

اصول و کاربردهای علم مواد در مهندسی مکانیک

فصل ششم:
کارگرم و مقدمه‌ای بر روش‌های شکل‌دهی

اصول علم مواد

1 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



مقدمه

- تغییر شکل پلاستیک در دمای محیط (کار سرد) در یک فلز بسپلور باعث تغییر در خواص و ریزساختار می‌شود:
 - ۱- تغییر در شکل دانه،
 - ۲- به وجود آمدن کار سختی
 - ۳- افزایش چگالی نابجایی‌ها است.
- این تغییر خواص و ساختار می‌تواند توسط فرآیند عملیات حرارتی آنیل فرآیندی به حالت قبل از کار سرد برگردد.
- این فرآیندهای عملیات حرارتی شامل بازیابی و تبلور مجدد است. فرآیند بازیابی و تبلور مجدد در دمای ۰/۴ تا ۰/۵ دمای ذوب ماده انجام می‌شود.

اصول علم مواد

2 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



بازیابی Recovery

- اگر بار به وجود آورنده تغییر شکل پلاستیک ماده بسپور حذف شود تغییر شکل کاملاً ناپدید نمی‌شود چون به سبب جهت‌گیری مختلف بلورها اگر بار رها شود بعضی از دانه‌ها نمی‌توانند به عقب برگردند (تنش داخلی).
- با افزایش دما اتم‌هایی که حرکت پلاستیک کرده‌اند برگشت فیزیکی انجام داده و تنش‌های داخلی آزاد می‌شود.
- در فرآیند بازیابی به دلیل بالا بودن دما، تحرک اتم‌ها و پدیده نفوذ افزایش یافته و در نتیجه نابجایی‌ها شروع به حرکت می‌کنند.
- در حین حرکت، نابجایی‌ها با علامت مخالف وقتی به همدیگر می‌رسند همدیگر را حذف کرده و به این ترتیب چگالی نابجایی‌ها کاهش می‌یابد.

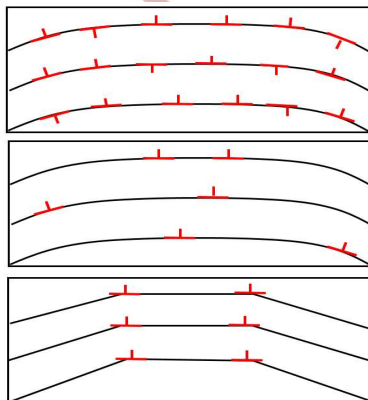
3

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



در فرآیند بازیابی توسط این مکانیسم چگالی نابجایی‌ها کاهش یافته و در انتهای فرآیند بازیابی، چگالی نابجایی‌ها به حداقل رسیده و آرایش جدیدی پیدا می‌کنند که به آن پدیده چندضلعی شدن گویند.

با کاهش چگالی نابجایی‌ها انرژی درونی ماده نیز کاهش می‌یابد. پس از فرآیند بازیابی خواص فیزیکی مانند هدایت الکتریکی که به عیوب نقطه‌ای حساس هستند و پس از کار سرد کاهش یافته بودند به حالت قبل از کار سرد برمی‌گردند اما خواص مکانیکی تغییر چندانی نمی‌یابند.



4

Material Science



تبلور مجدد Recrystallization

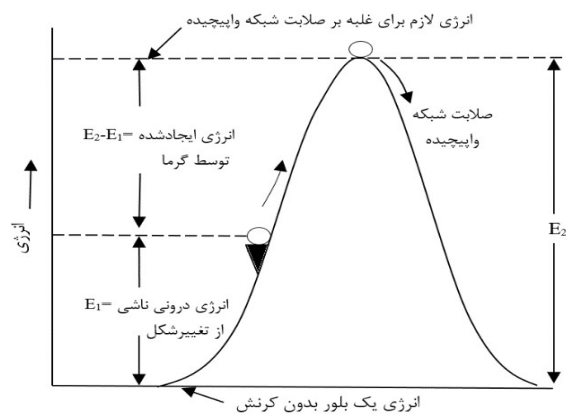
- صفحه‌های لغزش و مرز دانه‌ها نقاط تمرکز انرژی درونی بالا ناشی از تجمع نابجایی‌ها هستند.
- این نابجاییها و اتم‌ها به دلیل کرنش سختی ایجاد شده در شبکه واپیچیده شده (ساختار مملو از نابجایی) نمی‌توانند به عقب بازگردند و شبکه بدون کرنش ایجاد کنند.
- انرژی مرزدانه‌ها و صفحات لغزش به میزان E_1 می‌باشد که از انرژی اتم‌ها در ساختار تغییرشکل نیافته بیشتر است.
- انرژی لازم برای غلبه بر صلابت شبکه واپیچیده برابر E_2 است.

5

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



انرژی لازم برای ناپایدار کردن اتم‌ها و نابجایی‌ها برابر با $E_2 - E_1$ است که از طریق گرما دادن به ماده تامین می‌شود. وقتی انرژی در مرزدانه‌ها به E_2 رسید دانه‌های جدید عاری از کرنش در این مناطق جوانه می‌زند.



6

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

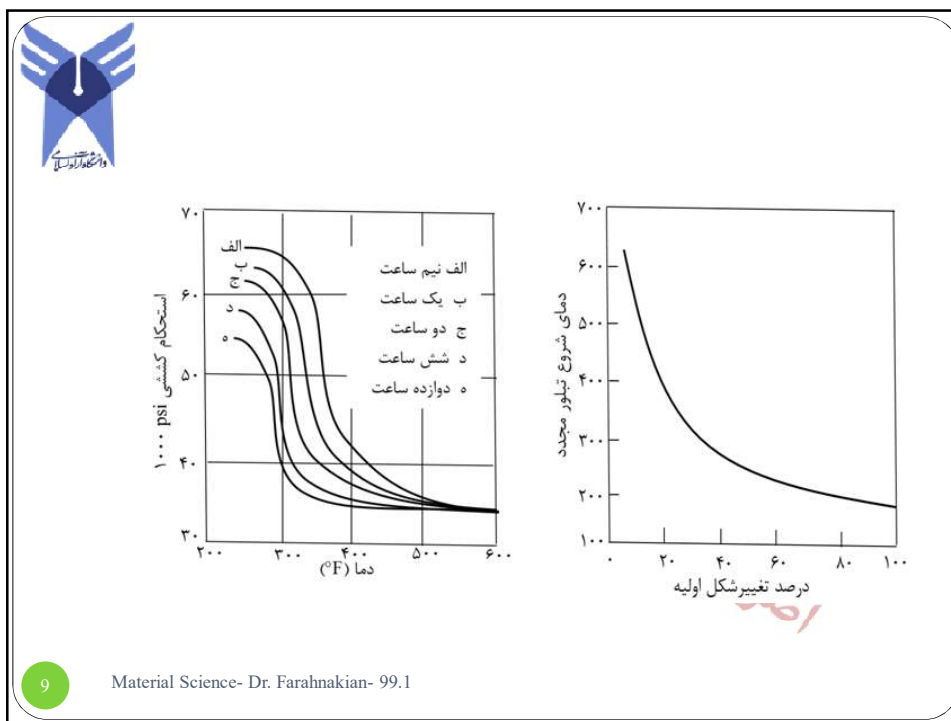
تبلور مجدد عبارت است از شکل‌گیری مجموعه جدیدی از دانه‌های منظم و عاری از انرژی کرنشی که داری کمترین چگالی نابجایی ممکن هستند. نیروی محرک برای تولید دانه‌های جدید تفاوت در انرژی درونی بین ماده کرنش یافته و کرنش نیافته است. دانه‌های جدید توسط جوانه‌های خیلی کوچک شکل گرفته و کم‌کم رشد کرده تا کامل شود.

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

دمای تبلور مجدد

- دمای تبلور مجدد، دمای تقریبی است که در آن ماده کار سرد یافته ظرف یک ساعت به‌طور کامل تبلور مجدد شود.
- هرچه مقدار تغییر شکل قبلی بیشتر باشد، دمای شروع تبلور مجدد پایین‌تر است، چون واپیچش و انرژی داخلی بیشتر است.
- با افزایش مدت زمان حرارت‌دهی (تاب‌کاری)، دمای تبلور مجدد کاهش می‌یابد. البته اثر دما نسبت به اثر زمان خیلی قوی‌تر است.
- با افزایش زمان و دمای عملیات حرارتی، استحکام کششی نمونه کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش و یا از بین رفتن کارسختی ماده پس از عملیات حرارتی می‌باشد.

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1




9

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

- برای مقادیر کار سرد یکسان، در فلز دانه ریز نسبت به فلز دانه درشت کرنش سختی بیشتری انجام می‌گیرد، پس دمای تبلور مجدد پایین‌تر است. برای تبلور مجدد مقدار کار سرد حداقلی (۲ تا ۸ درصد) نیاز است.
- فرآیند تبلور مجدد در فلزات خالص سریع‌تر از آلیاژها انجام می‌گیرد. در طول فرآیند تبلور مجدد مرز دانه‌های جدید شروع به حرکت کرده و باعث رشد دانه می‌شوند.
- اتم‌های ناخالص در آلیاژ مانع حرکت این مرز دانه‌ها شده و از رشد دانه جلوگیری می‌کنند، و در نتیجه نرخ تبلور مجدد را کاهش داده و باعث افزایش دمای تبلور مجدد می‌شوند.
- برای فلزات خالص دمای تبلور مجدد از 0.3 دمای ذوب شروع می‌شود، درحالی‌که برای آلیاژهای تجاری تبلور مجدد در دمای حدود 0.5 تا 0.6 دمای ذوب انجام می‌گیرد.

10

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



دمای خوب		دمای تبلور مجدد		فلزات
F°	C°	F°	C°	
۶۲۰	۳۲۷	۲۵	-۴	سرب
۴۵۰	۲۳۲	۲۵	-۴	قلع
۷۸۸	۴۲۰	۵۰	۱۰	روی
۱۲۲۰	۶۶۰	۱۷۶	۸۰	آلومینیوم (99.999wt%)
۱۹۸۵	۱۰۸۵	۲۵۰	۱۲۰	مس (99.999wt%)
۱۶۵۲	۹۰۰	۸۸۷	۴۷۵	برنج (60 Cu-40 Zn)
۲۶۵۱	۱۴۵۵	۷۰۰	۳۷۰	نیکل (99.99wt%)
۲۸۰۰	۱۵۳۸	۸۴۰	۴۵۴	آهن
۶۱۷۰	۳۴۱۰	۲۲۰۰	۱۲۰۰	تنگستن

11 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



رشد دانه Grain growth

- مرز دانه‌ها دارای انرژی خیلی بالاتری نسبت به درون دانه‌ها هستند. با رشد دانه مقدار مرزدانه‌ها کاهش یافته و در نتیجه انرژی درونی ماده نیز کاهش می‌یابد.
- با افزایش دما صلابت شبکه کاهش و آهنگ رشد دانه افزایش می‌یابد. در هر دمایی اندازه دانه بیشینه‌ای وجود دارد که به ازای آن دو اثر مذکور در تعادل هستند.
- رشد دانه با مهاجرت مرز دانه‌ها اتفاق می‌افتد. واضح است که همه دانه‌ها رشد نمی‌کنند بلکه آن‌هایی که بزرگ‌تر هستند به قیمت کوچک‌تر کردن دانه‌های کوچک، بزرگ می‌شوند.
- بنابراین متوسط اندازه دانه با افزایش زمان تبلور مجدد افزایش می‌یابد. حرکت مرزدانه‌ها تنها در اثر نفوذ دامنه کوتاه اتم‌ها از یک طرف مرز به طرف دیگر مرز اتفاق می‌افتد.

12 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



عوامل مؤثر بر اندازه دانه

- آنیل با جوانه زایی و رشد دانه توأم است. پس هر عاملی که جوانه زایی را تسریع و رشد را آهسته کند، باعث ریزدانه شدن می‌شود و برعکس.
- مقدار تغییر شکل قبلی مهم‌ترین عامل در اندازه دانه تبلور مجدد یافته است. افزایش تغییر شکل اولیه (قبلی) باعث کاهش اندازه نهایی می‌شود.
- برای شروع تبلور مجدد، مقداری کارسرد بحرانی لازم است. پس از این مقدار کار سرد بحرانی، با افزایش کار سرد اندازه دانه کاهش یافته است. در تغییر شکل بحرانی، به علت کاهش انرژی برای تشکیل جوانه‌ها، دانه‌ها بسیار کم بوده و بزرگ می‌شوند.
- حتی می‌توان با دقت در اعمال مقدار بحرانی کار سرد، تک‌بلور ایجاد کرد (روش کرنش تاب‌کاری).

13

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



عوامل مؤثر بر اندازه دانه

- مدت نگهداری در دمای تبلور مجدد، افزایش زمان و مدت نگهداری باعث رشد دانه‌ها شده و اندازه دانه نهایی بیشتر می‌شود.
- دمای تاب‌کاری: هرچه اختلاف دمای آنیل و دمای تبلور مجدد کمتر باشد، اندازه دانه ریزتر خواهد بود.
- مدت گرمایش: هر چه مدت گرمایش تا رسیدن به دمای تاب‌کاری کمتر باشد فلز دانه‌ریزتر می‌شود. نرخ آهسته گرم کردن باعث تشکیل جوانه کمتر و رشد بیشتر می‌شود و دانه درشت می‌شود.
- ناخالصی‌های غیر محلول: هرچه قدر ناخالصی‌ها بیشتر باشد، جوانه زایی افزایش می‌یابد. ناخالصی‌ها همچنین مانند سدی برای رشد دانه‌ها عمل می‌کنند.

14

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

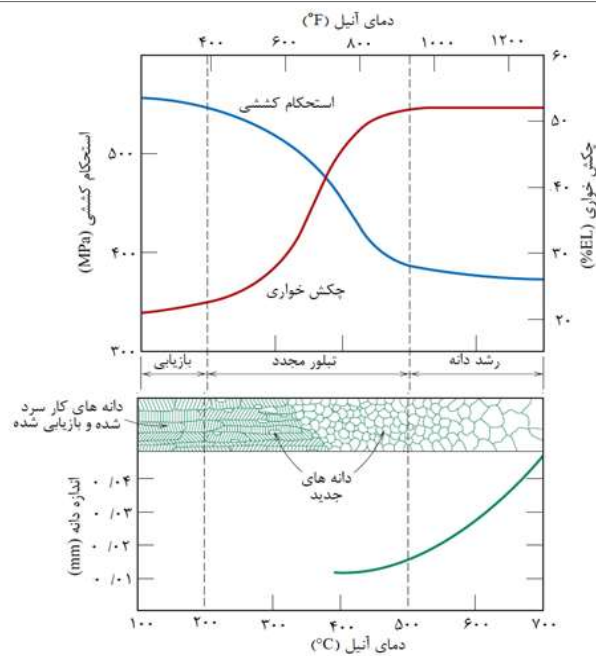


اثر کار سرد و کار گرم بر خواص ماده

- پس از انجام فرآیند تبلور مجدد، خواص مکانیکی که در اثر کار سرد تغییر کرده‌اند، به حالت قبل از کار سرد برمی‌گردند که در نتیجه آن فلز نرم‌تر و چکش‌خوارتر می‌شود.
- پیشرفت فرآیند تبلور مجدد بستگی به دما و زمان دارد. درجه تبلور مجدد با افزایش زمان افزایش می‌یابد.
- افزایش دمای آنیل باعث کاهش استحکام کششی و افزایش چکش‌خواری و اندازه دانه شده است.

15

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



16

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



کار سرد و کار گرم

- اگر دمای تغییر شکل زیر دمای تبلور مجدد باشد (معمولاً دمای محیط) آن را کار سرد گویند و اگر تغییر شکل در دمای تبلور مجدد و بالاتر از آن انجام گیرد آن را کار گرم گویند.
- معمولاً کار سرد در دمای محیط و بدون گرم کردن انجام می‌گیرد.
- فرآیند تبلور مجدد سرب، قلع و روی در دمای محیط و پایینتر از آن انجام می‌گیرد و در مقابل برای مولیبدن در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد است.
- در قبل گفته شد کار سرد باعث ایجاد کار سختی و افزایش استحکام ماده می‌شود و به همین دلیل ایجاد تغییر شکل‌های بالا در حالت سرد بسیار مشکل است
- اگر تغییر شکل در دمای تبلور مجدد انجام گیرد به دلیل فرآیند بازیابی و تبلور مجدد چگالی نابجایی‌ها کاهش یافته و کارسختی درون ماده از بین می‌رود و در نتیجه ایجاد تغییر شکل‌های بالا با نیروی نسبتاً کم امکان‌پذیر است.

17

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



- در کار گرم، ایجاد تغییر شکل در ماده باعث افزایش چگالی نابجایی و کارسختی می‌شود
- اما به دلیل بالا بودن دما و وجود فرآیند بازیابی و تبلور مجدد این کارسختی همزمان از بین رفته و چگالی نابجایی کاهش می‌یابد.
- در واقع در کار گرم نرخ تولید کارسختی و نرخ از بین رفتن آن باهم در تعادل هستند.
- به همین دلیل برای ایجاد تغییر شکل‌های بالا در فرآیندهای شکل‌دهی مانند نورد، اکستروژن و فورج باید ابتدا روی آن‌ها کار گرم انجام داد.
- کار گرم دارای معایبی است که از مهم‌ترین آن‌ها سرعت بالای نفوذ اتم‌ها و همچنین سرعت بالای اکسیداسیون فلز است.
- از طرف دیگر به دلیل بالا بودن تغییر شکل، دقت ابعادی مناسب نیست.

18

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



- پایین بودن دقت ابعادی و مناسب نبودن کیفیت سطح فلز در کار گرم از معایب مهم کار گرم است.
- عیب مهم دیگر کار گرم این است که به دلیل عدم وجود کارسختی، فلز تغییر شکل یافته دارای استحکام مناسب نیست.
- برای غلبه بر این معایب این راهکار پیشنهاد می‌شود که ابتدا تغییر شکل‌های بالا توسط کار گرم انجام شده و پس از انجام کار گرم، روی نمونه کار سرد انجام شود.
- با انجام کار سرد روی نمونه پس از کار گرم، دقت ابعادی و کیفیت سطح نمونه بهبود یافته و خواص مکانیکی آن مانند استحکام افزایش می‌یابد.
- البته کار سرد نیز دارای معایبی است که مهم‌ترین آن بالا بودن نیروی تغییر شکل است و اینکه به پرس‌های با تناژ بالا نیاز است.

19

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

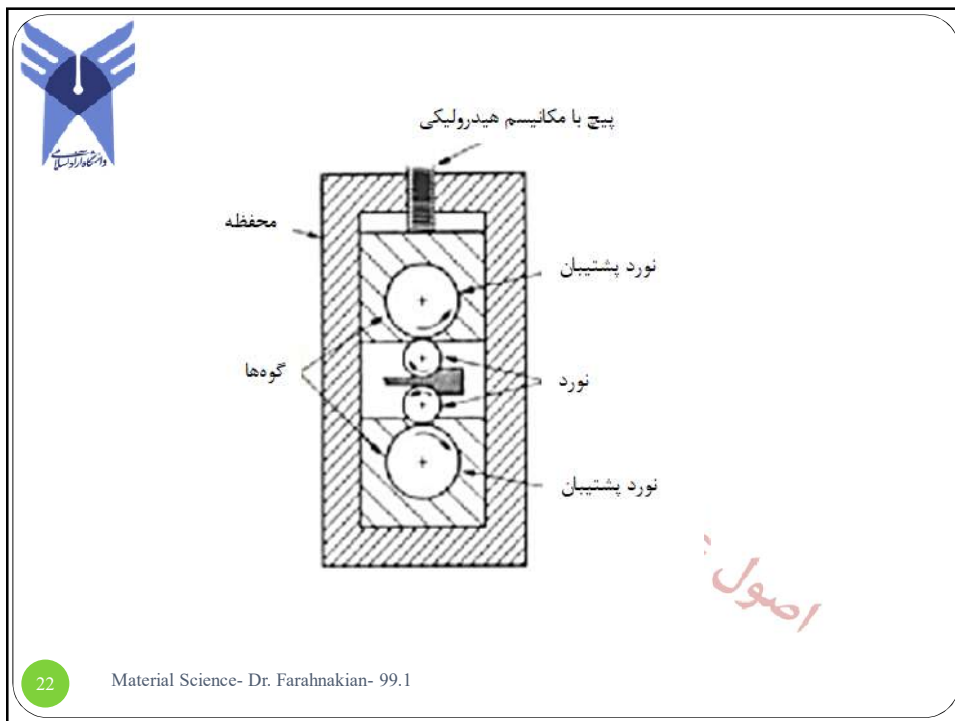
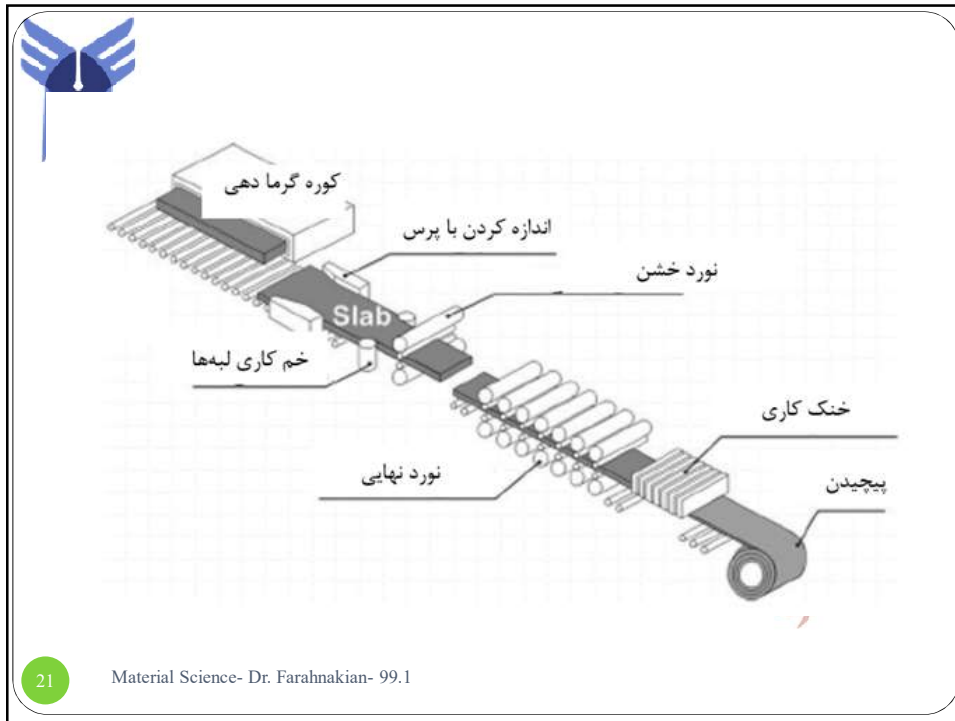


فرآیندهای شکل‌دهی فلزات

- **نورد Rolling**
- فرآیند نورد یکی از مهم‌ترین فرآیندهای شکل‌دهی بوده و از آن برای کاهش ضخامت شمش اولیه به منظور تولید ورق یا شکل‌های دیگر استفاده می‌شود.
- در فرآیند نورد، شمش یا تختال از بین غلتک‌های در حال دوران عبور کرده و تغییر شکل می‌یابد.
- ماده اولیه خط به صورت شمش یا تختال است. در این شکل ماده اولیه به صورت تختال با ضخامتی در حد چند ده سانتیمتر وارد خطنورد می‌شود.
- برای ایجاد تغییر شکل‌های بالا در ابتدا کار گرم انجام شده و در نهایت کار سرد روی نمونه انجام می‌شود.

20

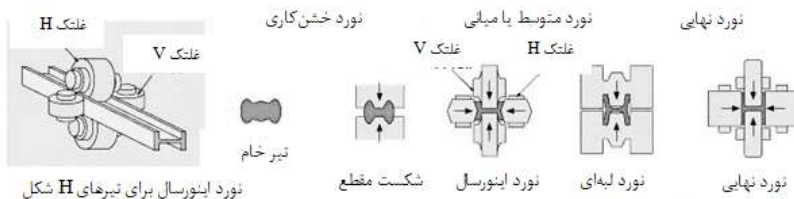
Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1





نورد پروفیل‌ها

- یکی از کاربردهای فرآیند نورد، نورد پروفیل‌هایی مانند تیر آهن و ریل است. در این نوع نورد، ابتدا در نورد گرم شکل پروفیل از شمش اولیه تولید شده و سپس در فرآیند نورد سرد طی چندین مرحله، شکل دقیق پروفیل با استحکام مناسب تولید می‌شود.



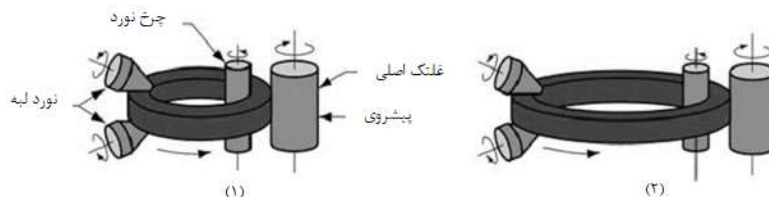
23

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



نورد حلقه (رینگ)

- از این روش برای کاهش ضخامت رینگ استفاده می‌شود. در این روش حلقه یا رینگ بین دو غلتک داخلی و خارجی قرار می‌گیرد. غلتک‌ها شروع به دوران کرده و به حلقه فشار وارد می‌کنند. این کار باعث می‌شود ضخامت حلقه کاهش یافته و بر قطر آن افزوده شود.



24

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

اکستروژن Extrusion

- اکستروژن فرآیندی است که در آن یک شمش یا بیلت فلزی تحت فشار از درون قالبی با شکل خاص و سطح مقطع ثابت عبور داده شده و شکل قالب را به خود می گیرد.

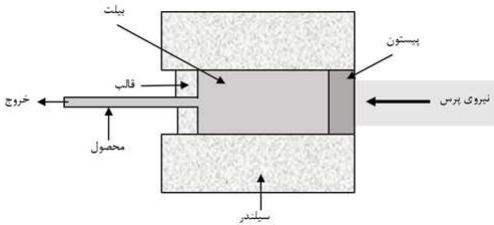


25

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

اکستروژن مستقیم

- در فرآیند اکستروژن مستقیم جهت حرکت پیستون و سیلان ماده هم جهت است



26

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

اکستروژن غیرمستقیم:

- در فرآیند اکستروژن غیرمستقیم جهت حرکت پیستون و سیلان ماده خلاف جهت هم است.

فدحناکیان



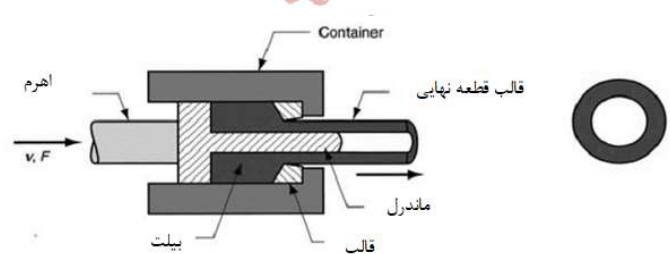
اصول ۱

27 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

اکستروژن لوله

- از فرآیند اکستروژن برای تولید لوله‌های توخالی نیز استفاده می‌شود که بیشتر از جنس آلومینیوم و مس و آلیاژهای آنها است. مزیت لوله‌هایی که به این روش تولید می‌شود یکی عدم وجود درز در لوله بوده و دوم به دلیل کارسختی که حین فرآیند شکل‌دهی ایجاد می‌شود

فدحناکیان



28 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



آهنگری (فورجینگ)

- آهنگری یا فورج یک فرآیند شکل‌دهی فشاری برای ایجاد شکل‌های متنوع در قطعه فلزی توسط چکش است.
- در این عملیات پتک یا چکش توسط پرس روی شمش اولیه کوبیده شده تا شکل موردنظر به دست آید.
- قطعاتی که به روش آهنگری تهیه می‌شوند، به دلیل اینکه دارای ساختار کاملاً ریزدانه هستند دارای چقرمگی و استحکام بسیار بالایی هستند.
- آهنگری به دودسته کلی تقسیم‌بندی می‌شود که عبارت‌اند از:

۱- آهنگری قالب باز

۲- آهنگری قالب بسته

29

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



اصول

30

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

