آنیل کردن اثر معکوسی دارد به طوری که باعث کاهش دانسیته نابه‌جایی و نتیجتاً افت مقاومت می‌شود.

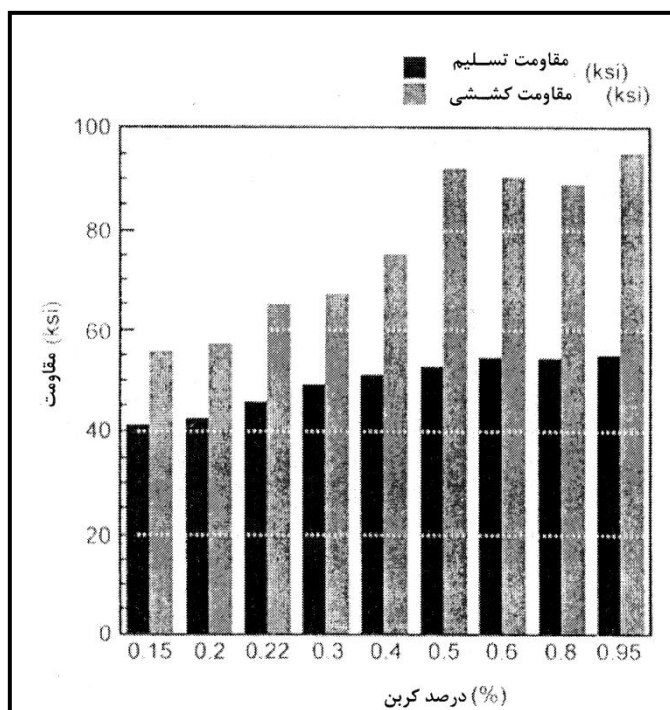
اثر آلیاژی - حضور اجزاء آلیاژ می‌تواند بر تحرک نابه‌جایی و به تبع آن مقاومت ماده و به علاوه بر کار سختی تأثیر داشته باشد. به دلیل عدم وجود دو فضای اتمی یکسان، حضور اجزاء آلیاژ ترتیب کریستالی متناوب را مختل می‌نماید. وقتی که اکثر اتم‌ها در شبکه از نظر اندازه در موقعیت

ثابتی قرار گرفتند، فضاهاى بين اتمى به حدى كوچك هستند كه بين دو اتم مجاور در ماتريس (قالب) كريستالى قرار مى گيرند و درجه اى از تحرك را دارند كه با درجه حرارت شتاب مى گيرد. نيترژن و در مقياس كمتر، كربن كه معمولاً يك ناخالصى در ميلگرد و مفتول فولادى به حساب مى آيند، ترجيحاً تمايل به نقل مكان به نابه جايى ها در زمينه آهن را دارند و در آنجا باعث قفل كردن نابه جايى ها مى شوند. نقطه تسليم و پديده پيرسازى کرنشى مثال هاى هستند براى چگونگى تأثير اين دو بر خواص مكانيكى فولادهائى كرنى. پيرسازى کرنشى در كشش مفتول زيان آور است به طورى كه نه تنها باعث افزايش نيروى كشش مورد نياز مى شود بلكه کاهش سطح مقطعى كه مى تواند رخ دهد را نيز تقليل مى دهد، در عوض كمى مفيد بوده و آن افزايش يافتن مقاومت كششى مى باشد. (پيرسازى کرنشى به معنى تغيير خواص مكانيكى و افزايش خود به خودى سختى فلزات بر اثر كهنه شدن ناشى از تغيير شكل مومسان به مرور زمان، در حرارت متعارفى يا گرمائى بيشتر است - مترجم)

پيرسازى کرنشى به طور نمونه پس از گذشت چندين روز در دماى اتاق (دماى معمولى معادل ۲۵ درجه) رخ مى دهد ولى مى تواند در ساعات كمترى نيز روى دهد مانند وقتى كه مفتول در دماى ۱۴۹ تا ۲۰۴ درجه سانتى گراد حرارت ببيند و يا وقتى كه يك كلاف در زير چادر تيره در هواى گرم نگهدارى شود. پيرسازى کرنشى در مفتول فولادى را مى توان به وسيله کاهش حجم نيترژن يا به وسيله از بين بردن نيترژن با افزودن آلومينيوم، واناديوم، تيتانيوم، كبالت يا بُر در فولاد مذاب، به حداقل رساند.

يك راه دوم كه آلياژ در رفتار نابه جايى تأثير مى گذارد وقتى است كه اتم هاى كوچك يا بزرگتر از معمول حل شده در زمينه (ماتريس) آهن وجود داشته باشند. اختلاف سايز در يك واپيچش موضعى وقتى به وجود مى آيد كه در ترتيب كريستالى اتم هاى حل شده قرار دارند و باعث سختى ماتريس كريستالى مى شوند و در نتيجه نيروى لازم براى تغيير شكل افزايش مى يابد. در فولاد اولين جزء آلياژ كه مقاومت را كنترل مى كند كربن است. ظرفيت هاى بالايى كربن مقاومت تسليم و مقاومت كششى را افزايش مى دهد. (به شكل ۴ نگاه كنيد)

اندازه دانه - به خوبی مشخص گردیده فلزاتی که دانه‌های کوچک‌تری دارند قوی‌تر، سخت‌تر و دارای خاصیت ضربه‌پذیری بهتری نسبت به ماده مشابه با دانه‌های درشت‌تر هستند. دلیل آن این است که مرزهای دانه در فرآیند لغزش مانند سد عمل می‌کنند. از حرکت آسان ناب‌جایی در امتداد صفحه اتمی به‌طور مؤثری در مرز دانه جلوگیری به عمل می‌آید که مربوط به ناجفتی یا جابه‌جا شدگی اتمی موجود در آنجاست. برای ادامه تغییر شکل بدون شکست، سایر جهات کریستالی نیز باید به کار گرفته شوند که نیاز به نیروی بیشتر یا انرژی حرارتی برای ادامه لغزش خواهد بود. اندازه دانه همچنین در میزان کار سختی مؤثر می‌باشد زیرا مواد دانه ریز خیلی سریع‌تر از مواد دانه درشت کار سخت می‌شوند.



شکل ۴- نسبت بین درصد کربن و مقاومت فولاد

دما و اثرات حرارتی - حرارت دادن یک ماده تغییر شکل را آسان می‌کند و خاصیت شکل‌پذیری آن را افزایش می‌دهد و این مربوط به اثر انرژی حرارتی بر رفتار ناب‌جایی می‌باشد. چنانچه به یک

مفتول حرارت داده شود، سفتی شبکه کریستالی آن کاهش می یابد و لغزش ثانویه صفحات/جهات امکان پذیر می گردد. پاسخ مفتول متناسب با میزان انرژی حرارتی موجود، متأثر از یکی از این دو راه است.

اول: در دمای به اندازه کافی زیاد، تعداد نابه جایی های موجود کاهش می یابد و همان گونه که قبلاً توضیح داده شد، مقاومت متناسب به دانسیته نابه جایی می باشد بنابراین حرارت دادن یک کلاف میلگرد، نرم شدن به همراه کاهش تنش تسلیم و تنش کشش مربوط به تعداد نابه جایی ها را به دنبال دارد.

دوم: وقتی حرارت بیشتر از ۵۰٪ نقطه ذوب باشد، نه تنها نابه جایی ها نابود می شوند بلکه در آن فرآیند ساختمان میکروسکوپی شکل کریستالی جدیدی پیدا می کند.

اندازه گیری کار سرد کشش مفتول

در کشش مفتول تعیین مقدار تغییر شکل صورت گرفته در مراحل جداگانه کشش و کل تغییر شکل عملیات کشش یک اصل می باشد. برقراری یک عملیات مطمئن با حداقل زیان و جلوگیری از برش یک ضرورت می باشد. گرچه تخصیص اعتدال معمولاً برای نشان دادن درجه کار سرد در مفتول به کار گرفته می شود ولی این نمی تواند اطلاعات کافی و اندازه گیری مفصل که برای تجزیه و تحلیل فرآیند و طراحی کار لازم است، ارائه دهد.

کاهش سطح مقطع

نیروی کشش تابع میزان تغییر شکل صورت گرفته در مفتول می باشد. مقدار تغییر شکل ممکن است به وسیله تغییر سایز در هنگام کشش اندازه گیری شود. روش خیلی معمول برای تعیین مقدار تغییر شکل براساس تغییر قطر و کاهش سطح مقطع (r) می باشد که به صورت زیر تعریف می گردد.

معادله (۲)

$$r = \frac{A_1 - A_2}{A_1} = 1 - \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

که A_1 و A_2 سطح مقطع مفتول ورودی و خروجی و d_1 و d_2 قطرهای مفتول ورودی و خروجی هستند. غالباً کاهش سطح مقطع در عدد ۱۰۰ ضرب می‌شود و به صورت درصد کاهش سطح مقطع تعریف می‌گردد ($\%r$) باید توجه داشت که موقع محاسبه کاهش سطح مقطع نکات زیر می‌بایست به کار گرفته شوند.

- کاهش سطح مقطع در عملیات کشش چند مرحله‌ای جمع شونده نمی‌باشند. وقتی n مرحله کشش پشت سرهم وجود دارد کاهش سطح مقطع کل عملیات (r_f) برابر جمع کاهش‌های سطح مقطع صورت گرفته در هر مرحله ($r_1 + r_2 + \dots + r_n$) نمی‌باشد. (به جدول ۱ نگاه کنید)
 - کاهش سطح مقطع همیشه مثبت است و هرگز منفی نمی‌شود.
 - کاهش سطح مقطع هرگز نمی‌تواند به ۱۰۰٪ برسد.
 - اثر کاهش سطح مقطع در کار سرد جمع شونده می‌باشد. اثر کاهش‌های متوالی در افزایش مقاومت کششی و تسلیم هر مرحله کشش عمل می‌کند. (به شکل ۵ نگاه کنید)
- فرم مفید دیگر معادله ۲ برای محاسبه قطر وقتی که درصد کاهش سطح مقطع و یکی از قطرهای مشخص باشند در زیر آمده است.

معادله (۳)

$$d_f = \frac{d_i}{10} \sqrt{100 - \%r}$$

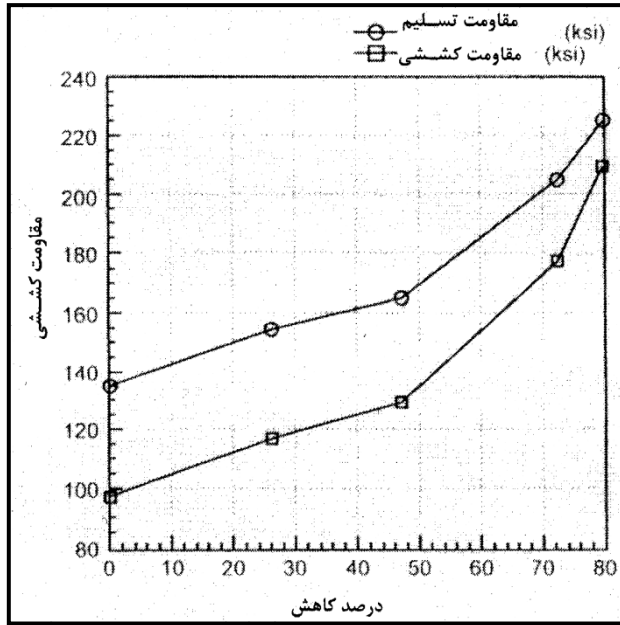
معادله (۴)

$$d_i = \frac{10d_f}{\sqrt{100 - \%r}}$$

Pass 1	Pass 2	Pass 3	Pass 4	Pass 5	Pass 6	Pass 7
10	19	27	34	41	47	52
11	21	30	37	44	50	56
12	23	32	40	47	54	59
13	24	34	43	50	57	62
14	26	36	45	53	60	65
15	28	39	48	56	62	68
16	29	41	50	58	65	70
17	31	43	53	61	67	73
18	33	45	55	63	70	75
19	34	47	57	65	72	77
20	36	49	59	67	74	79
21	38	51	61	69	76	81
22	39	53	63	71	77	82
23	41	54	65	73	79	84
24	42	56	67	75	81	85
25	44	58	68	76	82	87
26	45	59	70	78	84	88
27	47	61	72	79	85	89
28	48	63	73	81	86	90
29	50	64	75	82	87.2	90.9
30	51	66	76	83	88.2	91.8
31	52	67	77	84	89.2	92.6
32	54	69	79	85	90.1	93.3
33	55	70	80	86	91.0	93.9
34	56	71	81	87	91.7	94.5
35	58	73	82	88	92.5	95.1
36	59	74	83	89	93.1	95.6
37	60	75	84	90	93.7	96.1
38	62	76	85	91	94.3	96.5
39	63	77	86	92	94.8	96.9
40	64	78	87	92	95.3	97.2

جدول ۱- جمع درصد کاهش سطح مقطع بعد از هر مرحله کشش وقتی که

کاهش صورت گرفته در تمام مراحل کشش یکسان باشند



شکل ۵ - اثر کاهش سطح مقطع بر مقاومت کششی و تنش تسلیم در مفتول فولادی

۰/۹٪ کرن ۰ مقاومت‌ها برحسب KSI می‌باشد.

غالباً مطلوب این است که کشش چند مرحله‌ای طوری طراحی گردد که کاهش سطح مقطع در همه مراحل کشش با هم برابر باشند. اگر n نشان دهنده تعداد مراحل کشش (طبله‌ها) مورد استفاده باشد و d_i و d_f به ترتیب نشان‌دهنده قطر مفتول ورودی و خروجی نهایی باشند، درصد کاهش سطح مقطع که می‌بایست در هر مرحله (طبله) صورت گیرد، می‌تواند با فرمول زیر محاسبه گردد:

معادله (۵)

$$\%r = 100 \left[1 - \left(\frac{d_f}{d_i} \right)^{\frac{2}{n}} \right]$$

تغییر بعد نسبی (گرنش)

یک اندازه‌گیری متناوب تغییر شکل که غالباً در کشش مفتول مورد استفاده قرار می‌گیرد تغییر بعد نسبی است. تغییر بعد نسبی می‌تواند به صورت تغییر طول تقسیم بر طول اولیه تعریف گردد. گرچه فرم‌های مفیدتر که بر مبنای قطر و مساحت سطح مقطع هستند معمولاً در محاسبات تغییر بعد نسبی به کار گرفته می‌شوند.

تغییر بعد نسبی ظاهری

شاید یکی از تعاریف بسیار مورد استفاده تغییر بعد نسبی، تغییر بعد نسبی ظاهری باشد که با حرف e به صورت زیر تعریف می‌گردد.

معادله (۶)

$$e = \frac{A_i - A_f}{A_f} = \frac{A_i}{A_f} - 1 = \frac{d_2^2}{d_1^2} - 1$$

که A_i و A_f سطح مقطع‌های ورودی و پایانی هستند. به دلیل این که تغییر بعد نسبی ظاهری تقسیم دو مساحت بر یکدیگر می‌باشد. بنابراین کمیت بدون واحد می‌باشد اگر چه معمولاً به صورت اینچ بر اینچ یا میلیمتر بر میلیمتر نشان داده می‌شود. معادله ۶ را اغلب در ۱۰۰ ضرب می‌کنند و به صورت درصد تعریف می‌گردد.

گرچه تغییر بعد نسبی ظاهری به‌طور وسیعی در طراحی محصول و فرم‌دهی صفحات فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی به ندرت در کشش مفتول به کار گرفته می‌شود. یک مشکل جدی می‌تواند در هنگام به‌کارگیری تغییر بعد نسبی ظاهری در محاسبات کشش مفتول رخ دهد اگر جمع تغییر بعد با جمع کاهش در مراحل مختلف محاسبه گردد آنگاه نتیجه به تعداد مراحل کاهش صورت گرفته بستگی خواهد داشت. برای مثال جدول ۲ نشان‌دهنده جمع تغییر بعد نسبی ظاهری برای مفتولی است که با دو مرحله کشش از قطر ۵/۵ میلیمتر به ۴/۲۰ میلیمتر کشیده شده است. اگر در دو مرحله کشش به یک اندازه کاهش قطر صورت گرفته باشد جمع تغییر بعد نسبی

ظاهری ۰/۶۲ یا ۰/۶۲٪ خواهد شد در صورتی که اگر همین کاهش در سه مرحله مساوی صورت گیرد جمع تغییر بعد ۰/۵۹ یا ۰/۵۹٪ می شود. این دو مقدار یکی نبوده و می تواند موجب یک اشتباه کاری شود. همچنین این مقدار اگر براساس قطر مفتول ورودی و خروجی محاسبه گردد عدد ۰/۷۱٪ به دست می آید که با هیچ یک از این مقادیر مطابقت نمی کند به این دلیل یک اندازه گیری تغییر بعد نسبی که تغییر بعد نسبی واقعی نامیده می شود برای محاسبات کشش مفتول ترجیح داده می شود.

	۲ مرحله کشش قطر	ترتیب تغییر بعد نسبی هر مرحله	۳ مرحله کشش قطر	ترتیب تغییر بعد نسبی هر مرحله
	۵/۵		۵/۵	
کشش اول	۴/۸۵	۰/۲۹	۵/۰۷	۰/۱۸
کشش دوم	۴/۲۰	۰/۳۳	۴/۶۳	۰/۲۰
کشش سوم			۴/۲	۰/۲۱
جمع تغییر بعد نسبی		۰/۶۲		۰/۵۹

جدول ۲- کل تغییر بعد نسبی ظاهری برای دو عملیات کشش

تغییر بعد نسبی واقعی

برای اجتناب از مشکلات ناشی از به کارگیری تغییر بعد نسبی ظاهری در کشش یک اندازه گیری مبنا - لگاریتمی به نام تغییر بعد نسبی واقعی به کار گرفته می شود و به این دلیل واقعی گفته می شود که یک اندازه واقعی و دقیق و مستقل از تعداد مراحل کشش ارائه می کند. جهت تمایز آن با تغییر بعد نسبی ظاهری با حرف E (اپسیلن) نمایش داده می شود و به صورت لگاریتم طبیعی نسبت طول نهایی (L_f) به طول اولیه (L_i) به شکل زیر تعریف می گردد.

معادله (۷)

$$\epsilon = L_n \frac{L_f}{L_i}$$

واحد آن مانند تغییر بعد نسبی ظاهری می باشد. از آنجایی که حجم مفتول در زمان تغییر شکل ثابت می باشد این امکان وجود دارد که تعریف بالا به صورت مفیدتر برای محاسبات کشش و بر مبنای قطر مفتول ورودی و خروجی تبدیل شود مانند معادله ۸a

معادله (۸a)

$$\epsilon = 2L_n \frac{d_i}{d_f}$$

سپس می توان آن را به لگاریتم مبنای ۱۰ تبدیل نمود.

معادله (۸b)

$$\epsilon = 4/606 \text{Log} \left(\frac{d_i}{d_f} \right)$$

برای محاسبه کل کاهش به وسیله تغییر بعد نسبی واقعی در عملیات کشش چند مرحله ای مهم نیست که این کاهش با چند مرحله کشش انجام شده باشد. زیرا در هر صورت جمع تغییر بعد نسبی واقعی یکسان می باشد. با استفاده از همان مثال جدول ۲، جدول ۳ نشان می دهد که نتیجه برای هر دو عملیات کشش یکی خواهد بود.

	۲ مرحله کشش قطر	ترتیب تغییر بعد نسبی هر مرحله	۳ مرحله کشش قطر	ترتیب تغییر بعد نسبی هر مرحله
	۵/۵		۵/۵	
کشش اول	۴/۸۵	۰/۲۵	۵/۰۷	۰/۱۶
کشش دوم	۴/۲۰	۰/۲۹	۴/۶۳	۰/۱۸
کشش سوم			۴/۲۰	۰/۱۹
جمع تغییر بعد نسبی		۰/۵۴		۰/۵۴

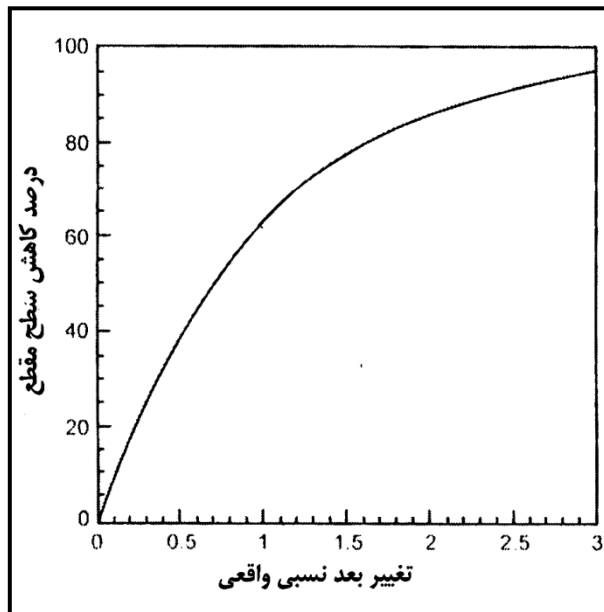
جدول ۳ - جمع تغییر بعد نسبی واقعی برای دو عملیات کشش

معادله ۹ رابطه بین تغییر بعد نسبی واقعی و درصد کاهش سطح مقطع می‌باشد.

معادله (۹)

$$\epsilon = L_n \left(\frac{100}{100-r} \right)$$

این رابطه در شکل ۶ نشان داده شده است.



تنش

علاوه بر محاسبه مقدار تغییر شکل (تغییر بعد نسبی) ضروری است مقاومت ماده در برابر تغییر شکل که آن را تنش می‌نامند نیز تعریف گردد. مقادیر اصلی تنش مانند تنش تسلیم و تنش کششی وابسته به پارامترهای مفتول هستند ولی با میزان تغییر شکل صورت گرفته در دوزه کشش نیز تغییر می‌کند.

تنش ظاهری - تنش ظاهری به‌طور ساده به صورت تقسیم نیرو (F) بر مساحت سطح مقطع اولیه (A_0) تعریف می‌گردد و در معادله ۱۰ نشان داده شده است. جهت جلوگیری از اشتباه شدن با

تنش واقعی (که در بخش بعدی می‌آید)، تنش ظاهری با حرف S نشان داده می‌شود و واحد آن پاند بر اینچ مربع (psi) یا مگا پاسکال می‌باشد (MPa).

معادله (۱۰)

$$S = \frac{F}{A_0}$$

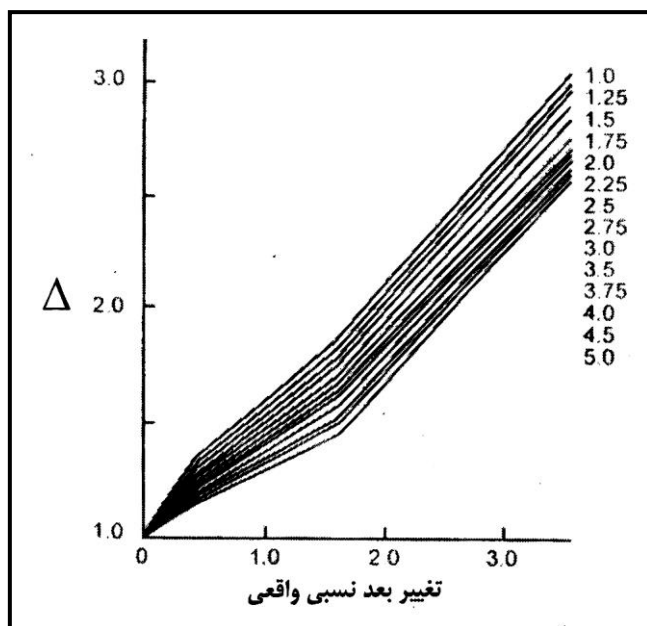
به دلیل این که مفتول غالباً با مشخصات تنش کششی در ارتباط می‌باشد، مناسب است تنش کششی براساس کاهش‌های صورت گرفته برآورد گردد. یک روش تجربی صورت گرفته توسط **Smith** این عمل را انجام داده است. آنالیز او متشکل از اثرات درصد کربن، میزان کشش، قطر ورودی و مقاومت کششی اولیه می‌باشد و اثرات حرارتی و سرعت کشش را لحاظ نکرده است، پایه آنالیز او این است که نسبت مقاومت کششی مفتول کشیده شده به مقاومت کششی مفتول اولیه می‌تواند پارامتر دلتا نامیده شود. (این پارامتر Δ با پارامتر Δ موجود در مبحث دوزه کشش متفاوت است و فقط تشابه علامت می‌باشد - مترجم) براساس آنالیز مقاومت کششی مفتول کشیده با درصد کربن ۰/۱۵٪ تا ۰/۸۵٪ او توانست یک گروه منحنی به نام K ارائه نماید که این منحنی‌ها امکان به دست آوردن مقدار مناسب Δ برای مقادیر مختلف تغییر شکل را فراهم می‌نمودند.

K را به وسیله استفاده از فرمول ۱۱ می‌توان به دست آورد.

معادله (۱۱)

$$K = \frac{D_E + C + 0.015d}{D_E + 0.1}$$

که D_E تغییر بعد نسبی واقعی صورت گرفته در هر مرحله از کشش است و C میزان درصد کربن و d_i قطر مفتول ورودی است.



شکل ۷- منحنی‌های منتشر شده به وسیله Smith برای محاسبه مقاومت کششی مفتول کشیده شده

به عنوان مثال اگر مفتول ۰/۶۹٪ کربن را با قطر اولیه ۵/۵ میلیمتر و مقاومت کششی ۱۰۱۶ مگاپاسکال با ۱۱ کشش مساوی ۲۴ درصد کاهش سطح مقطع یا ۲۸٪ تغییر بعد نسبی واقعی به مفتول قطر ۱/۲ میلیمتر تبدیل کنیم و بخواهیم مقاومت کششی مفتول نهایی را به دست آورید ابتدا به صورت زیر K یعنی شماره منحنی مورد نیاز را تعیین می‌کنیم.

معادله (۱۲)

$$K = \frac{D_{\epsilon} + C + 0.015d}{D_{\epsilon} + 0.1} = \frac{0.28 + 0.69 + 0.015(5.5)}{0.28 + 0.1} \approx 2.75$$

مقدار تغییر بعد نسبی کلی ۳/۰۸ می‌باشد ($11 \times 0.28 = 3.08$) و با استفاده از شکل ۷ نقطه ۳/۰۸ را از روی محور تغییر بعد نسبی واقعی به منحنی K شماره ۲/۷۵ منتقل کرده و سپس نقطه به دست آمده از روی این منحنی را به محور Δ منتقل می‌کنیم و به عدد ۲/۴ می‌رسیم، حال با استفاده از

آنالیز اسمیت که Δ را ضریب مقاومت مفتول ورودی برای دستیابی به مقاومت نهایی می‌داند به صورت زیر مقاومت مفتول نهایی مثال بالا را به دست می‌آوریم.

معادله (۱۳)

$$TS_f = \Delta \times TS_i = 2.4 \times 1016 = 2438 \text{ MPa}$$

تنش واقعی - در بسیاری از موارد ممکن است کار با تنش واقعی مطلوب باشد. تنش واقعی (6) براساس مساحت سطح مقطع واقعی (A) در تغییر بعد نسبی واقعی صورت گرفته به شکل زیر به دست می‌آید.

معادله (۱۴)

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{A}$$

واحدهای تنش واقعی همانند واحدهای استفاده شده در تنش ظاهری می‌باشد. برای مفید بودن اطلاعات مربوط به تنش و تغییر بعد نسبی یک نسبت بین مقاومت (تنش) و تغییر شکل (تغییر بعد نسبی) می‌بایست برقرار گردد. معادله ترکیب کننده یک نسبت ریاضی است که چگونگی ارتباط تنش و تغییر بعد نسبی مربوط به یک ماده را شرح می‌دهد. این اطلاعات جزئیات محاسبات نیرو و کاهش‌های تجربه شده کشش مفتول را میسر می‌سازد. قانون هوک یک رابطه خطی بین تنش و تغییر بعد نسبی تعریف می‌کند. این رابطه فقط در محدوده تغییر شکل الاستیکی و تنش‌های زیر نقطه تسلیم معتبر می‌باشد. اگر چه قطر مفتول در این محدوده (تغییر شکل الاستیکی) بعد از کشش به دلیل بازگشت تغییر شکل الاستیکی، کمی افزایش می‌یابد ولی این افزایش به قدری ناچیز است که در محاسبات نیرو می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. به همین دلیل تنش و تغییر بعد نسبی فقط در ناحیه تغییر شکل دائمی یا پلاستیکی می‌بایست شرح داده شوند. به دلیل پیچیدگی معادله و سودمندی محدودی که تنش ظاهری در کشش مفتول دارد، تنش و تغییر بعد نسبی ظاهری را معمولاً نمی‌توان به وسیله یک معادله ترکیب کننده مرتبط نمود. حال آن که تنش و تغییر بعد نسبی واقعی به وسیله رابطه لودویک - هولومن با یکدیگر مرتبط هستند.

معادله (۱۵ a)

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (\text{MPa یا PSI})$$

$$\text{Log}\sigma = \text{Log}k + n\text{log}\epsilon$$

که K ضریب مقاومت است با واحد PSi یا MPa و n یک ضریب سخت شدن در اثر تغییر بعد نسبی بدون واحد می باشد. ترسیم منحنی لگاریتم - لگاریتم تنش واقعی و تغییر بعد نسبی واقعی تا ماکزیمم نیروی یک تست کشش استاندارد چنانچه معادله b 15 مطابق اطلاعات کشش باشد، یک خط راست را ارائه می کند که شیب طولی این خط n می باشد و K تنش واقعی در نقطه $\epsilon=1$ است.

می بایست متذکر شد که k و n هر دو بستگی به آنالیز شیمیایی ماده دارند و همچنین می توانند برای آلیاژ مشابه با عملیات حرارتی و فرآیندهای قبلی انجام شده مختلف متغیر باشند. اطلاعات قابل توجهی برای آلیاژهای اصلی مفتولهای کشیده شده در کتابها موجود می باشد. برخی از این اطلاعات که نشان دهنده مقادیر k و n برای فولاد هستند در جدول 4 آمده است.

آلیاژ	K (ksi)	K (MPa)	n
AISI 1010	103.8	715.7	0.22
AISI 1015	113.8	784.7	0.11
AISI 1020	108.1	745.3	0.20
AISI 1035	130.8	901.9	0.17
AISI 1045	137.9	950.8	0.14
AISI 1050	140.8	970.8	0.16
AISI 1060	163.5	1127.3	0.09
302 SS	210.5	1451.4	0.6
304 SS	210.5	1451.4	0.6

جدول 4- ضرایب مقاومت سخت گردان تغییر بعدی برای آلیاژهای مفتولهای فولادی

این امکان وجود دارد که تغییر بعد نسبی واقعی (و تنش) را به تغییر بعد نسبی ظاهری (و تنش) با استفاده از فرمول زیر تبدیل نمود.

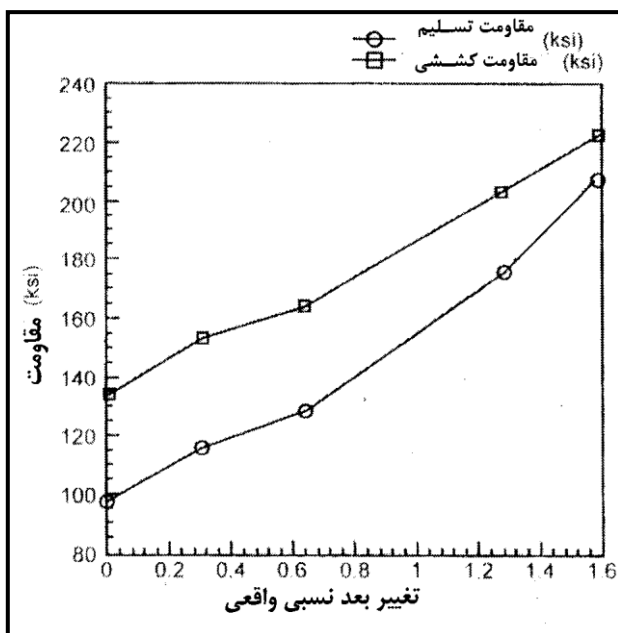
معادله (۱۶)

$$\varepsilon = \text{Ln} (1 + e)$$

معادله (۱۷)

$$\sigma = S (1 + e)$$

علامت مرسوم در تنش و محاسبات - تنش‌های کششی و فشاری و تغییر بعدهای نسبی به صورت جبری به ترتیب با علامت‌های مثبت و منفی نشان داده می‌شوند. بنابراین غالباً علامت‌ها نشان داده نمی‌شوند یا در محاسبات لحاظ نمی‌گردند. زیرا بدیهی است که تغییر شکل کششی یا فشاری است. معمولاً این علامت‌ها مشکل واقعی به وجود نمی‌آورند ولی در برگردان تنش و تغییر بعد نسبی واقعی به ظاهری و بالعکس می‌بایست به کار گرفته شوند. به‌طور تاریخی بسیاری از اطلاعات خواص مکانیکی منتشر شده در کشش مفتول، مقاومت کششی را به عنوان تابعی از تغییر بعد نسبی واقعی نشان می‌دهد. باید توجه کرد که مقادیر تنش و تغییر بعد نسبی واقعی و ظاهری را نمی‌توان به جای یکدیگر استفاده نمود زیرا باعث به وجود آمدن نتایج غلط و غیردقیق می‌شوند. اگرچه در مقادیر کم تغییر بعد نسبی واقعی و ظاهری اختلاف کوچکی وجود دارد، ولی به دلیل افزایش تغییر شکل در اثر تغییر کوچکی در تغییر بعد نسبی، در صورت ناهنجاری مقادیر تغییر بعد نسبی واقعی و ظاهری خطا نیز افزایش می‌یابد همانگونه که در شکل ۸ دیده می‌شود.



شکل ۸ - تأثیر افزایش تغییر بعد نسبی بر مقاومت تسلیم و مقاومت کششی برای مفتول فولادی ۹۰٪ کربن

خواص مکانیکی

میزان سخت شدن - افزایش در تنش مورد نیاز برای ایجاد لغزش به دلیل تغییر شکل پلاستیکی قبلی همانند کار سختی در اثر کار سرد، امری شناخته شده است. میزان یا مدول سخت شدن در اثر تغییر بعد نسبی یکی از کمیت‌های مهم در کشش مفتول می‌باشد. در حقیقت توانایی سخت شدن در اثر کار سرد است که کشش مفتول را میسر می‌سازد. بدون این خاصیت مفتول نمی‌تواند کشیده شود و دچار برش می‌گردد زیرا نیروی کشش در صورت عدم سخت شدن مفتول کشیده شده نمی‌تواند توسط سطح مقطع کاهش یافته تحمل شود.

میزان سخت شدن در اثر تغییر بعد با ضریب n نمایش داده می‌شود و بستگی به آنالیز شیمیایی آلیاژ دارد که در فولاد مستقیماً وابسته به درصد کربن می‌باشد. موادی که در اثر تغییر بعد سریع سخت می‌شوند، می‌توانند کاهش‌های بیشتری را نسبت به مواد کند سخت شونده تحمل کنند حتی اگر نیروها برای کاهش‌های اولیه بزرگتر باشند، دانستن این که چگونه کار سرد بر مقاومت

مفتول‌های آهنی اثر می‌کند، مهم است. همچنین کار سرد به همان اندازه می‌تواند بر دیگر خواص فیزیکی مفتول نیز تأثیرگذار باشد.

مقاومت تسلیم - خاصیت سخت شدن در اثر کار سرد متناسب با جنبه آن، هم اثر مثبت و هم اثر منفی دارا می‌باشد. از نظر طراحی یک محصول، سخت شدن در اثر کار سرد یک راه مؤثر برای افزایش مقاومت تسلیم تا حصول فرم نهایی مورد نیاز می‌باشد. از نظر طراحی فرآیند، سخت شدن در اثر کار سرد باعث افزایش توان و انرژی مصرفی و کاهش عمر دوزه می‌گردد.

اگر معادله ترکیبی یک آلیاژ شناخته شده باشد، در پروسه کشش برآورد مقاومت تسلیم در هر مرحله کشش امکان‌پذیر می‌باشد. برای برآورد مقاومت تسلیم بعد از هر کاهش برای یک میلگرد AISI ۱۰۴۵ با دو مرحله کشش که در جدول ۳ ملاحظه شد، ضریب مقاومت (k) برای آن جنس ۹۵۰/۸ مگاپاسکال یا نیوتن بر میلی‌متر مربع می‌باشد و ضریب سخت شدن تغییر بعدی (n) با استفاده از جدول ۴ برای فولاد AISI ۱۰۴۵ مقدار ۰/۱۴ خواهد بود. محاسبه تغییر بعد نسبی واقعی در پایان هر مرحله از کشش به صورت زیر می‌باشد.

کشش ۱- تغییر بعد نسبی واقعی بعد از کشش اول:

$$\varepsilon = 2 \times \ln \frac{5.5}{4.85} = 0.25$$

براساس این تغییر بعد مقاومت تسلیم:

$$\sigma = 950.8 \times (0.25)^{0.14} = 783.1 \text{ MPa}$$

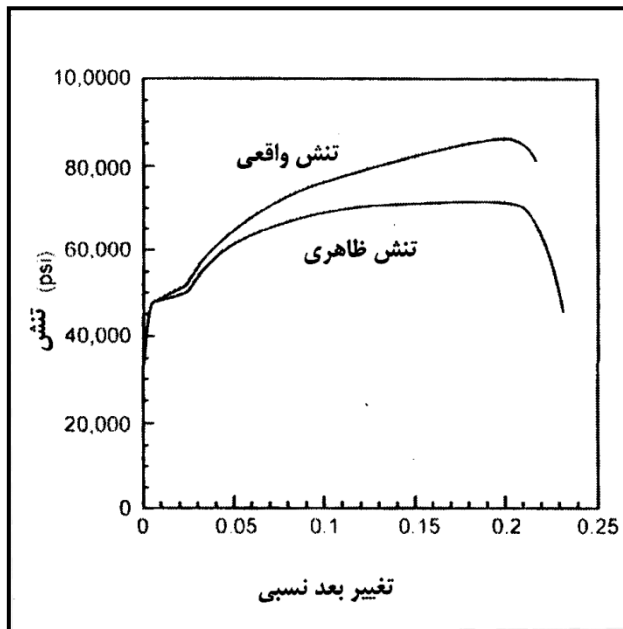
کشش ۲- تغییر بعد جمع شونده بعد از کشش دوم:

$$\varepsilon = 2 \times \ln \frac{5.5}{4.20} = 0.54$$

براساس آن مقاومت تسلیم:

$$\sigma = 950.8 \times (0.54)^{0.14} = 872.2 \text{ MPa}$$

مقاومت کششی - تفاسیر مشابه به کار گرفته شده برای مقاومت کششی مانند مقاومت تسلیم این است که افزایش تغییر شکل سبب افزایش مقاومت کششی می‌شود. همچنین توجه به این مسأله مهم است که اختلاف بین مقاومت تسلیم و مقاومت کشش در افزایش‌های کم تغییر بعد نسبی واقعی کم می‌باشد. (به شکل ۹ نگاه کنید) این تأکیدی است بر کنترل سفتی در کشش‌های بعدی فرآیند کشش جهت جلوگیری از برش مفتول چنانچه کل کاهش سطح مقطع افزایش یابد.



شکل ۹- مقایسه تنش - تغییر بعد نسبی واقعی و ظاهری مفتول AISI ۴۳۷ برای نمایش

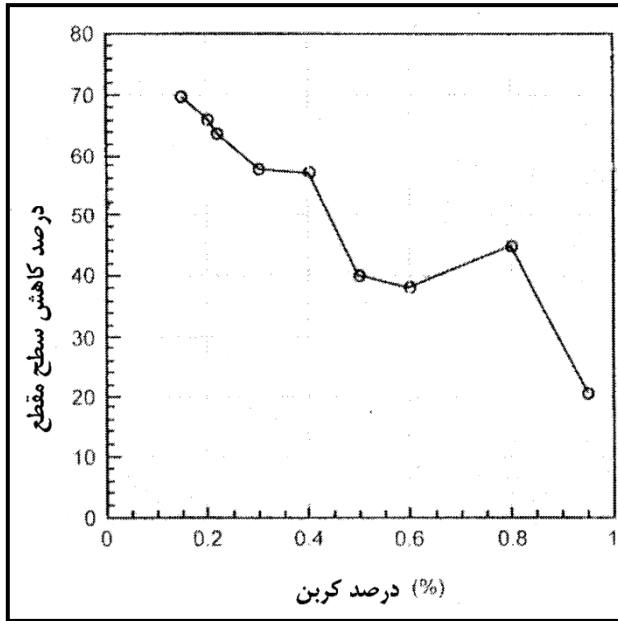
اختلاف زیاد در تنش در اثر مقادیر زیاد تغییر بعد نسبی

شکل پذیری - اگر چه شکل پذیری به روش‌های مختلف می‌تواند تعریف گردد، در اینجا شکل پذیری به صورت میزان کاهش انجام گرفته قبل از شکست کامل در نظر گرفته می‌شود. در غیاب هرگونه عملیات آنیل کاری در بین پروسه کشش، تأثیر تغییر شکل بر شکل پذیری و مقاومت کششی ماده، جمع شونده می‌باشد. وقتی کار سرد مقاومت تسلیم و مقاومت کششی را افزایش می‌دهد، هم‌زمان میزان قابلیت شکل پذیری موجود را کاهش می‌دهد. باید توجه کرد که قابلیت

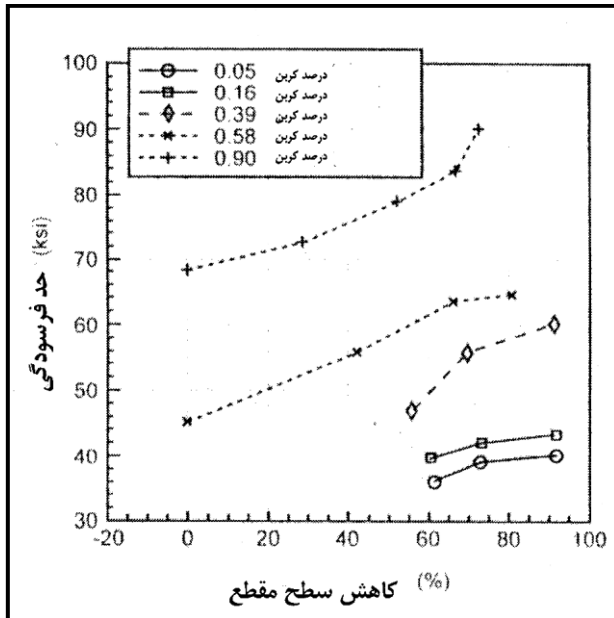
شکل پذیری یک خاصیت اساسی ماده نمی‌باشد، بلکه بیشتر عکس‌العملی است که ماده در برابر سیستم عمل تنش از خود نشان می‌دهد. میزان شکل‌پذیری را به وسیله استفاده از منحنی تنش تغییر بعد می‌توان تخمین زد. ولی این برآورد نمی‌تواند در طراحی عملیات آنیل‌کاری مورد استفاده قرار گیرد زیرا تنش‌های مؤثر در تغییر شکل اساساً با تنش حاصل از دستگاه تست کشش متفاوت است و مقایسه ماکزیمم تغییر بعد نسبی حاصل در کشش مفتول در مقابل آن چه در یک تست کشش استاندارد به دست می‌آید، این واقعیت را تأیید می‌کند.

شکل‌پذیری همچنین وابسته به آنالیز شیمیایی و ساختمان میکروسکوپی مفتول می‌باشد. به‌طور کلی با افزایش سطح آلیاژی می‌توان انتظار داشت که خاصیت شکل‌پذیری کاهش یابد. در فولاد این امر ابتدا وابسته به درصد کربن موجود می‌باشد. (به شکل ۱۰ نگاه کنید) دیگر عواملی که می‌توانند بر خاصیت شکل‌پذیری تأثیر بگذارند عبارتند از وضعیت سطح مفتول، حضور عیوب داخلی و دمای کشش، وجود خراش، درز و همچنین دیگر عیوب سطح در اثر حمل نامناسب می‌تواند به عنوان یک افزایش دهنده تمرکز تنش، باعث کاهش خاصیت شکل‌پذیری شود. عیوب داخلی از قبیل جدایش‌ها و ترک‌های جناقی با کاهش سطح مقطع مؤثر در مقابل تحمل نیرو، باعث کاهش خاصیت شکل‌پذیری می‌شوند. کنترل نامناسب دمای کشش برای فولاد می‌تواند باعث ایجاد ناحیه شکننده آبی در تغییر شکل که اساساً خاصیت شکل‌پذیری را کاهش می‌دهد، شود. پیرسازی بعد از تغییر شکل در ناحیه شکننده آبی $200-400^{\circ}\text{C}$ علاوه بر افزایش سختی خاصیت شکل‌پذیری را نیز کاهش می‌دهد.

اثر بر فرسودگی - Godfrey مطالعه‌ای بر روی نسبت بین میزان کار سرد و حد فرسودگی برای فولادهای کم، متوسط و پرکربن انجام داد. نتایج او نشان داد که در تمامی موارد حد فرسودگی با افزایش تغییر شکل، افزایش می‌یابد. (به شکل ۱۱ نگاه کنید)



شکل ۱۰- اثر میزان کربن بر درصد کاهش سطح مقطع برای فولاد



شکل ۱۱- اثر کاهش سطح مقطع بر حد فرسودگی برای مفتول فولادی

خواص فیزیکی

اثر کارسرد بر خواص فیزیکی مفتول می تواند به دو دسته تقسیم شود؛ اثر بر خواص تأثیرناپذیر (ساختار غیرحساس) و اثر بر خواص تأثیرپذیر (ساختار حساس).

خواص ساختار غیرحساس - خواصی که در مقابل کارسرد غیرحساس هستند عبارتند از مدول الاستیسیته، نقطه ذوب، دانسیته، دمای ویژه و ضریب انتقال حرارت، در حالی که معمولاً دانسیته مستقل از تغییر شکل در نظر گرفته می شود ولی این واقعیت محض نمی باشد. اگر ماده دارای پوکی و تخلخل از قبل باشد و در اثر تغییر شکل پر شود در نتیجه کاهش دانسیته را به دنبال خواهد داشت. به همین ترتیب دانسیته می تواند افزایش یابد اگر عیوب داخلی از قبیل جناغی ها در اثر کشش به وجود آیند. یک مطالعه توسط **Coffin و Rogers** نشان داد که تغییرات شاخص دانسیته در شرایط عادی کشش در حدود 10^{-5} gr/cm^3 می باشد. بنابراین در عمل می توان فرض نمود که دانسیته ثابت می باشد.

خواص ساختار حساس - خواصی هستند که می توانند به وسیله کشش مفتول از قبیل؛ خواص هدایت و مغناطیسی تأثیرپذیر باشند. هم هدایت گرمایی و هم هدایت الکتریکی می تواند در اثر افزایش تغییر شکل کاهش یابد و این در اثر تغییر شکل شبکه کریستالی به وجود می آید. معمولاً به استثنای مفتول های کشیده شده برای ترموکوبل ها، این کاهش خاصیت هدایت الکتریکی و حرارتی در کشش آهن که ابتدا خواص مکانیکی مورد توجه قرار می گیرند، بحرانی نمی باشد. این مسأله در مواد غیر آهنی از قبیل مس، آلومینیوم و تنگستن که کشش سرد می تواند خاصیت هدایت الکتریکی را حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش دهد، اهمیت دارد. مطالعات انجام شده توسط **Brick** و **Philips** نشان داده است که تغییر در خاصیت هدایت همچنین به آلیاژ نیز بستگی دارد به طوری که این تغییرات برای مس و آلومینیوم تجاری با آلیاژ ضعیف ۱ تا ۲ درصد است و با بالا رفتن کیفیت آلیاژ این تغییرات نیز افزایش می یابد. خواص مغناطیسی نیز به طور معکوس در اثر کشش تحت تأثیر قرار می گیرند یعنی نفوذپذیری مغناطیسی کم شده و اتلاف پسماند افزایش می یابد.

تأثیر متغیرهای کشش مفتول

مزارت

حرارت حاصله در مفتول فولادی بلافاصله پس از کشش را می‌توان به وسیله معادلات ۱۸ و ۱۹ تخمین زد.

معادله (۱۸)

درجه فارنهایت

$$T_{\text{defomation}} = \frac{0.95\sigma_{\epsilon}}{291.7}$$

معادله (۱۹)

درجه سلسیوس

$$T_{\text{defomation}} = \frac{0.95\sigma_{\epsilon}}{3.085}$$

توجه باید کرد که تنش به ترتیب در معادلات ۱۸ و ۱۹ می‌بایست برحسب PSI و MPa باشند تا نتیجه صحیح به دست آید.

به دلیل این که مفتول عکس العمل‌های بسیار متفاوت در دماهای مختلف از خود نشان می‌دهد، تشخیص این که مفتول در شرایط سرد، گرم یا خیلی داغ کشیده می‌شود مفید خواهد بود. دمای کار می‌تواند برای تعریف شرایط کار مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین تعیین دمای مشابه چنانچه عملیات کشش در شرایط سرد، گرم و داغ انجام شود، بسیار مطلوب می‌باشد. دمای مشابه (T_h) یک نسبت بدون بُعد می‌باشد که تقریباً مرزهای بین شرایط مختلف را طرح می‌نماید و می‌تواند به صورت زیر تعریف گردد.

معادله (۲۰)

$$T_h = \frac{T}{T_{mp}}$$

که T دمای مفتول و T_{mp} دمای ذوب آلیاژ می‌باشد که هر دو برحسب درجه فارنهایت یا سلسیوس می‌باشند. برای فولاد و دیگر فلزات اصلی مهندسی مرزهای جداکننده شرایط مختلف در جدول ۵ خلاصه شده است. مزیت استفاده از دمای مشابه این است که قابل کاربرد برای کلیه فلزات می‌باشد و فقط دمای ذوب آلیاژ به خصوص مورد نیاز است.

روشن کاری	دمای مشابه
شرایط کاری سرد	$T_h \leq 0.3$
شرایط کاری گرم	$0.3 < T_h \leq 0.6$
شرایط کاری داغ	$0.6 < T_h \leq 1$

جدول ۵ - شرایط کاری سرد، گرم و داغ براساس دمای مشابه

ارتباط این دما با کشش مفتول این است که میزان کشش در شرایط سرد مهم می‌باشد درحالی که سرعت کشش در شرایط کاری گرم و داغ بسیار مهم است. سرعت کشش - وقتی که ماده تحت شرایط کاری گرم یا داغ کشیده می‌شود، سرعت یا آهنگ تغییر شکل بسیار مهم تر از مقدار کاهش می‌باشد اگر چه فولادها در شرایط کاری سرد نیز وابستگی کمی به سرعت دارند ولی این اختلاف بین ۳ تا ۷ درصد است که معمولاً در اغلب آنالیزها صرف نظر می‌گردد. میزان متوسط تغییر شکل که نرخ تغییر بعد نسبی نامیده می‌شود ($\dot{\epsilon}$) به صورت ریاضی به شکل زیر تعریف می‌گردد.

معادله (۲۱)

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{d}$$

که V سرعت مفتول و d قطر آن می‌باشد. درحالی که این مشخص می‌کند که میزان تغییر بعد نسبی از یک نقطه به نقطه دیگر در دوزه کشش متغیر است، یک مقدار متوسط میزان تغییر بعد نسبی می‌تواند به وسیله استفاده از فرمول زیر شبیه نسبت مورد استفاده در اکستروژن محاسبه گردد.

معادله (۲۲)

$$\dot{\epsilon} = \frac{6vd_i^2 \cdot \text{tg}\alpha}{d_i^3 - d_f^3}$$

که V سرعت مفتول در بدو ورود به دوزه و a نصف زاویه دوزه بر حسب درجه می باشد.

تأثیر میزان کشش - مقدار کشش یا کاهش در هر مرحله (پاس) نیز یک عامل تأثیرگذار بر خواص مکانیکی به ویژه مقاومت کششی و خاصیت شکل پذیری می باشد. تأثیر کشش سبک و سنگین برای مفتول قطر $0/2$ اینچ ($5/1$ میلیمتر) با $0/06$ کرن در جدول ۶ که حاصل از نتایج به دست آمده توسط **Bonze** است، نشان داده شده است.

در اولین مطالعه او مفتول قطر $0/2$ اینچ را با ۵ کشش سبک ($13/3$) به قطر $0/14$ اینچ و بار دیگر با ۲ کشش سنگین ($30/$) با کل کاهش سطح مقطع 51% (تغییر بعدنسبی واقعی = $0/71$) کشید. در مطالعه دوم مفتول قطر $0/2$ اینچ را یک بار با ۱۶ کشش سبک ($14/$) و بار دیگر با ۶ کشش سنگین ($32/8$) برای کل کاهش سطح مقطع 91% (تغییر بعد نسبی واقعی = $2/41$) کشید. از هر دو این مطالعات می توان مشاهده کرد که برای سایز نهایی یکسان، کشش سنگین (کاهش سطح مقطع در هر مرحله) باعث افزایش مقاومت کششی و کاهش خاصیت شکل پذیری (کاهش در سطح) می گردد. خواص خم ها و پیچش تحت تأثیر زیاد عملیات کشش قرار نگرفتند و نشان داده شد که سطح مفتول در اثر کشش سنگین آسیب ندیده زیرا عیوب سطح باعث کاهش مقادیر پیچش می شود.

	کشش سبک		کشش سنگین	
	۵ کشش $0/14'' - 0/2''$	۱۶ کشش $0/06'' - 0/2''$	۲ کشش $0/14'' - 0/2''$	۶ کشش $0/06'' - 0/2''$
مقاومت کششی (Ksi)	62	115	87	128
کاهش در سطح	62%	37%	56%	26%
$\left(\frac{N}{r}\right)$ خم ها (سایز سنبه = r)	$\frac{22}{0.4}$	$\frac{25}{0.2}$	$\frac{20}{0.4}$	$\frac{24}{0.2}$
پیچش ($L=100dia$)	105 پیچ	40 پیچ	107 پیچ	43 پیچ

جدول ۶ - اثر کشش بر خواص منتخب مفتول کشیده شده

تئوری کشش مفتول

مقدمه

پیش از پا به عرصه نهادن عملیات کشش پیوسته، توجه کمی به فهم تئوری کشش مفتول می‌شود. این می‌توانست مربوط به این حقیقت باشد که تا وقتی که قدرت بخار معرفی گردید، تنها و بزرگترین مشکل مفتول کش‌ها تعیین نیروی محرکه لازم جهت عملیات کشش بود. در پی توسعه و بهبود مکانیزاسیون در اثر انقلاب صنعتی، تأکید کوچکی بر روی فهم پروسه‌های فیزیکی صورت گرفت به طوری که نتایج رضایت‌بخشی در جهت به‌کارگیری سرعت‌های متوسط کشش حاصل شد. با وجود این تولید مفتول در حجم کم و با عمر کوتاه قالب (دوزه) و بدون رشد در کیفیت و افزایش تولید صورت می‌گرفت.

تا این‌که در دهه ۱۹۲۰ در آلمان قالب‌هایی از کربورهای سخت شده (Cemented Carbide) معرفی گردیدند که باعث افزایش سرعت‌ها در کشش و ایجاد فرهنگ توانایی حجم تولید بیشتر گردید. این اولین ظهور نیاز به درک جزئیات عملیات کشش بود.

درحالی که دانش کلی جمع‌آوری شده از عهده مسایل جامع کشش یک مرحله‌ای برمی‌آید، جزئیات بیشتری برای کشش چند مرحله‌ای مورد نیاز می‌باشد. کشش مفتول مدرن یک کار بسیار رقابتی است که تجهیزات تولیدی آن به طور مرتب در حال تغییر بوده و تکنیک‌های سستی که حاکی از پیشرفت در گذشته بودند تکامل تدریجی پیدا کرده و دیگر کارآمد نمی‌باشند. به‌علاوه به دلیل وجود منابع محدود در صنعت همان‌گونه که تجهیزات فنی به سرعت تغییر می‌کنند واضح است که چنین فهمی لازمه کنترل و بهینه‌سازی پروسه‌های موجود و متضمن توسعه تکنولوژی نو می‌باشد.

روابط کشش مفتول

تغییر شکل در کشش مفتول تحت تأثیر چند فاکتور صورت می‌گیرد. آنالیز شیمیایی، زاویه تماس دوزه، روانکاری، سرعت کشش و کاهش سطح مقطع مهمترین آنها هستند. نخستین تأکید در روابط کشش مفتول فهم و تعریف نسبت‌های موجود بین وضعیت این فاکتورها و در نتیجه پاسخ حرارتی مفتول می‌باشد. بسیاری از توسعه‌های تکنولوژیکی که در بیست سال اخیر در زمینه کشش مفتول صورت پذیرفته در نتیجه افزایش درک این نسبت‌ها می‌باشد.

ثبات حجم

گرچه این واقعیت که حجم در اثر تغییر شکل کاهش نمی‌یابد ممکن است واضح به نظر برسد ولی این حقیقت مفهوم بسیار مفیدی است که پایه تجزیه و تحلیل بسیاری از مسایل کشش مفتول را می‌سازد. یکی از کاربردهای اصلی آن تعیین سرعت مفتول در مراحل مختلف کشش و سرعت لازم طبله‌ها می‌باشد. حالت ساده بیان ثبات حجم این است که حجم مفتول ورودی به دوزه باید با حجم مفتول خروجی از آن برابر باشد. به دلیل این که سطح مقطع در اثر کشش کاهش می‌یابد لازم است که برای برابر ماندن حجم مفتول ورودی و خروجی یک دوزه، سرعت مفتول خروجی بیشتر باشد. برابری حجمی به صورت ضرب سطح مقطع در سرعت تعریف می‌گردد که توضیح ریاضی آن به شرح زیر است:

معادله (۱)

$$V_i \frac{\pi d_i^2}{4} = V_f \frac{\pi d_f^2}{4}$$

که V_i و V_f سرعت‌های مفتول ورودی و خروجی (برحسب متر یا فوت بر دقیقه) و d_i و d_f قطرهای مفتول ورودی و خروجی (برحسب اینچ یا میلی‌متر برای مفتول گرد می‌باشند. معادله (۱) را می‌توان به صورت زیر ساده نمود.

معادله (۲)

$$V_i d_i^2 = V_f d_f^2$$

در کشش چند مرحله‌ای، سرعت خروجی مفتول هر دوزه می‌بایست افزایش یابد به طوری که هم ارزی حجمی یعنی ثابت بودن حجم مفتول قبل و بعد از هر دوزه می‌بایست برای تمام دوزه‌ها یکسان باشد. بنابراین جهت کشیدن مفتول بعد از کاهش سطح مقطع در هر دوزه، طبله‌ها سرعت زاویه‌ای برابر سرعت خروجی مفتول خواهند داشت. اگر چنین نباشد، مفتول به دلیل کشش نابرابر بین دوزه‌ها بریده خواهد شد.

به دلیل این که هم‌ارزی حجمی در تمام نقاط می‌بایست برابر باشد، سرعت مفتول در هر نقطه را با داشتن سرعت ورودی می‌توان محاسبه نمود. به‌طور مثال اگر مفتولی به قطر ۰/۱ اینچ (۲/۵ میلی‌متر) با سرعت ۱۲۰۰ فوت در دقیقه از روی قرقره‌ای تخلیه شود و قطر به ۰/۰۹ اینچ (۲/۲۸۶ میلی‌متر) با دو مرحله کشش کاهش یابد. سرعت مفتول بعد از خروج از آخرین دوزه را می‌توان با استفاده از فرمول $2b$ به صورت زیر محاسبه نمود.

معادله (۲b)

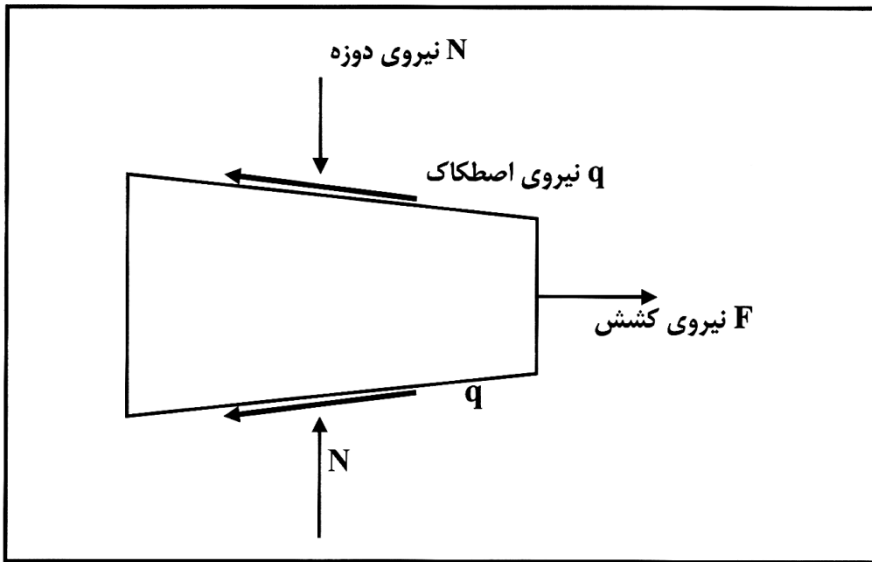
$$V_f \frac{V_i d_i^2}{d_f^2} = \frac{1200 \times (0.1)}{(0.09)^2} = 1481 \frac{\text{ft}}{\text{min}}$$

در پروسه عملیات کشش بر اثر فرسایش دوزه کشش قطر مفتول خروجی افزایش می‌یابد. بنابراین براساس اصل ثبات حجم سرعت مفتول به دلیل افزایش سایز دوزه می‌بایست کاهش یابد. اگر سرعت خطی طبله کشنده براساس سایز دوزه نو طراحی شده باشد در این حالت سرعت طبله بیش از حد نیاز مفتول خواهد بود و این افزایش سرعت باعث افزایش تنش کششی در مفتول خواهد شد و اغلب باعث برش مفتول می‌گردد.

بنابراین در ماشین‌های کشش چند مرحله‌ای، طبله‌ها طوری طراحی می‌گردند که مفتول بتواند بر روی سطح آنها لغزش داشته باشد و این لغزش، افزایش قطر مفتول و در نتیجه کاهش سرعت مورد نیاز طبله را جبران می‌نماید. این لغزش را می‌توان به وسیله محدود کردن تعداد حلقه‌های مفتول به دور طبله و همچنین با آغشته شدن مفتول و سطح طبله به مواد روانساز تأمین نمود.

نیروها و انرژی در کشش مفتول

گرچه ممکن است چنین به نظر برسد که نیروها و توان در کشش مفتول را می‌توان با استفاده از کشش ساده و وضعیت‌های تغییر شکل مفتول، آنالیز کرد ولی در حقیقت پیچیدگی‌های زیادی مربوط به فشار و نیروهای مقاوم حرکت که توسط سطح دوزه تولید می‌شوند، وجود خواهند داشت. یک نمودار جسم آزاد نیروهای عمل‌کننده بر روی مفتول را در شکل ۱ نشان داده است.



شکل ۱- نمودار جسم آزاد نیروهای عمل‌کننده در کشش مفتول

نیروی کشش F نشان‌دهنده کل نیرویی است که می‌بایست به دوزه اعمال گردد تا بر اصطکاک سطح دوزه و مقاومت در برابر تغییر شکل ماده غلبه نماید. به دلیل این‌که نیروی کشش توسط مفتول کشیده شده منتقل می‌گردد، می‌بایست محدود بوده تا از هرگونه ایجاد حالت تغییر شکل پلاستیکی خارج از دوزه جلوگیری شود.

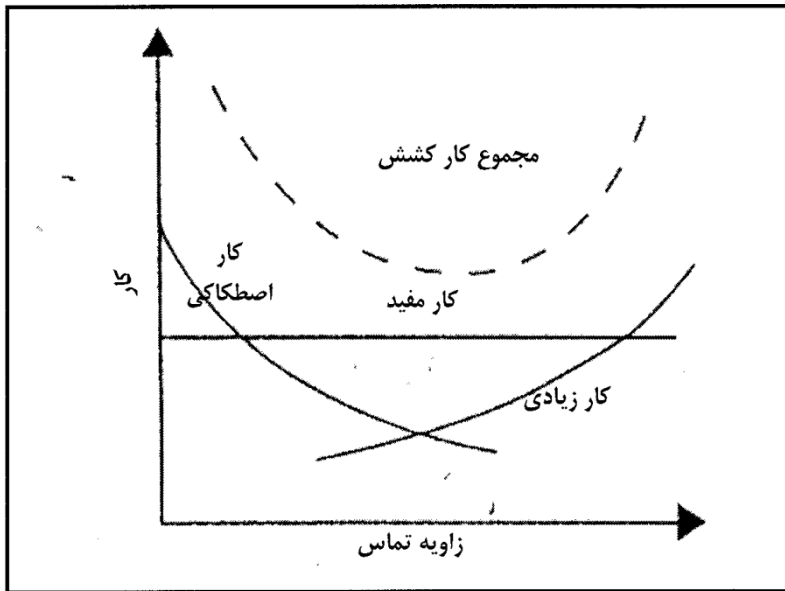
بنابراین تنش تسلیم مفتول کشیده شده نمایان‌گر حد بالایی تنش کشش مجاز می‌باشد. عملیات کشش معمولی، تنش کششی مورد قبول را ۶۰ درصد مقاومت تسلیم مفتول کشیده شده می‌داند.

تشن کششی از تقسیم نیروی کشش بر سطح مقطع مفتول کشیده شده به دست می‌آید. درحالی که چنین به نظر می‌رسد که کار یا انرژی مصرف شده در هر مرحله از کشش به وسیله جنس و کاهش سطح مقطع صورت گرفته تعیین می‌شود ولی مقدار واقعی مورد نیاز در عمل به میزان قابل توجهی بیشتر خواهد بود. به این دلیل که در هنگام تغییر شکل اتلاف انرژی صورت می‌گیرد که در درجه اول مربوط به زاویه تماس دوزه می‌باشد. این گونه انرژی‌های هدر رفته هیچ‌گونه سهمی در کاهش سطح مقطع نداشته و تنها باعث بالا رفتن میزان انرژی مورد نیاز و کم شدن کیفیت مفتول می‌گردند. مجموع کار مصرف شده در یک مرحله کشش را می‌توان به سه جزء تقسیم نمود (به شکل ۲ نگاه کنید) اینها عبارتند از (a) کار مفید (همگن و یکنواخت) لازم جهت کاهش سطح مقطع (b) کار لازم جهت فائق آمدن بر مقاومت اصطکاک و (c) کار زیادی (غیریکنواخت) لازم برای تغییر جهت دادن سیال (به شکل ۳ نگاه کنید) کار یکنواخت به وسیله کشش (کاهش سطح مقطع) تعیین می‌گردد و اساساً وابستگی به زاویه تماس دوزه ندارد. کار غیریکنواخت و اصطکاکی برعکس بستگی زیادی به شکل هندسی دوزه دارند و با تغییرات زاویه تماس تأثیرپذیر هستند. تحت شرایط معمول کشش ۲۰٪ افت کار بابت اصطکاک و ۱۲٪ بابت کار زیادی می‌باشد. کار غیریکنواخت و اصطکاکی اثرات زیان باری بر خواص مفتول می‌گذارند. در ضمن انرژی لازم جهت کشش را افزایش می‌دهند. یکی از مهمترین این اثرات این است که خواص مکانیکی در مقطع مفتول یکنواخت نخواهد بود، به دلیل این که کار اصطکاکی و غیریکنواخت نزدیک به سطح مفتول تمرکز خواهند داشت در نتیجه در سطح و لایه‌های نزدیک سطح مفتول سختی بیشتری نسبت به قسمت‌های مرکزی سطح مقطع به وجود خواهد آمد.

این متغیر بودن سختی (از سطح به عمق) را به راحتی می‌توان به وسیله انجام یک بررسی بر روی سطح مقطع مفتول سرد کشیده شده ثابت نمود.

تغییر شکل غیریکنواخت نیز اثرات بدی بر روی شکل پذیری دارد. خاصیت شکل پذیری با تغییر بعدنسبی نسبت عکس دارد بنابراین تغییر شکل غیریکنواخت و زائد اغلب تعداد مراحل کشش و ماکزیمم کاهش سطح مقطعی را که می‌توان قبل از آنیل کاری بر روی مفتول انجام داد، محدود می‌کند و حتی اگر این اثر مشکلی در کار کشش ایجاد نکند حتماً نتیجه آن در خاصیت

شکل پذیری مفتول در پروسه‌هایی از قبیل کله‌زنی سرد و یا خم‌کاری با ترکی که ایجاد می‌کند مشهود می‌شود.

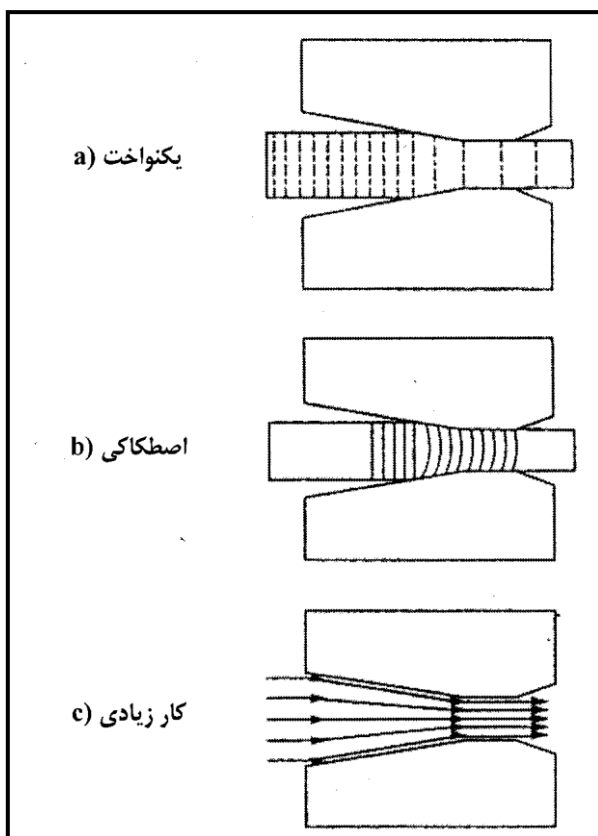


شکل ۲ - مؤلفه‌های کار که هنگام کشش مفتول عملکرد دارند

اثر اصطکاک

لایه‌های سطح مفتول نه تنها دستخوش تغییرات در سطح مقطع بلکه آنها همچنین به دلیل کشیده شدن توسط سطح دوزه تغییر شکل برشی نیز می‌دهند. (به شکل ۳b نگاه کنید) حتی برای دوزه‌های خیلی پولیش شده با روانسازهای مایع نیز یک مقدار قطعی کار اصطکاکی وجود دارد. در دوزه‌هایی با زاویه کم به دلیل سطح زیاد کشش و طول تماس بلند برای کاهش سطح مقطع در ناحیه تماس دوزه، کار اصطکاکی بیشتر می‌شود.

کار اصطکاکی را با استفاده از زاویه تماس بزرگ‌تر می‌توان کاهش داد و با استفاده از روانسازی مناسب و کیفیت سطح دوزه به حداقل رساند. همچنین نیروهای اصطکاکی نیز اغلب با بار دوزه متناسب هستند. معمولاً با کمی سعی به وسیله کم کردن کاهش سطح مقطع تا حدی که نیاز به افزایش تعداد مراحل کشش نباشد می‌توان اصطکاک را کنترل نمود. کار معمول برای این کنترل



شکل ۳- نمایش کارهای یکنواخت (a) اصطکاک (b) و زیادی (c) در کشش مفتول

بهبودسازی زاویه تماس و کارایی روانسازی می‌باشد. اثر اصطکاک به راحتی با استفاده از ضریب کولمب اصطکاک که معمولاً با حرف μ نشان داده می‌شود تعیین می‌گردد. اندازه واقعی μ بستگی به وضعیت سطح دوزه و روانسازی دارد. مقدار دقیق آن را می‌توان با روش تجربی توسط تکنیک شکافتن دوزه که از طرف «مک کلان» طرح گردیده، تعیین نمود. در عمل معمولاً مقدار μ در کشش خشک بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۷ و در روش ترکشی بین ۰/۰۸ تا ۰/۱۵ می‌باشد. علاوه بر کیفیت سطح و روانسازی، ضریب اصطکاک با سرعت کشش نسبت عکس دارد. برخی تحقیقات تجربی نشان داده است که با افزایش سرعت کشش ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد.

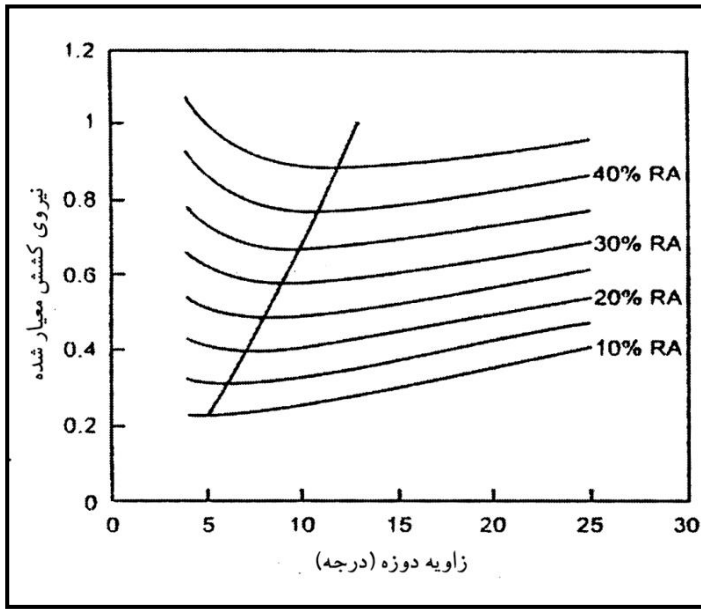
تغییر شکل زیادی

هنگامی که مفتول وارد ناحیه تماس در دوزه کشش می‌گردد. لایه‌های نزدیک سطح ماده دستخوش تغییر شکل مربوط به کاهش سطح مقطع گردیده و سیال با انحنایی که پیدا می‌کند جهت خود را از ناحیه تماس به قسمت استوانه‌ای دوزه تغییر می‌دهد (همان‌گونه که خطوط سیال در شکل ۳C نشان داده شده است) تغییر شکل زیادی مانند اثر اصطکاک به‌طور یکسان در مقطع مفتول توزیع نگردیده است بلکه در سطح ماکزیمم می‌باشد که با افزایش سختی در سطح مرتبط می‌باشد. تغییر شکل زیادی با افزایش زاویه تماس، افزایش یافته به‌طوری که ماده دورتر از خط مرکزی دستخوش تغییر جهت تیزتر نسبت به ماده نزدیک به خط مرکز می‌شود و متحمل سطح بالایی از پیچش در اثر تنش می‌گردد.

براساس مطالعاتی که بر روی برش مفتول و پرتونگاری با اشعه ایکس صورت گرفته، تغییر شکل زیادی باعث ایجاد تنش پسماند در مفتول کشیده شده می‌شود. با افزایش زاویه تماس شیب تغییر شکل از سطح به مرکز نیز افزایش می‌یابد. این باعث ایجاد تنش کششی زیاد در سطح و تنش فشاری در مرکز مفتول می‌گردد و اثر معکوس در زمان کشش اتفاق می‌افتد و آن برش مرکزی است و دلیل آن تنش‌های زیاد کششی است که در مرکز مفتول وارد می‌شود.

بهترین زاویه دوزه

انتخاب زاویه مناسب دوزه برای موفقیت هرگونه عملیات کشش مفتول بسیار ضروری می‌باشد. براساس این واقعیت که کار اصطکاکی با کاهش زاویه دوزه افزایش یافته و کار زیادی با افزایش زاویه دوزه افزایش می‌یابد. یک زاویه تماس مناسب می‌بایست جهت به حداقل رساندن نیروی کشش وجود داشته باشد. تحقیقات زیادی نشان داده‌اند که یک تعادل بین کار اصطکاکی و کار زیادی می‌تواند باعث انتخاب زاویه مناسب دوزه شود. این اثر در شکل ۴ نشان داده شده است. به‌علاوه برای به حداقل رساندن نیروی لازم کشش، زاویه مناسب می‌بایست با کیفیت سطح و پولیش خوب دوزه همراه باشد.



شکل ۴- بهترین زاویه دوزه که کار اصطکاکی و زیادی را به حداقل می‌رساند
به عنوان تابع زاویه دوزه برای کاهش سطح مقطع‌های مختلف

فاکتور دلتا

شکل هندسی ناحیه تماس در یک دوزه فاکتور کلیدی در کشش مفتول می‌باشد. این شکل هندسی را دلتا (Δ) می‌نامند که عبارت از نسبت قطر متوسط ناحیه تماس دوزه با مفتول به طول این ناحیه می‌باشد. برای دوزه‌های مخروطی فاکتور Δ این‌گونه خواهد بود.

معادله (۳a)

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

که α زاویه تماس (α نصف زاویه تماس) و D_1 و D_2 به ترتیب قطر مفتول ورودی و خروجی از دوزه می‌باشند. برای نصف زاویه‌های کوچک $\text{Sin } \alpha = \alpha$ خواهد بود. برحسب رادیان و با ضرب آن در قسمت راست معادله و با جایگزینی مقدار کاهش سطح مقطع $[r = 1 - (D_2/D_1)^2]$ به جای قطر ورودی و خروجی مفتول، مقدار Δ را به صورت زیر می‌توان نوشت:

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

مقادیر کم Δ (نصف زاویه کوچک یا کاهش سطح مقطع بزرگ) نمایانگر اثرات زیاد اصطکاکی و حرارتی سطح مربوط به طولانی بودن سطح تماس مفتول با دوزه می‌باشد. مقادیر زیاد Δ (نصف زاویه بزرگ یا کاهش سطح مقطع کم) بر سطح بالایی از تغییر شکل زیادی و حرارت سطح مربوط به تغییر جهت بیش از اندازه جریان سیال درون دوزه دلالت می‌کند. Δ بزرگ اغلب زمینه‌ساز حفره و برش مرکزی می‌شود. مقادیر Δ مربوط به نصف زاویه‌ها و کاهش سطح مقطع‌های مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است.

	کاهش سطح مقطع %							
	5	10	15	20	25	30	35	40
نصف زاویه								
2	2.72	1.33	0.86	0.63	0.49	0.39	0.33	0.27
4	5.44	2.65	1.72	1.25	0.97	0.78	0.65	0.55
6	8.17	3.98	2.58	1.88	1.46	1.18	0.98	0.82
8	10.89	5.30	3.44	2.51	1.94	1.57	1.30	1.10
10	13.61	6.63	4.30	3.13	2.43	1.96	1.63	1.37
12	16.33	7.95	5.16	3.76	2.92	2.35	1.95	1.65
14	19.06	9.28	6.02	4.38	3.40	2.75	2.28	1.92
16	21.78	10.60	6.88	5.01	3.89	3.14	2.60	2.20
18	24.50	11.93	7.74	5.64	4.38	3.53	2.93	2.47
20	27.55	13.26	8.60	6.26	4.86	3.92	3.25	2.75

جدول ۱- مقادیر پارامتر Δ برای نصف زاویه‌ها و کاهش سطح مقطع‌های مختلف در کشش مفتول

مقادیر Δ برابر با ۱/۵ در بسیاری از موارد کشش وضعیت مطلوبی را میسر می‌سازد. از فاکتورهای Δ که از ۳ تجاوز می‌کنند عموماً باید پرهیز شود.

محاسبه نیروی کشش

معادلات زیادی برای محاسبه نیروی کشش پیشنهاد شده است، نظر خیلی از این معادلات مبتنی بر ثابت‌های تجربی و آزمایشی و یا معادلات خطی است. به‌طور کلی اغلب یک معادله ساده برای تخمین نیروی لازم وجود دارد. گرچه می‌بایست توجه کرد که اساس معادلات فقط بر تغییر شکل یکنواخت است و از کار اصطکاکی و تغییر شکل زیادی به عنوان یک عامل مؤثر استفاده نشده است ولی جداً در صورت عدم به کارگیری این عوامل در معادله، نیروی کشش کمتری تخمین زده می‌شود. کار اصطکاکی و زیادی معمولاً با همدیگر تلفیق شده و به عنوان یک عامل و نه جدا از هم در محاسبات نیرو در نظر گرفته می‌شوند.

یک اضافه نیروی ۶۰ درصدی برای این عوامل در محاسبات نیروی کشش آهن مقدار قابل قبولی می‌باشد. معادله زیر که توسط کمیته آهن پیشنهاد گردیده دقت قابل قبولی را فراهم می‌سازد.

معادله (۱۴)

$$F = 1.6 (TS_2)[A_2] \text{Ln} \frac{d_1}{d_2}$$

که TS_2 مقاومت کششی مفتول کشیده شده دوزه‌ای است که نیروی کشش آن را حساب می‌کنیم و d_1 و d_2 به ترتیب قطر مفتول ورودی و خروجی و A_2 سطح مقطع مفتول خروجی می‌باشد. ضمناً $\text{Ln} d_1/d_2$ میزان تغییر بعد نسبی واقعی می‌باشد.

همچنین می‌بایست متذکر شد که مقاومت کششی یک تنش ظاهری می‌باشد. یعنی تنشی که بر مبنای سطح مقطع اولیه محاسبه شده است.

زمانی که پروسه کشش چند مرحله‌ای طراحی می‌گردد، کاهش سطح مقطع برای همه مراحل کشش اغلب ترجیح داده می‌شود که برای هر مرحله توان مساوی نیز به‌دست آید. توان می‌تواند با ضرب نیروی کشش (پاند نیرو) و سرعت کشش (فوت بر دقیقه) و سپس تقسیم این حاصل ضرب بر عدد ۳۳۰۰۰ بر حسب اسب بخار به‌دست آید.

معادله (۵)

$$HP = \frac{FV}{33000}$$

محاسبه پیشرفته نیروی کشش که یک محاسبه بسیار پیچیده ولی قابل قبول در دقت که اصطکاک، زاویه دوزه و و پس کشش را به وضوح مورد توجه قرار داده است در سال ۱۹۲۷ توسط «ساکس» پیشنهاد گردید. براساس آنالیز ساکس، تنش کششی در یک مرحله کشش (σ_d) به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

معادله (۶)

$$\sigma_d = \sigma_{average} \left\{ \left[\frac{1+\theta}{\theta} \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2} \right) \theta \right] + \frac{\sigma_{backpull}}{\sigma_{average}} \left(\frac{d_1^2}{d_2^2} \right) \right\}$$

وقتی که $\alpha = \mu/t_g$ و θ تنش کششی، $\sigma_{backpull}$ تنش تولید شده به وسیله پس کشش، μ ضریب اصطکاک کولمب و α نصف زاویه دوزه برحسب رادیان یا درجه. تنش تسلیم متوسط ماده‌ای که تحت کار سخت قرار می‌گیرد را می‌توان به روش زیر محاسبه نمود.

معادله (۷)

$$\sigma_{average} = \frac{K\varepsilon^n}{1+n}$$

که $\varepsilon = L_n L_2 / L_1$ تغییر بعد نسبی واقعی و k و n ثابت‌های ماده هستند که برای محاسبه تنش واقعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. (به جدول ۲ نگاه کنید)

Alloy	K (ksi)	K (MPa)	n
AISI 1010	103.8	715.7	0.22
AISI 1015	113.8	784.7	0.11
AISI 1020	108.1	745.3	0.20
AISI 1035	130.8	901.9	0.17
AISI 1045	137.9	950.8	0.14
AISI 1050	140.8	970.8	0.16
AISI 1060	163.5	1127.3	0.09
302 SS	210.5	1451.4	0.6
304 SS	210.5	1451.4	0.6

جدول ۲- ضرایب مقاومت (k) و سخت شدن در اثر کار سرد (n) برای برخی آلیاژهای فولادی

سپس تنش کششی (σ_d) می‌تواند در محاسبه نیروی کشش مجاز برحسب پاند یا نیوتن برای هر مرحله کشش مورد استفاده قرار گیرد.

معادله (۸)

$$F_{\max} = 10.6 \sigma_d \frac{\pi}{4} d_2^2$$

که d_2 قطر مفتول خروجی از دوزه می‌باشد.

فشار دوزه

گرچه فشار دوزه جزء توجهات اولیه در کشش مفتول نمی‌باشد منتهی یک اثر قابل توجه در عمر دوزه دارد. به‌طور کلی فرسایش دوزه با افزایش فشار، افزایش می‌یابد و فشار متوسط دوزه برحسب PSI یا MPa را می‌توان با استفاده از پارامتر Δ به روش زیر محاسبه نمود.

معادله (۹)

$$P_{av} = \sigma_{av} \left(\frac{\Delta}{4} + 0.6 \right)$$

از معادله ۹ پیداست که فشار کم دوزه و عمر بهتر آن با استفاده از مقادیر کم پارامتر دلتا و در ارتباط با آن زاویه تماس کوچک تر و کاهش سطح مقطع بیشتر که نتیجه آن سطح تماس بزرگ تر در ناحیه تماس می باشد، قابل دسترسی است. وقتی یک نیروی کشش داده شده بر سطح بزرگ تری اعمال شود نتیجه آن کاهش فشار دوزه می باشد. بنابراین زمانی که سطح تماس در ناحیه تماس دوزه افزایش می یابد کمی احتیاط لازم است زیرا این پدیده می تواند حرارت اصطکاکی در سطح مفتول را افزایش داده و در نتیجه باعث تجزیه و سوختن پودر روانساز گردد.

اثر پس کشش

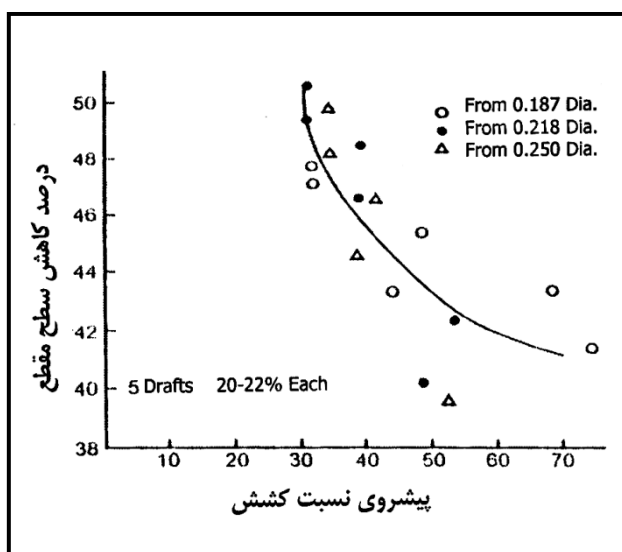
سالیان زیادی است که کاربرد عمده پس کشش که می تواند با کم کردن بار دوزه عمر آن را افزوده و ابعاد آن را تحت کنترل داشته باشد، شناخته شده است.

Godfrey و Lewis اشخاصی بودند که در زمینه اثر پس کشش بر بار دوزه مطالعاتی انجام دادند و نتیجه آن نشان داد که با این اثر یک کاهش سطح مقطع ۳۰ درصدی امکان پذیر می باشد. منفعت دوم استفاده از پس کشش آن است که به دلیل کاهش بار دوزه سطح کمتری برای تولید حرارت ایجاد شده و همچنین اصطکاک کششی کاهش می یابد. پس کشش معمولاً به میزان کمی در هر عملیات کشش چند مرحله ای وجود دارد. به طوری که نیروی کشش در بلوک قبلی به عنوان پس کشش در بلوک بعدی عمل می کند. یک منبع دیگر پس کشش در نتیجه استفاده از طبله حاصل می شود.

در عمل استفاده عمده از پس کشش جهت بالا بردن عمر دوزه و کاهش دما به ندرت صورت می گیرد، زیرا مضرات آن بیش از منفعت آن می باشد. برای افزایش میزان پس کشش نیروی کشش نیز می بایست افزایش یابد. چنانچه پس کشش به حدی افزایش یابد که به حد نیروی کشش برسد، فشار دوزه به صفر می رسد. در این مرحله مفتول بیش از آن چه توسط دوزه کشیده می شود با کمترین نیرویی کش می آید، در مقادیر زیاد پس کشش تغییر شکل مفتول می تواند خارج از دوزه صورت گیرد و نتیجه آن برش مفتول یا خارج شدن آن خواهد بود.

اثر دیگر پس کشش این است که مؤلفه محوری تنش، تنش افزایش یافته کششی بر سطح مقطع مفتول می باشد که باعث ایجاد پوکی داخلی و کاهش خاصیت شکل پذیری مفتول می گردد. در

مطالعات افراد نامبرده در مورد پس کشش مشاهده شد که بر اثر این پدیده کاهش سطح مقطع در مفتول‌های پرکربن در تست کشش و تعداد خم‌ها در تست خمش ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش خاصیت شکل‌پذیری در نهایت زیان‌آور می‌باشد به طوری که میزان کشش کمتری در هر مرحله را می‌طلبد و در نتیجه برای میزان کاهش سطح مقطع مشخص کلی، مراحل کشش را بیشتر می‌کند. بنابراین اگر پس کشش به خوبی کنترل گردد می‌تواند توزیع تغییر بعد یکنواخت در مفتول را باعث شود که مربوط به توزیع تنش محوری یکنواخت خواهد بود.



شکل ۵ - اثر افزایش پس کشش بر خاصیت شکل‌پذیری

اثرات گرمایی

کنترل دما یک موضوع بحرانی در کشش مفتول می‌باشد و اغلب به عنوان یک فاکتور محدود کننده در رابطه با تولید در پروسه‌های کشش چند مرحله‌ای به حساب می‌آید. در صورت فقدان هرگونه خنک‌سازی، دما در عملیات کشش به راحتی می‌تواند تا چند صددرجه فارنهایت بالا برود.

اگر درجه حرارت کنترل نشود نتیجه آن تأثیر بر خواص مفتول، کارآیی روانساز و کیفیت سطح و همچنین شتاب در فرسایش دوزه خواهد بود.

مدیریت دما به ویژه برای مفتول‌های پرکربن دارای اهمیت می‌باشد زیرا تنش تسلیم بالاتر حرارت بیشتری تولید می‌کند و تمایل به شکست در اثر تغییر بعد در دمای بالاتر شدت می‌یابد. اثرات حرارت در سطح مقطع مفتول متفاوت است و به عنوان پیامد کار اصطکاکی و تغییر فرم زیادی در سطح مفتول بسیار مشهود می‌باشد. به علاوه می‌تواند در ارتباط با عدم یکنواختی توزیع حرارتی خصوصیات تنش پسماند نامطلوب را افزایش دهد. افزایش دمای مفتول با افزایش سرعت کشش امری است شناخته شده، گرمای آدیاباتیک (بی در رو) در مفتول واقعاً مستقل از سرعت بوده و تحقیقات زیادی این مسأله را تأیید می‌نماید.

در عملیات کشش چند مرحله‌ای حرارت مرتباً انباشته شده و دمای مفتول ورودی دوزه بعدی افزایش می‌یابد مگر این که در هر مرحله کشش خنک‌سازی جهت کنترل دما صورت گیرد. در کشش یک مرحله‌ای افزایش دما به مراتب کمتر از حدی است که اثر قابل توجهی داشته باشد. در عملیات کشش چند مرحله‌ای دما انباشته شده و به حدی افزایش می‌یابد که ممکن است برخواص مفتول و قابلیت کشش آن تأثیر گذارد به‌ویژه در سرعت‌های کشش بالاتر از ۱/۵ متر در ثانیه.

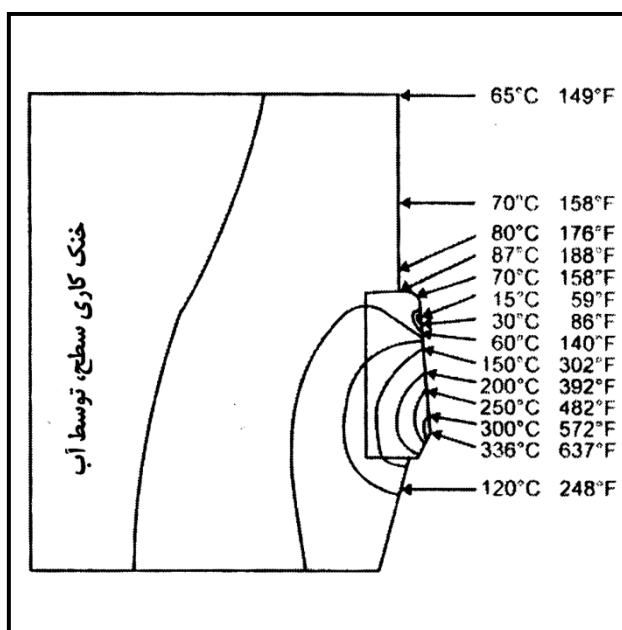
حرارت ناشی از کار تغییر شکل

دما ابتدا به وسیله کار تغییر شکل (کاهش سطح مقطع) و سایش (اصطکاک) در سطح دوزه تولید می‌شود. دمای آدیاباتیک متناسب با میزان تغییر شکل می‌باشد بنابراین دما در سطح مفتول بیشتر از خط مرکزی آن می‌باشد. هر چند یک محاسبات دقیق و ریاضیات پیچیده برای تعیین دمای حاصله مورد نیاز است ولی یک معادله تجربی مستدل برای تخمین این دما (ΔT) برحسب درجه فارنهایت توسط ویلسن ارائه گردیده که به صورت زیر می‌باشد.

معادله (۱۰)

$$\Delta T = \frac{1.069 \times 10^4 \times F}{C \times A_f \times P}$$

که F نیروی کشش دوزه (پاندنیرو) و C ظرفیت گرمایی ویژه فولاد، A_f سطح مقطع مفتول خروجی از دوزه (اینچ مربع) و P دانسیته فولاد (پاندبر فوت مکعب) می باشد. همانگونه که در معادله ۱۰ مشاهده می شود دمای حاصله متناسب با میزان تغییر شکل می باشد. بنابراین قابل پیش بینی است که گرمترین محل در دوزه در ناحیه زاویه تماس و استوانه سائز آن باشد که بیشترین تغییر شکل و سایش در این ناحیه روی می دهد. این مسأله توسط مطالعات کلاسیک انجام شده توسط **Ranger** نیز تأیید شده است. (به شکل ۶ نگاه کنید)



شکل ۶ - دامنه دمای تجربی برای عملیات کشش یک مرحله ای

خنک کردن حین کار

دوزه های کشش مقدار کمی حرارت را می توانند خارج نمایند. بنابراین توجه ویژه ای به خنک کردن حین کار می بایست معطوف داشت به ویژه در کشش های نهایی، در حالی که بخشی از حرارت توسط دوزه منتقل می شود و بیشتر آن در مفتول باقی ماند، تلاش برای استفاده از سیستم خنک سازی دوزه جهت کاهش دمای مفتول به عنوان تلاش غیر موفق اثبات شده است. مطالعات

متعددی بر روی مؤثر نبودن صرف خنک شدن دوزه از طریق تبادل حرارت وجود دارد و نشان می‌دهد که این عمل تنها حدود ۵ تا ۲۰ درصد دمای تولید شده در مفتول را می‌زداید و این مربوط به این حقیقت است که سطح تماس مفتول با دوزه فقط برای چند هزارم ثانیه می‌باشد. برای مثال وقتی مفتول قطر ۲ میلیمتر فولاد معمولی با روش خنک شدن معمولی دوزه (تبادل حرارتی) کشیده می‌شود، حرارت گرفته شده در سرعت ۲۰۰ فوت در دقیقه ۷ درصد، در سرعت ۱۰۰۰ فوت در دقیقه ۳ درصد و در سرعت ۵۰۰۰ فوت در دقیقه یک درصد می‌باشد. حتی اگر پیش‌بینی شود که دوزه حداقل دما از مفتول را کاهش می‌دهد و نمی‌تواند این امر چشمگیر باشد ولی اغلب خنک کردن محفظه دوزه ضروری می‌باشد، به‌ویژه وقتی که هسته کارباید در پوسته آهنی جاسازی شده است و این دو دارای ضریب هدایت حرارتی بسیار متفاوتی هستند.

قاعده خوب برای لمس افزایش دما در هر کشش در سیستم خشک‌کشی (به جز دوزه اول) ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد برای فولاد ساختمانی و ۱۰۰ تا ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد برای فولاد پر کربن می‌باشد. این مقادیر برای کشش تر نصف می‌گردد. Godfrey گزارشی دارد مبنی بر این که یک کاهش ۴۰ درجه سانتی‌گرادی در صورت به‌کارگیری نیروی پس کشش قوی به دست می‌آید.

سه روش خنک‌سازی مفتول مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- **فنک‌سازی مستقیم:** آب خنک‌کننده به مفتول خروجی یا طبه جمع‌کننده پاشیده می‌شود

- **فنک‌سازی غیرمستقیم:** آب در محفظه دوزه پاشیده یا گردش پیدا می‌کند و یا داخل طبه پاشیده می‌شود.

- **دمیدن هوا:** هوا با فشار به سطح مفتول روی طبه برخورد می‌کند. خنک کردن حین کار اغلب روش مستقیم خنک کردن یعنی پاشیدن آب به مفتول خروجی از دوزه را به کار می‌گیرد و پسماند حرارت در مفتول نیز باعث تبخیر آب باقی‌مانده بر روی آن می‌گردد. خنک کردن مستقیم به همراه خنک کردن داخلی طبه می‌تواند دمای مفتول را تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد پایین بیاورد که این دما برای کشش‌های بعدی معقول می‌باشد.

این بسیار مهم است که از اکسید شدن سطح داخلی طبله‌ها جهت ابقاء تبادل حرارتی خوب بین آب خنک‌کننده و مفتول جلوگیری شود.

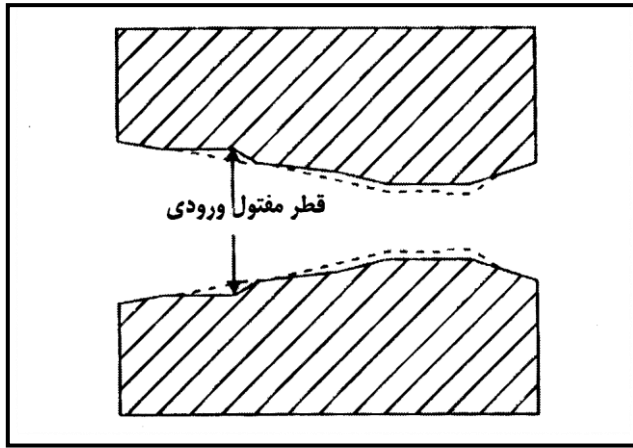
نکات مؤثر در خنک‌سازی مفتول کشیده شده به شرح زیر می‌باشند:

- اطمینان از این که مفتول ورودی به دوزه تا حد امکان خنک باشد.
- اجتناب از کشش زیاد
- به کارگیری بهترین روانساز
- توجه به استفاده از پس کشش
- افزایش زمان بین مراحل کشش
- افزایش تعداد حلقه‌های مفتول به دور طبله
- افزایش قطر طبله

عمر و فرسایش دوزه

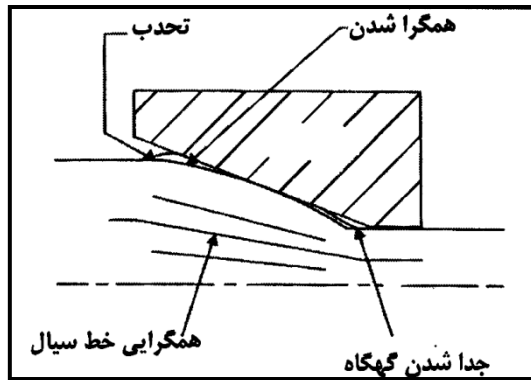
دو متغیر اولیه که در هر عملیات شکل‌دهی فلز عمر دوزه را کنترل می‌کنند عبارتند از: فشار و دما، فشار در عملیات کشش مفتول نسبت به سایر عملیات شکل‌دهی از قبیل کله‌زنی یا اکستروژن اثر کم بر روی دوزه دارد. برعکس دما اغلب یک عامل بسیار بحرانی در کنترل عمر دوزه می‌باشد. گرچه به نظر می‌رسد که فرسایش دوزه به طور یکنواخت در ناحیه تماس رخ می‌دهد ولی عملاً اینگونه نیست. حداکثر فرسایش معمولاً در نقطه‌ای که ابتدا مفتول با دوزه برخورد می‌کند رخ می‌دهد. در آنجا یک گودی حلقه‌وار عمیق شکل می‌گیرد که حلقه سایش نامیده می‌شود. (به شکل ۷ نگاه کنید)

این حلقه وقتی ایجاد می‌شود که برخورد مستقیم مفتول با دوزه به دلیل نامنظمی‌های سایش مفتول و لرزش آن، دچار نوسان گردد. در نتیجه یک ناحیه باریک از دوزه در معرض بار نوسانی با احتمال خرابی در اثر فرسودگی قرار می‌گیرد. مشکلی که این حلقه سایش ممکن است به وجود آورد این است که تغییر شکل مفتول قبل از نقطه تماس در دوزه شکل می‌گیرد که آن را برآمدگی یا تحذب بر روی مفتول می‌نامند که منتج از فرو رفتن مفتول در گودی حلقه سایش در دوزه



شکل ۷- سایش صورت گرفته به صورت حلقه در دوزه کشش

می باشد. تحدب در نقطه اولیه تماس در دوزه روی می دهد که گلوگاه ورودی روانساز را محدود کرده و باعث شتاب در فرسایش دوزه می گردد. (به شکل ۸ نگاه کنید)



شکل ۸ - تحدب مفتول که در گلوگاه دوزه کشش روی داده است

در طول ناحیه تماس فرسایش کمی صورت می گیرد همچنین در این ناحیه بیشتر از سایش سطح، دو پهنی به وجود می آید.

حرکت و لغزش مفتول بر روی سطح کاری دوزه کشش باعث فرسایش آن می گردد به طوری که این فرسایش بستگی به مساحت سطح تماس و به تبع آن به طول مفتولی دارد که از دوزه عبور

می‌کند. اغلب عمر دوزه به وسیله وزن مفتول کشیده شده یا زمان کارکرد آن قیاس می‌شود. درحالی که برای به دست آوردن یک نشانه اساسی از فرسایش دوزه می‌بایست به طول مفتول کشیده شده مراجعه نمود. بنابراین یک قیاس عملی برای عمر دوزه میزان طول مفتول کشیده شده بر یک واحد افزایش قطر می‌باشد (مثلاً یک هزارم اینچ) یک نمونه شاخص اندازه‌گیری عمر دوزه برحسب مایل طول مفتول کشیده شده بر هزارم اینچ افزایش قطر دوزه می‌باشد. این عمر برای دوزه‌هایی با جنس‌های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. بنا بر یک قاعده کلی، موادی که مقاومت تسلیم و نقطه ذوب بالاتری دارند در مقابل سایش مقاوم‌تر هستند ولی مطالعات اخیر نشان می‌دهد که سختی دوزه فرسایش آن را کنترل نمی‌کند. همچنین افزایش سختی دوزه دلالت بر افزایش عمر قابل توجه نمی‌کند. تحقیق بر روی پیش‌بینی عمر دوزه براساس خواص فیزیکی مفتول و دوزه تاکنون به نتیجه نرسیده است.

متوسط عمر دوزه (مایل بر هزارم اینچ افزایش قطر)	جنس دوزه
۰/۲۵ - ۱	فولاد نرم
۱۵ - ۴۰	فولاد پرکربن
۵۰ - ۲۰۰	تنگستن گاربايد
$۱ - ۸ \times ۱۰^۶$	الماس

جدول ۳ - عمر دوزه برای جنس‌های مختلف اصلی دوزه

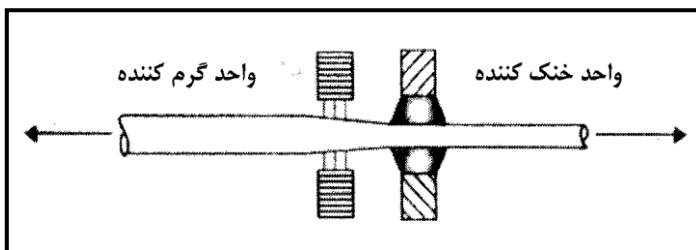
روش‌های غیر سنتی کشش

دوزه‌های مخروطی بیش از ۱۸۰۰ سال در کشش مفتول تکیه‌گاه اصلی بوده‌اند. با این حال تحقیق و تلاش زیادی بر روی اشکال دیگر (مقعر، حلقوی و غیره) متمرکز شده است، تا بر این محدودیت‌های ذاتی موجود در تکنولوژی دوزه‌های مخروطی فائق آید. تاکنون بسیاری از این روش‌های نوین امکانات جالبی را ارائه داده‌اند. مشکلات عملی زیادی مانع دستیابی به یک سطح قابل قبول تجاری این امکانات شده است.

کشش مفتول بدون دوزه

همان گونه که از نام این روش برداشت می شود، قاعده کلی کشش مفتول بدون دوزه (به شکل ۹ نگاه کنید) مستلزم به کارگیری حرارت و سپس کشیدن ساده مفتول به وسیله طبله با سرعت های مختلف به جای کاهش سطح مقطع به وسیله کشش از یک سری دوزه می باشد. معمولاً مفتول پس از خروج از ناحیه گرم کننده می بایست فوراً خنک شده تا ناحیه لاغر شده مقاوم شده و از ایجاد گلوبی اجتناب شود. نیروی کشش به کار رفته تعیین کننده قطر مفتول نهایی می باشد. بنابراین اوضاع عملیات به صورت منطقه ای می بایست بازرسی و کنترل شود. مزایای این عملیات شامل؛ تهیه مفتول (میلگرد) با قطرهای بسیار متنوع از سایزهای محدود اولیه، نیاز به حداقل نیروی کار و حذف نیاز به داشتن موجودی زیاد دوزه می باشد.

این عملیات از نظر موقعیت مکانی بسیار قابل انعطاف می باشد به طوری که می تواند در فضاهای کوچک جهت رفع نیاز مشتریان منطقه ای به کار گرفته شود. درحالی که کوشش های زیادی جهت تجاری کردن این پروسه انجام می شود، نگرانی هایی در ارتباط با هزینه تجهیزات و توانایی کنترل قطر نهایی وجود دارد.



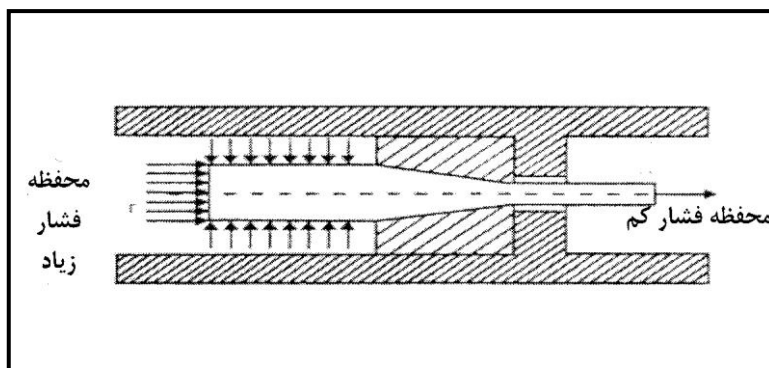
شکل ۹ - اصل اساسی کشش مفتول بدون دوزه

اکستروژن

محدودیتی که در سیستم کشش با دوزه برای کاهش سطح مقطع مفتول وجود دارد در اکستروژن (تزیق) وجود ندارد. کارهای تجربی در دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ نشان داده که امکان کاهش سطح مقطع زیادی در سیستم یک مرحله ای اکستروژن هیدرولیک مفتول وجود دارد. حتی اگر چنین

پتانسیلی وجود نداشته باشد که این عملیات تجاری گردد ولی این تکنولوژی در کارخانه وسترن الکتریک به نمایش گذاشته شد.

به گونه‌ای که میلگرد قطر ۷/۹ میلی‌متر از مس و آلومینیوم با این روش با موفقیت در سرعت ۶۱ متر بر ثانیه کاهش سطح مقطع بسیار زیادی را متحمل شدند. مزیت دیگر این پروسه این است که نیازی به حرارت دادن نمی‌باشد. (به شکل ۱۰ نگاه کنید)



شکل ۱۰ - نمایش اصول بنیانی استفاده از هیدرولیک در کشش مفتول

Bridgman در سال ۱۹۲۰ پیشقدم این کار بود، او کشف کرد که نمونه‌هایی که تحت تنش‌های فشاری افزوده شده (توسط هیدرولیک) در حد 450 ksi (3104 MPa) قرار می‌گیرند در زمان تست کشش خاصیت شکل‌پذیری خیلی زیادی از خود به نمایش می‌گذارند. این مربوط به افزایش تنش فشاری است که پوکی و تخلخل را از بین می‌برد و مانع جدایی در سطح مشترک مرزهای زمینه و فاز دوم ذرات می‌شود. تنش‌های هیدرواستاتیک افزوده شده اثرات شکست در نتیجه ناپایداری‌های کشش از قبیل گلوئی دادن (نازک شده موضعی) که عامل اصلی برش در کشش مفتول می‌باشد را ندارد. برای جلوگیری از ایجاد گلوئی ترجیحاً قطعه کار (میلگرد) می‌بایست اکستروود گردد تا این که از دوزه کشیده شود و برای این کار فشار هیدرولیک حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ هزار **PSI** به میلگرد می‌بایست وارد شود. مشکلات مربوط به تغذیه پیوسته میلگرد،

تأمین فشار زیاد محفظه اکستروود، برقراری روغن کاری مناسب و پیچیده بودن لوازم معایب مهم این روش می‌باشد.

ماوراء صوت (اولتراسونیک) در کشش

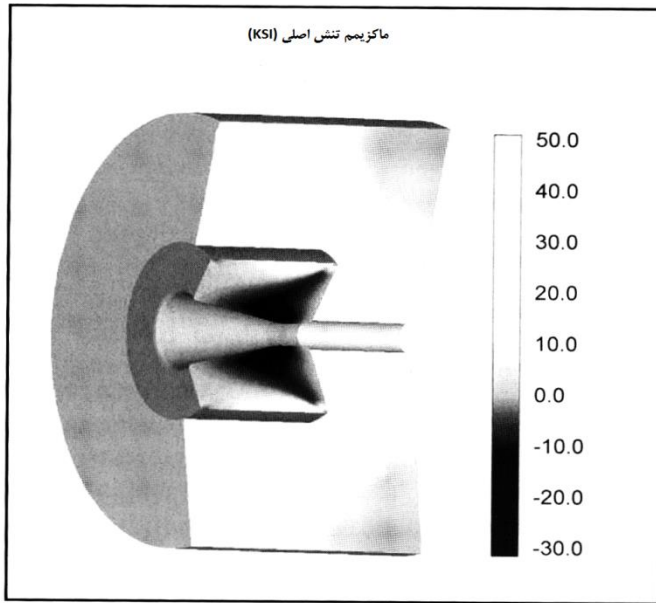
مزایای استفاده از نوسانات اولتراسونیک (ماوراء صوتی) در کشش مفتول سالیان زیادی است که شناخته شده است و تحقیقات فعال در این زمینه در اوایل دهه ۱۹۶۰ شروع شد. درحالی که کاربردهای موفقیت‌آمیز اولتراسونیک نشان داده شده‌اند ولی در مقیاس محدودی در صنعت کشش مقبول واقع شده است. امروزه فقط به منظور تمیز کردن و اتصال (جوش) مواد به‌طور غیرگسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک دلیل احتمالی برای این محدودیت استفاده این است که بسیاری از کاربردهای اولتراسونیک متمرکز بر آلیاژهای مهندسی مرسوم شده‌اند که شکل‌پذیر بوده و خواص مکانیکی محدودی ندارند و به راحتی و با صرفه اقتصادی و عملیات مرسوم کشیده می‌شوند. تعدادی از تحقیقات اثر لرزش‌های اولتراسونیک در مفتول یا لوله فولادی، آلومینیومی و مسی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این مطالعات مزایایی از قبیل کاهش نیروی کشش و افزایش کاهش سطح مقطع در هر مرحله کشش به اثبات رسیده است، در اغلب این تحقیقات دوزه کشش دارای حرکت نوسانی طولی (موازی با محور کشش) بوده است، یک اختلاف نظر وجود دارد مبنی بر این که کاهش نیروی کشش در نتیجه کاهش اصطکاک و کاهش تنش تسلیم در مفتول می‌باشد یا کاهش نیروی کشش در اثر موقعیت‌سازی مناسب برای اعمال تنش کششی توسط امواج اولتراسونیک است. مقادیر زیاد ارتعاش نتایج نامطلوبی از قبیل شکستن را در پی خواهد داشت.

آنالیز کشش مفتول به کمک کامپیوتر

برای مدل‌سازی روابط کشش مفتول معادلات مرتبط به یکدیگر متعددی به کار گرفته می‌شوند. در ارتباط با پیچیدگی ریاضیات آنها، تنها سطح محدودی از دارندگان اطلاعات بالا قادر به استفاده از آنها هستند. اما بسیاری از این مشکلات با ظهور کامپیوترهای جدید مرتفع گردیدند، با معرفی نرم‌افزارهای همگانی و کامپیوترهای سریع آنالیزهای کامپیوتری کشش مفتول در سال‌های اخیر معمول گردیده است. با استفاده از آنالیزهای کامپیوتری مدل‌های پیچیده ریاضی، اثرات حرارتی و مکانیکی برای وضعیت‌های مختلف به راحتی تجزیه و تحلیل شده و هزینه نسبتاً کمی نیز خواهند

داشت و اغلب با حداقل تکیه بر تجربه فیزیکی همراه خواهد بود. وقتی این آنالیزها با کامپیوترهای پیشرفته دارای قابلیت ترسیم انجام شود این گونه مدل‌ها می‌توانند اطلاعات بی‌نظیری در ارتباط با تنش، تغییر بعد نسبی و دامنه‌های حرارتی به عنوان تابعی از زمان را فراهم سازند. وقتی اطلاعات ورودی مقتضی فراهم باشند، مدل‌های کامپیوتری همچنین برای پیش‌بینی نواقص، پیش‌بینی تغییرات ریزساختاری و ارزیابی اوضاع عملیات کشش مفتول، اغلب بدون متوسل شدن به آزمایشات عملی پر هزینه، نیز می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

جزئیات ریاضیات روش‌های جزء محدود که از پیچیدگی بیشتر جلوگیری می‌کنند به خوبی به صورت موضوعی در کتاب‌های مختلف شرح داده شده‌اند. در اینجا فقط جهت اطلاع و آگاهی خوانندگان با فهم اولیه این روش یک نگاه مجدد به آن شده است. روش جزء محدود یک نزدیک شدن عددی به حل مسأله است که متکی است به تقسیم یک مشکل پیچیده به یک سری مشکلات کوچکتر که حل ساده‌ای دارند. در رابطه با پیچیدگی و تعداد زیاد معادلات یک قطعه کار، کامپیوتر می‌بایست مشکل را تقسیم کند و وقتی راه‌حل‌های جداگانه دوباره با هم جمع شوند، راه‌حل کل مسأله به دست می‌آید. در مدل‌های کامپیوتری سه مرحله جداگانه وجود دارد؛ پیش‌فرآیند، مدل‌سازی و نتیجه‌گیری در مرحله پیش‌فرآیند (دادن اطلاعات) کاربر خواص مواد، خواص هندسی و دیگر خواص فیزیکی مقتضی را عرضه می‌کند که نشان می‌دهد ویژگی‌های پروسه است که توضیح ریاضی آن را پرورش می‌دهد. در مرحله مدل‌سازی به وسیله کامپیوتر یک راه‌حل ریاضی برای نقاط پی‌درپی در زمان تعیین گردیده ارائه می‌شود و معمولاً مستقل از هرگونه فعالیت کاربر است. وقتی مدل‌سازی در حال اجراست نتایج به صورت گرافیکی قابل رویت بوده و متغیرهای مخصوص یا رفتار مورد نظر می‌توانند آنالیز گردند. (به شکل ۱۱ نگاه کنید) در مدل‌سازی جزء محدود عملیات کشش مفتول، معمولاً مفتول به عنوان یک جسم دارای قابلیت تغییر شکل پلاستیکی در نظر گرفته می‌شود و دوزه که یک جسم با تغییرات الاستیکی بسیار کم است به عنوان یک جسم صلب در نظر گرفته می‌شود و از تغییر شکل جزئی آن چشم‌پوشی می‌گردد.



شکل ۱۱ - نمایش سه بعدی گرافیکی تنش اصلی (KSI) در دوزه کشش مفتول

به جز تنش‌ها و تغییر شکل خمشی دوزه که در یک آنالیز ایزوترمال (هم دما) تجزیه و تحلیل می‌شوند. در آنالیزهای دیگر با تلقی دوزه به عنوان یک جسم صلب، تسهیل قابل توجهی در مدل فراهم خواهد شد و سپس سطح دوزه به طور مؤثر به یک وضعیت مرزی ساده ریاضی تبدیل می‌شود. هر چیزی در مدل که فرض شود تغییر شکل پیدا می‌کند اولین تشخیص مجزا به وسیله تقسیم داخلی به تعداد زیادی موجودیت هندسی ساده به نام اجزاء می‌باشد، بنابراین اگر یک آنالیز ایزوترمال صورت گیرد، چیزهای صلب نیز می‌بایست به صورت مجزا شناخته شوند.

هر جزیی با پیوستن به اجزاء مجاور در نقاطی که گره نامیده می‌شوند، برای شرح رفتار یک قسمت کوچکی از آن چیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. وقتی تمام اجزاء کاملاً جمع‌آوری شدند آنها به صورت یک شبکه ظاهر خواهند شد.

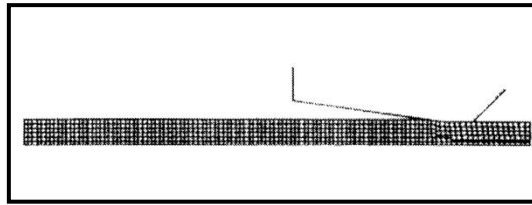
در مدل‌سازی گره‌ها و جزءها و همچنین مقادیر محاسبه شده در فواصل مختلف را ذخیره‌سازی می‌نمایند. دقت مدل و نتیجه بستگی زیادی به تعداد جزءها و گره‌های مورد استفاده دارد. اگر

شیب (ضریب زاویه) تغییرات تند باشد و تغییرات سریع و خارج از انتظار صورت گیرد می‌بایست تعداد بیشتری از جزءها و گره‌ها به کار گرفته شوند. هر گره در واقع نشان دهنده یک سری معادلات چند مجهولی در فرم ماتریس است که موضوع را به چند قید و وضعیت مرزی جهت تعیین تقریبی جابه‌جایی یا سرعت در آن نقطه، باز می‌کند. تعداد معادلات در هر گره بستگی به جهت‌های مجاز حرکت یا درجه آزادی تعیین شده در مدل دارد. جابه‌جایی و سرعت جهت محاسبه تغییر بعد نسبی و یا نرخ تغییر بعد نسبی و از طرف دیگر برای محاسبه تنش در یک ماتریس مورد استفاده قرار می‌گیرند.

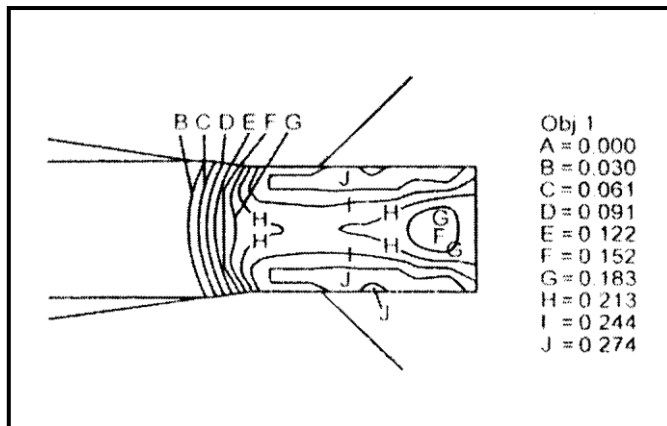
به دلیل این که تغییر شکل خطی نمی‌باشد، به دست آوردن راه‌حل در یک نقطه امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین پروسه می‌بایست به چند قسمت تقسیم شده و به طور متوالی در نقاط مختلف مشابه زمان واقعی پروسه تا رسیدن به نقطه دلخواه، حل شود. هر نقطه جداگانه در زمان که با این‌گونه راه‌حل محاسبه گردیده را زمان نقطه می‌گویند. معمولاً هر زمان نقطه‌ای چند هزارم ثانیه می‌باشد. اگر اثرات حرارتی نیز آنالیز شوند، روش راه‌حل بدین ترتیب است که ابتدا راه‌حل تغییر شکل انجام می‌شود و سپس راه‌حل حرارتی و قبل از حل زمان نقطه بعدی، راه‌حل حرارتی در روشن شدن وضعیت تغییر شکل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یک مثال ساده مدل‌سازی دو بعدی هم‌دمایی (ایزوترمال) کامپیوتری در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نشان داده شده است. شکل ۱۲ نمایش گرافیکی پروسه کشش مفتول را نشان می‌دهد بعد از این که مفتول کمی کشیده شده و فقط قسمت کوچکی از آن تغییر شکل یافته است. به دلیل این که تغییر شکل دوزه آنالیز نگردیده فقط نمایش مرزی سطح دوزه نشان داده شده است. به علاوه به دلیل تقارن پروسه فقط نیمی از آن مدل شده است و یک وضعیت مرزی (نشان داده نشده) در خط مرکزی جهت تسهیل زیاد، وضع گردیده است.

شکل ۱۳ دامنه تغییر بعد نسبی مدل‌سازی شده در ناحیه هدایت شده مفتول بعد از ۰/۰۶ ثانیه و استفاده از سرعت کشش ۱۵ متر در دقیقه را نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که شیئی وجود دارد که تغییر بعد نسبی در سطح مقطع یکنواخت نمی‌باشد.



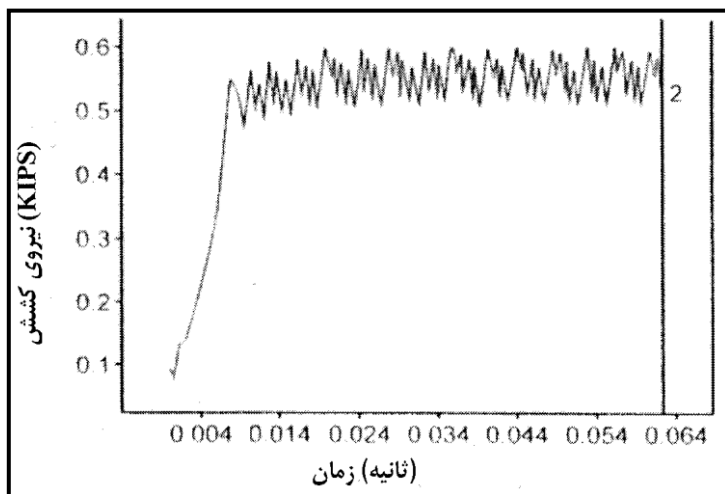
شکل ۱۲- جزء محدود نشان‌دهنده پروسه کشش، به دلیل تقارن محوری فقط نیمی از پروسه نشان داده شده است.



شکل ۱۳ - توزیع تغییر بعد نسبی مؤثر در یک مفتول کشیده شده با استفاده از مدل‌سازی جزء محدود

نیروی کشش به عنوان تابعی از زمان در شکل ۱۴ نشان داده شده است. تغییر در نیروی کشش به محض ورود مفتول به دوزه و سپس رسیدن به یک وضعیت ثابت حجم در لبه خروجی دوزه را می‌توان به راحتی تشخیص داد. مزیت نمایش گرافیکی این است که همه رفتار یک متغیر به‌خصوص، قابل تجسم می‌باشد و در سطح بالاتر، نشان‌دهنده مشکلات پروسه و تشخیص آسان است. به‌علاوه به دلیل این که مدل قادر است اطلاعات زمان نقطه قبلی را ذخیره نماید، یک مهندس می‌تواند عملکرد پروسه و متغیرهای آن را در زمان ردیابی نموده و وضعیت پروسه را ارزیابی نماید که این اغلب در تعیین ریشه مشکلات بسیار ارزشمند می‌باشد.

نکته پایانی این که مدل تغییر شکل را می توان به راحتی به کشش چند مرحله ای با افزودن یک یا چند دوزه به مدل موجود بسط داد.



شکل ۱۴ - مدل نیروی کشش به دست آمده توسط مدل سازی جزء محدود

فهرست جلد ۳

فصل ۱۰.

دوزه‌های کشش مفتول

فصل ۱۱.

روانکاری در کشش مفتول‌های آهنی

فصل ۱۲.

عملیات حرارتی مفتول آهنی

فصل ۱۳.

آنیل‌کاری

فصل ۱۴.

آزمون مفتول یا میلگرد آهنی