به نام خدا

# مرکز دانلود رایگان
# مهندسی متالورژی و مواد

---

www.Iran-mavad.com

دانشگاه علم و صنعت ایران

**مقدمات و روش‌های تولید**

# میـــــل لنـــگ

# Crankshaft

Introduction & Manufacturing methods

تهیه و تنظیم:

محسن آزاده- نیما بابایی- اشکان سزا- محسن محوی- محمدحسین یاری

www.Iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

# فهرست مطالب


بخش اول: معرفی میل لنگ ..... ۲
میل‌لنگ چیست؟ ..... ۲
ساختمان میل‌لنگ ..... ۳
عملکرد میل‌لنگ ..... ۴
انواع میل‌لنگ‌ها ..... ۵
روغن‌کاری میل‌لنگ ..... ۵
لنگ گیری میل‌لنگ ..... ۵
ارتعاش‌گیر یا ضربه‌گیر میل‌لنگ ..... ۶
بخش دوم: تحلیل نیروهای وارد بر میل‌لنگ ..... ۸
بخش سوم: روش‌های تولید میل‌لنگ ..... ۱۲
فورجینگ ..... ۱۲
ریخته گری ..... ۱۹
ریخته گری با ماسه‌ی تر ..... ۱۹
ریخته گری پوسته‌ای ..... ۲۴
ریخته گری با فوم از بین رونده ..... ۲۹
بیلت (ماشین کاری) ..... ۳۲
بخش چهارم: مقایسه‌ی روش‌های تولید ..... ۳۵
بخش پنجم: آلیاژهای تولید میل‌لنگ ..... ۴۰
فولاد منگنز- مولیبدن ..... ۴۱
فولاد کروم (۱٪)- مولیبدن ..... ۴۱
فولاد نیکل (۲.۵٪)- کروم- مولیبدن ..... ۴۱
فولاد کروم (۳٪)- مولیبدن ..... ۴۱
چدن‌های گره دار (نودولار) ..... ۴۲


www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

# بخش اول

# معرفی میل لنگ

## ۱-۱ میل لنگ (Crankshaft) چیست؟

میل لنگ دارای شکل فضایی خاصی است که با توجه به تعداد لنگ‌هایش با یکدیگر تفاوت می‌کنند. ساده‌ترین میل‌لنگ ، میل‌لنگ یک موتور تک سیلندر است. که دارای یک لنگ در وسط و دو تکیه گاه در طرفین است.

### ریشه لغوی

میل لنگ یک کلمه فارسی است و بیانگر میله‌ای است که از حالت ضخیم خارج شده است. معنای کاربردی میل لنگ عبارتست از یکی از قطعات موتور که باعث می شود قدرت چرخشی تولید شود.

برای آنکه تصوری از شکل فضایی میل لنگ داشته باشید. یک فیلتر دستی را تصور کنید. که قسمت دستگیره آن همان لنگ و طرفین آن (که در یک راستا قرار داند) تکیه گاههای میل لنگ می‌باشند. تعداد لنگ‌های میل لنگ متناسب با تعداد سیلندرهای یک موتور است. بدین شکل که پیستون قرار گرفته در داخل هر سیلندر به یکی از لنگهای میل لنگ متصل می‌گردد. البته این حالت در موتورهای پیستونی که سیلندرهای آنها به شکل ردیفی قرار گرفته‌اند صادق است.

در موتورهای پیستونی V شکل (موتورهای خورجینی) تعداد لنگ‌های میل لنگ معمولا ۱/۲ تعداد سیلندرهای موتور است. و به هر لنگ دو پیستون متصل می‌گردد. هدف از استفاده از میل لنگ در موتور اینست که حرکت دورانی تولید گردد. برای مثال همان فیلتر دستی را در نظر بگیرید. در حالیکه که دستگیره فیلتر با استفاده از دست چرخانده می‌شود. در این حالت دستگیره یک مسیر دایره‌ای شکل طی می‌کند. در حالیکه نوک متر در سر جایش در محل ایجاد سوراخ باقی مانده است و تنها در آنجا چرخش می‌کند (دستگیره بر روی محیط دایره سیر می‌کند و نوک متر در مرکز دایره قرار دارد.).

در موتورهای پیستونی می‌توان نیروی پیستون را به نیروی دست تشبیه کرد که باعث به حرکت در آوردن قسمت لنگ می‌شود (البته اینکار به کمک شاتون انجام می‌پذیرد). هر چند که حرکت پیستون به شکل رفت و برگشتی است، لیکن به علت چرخش قسمت لنگ در میان سر بزرگ شاتون این حرکت به شکل چرخشی در می‌آید و در نهایت ما چرخش مطلوب خوبی را از سر میل لنگ می‌گیریم که می‌توان آنرا به نوک فیلتر تشبیه کرد.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

## ۲-۱ ساختمان میل لنگ

اجزای میل لنگ از محورهای اصلی ، لنگ‌ها یا محورهای اصلی لنگ ، بازوهای لنگ ، و وزنه‌های تعادل تشکیل شده است.

### لنگ‌ها

لنگ‌ها قسمت‌هایی از میل لنگ می‌باشند که بر روی خط محور اصلی میل لنگ قرار نگرفته‌اند (مثل دستگیره چتر) و انتهای بزگ شاتون به آنها متصل م ی‌گردد. تعداد لنگ‌ها در موتورها ی ردیفی برابر با تعداد سیلندرهای و در موتورهای V شکل نصف تعداد سیلندرها است.

### محورهای اصلی

محورهایی از میل لنگ می‌باشد که با خط محور ی اصلی میل لنگ هم مرکز می‌باشند این محورها در محفظه میل لنگ درون یا تاقانون‌های ثابت قرار گرفته و با اتکا به آنها می‌چرخند هر یاتاقان ثابت از دو نیمه یا تاقان تشکیل شده است. که نیمه بالایی آن که نیمه ثابت نامیده می‌شود. با بدنه موتور و در محفظه م یل لنگ بصورت یکپارچه ریخته گری شده است و نیمه پایینی بوسیله دو عدد پیچ و مهره در نیمه بالایی متصل می‌گردد. غالبا تعداد محورها ی اصلی میل لنگ در موتورها ی مختلف (حتی با تعداد سیلندرهای برابر) فرق می‌کند.

### بازوهای لنگ

قسمت‌هایی از میل لنگ می‌باشند که محورهای اصلی میل لنگ را به لنگ‌ها وصل می‌کنند البته بازوهای لنگ با وزنه‌های تعادل (که در پی خواهد آمد) بصورت یکپارچه هستند.

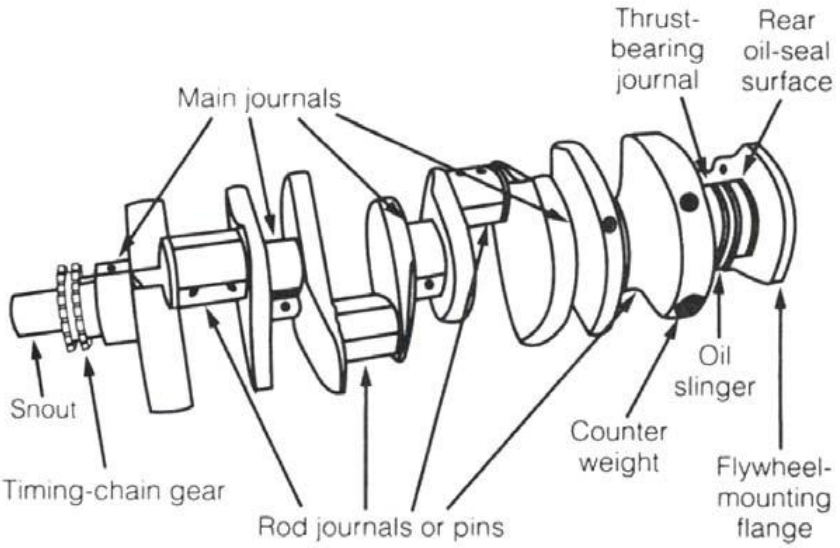
### وزنه‌های تعادل

در وزنه‌های تعادل به منظور ایجاد تعادل در برابر نیروهای پیستون و شاتون استفاده می‌شود وزنه‌های تعادل در مقابل لنگ‌ها قرار می‌گیرند.

### سایر متعلقات

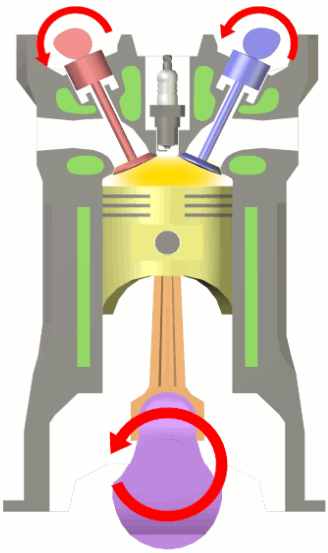
به قسمت جلو میل لنگ چرخ دنده‌ای متصل است که معمولا چرخ دنده ، م یل بادامک و یا سایر چرخ دنده‌های مورد لزوم را به حرکت در می‌آورد. در جلو این چرخ دنده یک پولی قرار می‌گیرد که برای به حرکت در آوردن ژنراتور (یا آلترناتور) و پمپ آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. و در انتهای پشتی میل لنگ صفحه‌ای وجود دارد که فلایویل را بوسیله پیچ بر روی آن نصب می‌کنند.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد




## ۳-۱ عملکرد میل لنگ

میل لنگ یک قطعه بزرگ در موتور ماشین است که وظیفه تبدیل حرکت کشویی پیستون و تبدیل آن به حرکت دورانی را دارد. زیرا حرکت رفت و برگشتی پیستون نمی‌تواند کاربردی باشد ولی حرکت دورانی قابلیت ورود به دیگر اجزای ماشین را دارد. از آنجا که حرکت پیستون ناشی از احتراق است به صورت یکنواخت نیست و ایجاد شک یا ضربه می کند، اگر این حرکت به همین شکل وارد دیگر سیستمها شود باعث صدمه به آنها می شود. بنابر این وظیفه میل لنگ تبدیل حرکت غیریکنواخت و خطی پیستون به حرکت دورانی و یکنواخت می‌باشد.



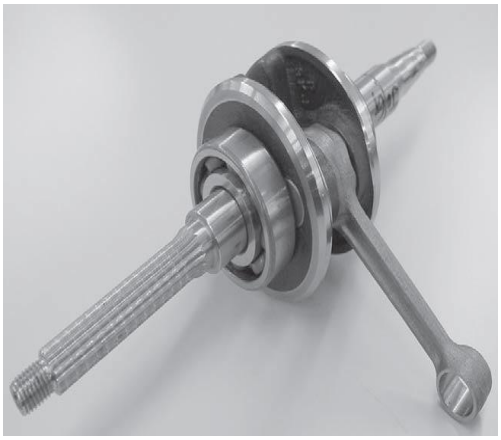
www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

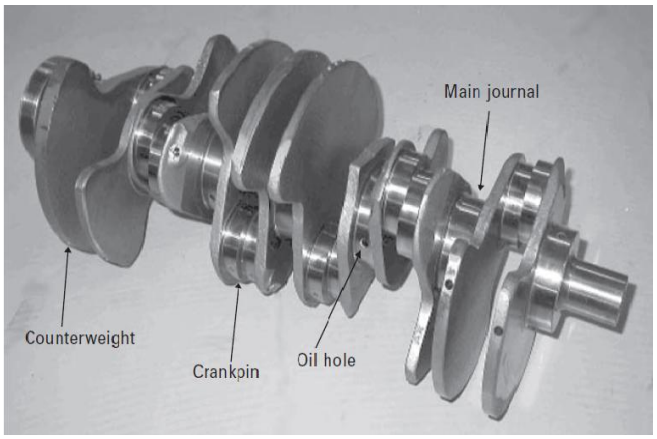
## ۱-۴ انواع میل لنگ ها

میل لنگها بر دو نوع هستند:

۱- میل لنگهای یک پارچه برای موتورهای چهارزمانه (Monolithic)

۲- میل لنگهای سر هم شده برای موتورهای دوزمانه (Assembled)






## ۱-۵ روغن کاری میل لنگ

میل لنگ دارای مجاری روغن بوده این مجاری تکیه گاههای ثابت میل لنگ به طور مستقیم با مجاری بلوک تماس داشته و بوسیله مجاری مورب مجاری ثابت به لنگ های متحرک وصل می شود روغن از لنگ های ثابت به لنگهای متحرک و از انجا از سوراخ شاتون دیواره سیلندر و بوش گژن پین را روغن کاری می نماید سپس بوسیله رینگ روغن از جداره سیلندر جمع اوری و به کارتر برگردانده می شود.

## ۱-۶ لنگ گیری میل لنگ

بالانس کردن میل لنگ برای متعادل ساختن میل لنگ در مقابل هر لنگ وزنه ای به میل لنگ اضافه می شود و میل لنگ با نهایت دقت بلید متعادل گردد چون نیروهای نامتعادل سبب لرزش و فشارهای زیاد روی یاتاقانهای ثابت میل لنگ شده و باعث خمیدگی یا پیچیدگی میل لنگ می‌گردد برای جلوگیری از این وضع بایستی میل لنگ به طور استاتیکی و دینامیکی بالانس شود.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

## ۷- ۱ ارتعاش گیر یا ضربه‌گیر میل لنگ

میل لنگ در معرض نیروهای مختلف و متناوب قرار دارد و در آن ارتعاشات پیچشی به وجود می آید. ارتعاشات متناوب، باعث تاب برداشتن میل لنگ می شود. پیچش ناموزون در جلوی میل لنگ، در سرعت معینی اتفاق می افتد. مثلاً ممکن است در دورهای۱۲۰۰، ۱۶۰۰ یا ۲۴۰۰ دور در دقیقه به حداکثر برسد. شدت ارتعاشات در دورهای بین ۱۲۰۰ تا ۱۶۰۰ دور در دقیقه است و نیز در فاصله بین ۱۶۰۰ تا ۲۴۰۰ ارتعاشات میل لنگ تشدید می‌گردد.

ارتعاشات میل لنگ را به وسیله ارتعاش گیر کاهش می دهند. ارتعاش‌گیر، از یک فلایول کوچک که در جلوی میل لنگ به وسیله بوش‌های لاستیکی و صفحه اصطکاکی به پولی یا چرخ دنده اتصال دارد، تشکیل شده است و همراه آن می‌گردد.

فلایوگیر، مانند فلایول انتهای میل لنگ در موقع ازدیاد ناگهانی سرعت، مقداری از انرژی را جذب نموده، در موقع کاهش دور، انرژی خود را به میل لنگ تحویل می دهد. در جلوی میل لنگ عواملی مانند دینام، واتر پمپ پروانه و غیر قرار دارد که همواره به نگه داشتن جلوی میل لنگ تمایل دارند . بنابراین برای حذف تأثیرات عوامل کاهنده سرعت، ارتعاش گیر کمک چشم‌گیری در کار میل لنگ می‌کند.

دو نوع ارتعاش گیر برای میل لنگ طراحی شده است، که به شرح زیرند:

۱- ارتعاش‌گیر هیدرولیکی

۲- ارتعاش‌گیر وزنه‌ای

### ۱-۷-۱ ارتعاش‌گیر هیدرولیکی

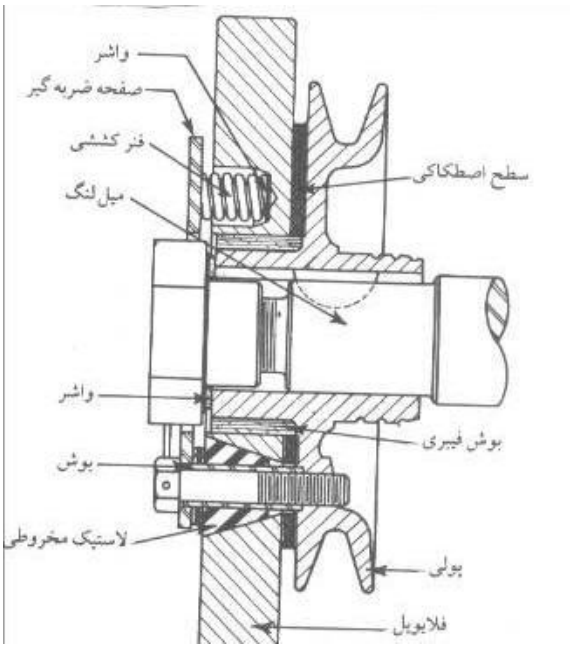
این ارتعاش براساس اینرسی فلایولی که در محفظه ی روغن شناور است، کار می کند. پوسته یا محفظه ی روغن به دنده سر میل لنگ بسته شده، همراه آن گردش می کند. فلایول داخل روغن بر اثر نیروی اصطکاک روغن، دیرتر از میل لنگ، انرژی اخذ می کند. همچنین دیرتر از حرکت باز می‌ایستد و لذا ارتعاش میل لنگ را خنثی می‌کند.

### ۱-۷-۲ ارتعاش‌گیر وزنه‌ای

به پولی میل لنگ متصل می باشند. در شکل سمت چپ، بوش لاستیکی بزرگی در چند موضع روی فلایول بسته می شود که از وسط لاستیک آن پیچ‌های اتصال دهنده عبور کرده، فلایول ارتعاش گیر را به پولی متصل می سازد. در شکل وسط، فلایول یک دیسک فولادی بزرگی است که به وسیله لاستیک‌های وسط از میل لنگ نیرو گرفته یا به آن نیرو وارد می‌کند.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

در شکل فلایول به وسیله یک فلانچ لاستیکی و یک درپوش به سر میل لنگ بسته می شود. فلانچ لاستیکی مانند بوش های لاستیکی در دو نوع دیگر عمل می‌کند.




**تصاویر و فیلم های مرتبط با میل لنگ/ فیلم‌ها/ روند تولید میل لنگ و لنگ گیری**

**تصاویر و فیلم های مرتبط با میل لنگ/ فیلم‌ها/ لنگ گیری و بالانس میل لنگ**

**تصاویر و فیلم های مرتبط با میل لنگ/ فیلم‌ها/ لنگ گیری و بالانس میل لنگ (۲)**

# بخش دوم

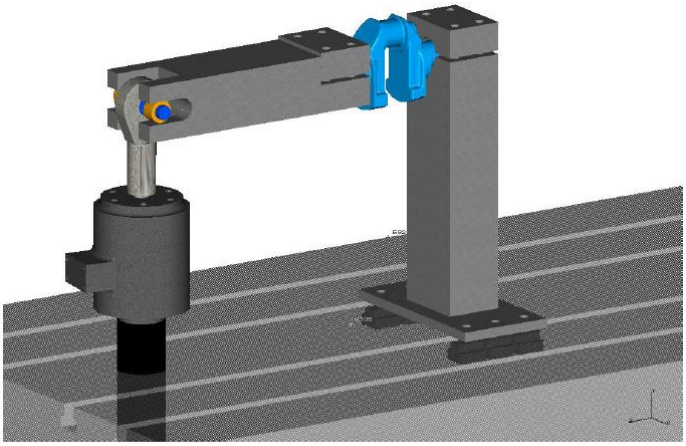
# تحلیل نیروهای وارد بر میل‌لنگ

آشکار ترین منبع تامین کننده نیرو بر روی میل لنگ  نیروی حاصل از احتراق درون محفظه  میباشد که با فشاری که به بالای پیستون وارد میکند تولید میشود.

اما نیروی اصلی دیگری نیز به میل لنگ وارد میشود که معروف به شتاب پیستون است.

## آزمایش فشار بر روی میل لنگ

در دو تصویر زیر انجام آزمایش فشار بر روی میل لنگ را به صورت واقعی  و شماتیک مشاهده می‌کنید.



(a) Schematic of test set-up.

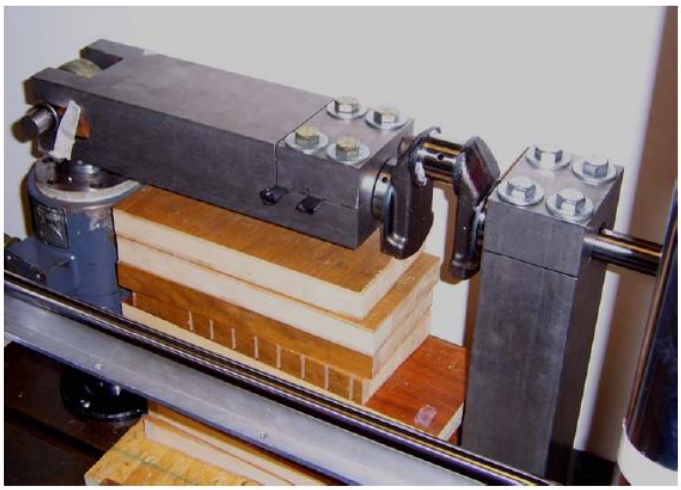
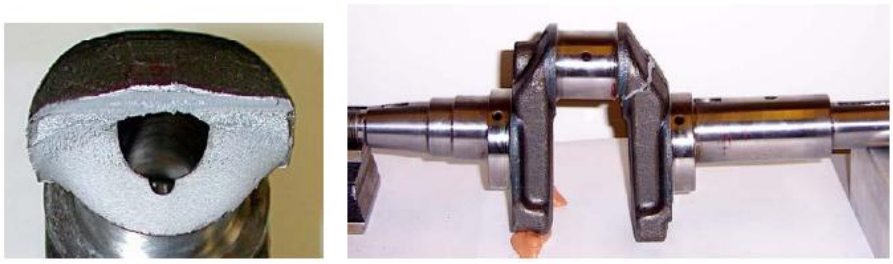


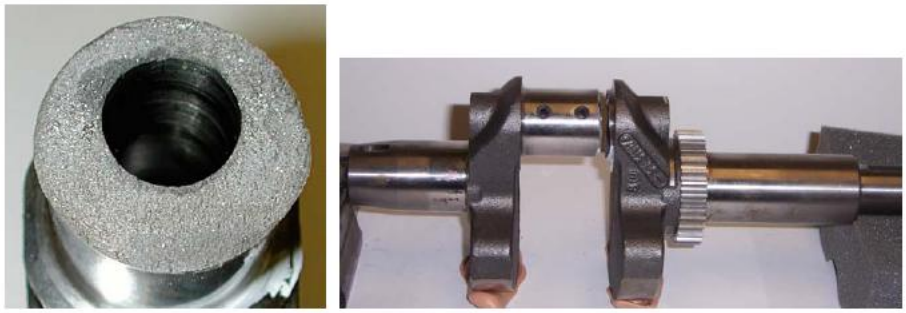
**Figure 7** Test set-up for the crankshaft. (a) Schematic, and (b) Forged steel crankshaft

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

با انجام آزمایش بالا بر روی میل لنگ تولید شده به روش فورج و میل لنگ تولید شده به روش ریخته گری ، نتایج زیر حاصل می‌شود.



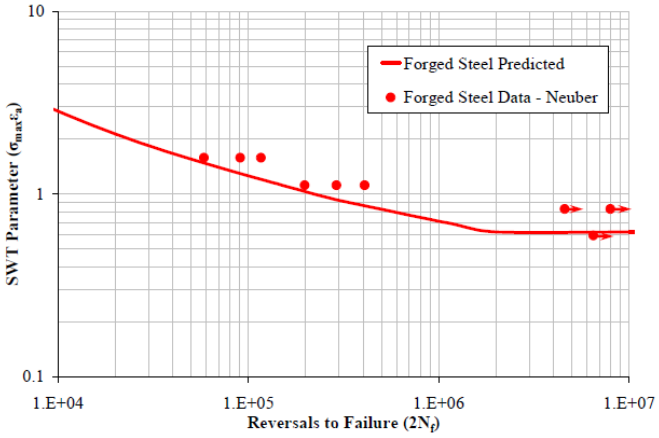
(a) Forged steel crankshaft



(b) Cast iron crankshaft

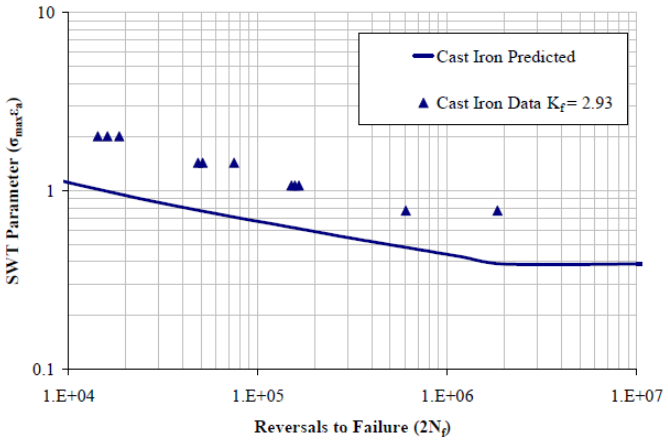
**Figure 9** Typical fatigue fractures of the crankshafts.

نتایج حاصل از آزمایش فشار ، بر روی میل لنگ ریختگی و فورج، در نمودارهای زیر قابل مشاهده است.



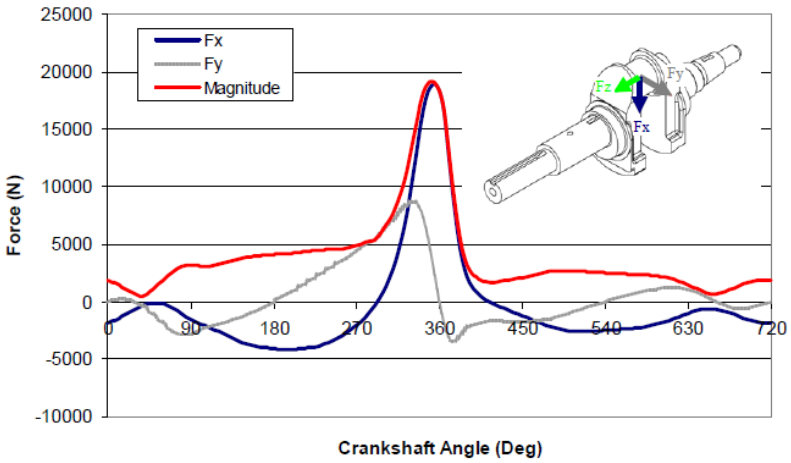

(a) Forged steel crankshaft

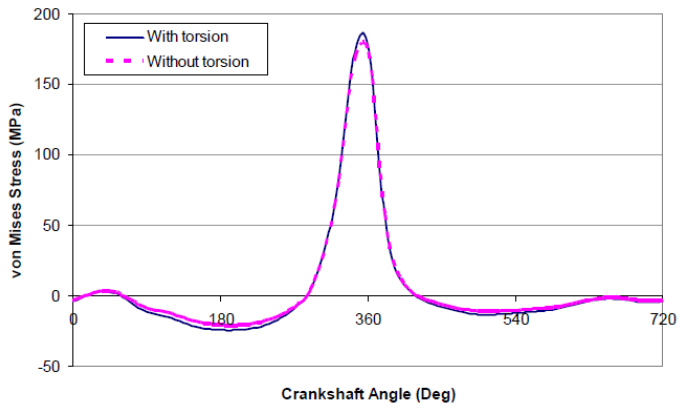
www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد




(b) Cast iron crankshaft

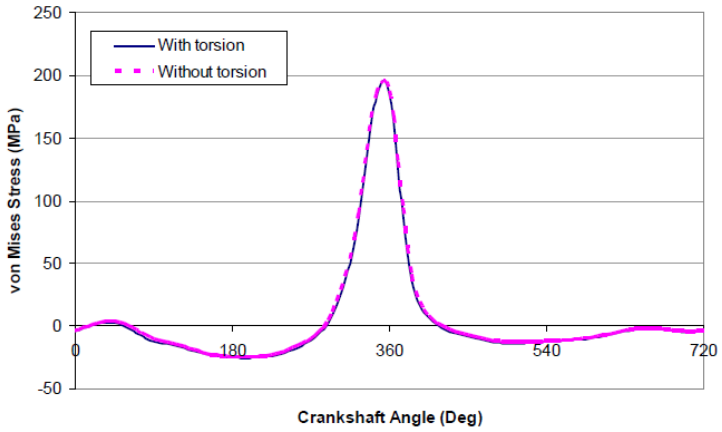
یکی دیگر از بحث‌های مربوط به تحلیل نیروهای وارد بر میل لنگ، تحلیل و بررسی نیروها با توجه به زوایای میل‌لنگ است. به همین منظور در سه نمودار پیش رو این موضوع را مورد بررسی قرار داده‌ایم.



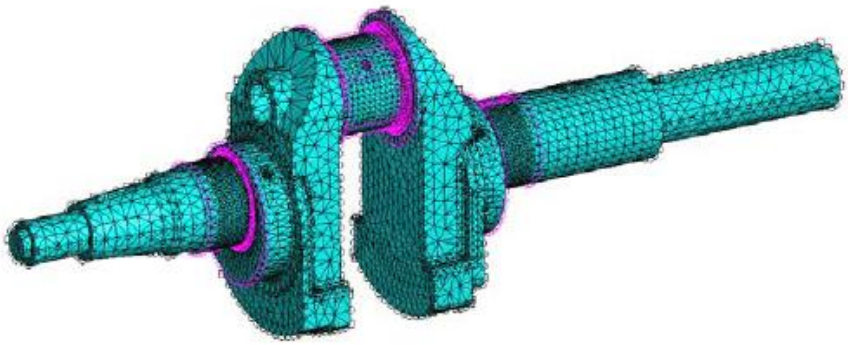

(a) Forged steel crankshaft

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

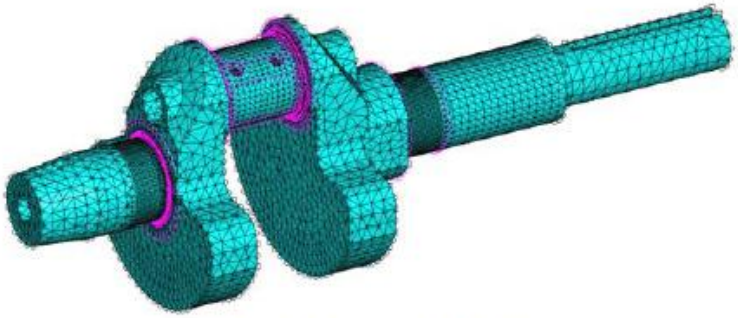



(b) Cast iron crankshaft

در پایان این بخش نیز، تمرکز تنش در دو میل لنگ فورج و ریخته‌گری را به شکل مدل سازی شده مشاهده می‌کنیم.



(b) Forged steel crankshaft



© Cast iron crankshaft

* مناطق مشخص شده با رنگ بنفش، بیشترین میزان تنش را تحمل می‌کنند.

**تصاویر و فیلم های مرتبط با میل لنگ/ فیلم‌ها/ تحلیل نیروهای وارد بر میل لنگ (شماتیک)**

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

# بخش سوم

# روش‌های تولید میل‌لنگ

از زمان ساخت اولین میل لنگ تا کنون، شاهد تغییراتی در روش های تولید آن و استفاده از آلیاژ های مختلف برای تولید این قطعه بوده‌ایم. تمامی این تغییرات در روش‌های تولید در جهت بهبود خواص میل‌لنگ، صرفه‌ی اقتصادی و همچنین استفاده از میل لنگ برای کاربردهای مختلف بوده است.

اما هم اکنون به طور عمده، ۳ روش برای تولید میل لنگ بیان می شود که در هر کدام از این موارد ازآلیاژهای ویژه ای هم استفاده می‌شود که در بخش بعدی به طور مفصل به این موضوع پرداخته می‌شود. باید توجه داشت که هر کدام از این روهای تولید، مزایا و معایب خاص خود را دارند. این روش‌ها عبارتند از:

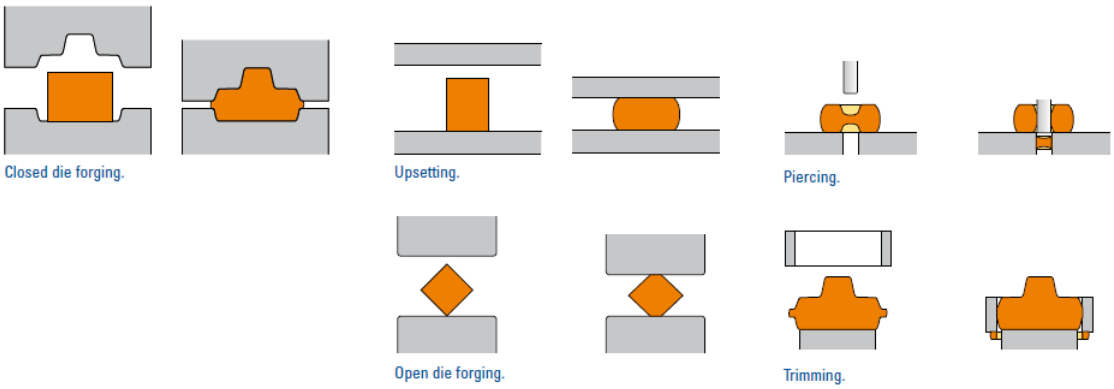
۱- روش فورجینگ

۲- روش ریخته‌گری

۳- روش بیلت (ماشین کاری)

## ۳-۱ فورجینگ

فورجینگ یکی از روشه‌ای شکل دهی فلزات بر پایه تغییر فرم پلاستیک است . شکل زیر نشان دهنده برخی فرآیندهای شکل دهی فلزات است.




www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

همچون دیگر روشهای شکل‌دهی فلزات، فرآیند فورجینگ از نظر دمای انجام شدن به شکل‌های زیر انجام می‌گیرد:

۱- cold forging

۲- semi hot forgigng

۳- hot forging

## Cold Forging

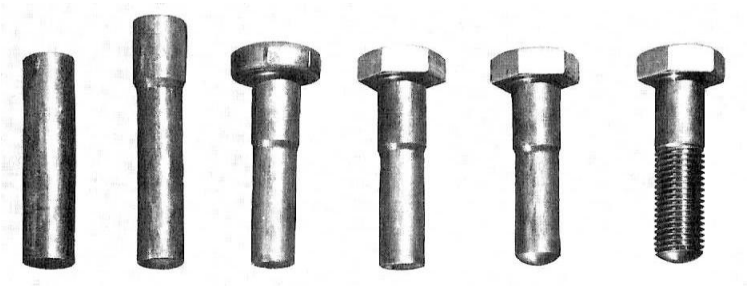
تغییر فرم پلاستیک در دماهای پایین تر از نقطه تبلور مجدد انجام می شود و با افزایش چگالی نابجایی ها به کارسختی منجر خواهدشد.

هنگامی که حین تغییرفرم ضخامت قطعه کم باشد، برای جلوگیری از گسیختگی از این روش استفاده می‌شود.

به علت رخ دادن کارسختی استحکام بالاتری نسبت به روش Hot Forging بدست می‌آید.

قطعات تولید شده با روش Cold Forging دارای صافی سطح بهتری نسبت به روش Hot Forging هستند و به علت انجام شدن در دماهای پایین خطر اکسیداسیون نیز کمتر است. به علاوه در این روش هزینه گرم کردن و سپس سرد کردن قطعه کلهش می‌یابد.

از جمله قطعات تولید شده با این روش می توان به تولید پیچ اشاره کرد که برای ایجاد قسمت ۶ ضلعی آن از این روش استفاده می‌شود.



## Semi-hot or warm forging

در این گونه تغییر فرم دما کمتر از نقطه تبلور مجدد است اما به نسبت نوع اول دما بالاتر خواهد بود و تنش لازم برای شروع سیلان کاهش خواهد یافت.

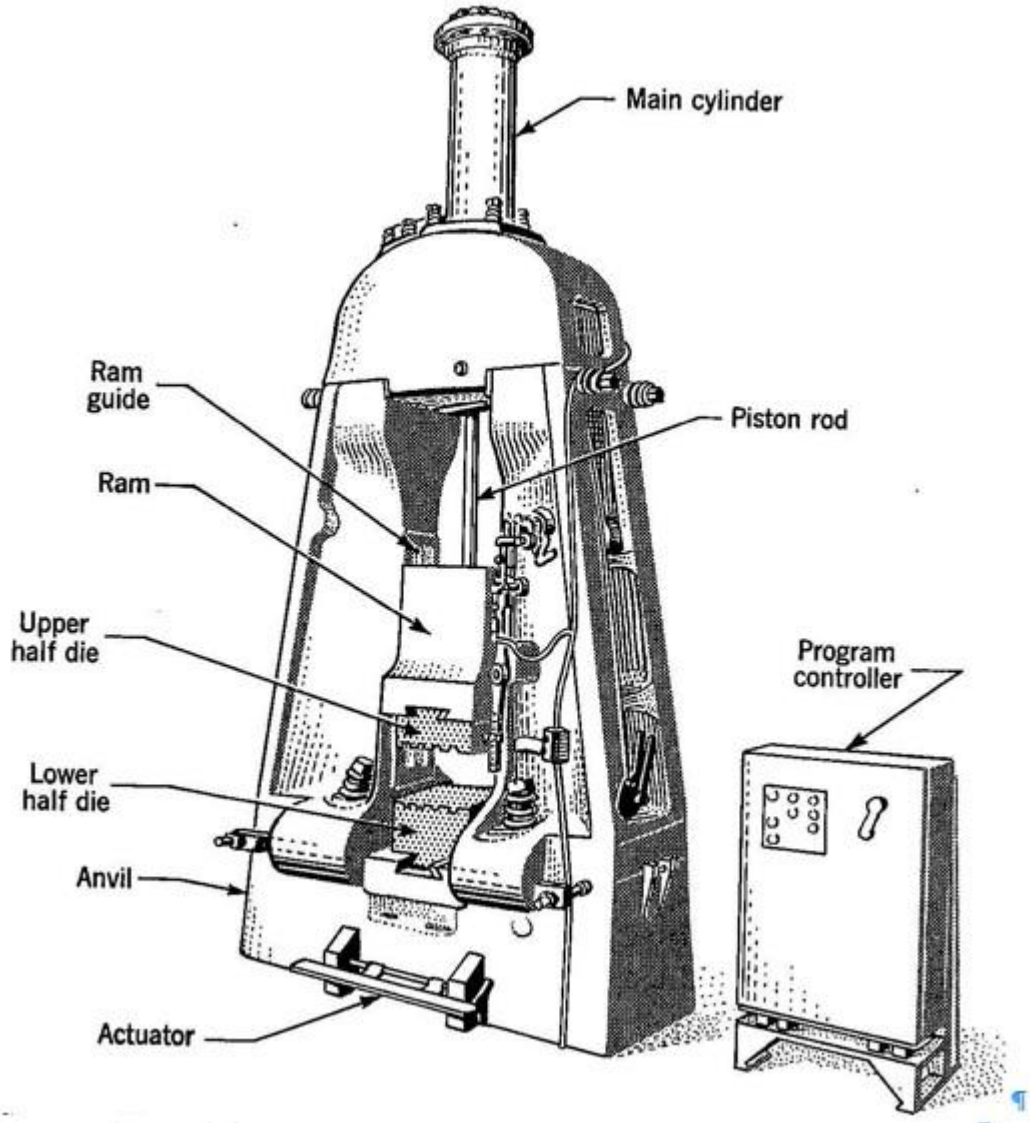
## Hot Forging

تغییر فرم پلاستیک در دماهای بالاتر از نقطه تبلور مجدد انجام می‌شود و چون در قطعه بازیابی انجام می گیرد تغییر فرم آسان‌تر و تنش لازم برای شروع سیلان کمتر خواهدبود.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

آهنگر با استفاده از پتک (Hammer) و سندان (anvil) شمش اولیه با دمای بالا را به شکلهای مختلف تبدیل می کند، این روش نیازمند مهارت و قدرت بالای آهنگر است.

روشهای جدید که از قالب نصب شده روی یک پرس عظیم استفاده می‌کنند دارای نیرو و کارآیی بسیار بالاتر هستند.

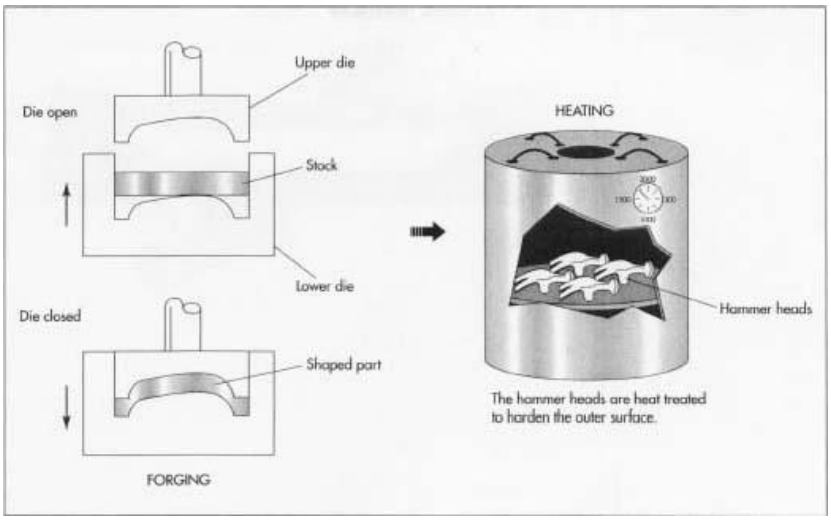



www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

قالبها بلوکهای فولادی سختی هستند که با استفاده از ماشین کاری شکل مورد نظر روی آنها ایجادمی شود. قالب پایینی ثابت است در حالی که قالب بالایی می‌تواند به بالا و پایین برود.

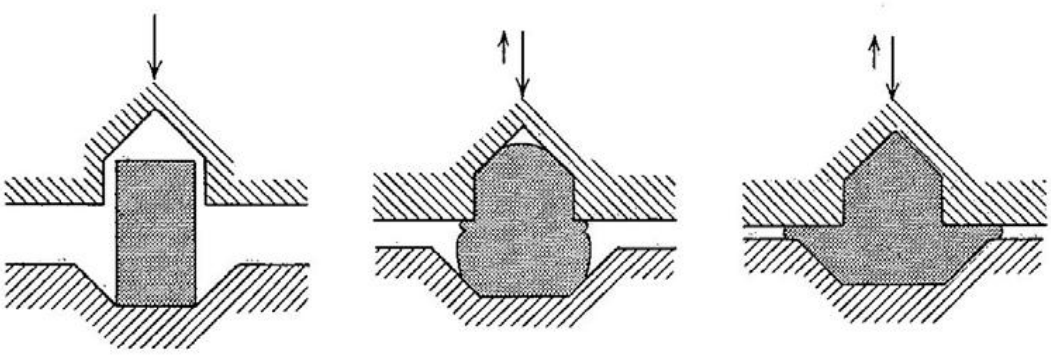
شباهت این روش با ریخته‌گری این است که در هر دو روش فلز به طور کامل محفظه قالب را پرمی‌کند.

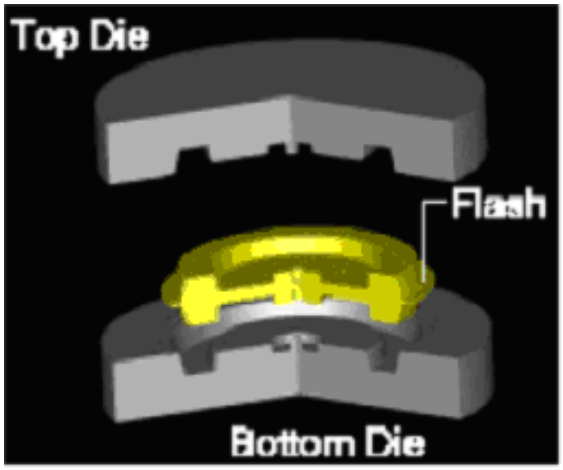
اما تفاوت اساسی این دو روش این است که در ریخته گری فلز به صورت مذاب قالب را پر می کند ولی در فورجینگ با استفاده از فشار، فلز در حالت جامد قالب را پر می‌کند و این علت برتری ساختار داخلی قطعات ساخته‌شده به روش فورجینگ است.




www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

برای اطمینان از عدم وجود هیچ روزن و نقص در قطعه، همواره مقدار بیشتری فلز داخل محفظه قالب قرار داده می شود. بنابراین قطعه تولید شده دارای اضافه‌هایی است که Flash نامیده می‌شود و در ادامه باید بریده شود.






## تولید میل‌لنگ با روش فورجینگ

از آنجا که ضخامت میل لنگ زیاد بوده و نیاز به تغییر فرم زیادی دارد فرآیند فورجینگ برای تولید آن از نوع Hot Forging است.

این فرآیند از طریق روش closed impression die forging انجام می‌شود، که در آن قالبها به سمت هم می آیند و قطعه را درون خود جای می‌دهند.

بیلت با دمای اولیه $1100^{\circ}C$ داخل قالب پایینی قرار می‌گیرد و پرس با چند ضربه آن را به شکل مورد نظر در می‌آورد.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

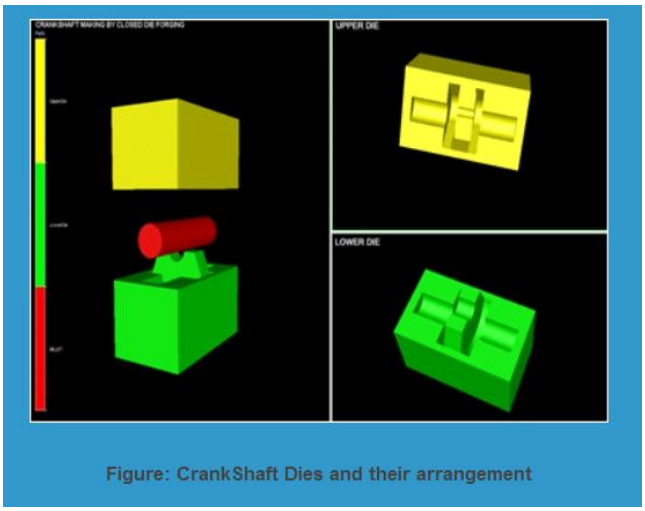



Figure: CrankShaft Dies and their arrangement

مشخصات چند نوع از پرس‌های مورد استفاده برای تولید میل‌لنگ:

**OVERVIEW OF CRANK FORGING PRESS MODELS**

| Model | PK 1250 | PK 2000 | PK 3150 | PK 4000 | PK 5000 | PK 6300 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Nominal force [kN] | 12,500 | 20,000 | 31,500 | 40,000 | 50,000 | 63,000 |
| Stroke rate continuous [1/min] | 70 | 65 | 60 | 60 | 50 | 40 |
| Working capacity single [kJ] | 180 | 320 | 550 | 750 | 1,000 | 1,300 |
| Ram stroke [mm] | 300 | 300 | 400 | 425 | 450 | 450 |
| Ram adjustment [mm] | 15 | 20 | 25 | 20 | 20 | 20 |
| Shut height [mm] | 850 | 1,100 | 1,500 | 1,600 | 1,700 | 1,700 |
| Bed depth [mm] | 1,050 | 1,500 | 1,390 | 1,450 | 1,500 | 1,600 |
| Bed width [mm] | 1,280 | 1,640 | 2,170 | 2,200 | 2,250 | 2,300 |

Subject to technical modifications.

با توجه به استحکام ماده، داکتیلیته، اصطکاک ماده، تغییر فرم زیاد بیل ت و کاهش دادن تنشها، فرآیند فورجینگ میل لنگ دارای مراحل میانی زیر است:

۱- نورد با کالیبر اولیه

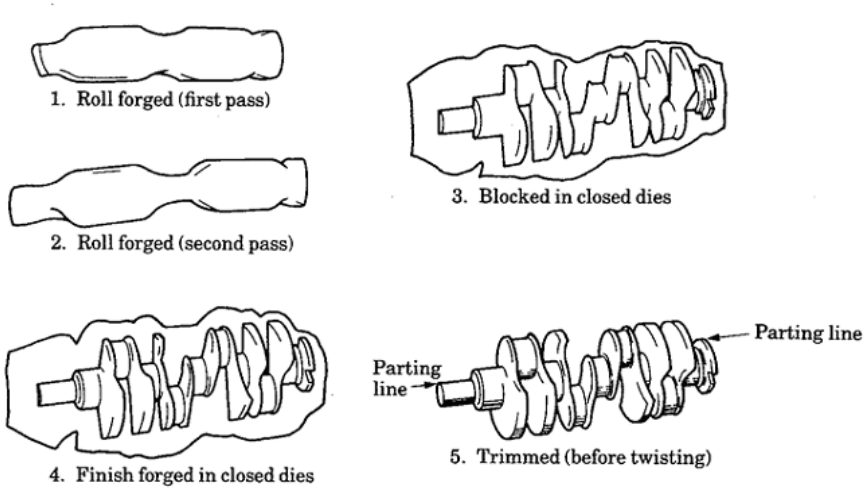
۲- نورد با کالیبر ثانویه

۳- فشرده سازی در قالب بسته

۴- فورج نهایی در قالب بسته

۵- ماشین کاری

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد




از مراحل بالا مرحله ۱ و ۲ نورد هستند و در واقع بیلت بعد از مرحله ۲ وارد پرس می‌شود.

مراحل ۳ و ۴ فورجینگ گرم هستند و ایجاد شدن Flash مشخص است.

قطعه تولید شده در مرحله ۴ با فرآیندهایی چون Trimming و ماشین‌کاری به قطعه نهایی تبدیل می شود. دقت به این نکته ضروری است که بعد از عملیات Trimming روی قطعه خط جدا کننده ای ایجاد می شود که همچون سطح جدایش در فرآیند ریخته‌گری است. بنابراین تشخیص روش تولید میل‌لنگ ممکن است گمراه کننده باشد.

سپس با روش‌های دیگر بالانس قطعه و عملیات حرارتی و سخت سازی سطحی روی آن انجام می‌گیرد.

**تصاویر و فیلم های مرتبط با میل لنگ/ فیلم‌ها/ تولید میل لنگ به روش فورجینگ (واقعی)**

**تصاویر و فیلم های مرتبط با میل لنگ/ فیلم‌ها/ تولید میل لنگ به روش فورجینگ (شماتیک)**

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

## ۳-۲ ریخته گری

در بحث میل لنگ، از چدن داکتیل به دلیل قیمت کمترش نسبت به بقیه انتخاب ها به عنوان ماده ی اولیه برای تولید استفاده می شود. حال سوال اینجاست، که چه فرآیندی از مجموعه فرآیندهای تولید قادر به بهره گیری از چدن داکتیل است؟ طبق تجربیات به دست آمده میل لنگ های از جنس چدن داکتیل قابلیت تولید با ۳ روش ماسه تر، ریخته گری پوسته ای و فوم از بین رونده را دارند. اما کاربر نهایی، چگونه می تواند روش مناسب را انتخاب کند؟

تصمیم گیری در این مورد، باید بر اساس اطلاعات در مورد روش های مختلف ریخته گری و این که ماشین آلات کدام روش قابلیت تولید قطعه به شکلی مطبوب و در عین حال کم هزینه را دارد، انجام گیرد . اگراین تصمیم تنها با توجه به هزینه ی تمام شده و بدون در نظر گرفتن دیگر پارامترها صورت گیرد، ترتیب روش ها، به شکل زیر خواهد بود:

۱- روش ماسه تر ۲- روش ریخته گری پوسته‌ای ۳- روش فوم از بین رونده

البته توجه داشته باشیم که این رتبه بندی تنها با تمرکز بر روی هزینه‌ی تمام شده‌ی واحد انجام شده است.

زمانی که فلز مذاب، در درون قالب منجمد می شود، به این فرآیند ریخته گری می گویند، اما این تنها فرآیندی نیست که در مسیر ریخته گری یک قطعه انجام می گیرد. بسیاری از قطعات ریخته گری بعد از خروج از قالب، به مجموعه اقداماتی همچون عملیات حرارتی، سنگ زنی، ماشین کاری ، پولیش کاری، مونتاژ و سایر اقدامات نیاز دارند. پس کاملا حیاتی به نظر می رسد که فرد برای انتخاب روش مناسب برای تولید،هزینه‌ی این گونه اقدامات را هم در هزینه ی تمام شده برای قطعه در نظر بگیریم و ملاحظه کنیم که کدام یک از این روش‌ها ( ماسه تر، پوسته‌ای و فوم از بین رونده ) نیاز بیشتری به اقدامات پس از ریخته گری دارند و کدام یک نیاز کمتری دارند و به این ترتیب میزان اثر گذاری هزینه‌ای آنها را معین کنیم.

### ۳-۲-۱ ریخته‌گری با ماسه‌ی تر

۱- در این روش ابتدا یک جرثقیل مغناطیسی مخلوطی از قراضه های آهنی را با خود حمل کرده و به داخل ظرف مخصوص کوره انتقال می دهد. هر بار پر شدن این طرف توسط جرثقیل، معروف به یک "بار" است.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

۲- سپس این ظرف متحرک به داخل کوره مخصوص انتقال می یابد تا قراضه‌ها به مذاب تبدیل شوند.

در ضمن کوره، در این حالات دارای ده "بار" است.

۳- در این مرحله ، تکنسین مربوطه دمای کوره را تنظیم می کند . این دما با ید بین ۲۵۰۰ تا ۲۶۴۰ درجه‌ی فارنهایت باشد.

۴- حالا پس از گذشت مدت زمان مشخص، آهن مذاب از طریق سوراخی در کف کوره به یک آبشخور انتقال پیدا می کند . در همین مرحله، مسئول بخش به بازرسی آهن مذاب داخل آبشخور می پردازد تا از ذوب مناسب آهن اطمینان پیدا کند.

۵- این آبشخور، فلز مذاب را به درون یک محفظه‌ی متخلخل (که در شکل رو به رو نشان داده شده است ) انتقال می دهد. در درون این محفظه، مذاب در مواجهه با نیتروژن در سولفوره می‌شود.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

۶- در این مرحله، یک جرثقیل حمل فلز با حرارت بالا، مذاب را به سمت بخش ریختن مذاب حمل کرده تا در این بخش افزودنی های لازم را برای تبدیل شدن به یک آلیاژ مناسب برای میل لنگ دریافت کند. این افزودنی‌ها شامل مقادیر مختلفی از کربن، سیلیسیم، منیزیم و مس هستند.

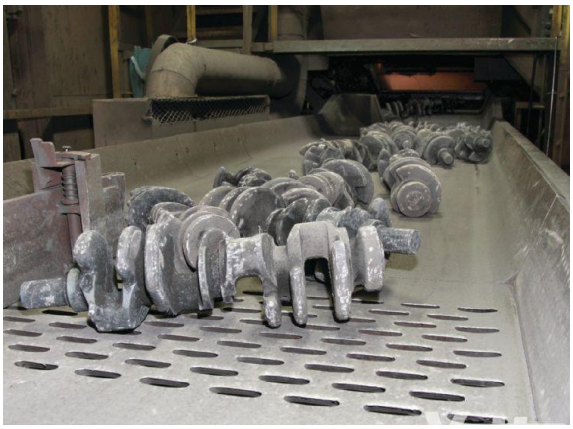
در طول این مرحله، محفظه دارای حرارت بالاست.

۷- قدم بعدی، این است که آلیاژ مذاب ایجاد شده را به درون محفظه‌ای برای انتقال به قسمت بعدی، انتقال دهیم.

۸- بعد از پر شدن محفظه ی گرم توسط آلیاژ مذاب، جرثقیل، محفظه را به بخشی دیگر حمل می کند . در این بخش، مذاب از داخل محفظه به پاتیل باریک جهت بار ریزی انتقال می یابد.

۹- آهن مذاب از طریق این مجرای باریک انتقال، به درون یک ملاقه‌ی RMIP (چرخنده مکانیکی آهن ریز ) انتقال یافته و سپس مذاب از طریق این ملاقه به درون قالب ماسه ای که در آن جای خالی میل لنگ طراحی شده است ریخته می شود . در این جا چدن خاکستری در انر مخلوط شدن با منیزیم تلقیح کننده در درون قالب به چدن کروی تبدیل می شود.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



۱۰- میل لنگ ها به مدت ۱۵۰ دقیقه در درون قالب خنک شده تا به طور کامل منجمد شوند . سپس درجه ی بالایی برداشته شده و درجه‌ی پایینی نیز از جای خود خارج شده و میل لنگ ها به سمت یک محدوده نوسان گر معروف به " shake out area " میلغزند و در این قسمت نیز برای حدود ۹۰ دقیقه خنک می‌شود.

۱۱- حالا میل لنگ های تولید شده که دارای سطح خشنی هم هستند به نوار نقاله ی تفکیک کننده از جنس آهن سخت وارد می شوند، جایی که در آن فلزات اضافی، که البته در فرآیند ریخته گری مورد نیاز بوده اند، از میل لنگ جدا می شوند. میل لنگ‌ها سپس به وسیله‌ی یک سطل حامل به واحد پردازش انتقال پیدا می کنند.

۱۲- در این مرحله تکنسین متخصص قطعات آهنی، میل لنگ های خرد شده و متلاشی را از روی نوار نقاله خارج می کند.

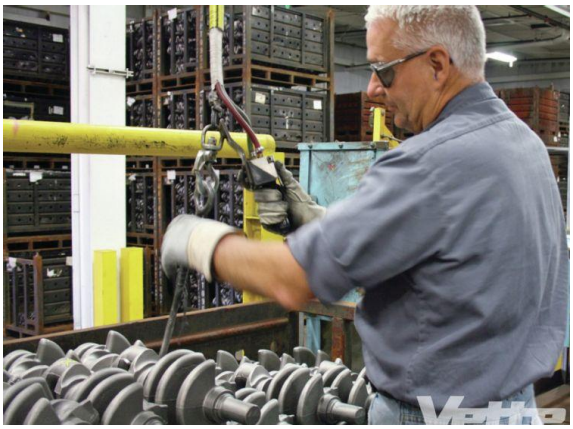
۱۳- میل لنگ‌های ضایعاتی به داخل محفظه‌ی یک جرثقیل ۱۰ تنی منتقل می شوند تا در ادامه مجددا ذوب شده و مورد استفاده قرار گیرند.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

۱۴- در این زمان میل لنگ ها به داخل یک محفظه ی هوای پر فشار (shot-blast) هدایت شده تا مرحله ی تمیز کاری اولیه صورت گیرد. سپس مرحله‌ی دوم تمیز کاری در هوادهی در خط (in-line blast) انجام می گیرد.

۱۵- حالا پردازشگر قطعات ریختگی، میل لنگ ها را وارسی کرده وبر روی نوار نقاله، مواد اضافه را از قطعه جدا می کند. سپس او اقدام به انجام تست صدا می کند ! یعنی چه؟ همان طور که از اسمش پیداست در این تست با چکش به میل لنگ ضربه وارد می شود و صدای تولید شده شنیده می‌شود. یک میل لنگ ریخته‌گری از جنس پدن کروی باید صدایی شبیه به زنگ تولید کند.
در پایان این مرحله نیز، هر گونه فلزات اضافی باقی مانده بر میل لنگ با سنگ زنی دستی رفع می‌شوند.

۱۶- و بالاخره همان چیزی که انتظارش را می کشیدید . . . یک میل لنگ پردازش شده از جنس چدن کروی !



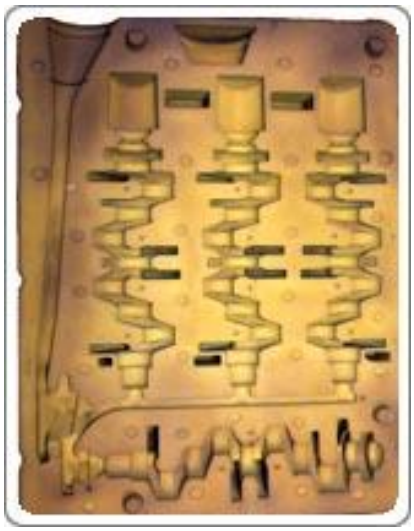
۱۷- اما اشتباه نکنید . . . این پایان کار نیست ! در مرحله‌ی پایانی، یک کارگر، این میل لنگ های پردازش شده را از روی نوار نقاله به درون یک محفظه انتقال داده تا به سمت ف رآیندهای واسطه انتقال یابد. در این جا تکنسین ها ازقطر میله های لنگ و محورهای اصلی ۲ میلی متر می کاهند، سوراخ کاری های لازم را انجام می دهند، برای نصب فلایویل سوراخ ایجاد می کنند، و وزنه های تعادل را برای ایجاد تعادل داخلی بر روی میل لنگ نصب می کنند.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

حالا دیگر مطمئن باشید که میل لنگ آماده است و همه چیز برای عرضه‌ی آن فراهم است.

* شاید باورتان نشود ! ولی ابن میل لنگ، حالا در درون این خودرو نصب شده است !

## ۲-۲-۳ ریخته گری پوسته ای



ریخته گری درقالب های پوسته ای به فرایندی اطلاق میشود که درآن قالب ازمخلوط ماسه بایک چسب رزینی(گرما سخت)به روی مدل فلزی گرم شده شکل میگیرد. این روش به عنوان یکی از روش های تولید، از اوایل دهه ی ۱۹۴۰ در آلمان شروع به توسعه کرد. این روش توسط دکتر Johannes Croning در شهر هامبورگ ابدا شد و در ابتدا به روش کرونینگ مشهور بود.

هنگامی که مخلوط ماسه دراثرتماس بامدل فلزی، گرم شده، رزین ذوب شده واطراف ذرات ماسه را میگیرد وباعث چسبیدن ذرات ماسه به یکدیگر میشود بدین طریق یک نیمه ی قالب کاملاسخت ومستحکم تهیه میشود. دراین مرحله عملیات ماهیچه گذاری درقالب انجام شده ودو نیمه ی قالب توسط سیم به هم محکم می شوند.

روش قالبگیری پوسته ای به منظورتولیدانبوه قطعات آهنی وغیرآهنی از چندگرم تا ۲۰۰ کیلوگرم به کار میرود. حتی در برخی مواردمحدود، قطعاتی تا وزن ۵۰۰ کیلو گرم نیزبه این روش تولید شده است.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

**مزایا ومحدودیتها:**

**الف) مزایا:**

۱- دقت ابعادی قطعات تولیدی شده به این روش درمقایسه با روش ریخته گری ماسه ای تربیشتر بوده لذاعملیات ماشین کاری کاهش میابد.

۲- صافی سطح نسبت به روش ماسه ای تر بیشتر می باشد.

۳- مصرف ماسه در این روش نسبت به فرایند ماسه ای ترکمتر است.

**ب) معایب:**

۱- در اندازه ووزن قطعات ریخته گری محدودیت وجود دارد

۲- هزینه ی ساخت مدل در این روش زیاد بوده،چرا که بایستی مدل حتما از فلز ساخته وماشین کاری شود.

۳- قیمت چسب دراین روش بالا است.

۴- درسیستم راهگاهی وتغذیه گذاری دراین روش محدودیت وجود دارد.

۵- این روش نیاز به تجهیزات گران قیمت دارد.

**اجزای مخلوط ماسه و خواص آن**

مخلوط ماسه ی قالبگیری درروش پوسته ای همانند روشهای دیگرازچندجزءتشکیل شده است که ماسه، چسب و مواد روان کننده اجزای اصلی در آن میباشد.

**۱- ماسه**: ماسه ی مورد استفاده درفرایند پوسته ای سلیسی ویا زیر کنی با درجه ی خلوص زیاد ومواد آلی وخاک رس شسته میشود. این عمل سبب کم شدن مصرف چسب می شود. درصورتی که مواد آلی وخاک رس در ماسه زیاد باشد به منظوردستیابی به استحکام ماسه کافی مقدار مصرف رزین افزایش میابد.

به جز در مورد آلیاژهای الومینیوم بهترین نتیجه هنگامی به دست می آید که اندازه‌ی دانه‌های ماسه یکنواخت‌تر باشد. در مورد قطعات ریختگی آلومینیوم اندازه‌ی دانه های ماسه بایستی چهار نوع باشد

ماسه درروش رزین سرد بایستی کاملا خشک شده باشد. رطوبت، باعث باد کردن رزین شده ودر نتیجه خاصیت پوششی رزین بر ماسه کاهش میابد در روش استفاده ازرزین گرم، رطوبت یک مشکل بزرگ نبوده چراکه به هنگام گرم شدن ماسه رطوبت گرفته می شود.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

**۲- رزینها:** رزینهای مصنوعی که درروش قالب گیری پوسته ای مورد استفاده قرار می گیرد از نوع رزینهای ترموپلاستیک بوده که به آن مواد اضافه میشود تا مشخصات گرما سخت را پیدا نماید.

رزینهای فنل فرمالییید با افزایش مقدار کمی هگزامین به آن حالت گرما سخت میابند، این رزینها در فرایند قالب گیری پوسته ای بیشترین کابرد را دارند، زیرا هنگامی که با ماسه مخلوط شوند بیشترین استحکام مقاومت به حرارت رطوبت را دارا میباشند.

**۳- مواد روان کننده:** از مواد روان کننده به منظور تسهیل در جدا شدن قالب از مدل ونیز بهبود بخشیدن به خاصیت روانی ماسه استفاده میشود. مواد روان کننده همچنین باعث افزایش استحکام کششی قالب می شوند، زیرامخلوط ماسه دارای چگالی بالاتری خواهد شد. این موادمعمولا استیرات کلسیم و روی می باشد.

مقدار مورد نیاز مواد روان کننده معمولابین۲تا۵ درصد رزین است، البته درحالت های خاص ممکن است مقدار آن به۹ درصد رزین برسد.

**مخلوط ماسه ورزین برای قالب های پوسته ای به دو روش تهیه میشود:**

**الف) مخلوط کردن ماسه ورزین:** دراین روش ماسه و رزین را به طریق معمول مخلوط کن ها به صورت خشک با هم مخلوط میکنند. اگر چه این روش ساده ودر دسترس می باشد ولی امکان جدا شدن رزین و ماسه در آن وجود دارد و به همین دلیل استفاده ازمخلوط ماسه و رزین برای روشهایی که در آن توسط دمیدن ماسه قالب پر میگردد امکان پذیر نبوده وفقط برای تهیه قالب‌های دامپ باکس استفاده می شود.

**ب) پوشش دادن ماسه با رزین:** در این روش ماسه توسط رزین پوشش داده می شود. این پوشش با مخلوط کردن ماسه، رزین هکزامین و مواد روان کننده توسط مخلوط کن انجام میشود. نحوه‌ی مخلوط کردن، متفاوت است. ممکن است بعضی ازاجزای مخلوط به صورت مایع باشد اما هنگامی که ازمخلوط کن ماسه ی پوشش داده شده خارج می شود، بایستی کاملا خشک و عاری از رطوبت باشد. لازم به یاداوری است که خشک بودن ماسه باعث روانی وتسهیل درقالب گیری میشود.

پوشش دادن ماسه ممکن است به دو روش سرد وگرم انجام شود:

**روش‌های پوشش دادن**

**روش سرد**: در این روش ماسه همراه با رزین مایع در درجه حرارت محیط با اجزای دیگر مخلوط میشود. مهمترین مزیت این روش حذف تجهیزات مربوط به گرم کردن ماسه و نیز امکان کنترل ساده تر استحکام و نقطه ی ذوب ماسه ی پوشش داده شده میباشد.و از معایب آن نیاز به حمل مقدارزیادی رزین مایع و نیاز به خارج کردن مایعات از مخلوط ماسه ی تهیه شده و نیز امکان اتش سوزی میباشد.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

در این فرایند تمام اجزاء ماسه هنگامی که به مخلوط کن اضافه می شوند در درجه ی حرارت محیط قرار دارند.اگر به هر صورت ماسه یا رزین خیلی سرد باشند امکان تهیه ماسه پوشش داده شده مناسب کاهش میابد. و برعکس اگر درجه حرارت مواد خیلی بالا رفته باشد رزین قبل از این که بتواند ماسه را پوشش بدهد سخت میشود.

**روش پوشش گرم**: دراین روش ماسه ورزین در درجه حرارت بین ۱۲۰ تا ۱۳۵ درجه سانتی گراد با هم مخلوط میشوند. این روش حداقل سه مزیت نسبت به روش سرد دارند.

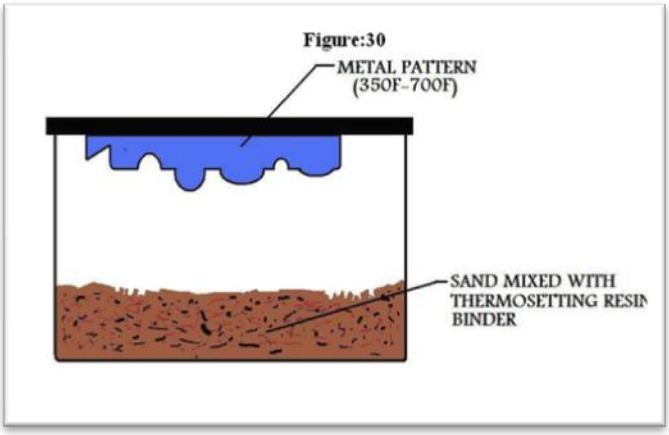
اول این که استحکام کششی ماسه ی پوشش داده شده حدود ۲۵٪ افزایش میابد.

دوم این که گرد و غبار در این روش کمتر است.

سوم این که که به دلیل عدم استفاده از الکل، امکان آتش سوزی درآن کمتر است.

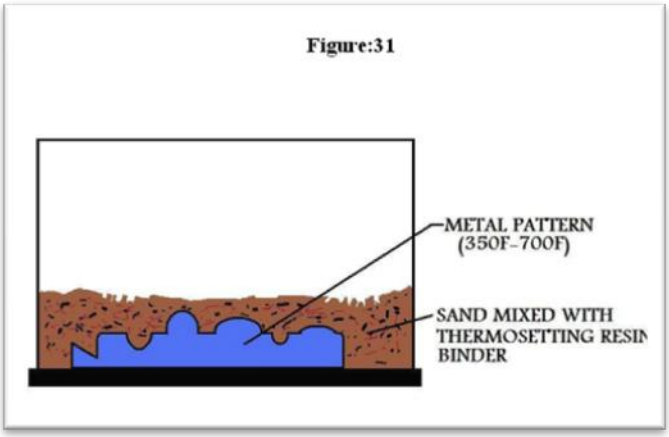
## مراحل انجام فرآیند ریخته گری به روش پوسته‌ای

۱- اولین مرحلهٔ در این فرآیند، ایجاد یک پوسته ی محکم است. برای این کار مدل فلزی را ابتدا تا دمای ۳۵۰ الی ۷۰۰ درجه‌ی فارنهایت (۱۷۵ تا ۳۷۰ درجه‌ی سانتی گراد ) گرم می کنیم (این کا ربه این منظور انجام می شود که رزین داخل ماسه به خوبی ذوب شده و مخلوط ماسه به مدل بچسبد) و سپس از قسمت خط جدایش، در درون یک محفظه نصب می کنیم.

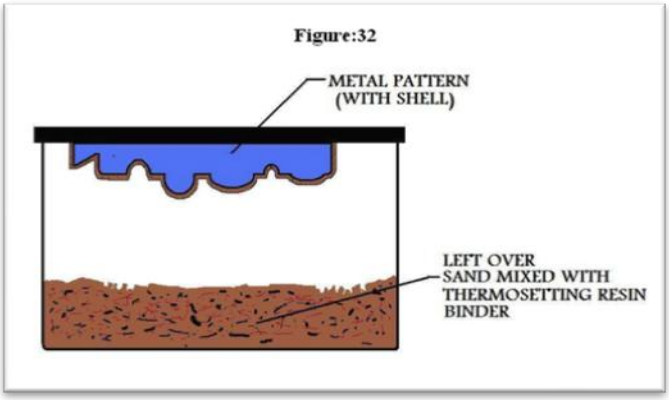



۲- حالا مخلوط ماسه و رزین و . . . که قبلا تهیه کردیم را به درون این محفظه اضافه می کنیم.

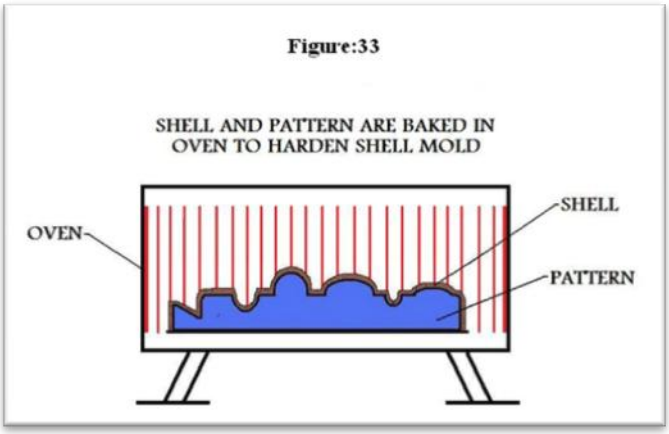
۳- در این مرحله با چرخش های محفظه بین ماسه و مدل فلزی گرم ارتباط برقرار می کنیم . به دلیل وقوع واکنش‌ها میان رزین گرما سخت شده و سطح گرم مدل فلزی، در اطراف مدل لایه ای از ماسه تشکیل می شود . میزان ضخامت مطلوب پوسته ی تشکیل شده به چگونگی عمل ریخته گری بستگی دارد، اما به طور معمول این ضخامت حدود ۷.۵ میلی متر است . این ضخامت، با توجه به طول مدت ارتباط ماسه و مدل تغییر می کند.



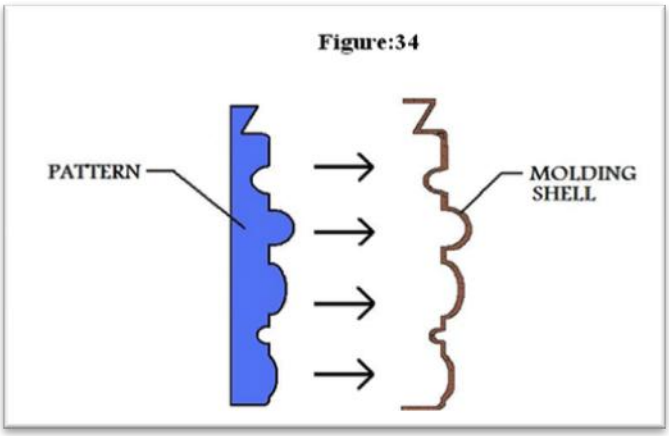

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد




۴- حالا، پس از دست یابی به ضخامت مورد نظر از پوسته، محفظه به همان حالت اولیه بر می گردد و مخلوط ماسه‌ی اضافه به کف محفظه می ریزد و اطراف مدل نیز توسط مخلوط ماسه پوشش داده شده است.

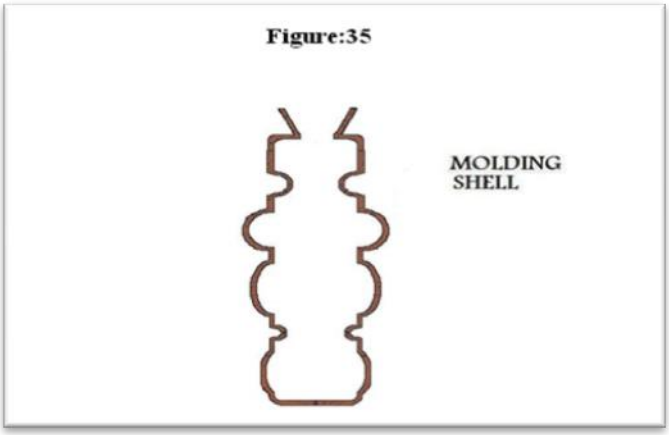



۵- پس از انجام مراحل بالا برای هر دو نیمه ی قطعه، دو نیمه را برای مدتی (در حد چند دقیقه) در درون یک فر قرار می دهیم تا لایه ی ماسه‌ای اطراف مدل به اندازه ی کافی سخت شود.



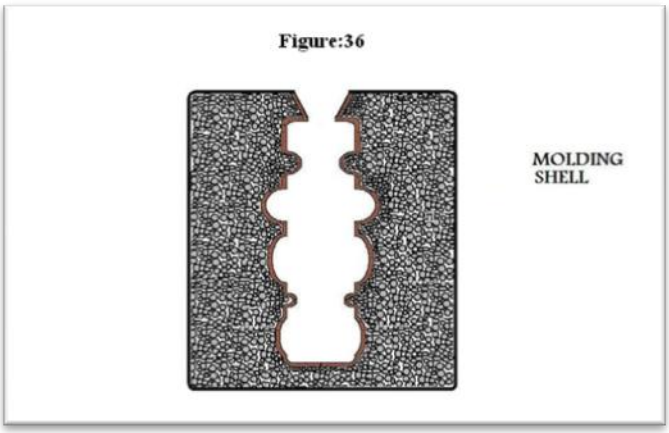

۶- بعد از به پایان رسیدن مرحله ی پختن پوسته، زمان آن است که پوسته را از مدل فلزی جدا کنیم. این کار به وسیله‌ی پین های خارج کننده که در مدل تعبیه شده است، انجام می گیرد.

حالا دو پوسته از دو نیمه‌ی مدل در اختیار داریم.




۷- حالا این دو نیمه پوسته ی ماسه‌ای سخت شده که هر کدام نیمی از قالب قطعه ( میل لنگ ) را تشکیل می دهند،به وسیله‌ی چسب یا سیم به هم متصل می شوند و فضای قالب گیری را ایجاد می کنند.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد




۸- در این جا عملیات ساخت قالب پوسته ای به پایان رسیده است و قالب برای ریختن مذاب آماده است . برای این منظور معمولا قالب پوسته ای را در درون محفظه ی ماسه قرار می دهند و مذاب را در داخل آن می ریزند.

۹- بعد از سرد شدن مذاب، قطعه ی مورد نظر به همراه پوشش ماسه ای به دست می‌آید، حالا با انجام عمل شیک اوت (shake out) پوسته را از قطعه جدا کرده و به قطعه (میل لنگ) پایانی دست می یابیم.

* یادمان باشد میل لنگ تولید شده به این روش، با توجه به کیفیت سطح بالا، دقت ابعادی مناسب و ظرافت در اجرا، نیاز زیادی به ماشین کاری ندارد.

## ۳-۲-۳ ریخته‌گری با فوم از بین رونده

تاریچه‌ی فرایند ریخته گری با فوم از بین رونده (LFC) به سال ۱۹۵۸ برمی‌گردد، زمانی که H.F.Shroyer حق امتیاز روش انحصاری Cavity-less را در اختیار گرفت، او در این روش ریخته‌گری را با استفاده از قرار دادن فوم پلی استایرن در درون ماسه-ی تر انجام داد.اساس این روش به این صورت است که این فوم پلی استایرن به واسطه ی تجزیه توسط فلز مذاب، از دورن ماسه ی تر خارج می‌شود. حالا فلز مذاب جایگزین مدل می‌شود و دقیقا همان جاهایی را پر می‌کند که مدل قبل از آن اشغال کرده بود.

**مراحل انجام فرایند ریخته گری با فوم از بین رونده**

۱- ابتدا یک مدل از جنس پلی استایرن دارای قابلیت انبساط ساخته می شود. مدل در نهایت تقریبا شامل ۹۷.۵ درصد هوا و ۲.۵ درصد پلی استایرن می‌باشد.

۲- حالا فوم، با یک پوشش سرامیکی پوشانده می شود. این پوشش که به پوشش دیر گداز نیز مع روف است از طریق فرو بردن، آغشته کردن، پاشیدن یا اسپری کردن بر روی فرم ایجاد می شود. این پوشش، یک حایل میان سطح نرم فرم و سطح زمخت ماسه ایجاد می‌کند. این پوشش همچنین، نفوذ پذیری را کنترل می کند و در حقیقت گاز های حاصل از تبخیر فوم را به سمت بیرون هدایت می‌کند . در ضمن این پوشش سرامیکی مانعی است برای نفوذ مذاب فلز به داخل ماسه و همچنین سایش ماسه‌ها.

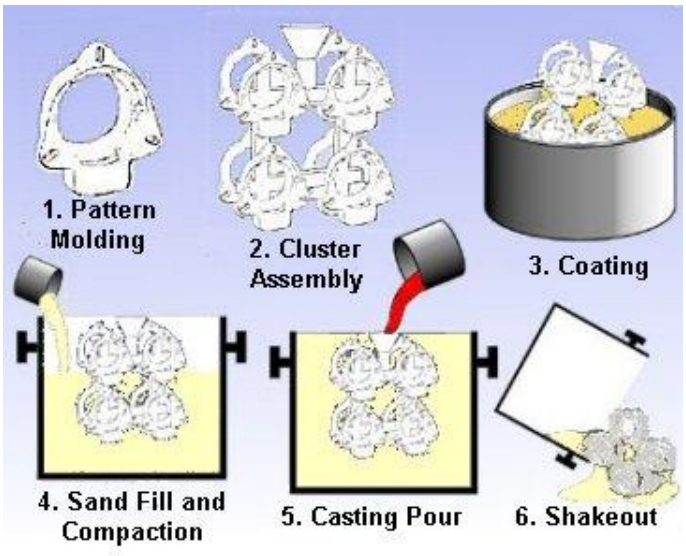
www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

۳- بعد از خشک شدن پوسته بر روی مدل فومی، خوشه ی بدست آمده به داخل درجه انتقال یافته و توسط ماسه احاطه می گردد. در پاین این مرحله این ماسه ها به وسیله‌ی میز لرزان، فشرده می‌گردند. یک بار انجام عمل لرزش برای تراکم کاسه ها کافی است و مدل آماده‌ی ریختن مذاب می‌گردد.

۴- در این مرحله، مذاب فلز به محل حضور مدل ریخته می‌شود و دائما با تبخیر مدل فومی، جای آن را در قالب می‌گیرد. در این مرحله، ونت (vent) های موجود در اطراف قالب، اجازه ی خروج گازهای ایجاد شده را می‌دهند.

۵- در نهایت نیز، پوشش سرامیکی حول قطعه جدا می‌شود و قطعه‌ی نهایی بدست می‌آید.

* در شکل زیر مراحل گفته شده در بالا را به شکل خلاصه شده مشاهده می کنید.




## مقایسه‌ی روش‌های ریخته گری میل لنگ

### روش ریخته گری با ماسه تر:

بخش عظیمی از میل لنگ ها در قالب های با ماسه ی تر ریخته گری می شوند. در این فرآیند ماسه به همراه رس (چسب) ، آب و دیگر افزودنی های لازم در اطراف دو تکه ی مدل میل لنگ فشرده می شوند. این روش به دلیل آن که کم هزینه است در کارخانه - های با تولید بالا مورد استفاده قرار می گیرد .اما این روش در مقایسه با دو روش دیگر ریخته گری یعنی ریخته گری پوسته ای و ریخته گری با فوم از بین رونده دارای سطح خشن تری بوده و پس از ریخته گری نیاز بیشتری به ماشین کاری دارد.

از آن جایی که عموما میل لنگ ها در خود حفرات و سوراخ هایی ندارند، از تهیه کردن و قرار دادن هر گونه ماهیچه در داخل قالب میل لنگ در هر کدام از این روش ها اجتناب می شود.

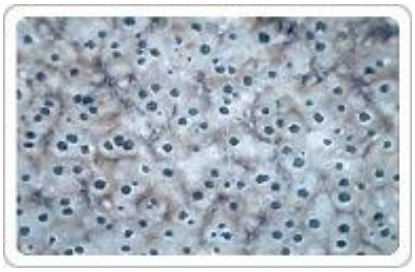
www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

**روش ریخته گری پوسته ای:**

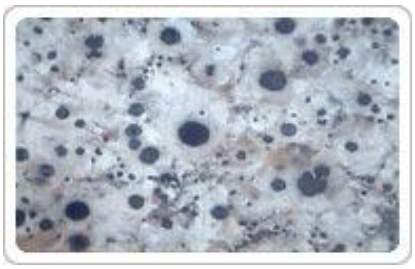
ریخته گری پوسته‌ای تلورانس ابعادی محدودتر و زوایای دقیق تری را نسبت به ریخته گری با ماسه ی تر به ارمغان می آورد که این موضوع باعث می شود قسمت های اضافی کمتری را به همراه میل لنگ ریخته گری شده داشته باشیم و در نتیجه به ماشین کاری کمتری نیازمند باشیم و در ضمن دقت ابعادی مناسبی در ا ختیار خواهیم داشت، چرا که در این روش دانه های ماسه حول حفره‌ی ایجاد شده توسط مدل به وسیله ی گرما به هم می چسبند.

علاوه بر این، سطح میل لنگ در این روش نسبت به روش ریخته گری با ماسه تر دارای کیفیت مطلوب تری است . اما از آن جا که در این روش از پوشش دهی به وسیله‌ی ماسه های با کیفیت و رزین استفاده میشود، این روش نسبت به روش قبل دارای هزینه ی بالاتری است.

یکی دیگر از تفاوت‌های اساسی میان قطعات ریخته‌گری شده با روش ماسه تر و قطعات ریخته‌گری شده به روش پوسته‌ای ، تفاوت میان ریز ساختار آن هاست، به گونه ای که ساختار میکروسکوپی یک میل لنگ به روش پوسته ای به مراتب منظم تر از ساختار میکروسکوپی میل لنگ به روش ماسه تر است. شکل زیر بیانگر همین موضوع است.



ریز ساختار میل لنگ تولید شده به روش پوسته‌ای



ریزساختار میل لنگ تولید شده به روش ماسه تر

**روش ریخته گری با فوم از بین رونده:**

روش سوم، روش ریخته گری با استفاده از فوم از بین رونده است . اگر چه این روش پر هزینه ترین فرآیند در بین ۳ روش گفته شده است، اما مزایای آن بعد از بدست آمدن قطعه ی ریختگی نهایی قابل درک است . در این روش که با استفاده از ماسه ی شل انجام می گیرد، فلز مذاب جای فوم پلی استایرن را می گیرد . دراین روش ، ابعاد قطعه نسبت به دو روش دیگر تکرار پذیرترند و به طور کلی دقت ابعادی بالاتر است، که همین موضوع زمان انجام ماشین کاری را کاهش می دهد.

در مورد ریخته گری میل لنگ ها به این روش،سوراخ ها می‌توانند دردرون بلبرینگ ها ریخته گری شوند تا باعث کاهش جرم شود.

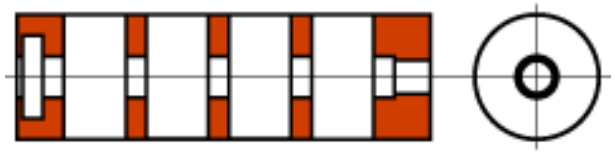
**تصاویر و فیلم های مرتبط با میل لنگ/ فیلم‌ها/ تولید میل لنگ به روش ریخته گری (شماتیک)**

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

## ۳-۳ بیلت (ماشین‌کاری)

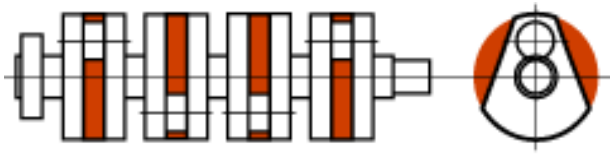
### اولین فرایند جهت شکل دهی قطعه

این فرایند ، با تراش بخش های اضافی ، میله های اتصال را ایجاد می کند ، در حالی که حاشیه ای را تا سطح نهایی مورد نظر لحاظ می کند.



### اولین فرایند برای شکل دهی به میله های اتصال

این فرایند وزنه های تعادل و میله ها را تراش داده ، حاشیه ای تا سطح نهایی لحاظ می کند.

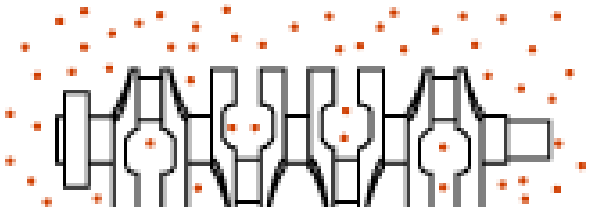


### فرایند شکل دهی به وزنه های تعادل

برای اینکه قطعه را به شکل یک میل لنگ در بیاوریم ، بخش بیرونی اضافی وزنه های تعادل را تراش می دهیم.

### با کیفیت سازی و گلوله زنی

تنش داخلی قطعه حذف ، ساختار پایدار شده و سختی به HRC 28-32 می رسد.



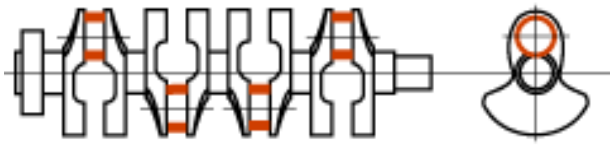
www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

## دومین فرایند جهت شکل دهی به قطعه

این فرایند ژورنال ها را تراش داده و حاشیه ای برای عملیات پولیشش باقی می گذارد.

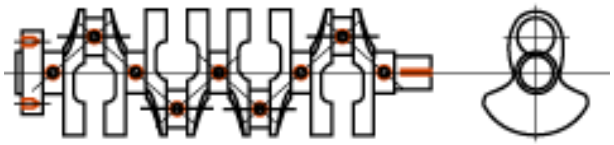
## دومین فرایند جهت شکل دهی به میله های اتصال

این فرایند میله های اتصال را تراش داده و حاشیه ای برای عملیات پولیش حفظ می کند.



## ایجاد سوراخ روغن کاری و سوراخ پیچ ها

این فرایند سوراخ روغن کاری ، سوراخ های پیچ پولی و فلای ویل را ایجاد می کند.



## فرایند پولیش میله ها و ژورنال ها

این فرایند ژورنال ها و میله های اتصال را پولیش می کند.

## فرایند تنظیم تعادل دینامیکی

برای حذف نوسانات میل لنگ تا جای ممکن ، این عملیات بالانس ، صورت می گیرد.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

## فرایند پیچش میله و ژورنال ها

این فرایند برای بهبود میزان گردی دایره ها و زبری سطوح جهت رسیدن به گردشی ملایم و کاهش اصطکاک صورت می گیرد.

## فرایند عملیات سطحی

استحکلم سطح ، مقاومت در مقابل اصطکاک و تنش خستگی قطعه بهبود می یابد . سطح قطعه در اثر این فرایند ، سیاه می شود.

## چرخش نهایی ، اصلاح تاب و بازدید

بعد از چرخش ، تاب قطعه که موجب لرزش می شود ، اصلاح شده و قطعه بعد از اصلاح تاب مجددا مورد بازرسی قرار می گیرد.

**تصاویر و فیلم های مرتبط با میل لنگ/ فیلم‌ها/ تولید میل لنگ به روش ماشین کاری (واقعی)**

**تصاویر و فیلم های مرتبط با میل لنگ/ فیلم‌ها/ تولید میل لنگ به روش ماشین کاری (شماتیک)**

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

# بخش چهارم

# مقایسه‌ی روش‌های تولید

## مقایسه روش فورجینگ و فرآیند ریخته‌گری

برتری روش فورجینگ نسبت به ریخته‌گری در خواص قطعه تولید شده‌است.

جهت‌گیری دانه ها، در ریزساختار فلز، با هندس ه قطعه به طور مسقیم روی مقاومت کششی، سختی و مقاومت به خستگی آن اثرگذار است.

تصویر مقطع میل‌لنگ تولید شده به روش فورجینگ نشان‌دهنده جهت‌گیری دانه‌ها

در روش فورجینگ شکل دانه ها تحت تاثیر تغییر فرم شمش اولیه به قطعه نهایی است در حالی که در تولید همان قطعه ب ا روش ریخته‌گری به علت ویژگی های فرآیند انجماد جهت گیری دانه ها به صورت تصادفی است . همچنین در روش ماشین کاری به علت براده برداری شدید دانه‌های روی سطح قطعه شکسته می‌شوند و در بهترین حالت جهت‌گیری دانه‌ها مانند شمش اولیه است.

در روش فورجینگ به علت جهت‌گیری بهتر دانه‌ها خواص مکانیکی نسبت به فرآیند ریخته‌گری بهتر است.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

جدول زیر، نشان‌دهنده مقایسه خواص مکانیکی میل‌لنگ در این دو روش است:

**COMPARISON OF FORGED VERSUS CAST CRANKSHAFTS***

| Property | Casting | Forging |
|---|---|---|
| Ultimate tensile strength, psi | 36,400 | 102,900 |
| Yield strength, psi | 36,400 | 78,000 |
| Elongation, % | 0 | 38.0 |
| Reduction of area, % | 0 | 63.6 |
| Charpy V-notch impact, ft-lb | | |
| test @ room temperature | 1.5 | 103.0 |
| @ -40°F | – | 19.0 |
| @ 300°F | 3.0 | – |

**Chemical analysis, wt. %**

| Element | C | Mn | P | S | Si | Ni | Cr | Mo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cast | 3.97 | .27 | .033 | .014 | .65 | .08 | .01 | .01 |
| Forged | .45 | .66 | .019 | .049 | .24 | .12 | .24 | .09 |

* Forged 1045 steel/ductile iron

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

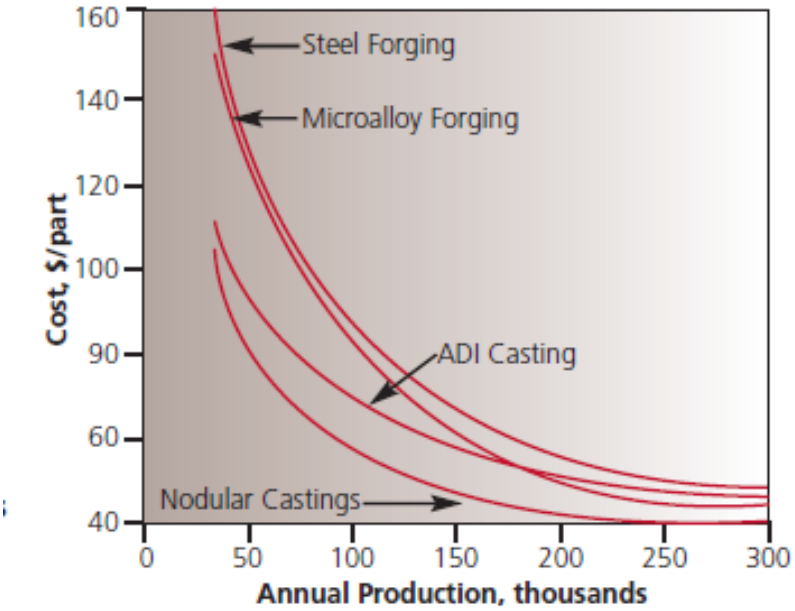
**Table 1** Summary of monotonic and cyclic properties for the two materials.

| Monotonic Properties | Forged Steel | | Cast Iron | | Ratio |
|---|---|---|---|---|---|
| Average Hardness, HRC | 23 | | 18 | | 0.8 |
| Average Hardness, HRB | 101 | | 97 | | 0.96 |
| Modulus of elasticity, E, Gpa (ksi) | 221 | (32,088) | 178 | (25,838) | 0.81 |
| Yield Strength (0.2%offset), YS, MPa (ksi) | 625 | (91) | 412 | (60) | 0.66 |
| Ultimate strength, $S_u$, MPa (ksi) | 827 | (120) | 658 | (95) | 0.80 |
| Percent elongation, %EL | 54% | | 10% | | 0.19 |
| Percent reduction in area, %RA | 58% | | 6% | | 0.10 |
| Strength coefficient, K, MPa (ksi) | 1316 | (191) | 1199 | (174) | 0.91 |
| Strain hardening exponent, n | 0.152 | | 0.183 | | 1.20 |
| True fracture strength, $\sigma_f$, MPa (ksi) | 980 | (142) | 658 | (95) | 0.67 |
| True fracture ductility, $\varepsilon_f$ | 87% | | 6% | | 0.07 |
| **Cyclic Properties** | **Forged Steel** | | **Cast Iron** | | **Ratio** |
| Fatigue strength coefficient, $\sigma_f'$, MPa (ksi) | 1124 | 163 | 927 | (134) | 0.82 |
| Fatigue strength exponent, b | -0.079 | | -0.087 | | 1.10 |
| Fatigue ductility coefficient, $\varepsilon_f'$ | 0.671 | | 0.202 | | 0.30 |
| Fatigue ductility exponent, c | -0.597 | | -0.696 | | 1.17 |
| Cyclic yield strength, YS', MPa (ksi) | 505 | 73 | 519 | (75) | 1.03 |
| Cyclic strength coefficient, K', MPa (ksi) | 1159 | 168 | 1061 | (154) | 0.91 |
| Cyclic strain hardening exponent, n' | 0.128 | | 0.114 | | 0.89 |
| $S_f = \sigma_f'(2N_f)^b$ at $N_f = 10^6$, MPa (ksi) | 359 | (52) | 263 | (38) | 0.73 |
| Average E' Gpa (ksi) | 204 | (31,437) | 174 | (25,229) | 0.85 |

Note: Forged steel taken as the base for all ratio calculations

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

در عین حال هزینه تولید میل لنگ با روش فورجینگ بسیار بیشتر از فرآیند ریخته گری آن است، و تنها برای تولید زیاد می تواند بصرفه باشد. بنابراین ممکن است در تولیدات کم و یا مواردی که به استحکام بالا نیاز نیست از روش ریخته‌گری استفاده‌کنیم.




## مقایسه میان هر ۳ روش

امروزه میل لنگ های ریخته گی شده ،دارای کیفیت‌های مناسبی هستند، اما ممکن است تفاوت هایی ما بین آنها در کیفیت وجود داشته‌باشد که مرتبط با فرایند ریخته گری است.

روش فرجینگ نسبت به روش کستینگ ، میل لنگ های مستحکم تری به ما میدهد که دلیل آن جهت گیری دانه ها ( در ساختار ماده) مطابق با شکل کلی میل لنگ است.

برای کارایی بالا، مانند ماشین های مسابقه از میل لنگ های ماشین کاری شده استفاده میکنند. این میل لنگ ها دارای استحکام عالی و مقاومت بالا در برابر فرسودگی هستند. از دیگر مزایای این میل لنگ ها تحمل فشار زیاد ناشی از احتراق و تحمل سرعت های بالای موتور است.

فرجینگ، یکی از انواع روش شکل دهی به فلزات است که با وارد کردن نیروی زیاد به قطعه به آن شکل می‌دهد.

همه میدانند، میل لنگ هایی که به روش فرجینگ تولید شده اند ازنوع ریخته گری شده‌ی آن ها قوی ترند. اما چه مقدار قوی تر؟

از مزایای روش ریخته گری این است که از مقدار کار ماشین کاری انتهایی میکاهد که این امر موجب پایین آمدن هزینه ساخ ت می‌شود.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

هم چنین تجهیزاتی که در روش ریخته گری برای تولید میل لنگ استفاده میشود نسبت به روش دیگر ارزان تر تمام می شود، به همین دلیل در بسیاری از موتورها که از میل لنگ ریخته گی استفاده شده قطعه به قیمت پایینی به فروش میرسد . از طرفی در روش فرجینگ، فرایند ه‌ای زیادی درگیر کار هستند . در ابتدا با یک شمش بزرگ از آلیا ژی فلزی روبرو هستیم که برای شکل دادن به آن باید به اندازه ۲۰۰ تن به آن وارد کنیم که همین کار حداقل ۱۰۰۰۰۰ دلار هزینه دارد. علاوه بر این ها، در جایی که شکل میل لنگ برای ما اهمیت داشته باشد، روش فرجینگ به اندازه روش ریخته گی دقیق نیست در نتیجه فرایند بیشتری از ماشین کاری نیاز است تا بتوانیم به دقتی که در عمل ریخته گری است برسیم.

پس در نتیجه طبق دلایلی که ذکر شد، قیمت یک قطعه فرجینگ ۳ تا ۴ برابر یک قطعه ریخته گی در می آید.

پس چه دلیلی موجب استفاده از میل لنگ های تولید شده به روش فرجینگ نسبت به ریخته گی می‌شود؟

دلیل این است که میل لنگ فرج شده فوق العاده مستحکم تر از میل لنگ ریخته گری است.

امروزه تولید کنندگان به دلیل وزن کم، ابعاد فشرده و مرطوب شدن ذاتی قطعه فرجینگ تمایل بیشتری به استفاده از این روش دارند.

روش دیگر برای تولید میل لنگ روش ماشین کاری است که همانند روش فرجینگ ابتدا به یک قطعه بزرگ فلزی نیاز داریم .

تفاوت اصلی این است که قطعه مورد نیاز برای ماشین کاری از قبل فرج شده است و به جای اینکه شکل اصلی از وارد شدن فشار هیدرولیکی تولید شود از عملیاتهای ماشین کاری تولید می شود.

به هر حال از مزایای روش ماشین کاری این است که برای تولید یک قطعه از آن مقدار هزینه ای که برای اعمال فشار در روش فرجینگ مصرف میشد خبری نیست. علاوه بر این در این روش پس از تهیه وسایل لازم هزینه های دیگری برای تولید انبوه وجو د ندارد.

**تصاویر و فیلم های مرتبط با میل لنگ/ فیلم‌ها/ مقایسه‌ی میل لنگ ریختگی و فورج (۱)**

**تصاویر و فیلم های مرتبط با میل لنگ/ فیلم‌ها/ مقایسه‌ی میل لنگ ریختگی و فورج (۲)**

**تصاویر و فیلم های مرتبط با میل لنگ/ فیلم‌ها/ مقایسه‌ی میل لنگ ریختگی و فورج (۳)**

**تصاویر و فیلم های مرتبط با میل لنگ/ فیلم‌ها/ مقایسه‌ی میل لنگ ریختگی و فورج (۴)**

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

# بخش ششم

# آلیاژهای تولید میل‌لنگ

این مواد باید شکل پذیر باشند و به سادگی ماشین کاری و عملیات حرارتی شوند وخصوصیاتی از جمله استحکام و مقاومت کافی ، سختی و سفتی بالا داشته باشند.میل لنگ فولادی به دو روش فورج و ریخته گری تولید میشود. بلبرینگ (یاتاقان) اصلی و آستری بلبرینگ میله ی اتصال از آلیاژ بابیت (آلیاژی از قلع و سرب ) تولید می شود.میل لنگ های فورج مستحکم تر از میل لنگ های ریختگی هستند اما پر هزینه تر هم هستند .میل لنگ فورج رااز آلیاژ فولاد(اس-آ-ای ۱۰۴۵) و یا فولاد های مشابه می سازند . از طریق فرایند فورجینگ میله ی محکم و متراکم با یک نقطه ی متحرک به موازات جهت تنش اصلی تولید می شود .میل لنگ های ریختگی از جنس فولاد، چدن گره دار (نودولار) و چدن چکش خوار هستند. مزیت اصلی روش ریخته گری این است که در این روش هزینه های مربوط به مواد و ماشین کاری کاهش می یابد به این علت که ممکن است میل لنگ تولیدی به شکل و اندازه های اصلی نزدیک و شامل (وزنه های تعادل یا پارسنگ ) باشد. میل لنگ های ریختگی میتوانند بارگذاری از تمام جهات را تحمل کنند چراکه ساختار دانه ای ماده ی تشکیل دهنده شان سرتاسر یکسان است . وزنه های تعادل در میل لنگ های ریختگی کمی بزرگتر از وزنه های تعادلی میل لنگ های فورج هستند زیرا فلز ریختگی از تراکم و چگالی کمتری برخوردار است وتا اندازه ای سبکتر است.

عموما میل لنگ های خودرو در گذشته فورج می شدند تا تمام خصوصیات مرغوب را داشته باشند. به هر حال همراه با سیر تکامل چدن های گره دار ریختگی و بهبود تکنیک های ریخته گری ، امروزه میل لنگ های ریختگی برای تولیدات محدود ارجحیت دارند و میل لنگ های فورج فقط برای کار سنگین کاربرد دارند.انتخاب مواد میل لنگ و عملیات حرارتی آن برای کاربرد های مختلف در زیر آمده است.

در جدول زیر، آلیاژهای مناسب برای تولید میل‌لنگ را به همراه جزئیات مشاهده می‌کنید:

Chemistry of Crankshaft Alloys
Nominal Percentages of Alloying Elements

| Material | AMS | C | Mn | Cr | Ni | Mo | Si | V |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4340 | 6414 | 0.40 | 0.75 | 0.82 | 1.85 | 0.25 | | |
| EN-30B | | 0.30 | 0.55 | 1.20 | 4.15 | 0.30 | 0.22 | |
| 4330-M | 6427 | 0.30 | 0.85 | 0.90 | 1.80 | 0.45 | 0.30 | 0.07 |
| 32-CrMoV-13 | 6481 | 0.34 | 0.55 | 3.00 | <0.30 | 0.90 | 0.25 | 0.28 |
| 300-M | 6419 | 0.43 | 0.75 | 0.82 | 1.85 | 0.40 | 1.70 | 0.07 |
| Key: | C = Carbon | | Mn = Manganese | | | Cr = Chromium | | |
| | Ni = Nickel | | Mo = Molybdenum | | | Si = Silicon | | |
| | V = Vanadium | | AMS = Aircraft Material Spec Number | | | | | |

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

## ۶-۱ فولاد منگنز-مولیبدن

این مورد یک فولاد نسبتا ارزان در روش فورج است که برای تعدیل میل لنگ موتور بنزینی استفاده می شو د. ترکیب این آلیاژ شامل ۰.۳۸٪ کربن ، ۱.۵٪ منگنز و ۰.۳٪ مولیبدن و زمینه ی آهن است .فولاد از طریق کوئنچ شدن در روغن از دمای ۱۱۲۳ کلوین و حرارت دادن تا دمای ۹۷۳ کلوین عملیات حرارتی شده که موجب سختی سطحی تا ۲۵۰ برینل می شود. با این سختی میله برای بلبرینگ هایی با روکش قلع-آلومینیم و سرب-مس مناسب است.

## ۶-۲ فولاد کروم(۱٪)-مولیبدن

این فولاد فورج نیز برای کار سنگین و متوسط در میل لنگ موتورهای بنزینی و دیزلی استفاده می شود . ترکیب آن شامل ۰.۴٪ کربن ، ۱.۲٪ کروم ، ۰.۳٪ مولیبدن و زمینه ی آهن است. در این مورد فولاد برای عملیات حرارتی شدن، از دمای ۱۱۲۳ کلوین در روغن کوئنچ می شود و سپس در دمایی کمتر از ۹۵۳ کلوین حرارت داده شده و به سختی ۲۸۰ برینل می رسد. به منظور استفاده از بلبرینگ های سخت تر ، می توان با حرارت بیشتر میله با سختی ۴۸۰ برینل را تولید کرد.برای کارهای بسیار سنگین می توان از طریق پروسه ی نیتریدینگ سختی میله را تا ۷۰۰ دی پی ان افزایش داد که این میله برای تمامی بلبرینگ ها با روکش های قلع-آلومینیم و برونز مناسب است.

## ۶-۳ فولاد نیکل(۲.۵٪)-کروم-مولیبدن

این فولاد فورج برای کار سنگین در موتورهای دیزلی کاربرد دارد . ترکیب آن شامل ۰.۳۱٪ کربن ، ۲.۵٪ نیکل ، ۰.۶۵٪ کروم ، ۰.۵۵٪ مولیبدن و زمینه ی آهن است . شیوه ی عملیات حرارتی این فولاد بدین صورت است که ابتدا از دمای ۱۰۰۳ کلوین در روغن کوئنچ شده و سپس در دمایی مناسب (کمتر از ۹۳۳ کلوین) حرارت داده می شود . بدین ترتیب سختی آلیاژ به مح دوده ی ۳۰۰ برینل می رسد. این فولاد از فولادهای منگنز- مولیبدن و کروم-مولیبدن گرانتر است اما خواص مکانیکی بهتری نسبت به آنها دارد.

## ۶-۴ فولاد کروم(۳٪)-مولیبدن و یا کروم(۱.۵٪)-آلومینیم-مولیبدن

این فولادهای فورج که در میل لنگ موتورهای دیزلی استفاده می شوندبرای ب لبرینگ هایی از جنس مواد سخت با سفتی بالا مناسبند.ترکیب آنها بدین شرح است: اولی شامل ۰.۱۵٪ کربن ، ۳٪ کروم و ۰.۵٪ مولیبدن و دومی شامل ۰.۳٪ کربن ، ۱.۵٪ کروم

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

، ۱.۱٪ آلومینیم و ۰.۲٪ مولیبدن است.عملیات حرارتی آنها به ترتیب شامل کوئنچ و حرارت در ۱۱۹۳ کلوین و ۸۸۳ کلوین و یا در ۱۱۶۳ کلوین و ۹۶۳ کلوین است. سخت سازی آنها به روش نیتریدینگ به این صورت است که نیتروژن جذب لایه های سطحی آنها می شود. اگر این فرایند به درستی در بخش های مختلف و درونی میله انجام شود ، سفتی میل لنگ حداقل ۳۰٪ افزایش در مقایسه با حرارت دادن سطحی ، خواهد داشت. فولاد شامل ۳٪ کروم دارای سختی در حدود ۸۰۰ تا ۹۰۰ دی پی ان است . از طرف دیگر فولاد دارای ۱.۵٪ کروم کمی شکننده تر است اما دارای سختی بیشتر( حدود ۱۰۵۰ تا ۱۱۰۰ دی پی ان) است.

## ۵-۶ چدن های گره دار(نودولار)

این چدن ها به نام های چدن اسفرویدال- گرافیت(گرافیت کروی) و چدن داکتیل نیز شناخته شده اند . این چدن های خاکستری حدود ۳ تا ۴٪ کربن و ۱.۸ تا ۲.۸٪ سیلیس دارند و گره های گرافیت در یک ساختار پرلیتی پراکنده شده اند .برای رسیدن به این ساختار ۰.۰۲٪ سزیم یا ۰.۰۵٪ منیزیم ویا حتی هردو را به مذاب اضافه می کنیم تا گوگرد از آن خارج شود و کرات بسیار زیاد و ریز(گرافیت) در ماده ی جدید (آ-اس-کاست) تشکیل شود. سختی این ماده (۲۵۰ تا ۳۰۰ برینل) بیشتر از سختی فولاد هایی با سفتی مشابه(۲۰۰ تا ۲۵۰ برینل) است. که این سختی با روش حرارت می تواند به ۵۵۰ تا ۵۸۰ برینل برسد. البته روش نیتریدینگ نیز در صورت لزوم قابل استفاده است.

چدن گره دار مزیت هایی نسبت به چدن خاکستری دارد(نقطه ی ذوب پایین ، سیالیت و قابلیت ریخته گری مناسب ، قابلیت ماشین کاری خوب و مقاومت و دوام) ، همچنین خواص مکانیکی فولاد(شامل سفتی ، سختی ، استحکام و تنش تسلیم بالا و...) را نیز داراست. امروزه تعداد کثیری از میل لنگ ها برای موتورهای دیزلی و بنزینی ، به جای فولاد فورج گران قیمت، از جنس چدن گره دار ساخته می شوند. برای برطرف کردن نامرغوبیت اندک این چدن ها از منظر تنش تسلیم و سفتی ، از مقاطع بزرگتر و حداکثر تعداد میله های اصلی استفاده می شود.

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

# منابع و مآخذ

## مقالات

1- Authors: Fred Durek and Michael Oddi, GM Powertrain, and Alfred Spada, Metal Casting Design & Purchasing magazine.

2- Fatigue Performance Evaluation of Forged Steel versus
Ductile Cast Iron Crankshaft: A Comparative Study, Jonathan Williams, Farzin Montazersadgh and Ali Fatemi, Great Designs in Steel, Livonia, Michigan, august, 2007.

3- A modified version of an article by Jack Kane which appeared in issue 033 of RACE ENGINE TECHNOLOGY MAGAZINE

4- Deformation Processing & Forging Introduction- ver. 1 - Prof. Ramesh Singh, Notes by Dr.Singh/ Dr. Colton

5- Journal of Industrial and Systems Engineering - Vol. 3, No. 1, pp 27-37 - Spring 2009 - Quality Tools to Reduce Crankshaft Forging Defects: An Industrial Case Study

6- Advances in 3-D Forging Process Modeling - W J Slagter, C J L Florie and A C J Venis - MSC.Software Corporation, Groningenweg 6, 2803 PV Gouda, The Netherlands

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

## وب‌سایت‌ها

1- www.vetteweb.com

2- www.darcast.com

3- www.afsinc.org

4- www.thelibraryofmanufacturing.com

5- www.achfoam.com

6- www.sfsa.org

7- www.junauto.co.jp

8- www.what-when-how.com

9- www.schulergroup.com

10- www.emtc.lt

11- www.east-engineering.eu

12- www.precisionenginetech.com

13- www.alfing.de

www.Iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد