

# فرایندهای ریخته‌گری با مدل کف (Foam) از میان رونده

دکتر رضا قاسم‌زاده

دانشیار دانشکده مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندس حمیدرضا شاکری

مربی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

## چکیده:

مقاله حاضر به منظور معرفی روشهای گوناگون تهیه قطعات ریخته‌گری با استفاده از مدل‌های پلیمری تهیه شده است. پلیمرهای مورد مصرف که انبساط پذیر هستند، قبل از ریخته‌گری از قالب خارج نمی‌شوند. این مسأله باعث سهولت تولید می‌شود. در این مقاله مراحل تولید به اختصار تشریح شده‌اند. همچنین متالورژی فرایند مورد تأکید بسیار قرار گرفته است. پیشرفتهای اخیر در این فرایند منجر به فرایندهای تکامل یافته‌ای شده است که در حد امکان، این فرایندها نیز معرفی و تشریح شده‌اند.

## Casting Process with the Use of Expandable Polystyrene Pattern

R.Ghasemzadeh, Ph.D.

Associate prof. , Metallurgy Dept.

Iran University of Science & Technology

H.R. Shakeri, M.Sc.

Dept. of Materials Science & Engineering

Tarbiat Modarres University

### Abstract:

---

*Interest in the lost foam casting (LFC), also known as the evaporative pattern, evaporative foam, full mold, evaporative casting and volatile pattern casting process is growing rapidly.*

*The use of expandable polymers (e.g. expandable polystyrene-EPS) pattern for the*

production of castings dates back to 1958. An EPS pattern was imbedded in molding sand and metal poured into the cavity-less mold. The molten metal vaporized the pattern as the mold filled. This was the full mold process, which is still in use today.

The present paper was written to outline the steps involved in producing casting utilizing the LFC process. The metallurgical topics and recent developments in this process were reviewed. Recent developments indicate that the use of expandable polystyrene patterns and unbonded sand casting techniques is a potentially viable method for producing complex, close-tolerance components.

## مقدمه

بکارگیری نیروی انسانی کمتر ماهر را فراهم می‌آورد.

### تاریخچه

استفاده از مدل کف پلی استیرین در سال ۱۹۵۸ میلادی توسط فردی به نام H.F. Shroyer با شماره ۲۸۳۰۳۴۳ به عنوان اختراع در آمریکا ثبت شد. وی از ماشینکاری بلوک پلی استیرین مدل مورد نظر را تهیه کرد و با استفاده از ماسه تر اقدام به قالب گیری و ریخته گری نمود. تخلخل و مک و کیفیت سطحی نامناسب، کاربرد ابداع وی را محدود نمود. در سال ۱۹۶۲ میلادی Smith و Dietert مسأله استفاده از ماسه فاقد چسب را مطرح کردند و در همان سال T.R. Smith استفاده از ماسه فاقد چسب همراه با مدل پلی استیرین را با شماره ۳۱۵۷۹۲۴ به عنوان اختراع در آمریکا ثبت نمود. در سال ۱۹۶۴ دو نفر محقق انگلیسی به نامهای Butler و Pope پارامترهای بحرانی و مکانیزمهای فرایند را مورد مطالعه قرار دادند که تا سال ۱۹۸۱ کاربرد زیادی پیدا نکرد. در این سال با انقضای حق امتیاز یکی از مخترعین روش، کاربرد فرایند توسعه چشمگیری یافت. به طوری که امروز در صنایع بزرگ اتومبیل سازی نظیر فورد، جنرال موتورز و فیات از این روش جهت تولید قطعاتی نظیر مانیفولد و سر سیلندر و... استفاده می‌گردد:

این فرایند با اسامی دیگری نیز شهرت یافته است که برخی از آنها عبارتند از:

- The full mold process
- The cavity-less expanded polystyrene

در سالهای اخیر در زمینه‌های مختلف صنعتی پیشرفتهای پرشتابی صورت گرفته است و روشها، مواد و فرایندهای اقتصادی تری بروز نموده‌اند. در این راستا صنایع ریخته گری همواره در تنگناهای اقتصادی بیشتری قرار گرفته‌اند. در جهت خروج از این تنگنا توسعه فرایندهایی که قادر به رقابت اقتصادی و کیفی با سایر روشهای تولیدی باشند به عنوان سرلوحه کار هدایتگران صنایع ریخته گری در جهان صنعتی قرار گرفته است.

بر اساس مطالعات و تجربیات انجام شده، روشهای ریخته گری که از مدل کف (Foam) از میان رونده استفاده می‌کنند پاسخگوی نیازهای امروز صنایع ریخته گری هستند. یکی از دست‌اندرکاران صنایع ریخته گری در اروپا در ارتباط با این فرایندها چنین می‌گوید: «بدون فرایند ریخته گری با مدل کف از میان رونده هیچ‌امیدی به ادامه حیات صنایع ریخته گری نداشتیم».

فرایند ریخته گری با مدل کف از میان رونده برای کشور ما ایران، نیز جاذبه‌هایی دارد که از آن جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- مواد اولیه مدل کف از مشتقات نفت خام و گاز طبیعی هستند، بنابراین در صورت برنامه‌ریزی امکان تولید آنها در داخل کشور وجود دارد.

- با بکارگیری مدل کف و استفاده از ماسه فاقد چسب، امکان مصرف انواع ماسه داخلی فراهم شده و ضمن حذف یا کاهش واردات انواع ماسه و رزین، بازیابی ساده و سریع ماسه نیز میسر است.

- سادگی نسبی فرایند امکان تولید محصولی پر کیفیت با

casting process

- The evaporative foam casting
- The evaporative pattern casting
- expandable polystyrene molding

فرایندهای توسعه یافته و تکمیل شده که براساس استفاده از

مدل کف هستند نیز با اسامی زیر معروفند:

- The Polycast process
- The Replicast process

5mm تا 1m می باشد.

- ۴) وزن قطعات تولیدی بین ۱ کیلوگرم تا ۵۰ تن تغییر می کند.
- ۵) کیفیت سطح قطعه تابعی از کیفیت سطحی مدل (Expandable polystyrene) است.
- ۶) تolerانسهای ابعادی متداول به راحتی قابل حصول است.
- ۷) بهتر است برای جای دادن مدل در ماسه از ایجاد بستر سیال ماسه و وارد کردن تدریجی مدل استفاده شود.

### تئوریا و مکانیزمها

فرایند ریخته گری با مدل کف از میان رونده همراه با استفاده از ماسه فاقد چسب از ابتدا مورد تردید بوده است. برای توجیه کارایی فرایند، پاسخ به دو سؤال زیر ضروری است:

- ۱) چرا عملیات ریخته گری تداوم یافته و شکل مدل باقی می ماند؟
- ۲) چرا ماسه بدون چسب (خصوصاً در سیستم راهگامی) توسط جریان مذاب شسته نمی شود؟

به طور کلی جهت توجیه کارایی فرایند دو تئوری یا مکانیزم ارائه گردیده است:

الف) تئوری Dietert یا تئوری اتصال موقت: چنین پیشنهاد می کند که به دلیل میعان و متراکم شدن محصولات تجزیه مدل کف بر روی ماسه یک اتصال موقت بین ذرات ایجاد می شود. براساس این تئوری عامل اساسی موفقیت فرایند، تبخیر مدل و ممانعت از احتراق است.

ب) تئوری بدون محفظه No Cavity: براساس این تئوری اگر محفظه و حفره ای در قالب نداشته باشیم - چنانکه در روش قالب پر چنین است - دیگر عامل چسبنده ای در ماسه نیاز نیست. براساس این تئوری عامل موفقیت فرایند بستگی به سرعت بارریزی دارد. اگر سرعت پرشدن همان سرعت تبخیر باشد دیگر در هیچ زمانی محفظه ای به وجود نمی آید و دیگر ماسه نیازی به حمایت ندارد.

مطالعات و آزمایشات Butler و Pope نشان می دهد که موفقیت فرایند در ارتباط با فلزات با دمای ریخته گری پائین به سادگی با دو تئوری فوق قابل توجیه است و در ارتباط با فلزات با دمای ریخته گری بالا علاوه بر اثر اتصال موقت ناشی از محصولات تجزیه متراکم شده در بین ذرات ماسه، عوامل دیگری نیز دخیلند.

### کلیات فرایند

در این روش برای تهیه قطعه مراحل متوالی زیر باید انجام شود:

- تهیه مدل از جنس کف پلی استیرن
- تهیه اجزاء سیستم راهگامی و تغذیه از کف پلی استیرن و اتصال آنها به مدل
- پوشش کردن مدل (بخشهای درونی و بیرونی)
- خشک کردن پوشش
- استقرار مجموعه مدل در یک درجه یک تکه که در ته آن مقداری ماسه بستر موجود است.
- ورود ماسه در اطراف مدل
- ایجاد ارتعاش و متراکم کردن ماسه
- انتقال قالب به ریخته گری و بارریزی
- تخلیه درجه و بازیابی ماسه
- عملیات نهایی قطعه

پروفسور Wittmoser که در رابطه با این فرایند تلاشهای بسیار کرده است نکات زیر را به عنوان مشخصات فرایند ذکر می نماید:

- ۱) حساسیت به خرابی و اعوجاج قطعه با کاهش ضخامت دیواره قطعه افزایش می یابد.
- ۲) قطعات ریختگی فولادی که کرین کمتر از ۰/۱ درصد نیاز دارند را نباید از این روش تهیه کرد [البته ابداع روش ربلی کست با پوسته سرامیکی این مشکل را رفع کرده است].
- ۳) محدوده تغییرات ضخامت دیواره قطعات ریختگی بین

مهمترین عامل اضافی، حمایت اعمالی توسط پوشش دیرگداز است که توسط گازهای حاصل از تجزیه مدل در تماس تنگاتنگ با ماسه قرار می‌گیرد.

در ارتباط با عدم بروز ماسه شویی هم چنین گفته شده است که در فلزات با نقطه ذوب پایین چون با یک سرعت بارریزی بالا دیگر محفظه خالی به وجود نمی‌آید، بنابراین ماسه مکانی برای حرکت ندارد (ماسه خشک، عاری از مواد آلی و با چگالی بالا). در فلزات با نقطه ذوب بالا نیز به دلیل تشکیل یک پوسته تیریدی یا اکسیدی در فصل مشترک فلز - قالب از ماسه شویی جلوگیری می‌شود. در رابطه با عدم ماسه شویی عوامل دیگری نظیر پوشش اعمال شده بر مدل و کشش سطحی در فصل مشترک هم دخیل هستند. علاوه بر این، یکی از دلایل ماسه شویی در روشهای متداول ریخته گری اثر تشعشع حاصل از مذاب بر روی دیواره‌های قالب است که باعث شکسته شدن باندهای بین ماسه و... می‌شود ولی در فرایندهایی که از مدل کف از میان رونده استفاده می‌کنند مدل کف که یک ماده عایق است مانع از تشعشع شده، بنابراین حتی با کاربرد ماسه‌های رزین دار احتمال ماسه شویی از میان می‌رود.

#### ماده و خواص مدل

عموماً برای تهیه مدل از پلی‌استیرین استفاده شده است. این ماده چگالی پایینی دارد و همانطور که در تصویر ۱ ملاحظه می‌شود، دارای ساختاری سلولی است که فقط حدود ۲ درصد مواد آلی جامد دارد. فرمول پایه آن  $C_6H_5-CH=CH_2$  می‌باشد. این ماده از نظر ترکیبی محتوی ۹۴-۹۲ درصد کربن، ۴ تا ۸ درصد هیدروژن می‌باشد. علاوه بر این برای انبساط پذیر کردن این ماده، یک عامل باد کننده هیدروکربنی نظیر پنتان نیز به آن اضافه می‌شود. این ماده در حالت خام به صورت دانه‌های کوچک با چگالی نسبتاً بالا  $64 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$  عرضه می‌شود.

پلی‌استیرین انبساط پذیر یا EPS اولین بار در سال ۱۹۵۴ تهیه شده است و از مشتقات نفت خام و گاز طبیعی می‌باشد. پلی‌استیرین انبساط پذیر یک ماده ترموپلاستیک است و با اعمال گرما دانه‌ها نرم شده، با انبساط عامل باد کننده هیدروکربنی دانه‌های EPS شروع به انبساط می‌نمایند. EPS به صورت

اختصاصی برای ریخته گری تهیه نشده است و به همین علت فقط رده‌های خاصی از آن جهت کاربرد به عنوان مدل در ریخته گری مناسبند؛ رده‌های مختلف این ماده در جدول ۱ گردآوری شده‌اند.

امروزه پلی‌استیرین انبساط پذیر مناسب جهت ریخته گری با اسم تجارتي Styrofoam و با رنگ آبی به بازار عرضه شده است. علاوه بر این، مواد کف جدیدی نیز در حال توسعه هستند؛ به عنوان مثال می‌توان از پلی‌متیل متا کریلات PMMA نام برد که اگرچه از برخی جهات بر EPS ارجحیت دارد ولی به دلیل پاره‌ای از مشکلات از جمله کم بودن استحکام هنوز به عنوان جانشین جدی برای پلی‌استیرین تلقی نمی‌شود.

نیازهای عمومی یک ماده به عنوان مدل برای کاربرد در روش ریخته گری با مدل کف از میان رونده در جدول ۲ گردآوری شده است. یکی دیگر از موارد مهم در ماده مدل، کم بودن میزان گوگرد آن است.

به طور کلی تجزیه EPS به دو صورت احتراق و یا تبخیر انجام می‌گیرد. در صورت احتراق برحسب مقدار اکسیژن موجود، محصولات تجزیه هیدروکربنها و کربن آزاد هستند. در طول فرایند ریخته گری با مدل کف از میان رونده پیوسته تلاش در جهت تبخیر مدل و گریز از احتراق آن است. درجه تجزیه و نوع محصولات تجزیه و بسته به دما می‌باشد که محصولات تجزیه در دماهای مختلف در جدول ۳ آمده است. مقادیر ارائه شده در جدول جهت مواد مهم در شکل ۲ رسم شده است.

#### جزئیات فرایند

اولین مرحله ساخت مدل کف پلی‌استیرین است. این مدل درست همانند قطعه‌نهایی ساخته شده و فقط انقباض قطعه در حین انجماد را در نظر می‌گیریم. مدل را از دو طریق می‌توان تهیه کرد. یک روش غیر متداول ماشین کاری و برش بلوک کف است که بیشتر برای تهیه نمونه اولیه و کنترل طراحی به کار می‌رود. روش کلی و متداول که برای تولید صنعتی مناسب است، قالب گیری مدل است.

EPS خام دارای چگالی  $64 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  است ولی قطعه

نهایی باید چگالی در محدوده  $3 \text{ kg/m}^3 - 27$  داشته باشد (جدول ۴). این کاهش زیاد چگالی در یک مرحله امکان پذیر نیست. بنابراین در مرحله تولید مدل کف، قبل از قالب گیری یک مرحله پیش انبساط لازم است. مرحله پیش انبساط یا درون یک محفظه پیش گرم انجام می شود و یا با استفاده از بخار گرم با دمای  $120^\circ\text{C} - 110^\circ\text{C}$  انجام می گیرد. عمل پیش انبساط در یک پیش منبسط کننده انجام می گیرد که انواع آن عبارتند از:

۱) پیش انبساط دهنده تصادفی

۲) پیش انبساط دهنده خلایی

۳) پیش انبساط دهنده Unutex

پیش انبساط دهنده تصادفی چگالی مناسب را فراهم نمی کند. امروزه متداولترین نوع پیش منبسط کننده همان پیش منبسط کننده خلایی است. در این نوع پیش منبسط کننده دانه های خام EPS به درون یک محفظه پیش گرم تخلیه شده، دانه ها تحت اثر حرارت شروع به انبساط می نمایند سپس با اعمال خلاء امکان انبساط بیشتر فراهم شده، آنگاه تحت خلاء آب اضافه می کنند و با این کار دانه های EPS را پایدار می نمایند تا بعد از خروج از پیش منبسط کننده، انبساط تأخیری ندهند، پیش منبسط کننده Unutex به جای خلاء از هوای فشرده استفاده می کند. چگالی مواد پس از مرحله پیش انبساط توسط وزن کردن کنترل می شود و چگالی مورد نظر تا  $\pm 2\%$  تolerانس خواهد داشت. شکل ۳ مراحل متوالی تا قبل از قالب گیری را نشان می دهد. برای قالب گیری مدلها از قالبهای آلومینیومی با پوششی از تفلن استفاده می شود. قالبگیری شامل چهار مرحله زیر است:

۱) مرحله پر کردن: در این مرحله ماده پیش منبسط به صورت پنوماتیکی به داخل قالب فرستاده می شود. یک نواخت پر شدن قالب اهمیت زیادی دارد.

۲) ترکیب و امتزاج: در این مرحله با عبور بخار با دمای  $120^\circ\text{C} - 110^\circ\text{C}$ ، دانه های پیش منبسط نرم شده و شروع به انبساط مجدد می نمایند و در انتهای این مرحله دانه ها به یکدیگر جوش خورده و به دیواره قالب هم فشار می آورند.

۳) سرد کردن: در این مرحله به منظور جلوگیری از انبساط تأخیری و حفظ صحت ابعادی و سهولت خروج مدل از قالب با

پاشیدن آب به پشت قالب آن را سرد می نمایند.

۴) خارج سازی: در این مرحله به صورت مکانیکی یا پنوماتیکی مدل از قالب خارج می شود. تصویر ۴ مراحل فوق را نشان می دهد. در مرحله بعد اجزاء مختلف قالب گیری شده، بر روی هم سوار می شوند (مونتاژ). عمل سوار کردن در خطوط تولید به صورت خود کار انجام می گیرد. برای قطعات کم تعداد یا نمونه اولیه، سوار کردن به صورت دستی نیز عملی است. در این مرحله معمولاً از چسب برای سوار کردن استفاده می شود. این چسبها باید با مدل سازگار باشند و خاکستر یکسانی نیز داشته باشند. چسبهای مصرفی از انواع مختلفی هستند مثلاً از چسبهای مذاب گرم، سیمان کائوچویی، مذاب گرم کفی شده و چسبهای حلال پایه کائوچوی طبیعی - رزین استفاده می شود. گاهی در سوار کردن اجزاء از اتصالات مکانیکی و یا اجزاء نر و ماده هم استفاده می شود. عدم دقت در مرحله سوار کردن موجب افزایش عیوب و قطعات برگشتی می شود. پس از اتمام مرحله سوار کردن، مدلها تکمیل شده (مدل همراه با تغذیه و سیستم راهگامی) پوشش می شود. پوشش دادن مدل در این فرایند اهمیت زیادی دارد و جهت حصول اهداف زیر انجام می گیرد.

۱) ایجاد قابلیت عبور گاز به مقدار معین

۲) ممانعت از ریزش ماسه

۳) ایجاد سطوح مناسب

انتخاب نوع پوشش بر اساس نوع فلز و ضخامت مدل است؛ به هر حال حصول تعادل بهینه ای بین استحکام مکانیکی پوشش و قابلیت عبور گاز ضروری است. شرایط کلی که باید در پوشش وجود داشته باشند عبارتند از: چسبندگی کافی، ایجاد رسوب یکنواخت، انعطاف پذیری، مقاومت نسبت به سایش، نفوذ پذیری نسبت به گازها، مقاومت نسبت به نفوذ مذاب و جدا شدن آسان از قطعه پس از ریخته گری. دوغاب پوشش باید دقیقاً کنترل شود و درجه حرارت دوغاب و میزان مخلوط کردن آن دقیقاً باید تنظیم گردد.

همانطور که قبلاً ذکر شد از عوامل مهم در پوشش، قابلیت عبور گاز آن است؛ اینک جهت بررسی بیشتر اشاره ای به شرایط

ریخته‌گری یک فلز (مثلاً چدن) می‌نماییم. شکل ۵ شرایط ورود مذاب و نحوه خروج گازها را به همراه منحنیهای چگونگی تغییرات محصولات تجزیه مدل کف با درجه حرارت، نشان می‌دهد. درجه حرارت بین جبهه پلی‌استیرن مذاب و فلز مذاب از ۳۰۰°C تا ۱۲۰۰°C تغییر می‌کند. در این شرایط، درجه تجزیه حرارتی حاصل شده در بخشی از محصولات (گازها) با نزدیکتر شدن به فلز مذاب و افزایش زمان تماس بزرگتر خواهد بود. با حفظ عوامل هندسی که قادر به تأثیرگذاری بر زمان بارریزی هستند می‌توان قابلیت‌های عبور گاز متفاوت را به زمانهای تماس متفاوت با فلز مذاب و در نتیجه اتمسفرهای (فاز) گازی متفاوت مرتبط کرد. به عنوان مثال قابلیت عبور گاز کم منجر به زمان تماس بیشتر شده، اتمسفری غنی نسبت به کربن و هیدروژن و با محتوی کم هیدروکربنها ایجاد می‌شود و برعکس. این پدیده تأثیرات مهمی بر متالورژی قطعه ریختگی خواهد داشت.

رفتار پوشش در شرایطی که درجه حرارت فلز مذاب یک عامل اساسی در میزان فضای خالی باشد باد و وضعیت حاشیه‌ای مشخص شده است:

(الف) قابلیت عبور گاز پوشش خیلی پایین است: در این شرایط فشار گاز در فضای خالی افزایش یافته تا به فشار متالواستاتیک می‌رسد، در این شرایط گازها به صورت ناپیوسته و بی‌نظم از طریق فلز مذاب خارج می‌شوند. هر زمانی که فشار کاهش یابد، جبهه فلز به صورت ناگهانی جلو رفته و دیواره‌های قالب را «ضربت» می‌زند. شواهد این ضربت زدن را می‌توان در باد کردن و برجستگی داشتن قطعه ریختگی و یا به صورت جابجایی ماسه فشرده به درون حفرات مدلها دید.

(ب) قابلیت عبور گاز پوشش خیلی بالاست؛ در این حالت افت فشارهای موضعی برای سقوط ماسه کافی است. در واقع لایه پوشش به توسط گاز یا فشار مذاب حمایت نمی‌شود و دیگر نمی‌تواند وزن ماسه را تحمل نماید. نتیجه این امر قطعات سوراخ‌دار و یا قطعات با سطوح جابجا شده می‌باشد. در شرایط حاد قطعه بی‌شکل خواهد شد.

معمولاً وقتی سرعت ورود مذاب زیاد باشد نواقصی از نوع

حالت «الف» بروز می‌کند و وقتی سرعت ورود مذاب خیلی کند باشد نواقصی از نوع حالت «ب» بروز می‌نماید.

از نظر کاربردی دوغاب پوشش شامل عوامل زیر است:

(۱) دیرگداز (پودر نرمی از آلومینا، کرمیت، زیرکن، الوین و سیلیس)

(۲) عامل پراکنده‌کننده، وظیفه‌اش معلق نگهداشتن ذرات است

(۳) عامل چسبندة آلی، جهت حصول چسبندگی کافی بعد از خشک شدن

(۴) عامل Thixotropic؛ جهت ایجاد حالتی که دوغاب در حالت ساکن ژلاتینی شده و در صورت هم زدن محلول شود.

(۵) ماده حمل‌کننده؛ که باید با مدل سازگار باشد که می‌تواند آب یا الکل باشد.

عملیات پوشش می‌تواند توسط برس، اسپری یا فروری انجام شود. خشک شدن پوشش می‌تواند به صورت طبیعی در ۲۴ ساعت انجام گیرد ولی عموماً این کار را در دمای ۴۰°C تا ۶۰°C در طی ۶-۲ ساعت انجام می‌دهند.

مرحله بعدی فرایند، جای دادن مجموعه مدل در ماسه است، برای این کار از یک درجه یک تکه استفاده می‌شود که در داخل آن ۲۵ تا ۷۵ میلی‌متر ماسه بستر وجود دارد، سپس با استفاده از یک سیستم بارش ماسه، درجه تدریجاً پر شده سپس توسط یک سیستم متر اکم‌کننده فرکانس بالا یا متوسط از بخش تحتانی یا کناری مرتعش می‌شود؛ فرکانس، دامنه و شدت ارتعاش عوامل حساسی هستند. درجه‌های مصرفی باید کاملاً درزگیری شده باشند.

ماسه مصرفی می‌تواند از انواع سیلیسی، زیرکنی و سیلیکون کاربیدی و... باشد. حتی گاهی از برخی اکسیدهای بی‌مصرف آلومینیم هم استفاده شده است. شکل ماسه‌ها باید بطور جزئی گوشه‌دار تا کروی باشد. به طور کلی ماسه باید دارای اندازه متوسط باشد. این ماسه معمولاً دو یا سه الک می‌باشد. برای قطعات آهنی ماسه با عدد نرمی ۳-۳۵ AFS، و برای قطعات غیر آهنی ماسه با عدد نرمی ۳-۴۳ AFS، مناسب است.

ماسه مصرفی پس از پایان ریخته‌گری به راحتی قابل بازگشت به خط بوده و فقط باید دمای آن کاهش یابد.

پس از اتمام این مرحله درجه‌ها به بخش بارریزی منتقل شده، بارریزی انجام می‌گیرد. بارریزی معمولاً مشابه سایر روشها، ولی حساستر است. چند اصل باید در بارریزی مورد توجه باشد:

۱) استفاده از حداکثر سرعت بارریزی در شروع، جهت جلوگیری از احتراق.

۲) انجام عملیات بارریزی بدون درنگ و وقفه. پس از اتمام زمان انجماد، تخلیه قالبها صورت گرفته، قطعه به راحتی تمیز می‌شود و عملیات نهایی مورد نظر انجام می‌گیرد.

### ویژگیهای متالورژیکی فرایند

پدیده‌های شیمیایی و گرمایی همراه با تجزیه مدل‌های کف از میان رونده، و ویژگیهای متالورژیکی قطعات ریختگی را (خصوصاً در چدن با گرافیت کروی) تحت تأثیر قرار می‌دهد. آخالهای کربنی نامطلوب و دگرگونی در نسبتهای فریت - پرلیت بروز می‌کند؛ افزون بر این حذف عیوب انقباضی - که با توجه به طبیعت فرایند به ندرت رخ می‌دهند - مشکل می‌شود. البته با بهبود پوشش مصرفی و ماده مدل، این مشکلات قابل حل هستند.

همان طور که قبلاً ذکر شد؛ درجه حرارت به طور پیوسته از جبهه پلی استیرن به جبهه فلز مذاب بیشتر شده و براساس مقدار قابلیت عبور گاز پوشش، زمانهای تماس متفاوت محصولات تجزیه، منجر به درجه تجزیه متفاوت می‌شود. به عنوان مثال قابلیت عبور گاز پایین پوشش منجر به زمان تماس بیشتر و حصول اتمسفری غنی از کربن و هیدروژن می‌شود و برعکس. این پدیده اثرات متالورژیکی جالبی دارد که اینک به اهم آنها اشاره می‌شود.

۱) غلظتهای بالای کربن آزاد، به صورت توده‌های جامد خیلی ظریف در تماس با جریان فلز مذاب قرار می‌گیرند و اثر جوانه‌زایی خیلی مؤثری را ایجاد می‌نمایند که به افزایش درجه جوانه‌زایی یوتکتیک کمک می‌کند (شکل ۶).

۲) رسوب کربنی در فصل مشترک گاز - فلز، در چدنهای با کربن معادل بالا و خصوصاً در چدنهای با گرافیت کروی، ممکن است منبع آخالهای کربنی براق باشند. در چدنهای با کربن معادل بالا که گوگردزایی و اکسیژن‌زدایی شده‌اند

(چنانکه در حالت عملیات تلقیح با منیزیم پیش می‌آید)، مقادیر خیلی بالایی از کشتش سطحی مشاهده شده است. اضافه بر این به جهت درجه بالای اشباع مذاب چدن، کربن حاصل از تجزیه حرارتی بر روی فصل مشترک گاز - فلز تشکیل رسوباتی می‌دهد که در برخی حالات ممکن است متشکل از لایه‌های ضخیمی باشند که در حین تماس با جریان مذاب به راحتی به دام می‌افتند (شکل ۷).

مشخصات متالورژیکی و فیزیکی - مکانیکی قطعات تولیدی با فرایندهای مدل کف از میان رونده نیز با اثرات متقابل جبهه فلز مذاب و جبهه پلیمر تجزیه شونده مرتبط است؛ اول آنکه وقتی فلز پیش می‌رود به دلیل جذب افزونتر حرارت توسط واکنش تجزیه حرارتی گرماگیر، سریعتر سرد می‌شود. دوم آنکه (همان طور که قبلاً اشاره شد)؛ فلز مذاب ذرات کربنی حاصل از تجزیه مدل را در خود می‌گیرد و این ذرات به عنوان نطفه‌هایی برای جوانه‌زنی گرافیت در حین انجماد عمل می‌کنند.

سرد شدن سریع منجر به قطعاتی می‌شود که به داشتن سختی بالاتری نسبت به قطعات مشابه تولیدی توسط فرایندهای متداول دیگر (با همان ترکیب شیمیایی و همان شرایط جوانه‌زایی) تمایل دارند. از طرف دیگر غوطه‌وری ذرات کربنی اثر متضادی هم دارد؛ گرافیت‌زایی و تشکیل فریت را تشویق می‌کند و مجموعه اثر این دو پدیده منجر به قطعاتی می‌شود که استحکام نهایی (U.T.S) و استحکام تسلیم (Y.S.) بالاتری نسبت به قطعات مشابه تولید در ماسه دارند. اما سرد شدن خیلی سریع فلز مذاب ممکن است منجر به این شود که عیوب یا ناهنجاریهای ساختاری در زمینه فلزی، نظیر تشکیل موضعی یا پراکنده دندریتها (شکل ۸)، حضور کاربیدهای ظریف تحت تبریدی (شکل ۹)، سختی غیر یکنواخت یا ناپوستگی ناشی از به دام افتادن گازها، بروز نمایند.

براساس پاره‌ای از تحقیقات موارد زیر نیز در این بخش قابل بیان هستند:

- کربن حاصل از تجزیه شدیداً جلوی اکسایش و سرباره‌های اکسیدی (خصوصاً در آلیاژهای حاوی منگنز، کرم و آلومینیم) را می‌گیرد.

- زمان گرافیت زایی برای چدن چکش خوار با این روش کاهش یافته است.
- در چدن خاکستری، خاصیت جذب ارتعاش و مقاومت به سایش زیاد شده است.
- افزایش استحکام کششی تا ده درصد در چدن‌ها مشاهده شده است.

### مشکلات فرایند

یکی از مشکلات فرایند که در تولید انبوه مطرح است، انقباض مدل‌ها در فاصله بین قالب گیری مدل کف و مصرف در ریخته گری می باشد؛ این امر می تواند دقت ابعادی قطعات را از بین ببرد. منحنی‌های مربوط به این انقباض در تصویر ۱۰ آمده است. بخش اول منحنی‌ها ناشی از حذف رطوبت و بخش دوم ناشی از خروج عامل بادکننده هیدروکربنی می باشد.

مطالعات نشان می دهد که در زمان تقریبی ۷ روز بیش از ۷۰٪ انقباض انجام شده و در زمان تقریبی ۳۰ روز مدل کاملاً پایداری ابعادی می یابد. بنابراین برای حفظ دقت ابعادی قطعات لازم است انقباض مدل‌ها در طراحی اولیه در نظر گرفته شود و پس از پایدار شدن مدل‌ها از آنها استفاده گردد.

مشکل عمده دیگر در فرایند، عیوب کربنی هستند که ناشی از کربن تجزیه ای می باشند، علاوه بر این امکان افزایش درصد کربن وجود دارد که در فولادها مشکلات بیشتری ایجاد می کند.

عیوب کربنی سطحی عموماً در بخش‌های فوقانی قطعات ایجاد می شوند که این امر به دلیل شناور شدن کربن تجزیه ای بر روی مذاب می باشد. آزمایشات و مطالعات انجام یافته، مبین این امر است که برای حذف این عیوب سطحی باید تلاش در جهت توسعه تبخیر مدل و ممانعت از احتراق آن باشد. بنابراین استفاده از تغذیه کور و حذف هواکشها همراه با بارریزی سریعتر و راهگاه گذاری از بخش تحتانی توصیه شده است.

باتوجه به اینکه عیوب کربنی بیشتر در آلیاژهای آهنی رخ می دهند، بیشتر مطالعات بر روی عیب با تأکید بر فلزات آهنی صورت گرفته است. نتیجه این مطالعات مبین این امر است که در

دمای بارریزی فلزات آهنی محصولات تجزیه مدل کف کربن جامد و هیدروژن است که این کربن باعث بروز عیب می شود. همچنین مطالعات نشان می دهد که در این شرایط واکنش تجزیه مدل کف به صورت سینتیکی کنترل می شود و عوامل مختلفی بر سینتیک تجزیه مؤثرند که با دستکاری این عوامل می توان عیوب کربنی را حذف کرد ولی حذف کامل عیب با دستکاری تنها متغیر کلیدی یعنی ترکیب شیمیایی مدل کف عملی است. به همین جهت بر روی مواد پلیمری مختلف آزمایشاتی صورت گرفته و مشخص شده است که پلیمری موسوم به پلی متیل متا کریلات می تواند جایگزین خوبی برای پلی استیرن باشد. این دو نوع پلیمر تفاوت‌های آشکاری دارند که باعث تفاوت مکانیزم تجزیه آنها می باشد.

پلی استیرن انبساط یافته (یا EPS) با مکانیزم تقسیم یا برش تصادفی، تجزیه می شود؛ در این شرایط مواد گازی کمتر و مواد باقیمانده به صورت مایعی غلیظتر خواهند بود. این مایع غلیظ تمایل به تجزیه به مواد کربنی غیر فرار دارد. این مسأله به زمان اقامت طولانی تر در محدوده مدل و بالا رفتن دمای تجزیه مرتبط است؛ افزون بر این گروه معطر آویزان در استیرن، کربن را به عنوان یک محصول پایدار تجزیه در خود دارد. در عوض پلی متیل متا کریلات (یا PMMA) با مکانیزم جداسازی تجزیه می شود؛ در این شرایط مواد باقیمانده جامد کمتر شده و محصولات گازی بین ۴۰ تا ۵۰ درصد افزایش می یابند. تفاوت‌های دیگر PMMA با EPS به شرح زیر است:

۱) PMMA، ۳۲٪ بیشتر اکسیژن دارد، بنابراین تشکیل CO را افزایش می دهد.

۲) گروه‌های متیل موجود در PMMA به سادگی مبدل به هیدروکربنهای آلفاتیک گازی می شوند.

۳) PMMA تمایل دارد که مستقیماً از حالت جامد منبسط شده تبدیل به گاز شود.

بنابراین با کاربرد PMMA عیوب کربنی چه به صورت عیوب ظاهری و چه به صورت افزایش درصد کربن حذف شده، یا کاهش می یابند. اما تذکر این نکته ضروری است که به دلیل استحکام کمتر PMMA، کاربرد آن محدود است و هنوز



## روش رپلی کست با پوسته سرامیکی Replicast ceramic shell

یکی از روشهای پیشرفته ریخته گری که از مدل کف برای تولید قطعات استفاده می کند، روش رپلی کست با پوسته سرامیکی می باشد. این روش امکان ریخته گری انواع فولاد خصوصاً فولادهای ضدزنگ را فراهم آورده است. این روش توسط محققین SCRATA ابداع شده، امکان استفاده از مدل کف در ریخته گری فولاد و حذف جوشکاری ترمیمی را فراهم آورده است.

روش رپلی کست با پوسته سرامیکی که به اختصار Replicast CS نامیده شده است، شبیه به روش ریخته گری دقیق می باشد ولی با بکارگیری مدل های EPS مشکلاتی نظیر اعوجاج و شکست مدل های مومی بزرگتر در حین فرایند تولید را حذف نموده است. علاوه بر این، ترک خوردن پوسته های سرامیکی ضعیف که بر روی مدل های مومی بکار می رفتند به حداقل رسیده است. پوسته های سرامیکی نازک در سیستم رپلی کست با پوسته سرامیکی بکار می روند، چون این پوسته ها در حین حذف مدل EPS تحت تنش کمتری قرار می گیرند. علاوه بر این روش رپلی کست با پوسته سرامیکی نسبت به روش مومی سریعتر است و می توانیم قطعاتی تا ۶۰ کیلو گرم را تولید نماییم. از مزایای مهم این روش عاری بودن پوسته سرامیکی از مواد کربن زا می باشد که امکان ریخته گری هر نوع فولاد با ویژگیهای خاص را فراهم آورده است.

شکل ۱۱ فلوجارت فرایند رپلی کست با پوسته سرامیکی می باشد. مراحل اول تولید مدل کف مشابه فرایند کلی است. پس از تهیه مجموعه مدل کف، آن را با یک دوغاب سرامیکی پوشش می دهند، سپس از ماشینهای بارش ماسه برای اضافه کردن مواد دیرگداز کروی روی لایه مرطوب استفاده می شود مراحل فرایند پوشش دادن، به صورت زیر است:

- ۱) مجموعه کامل مدل EPS را در دوغابی محتوی سیلیکات اتیل به اضافه سیلیس ذوب شده (fused silica) و پودر زیرکن فرو می برند.
- ۲) مجموعه مدل را از دوغاب خارج کرده، در زیر ماشین بارش (دیرگداز) قرار می دهند. اینجا پوشش اولیه از مواد دیرگداز

EPS به عنوان ماده منحصر به فرد برای این فرایند مطرح است. پس به طور کلی برای حذف عیب کربنی استفاده از مواد پوشش مناسب و همراه با بهبود مدل کف مصرفی پیشنهاد شده است. علاوه بر اینها با توجه به اینکه عیوب کربنی بیشتر در بخشهای فوقانی قطعات ایجاد می گردند، بنابراین استقرار سطوح حساس در بخشهای تحتانی و در نظر گرفتن اضافه تراش کافی می تواند به عنوان راه حل در نظر گرفته شود.

### مزایا و محدودیتهای فرایند

مزایای فرایند به شرح زیر می باشد:

- حذف خط جدایش
- حذف کلی یا جزئی ماهیچه ها
- امکان استفاده از ماسه فاقد چسب همراه با امکان استفاده مجدد از آن
- سیستم بازیابی ماسه ساده با تعمیرات کمتر
- امکان استفاده از درجه های یک لنگه
- افزایش بازده ریختگی (به دلیل امکان طراحی مدلها به صورت سه بعدی در یک درجه)
- کاهش کار و مهارت لازم
- امکان اتوماسیون زیاد
- امکان تنوع قطعات
- امکان تنوع فلزات و آلیاژها
- آزادی عمل در طراحی
- امکان تهیه نمونه اولیه و توسعه تولید با هزینه کمتر
- کاهش فوق العاده عملیات نهایی و ماشینکاری

محدودیتهای فرایند به شرح زیر می باشد:

- عدم استفاده مجدد از مدل
- نیاز به کوره هایی برای بارریزی خود کار (در تولید انبوه)
- نیاز به سطح مقاطع بزرگتر برای راهگاههای فرعی
- نیاز به تجهیزات بیشتر برای برش راهگاهها
- احتمال عیوب شکلی ناشی از تغییر شکل مدل

کروی شامل سیلیس ذوب شده (ریزتر از ۱۰۰ # AFS) ایجاد می شود.

۳) مجموعه را در مدت یک ساعت در هوا خشک می کنند و سپس آن را به درون یک کابینت انتقال داده، با آمونیاک گازی تحت واکنش قرار می دهند تا اتیل سیلیکات ژله ای شده، پوسته سرامیکی سخت شود.

۴) مراحل قبل چهار تا پنج بار تکرار می شود. برای پوششهای نهایی از آلومیناسیلیکاتهای زبرتر استفاده می کنند.

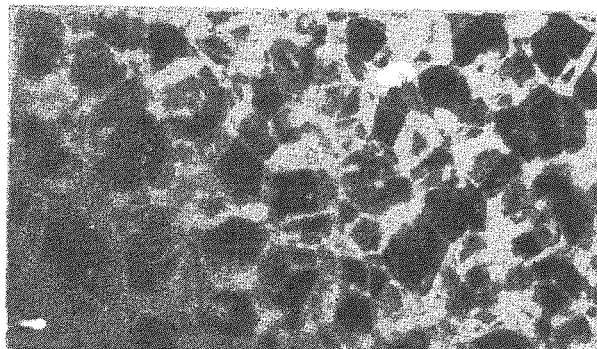
۵) ضخامت نهایی پوسته ۳/۲-۹/۵ mm خواهد بود.

مرحله بعد تولید پوسته، پختن پوسته های سرامیکی در یک کوره شعله ای گازی می باشد. پوسته تا دمای ۹۵۰°C حرارت می بیند تا مدل پلی استیرین کاملاً بسوزد و پوسته سرامیکی سخت گردد. سپس پوسته های سرامیکی به بخش ریخته گری انتقال یافته، چند تا از آنها در یک درجه قالبگیری قرار می گیرند. درجه متصل به یک محفظه تحت فشار است که از طریق آن هوا به توسط یک پمپ خلاء خارج می شود. درجه های مربوط به فرایند خلاء (V-Process) نیز به صورت موفقیت آمیزی بکار رفته اند.

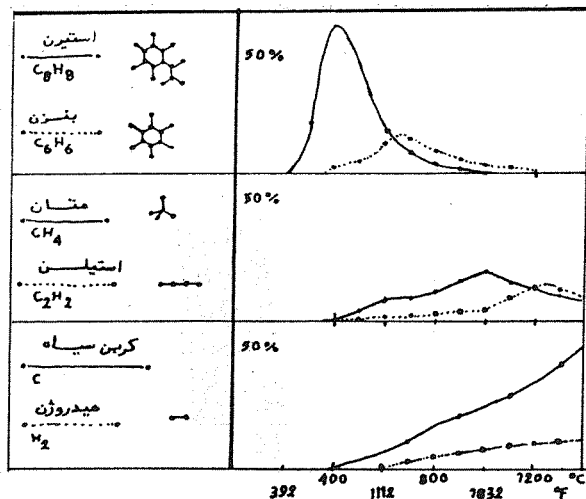
محدوده پیرامون پوسته ها توسط ماسه نرم فاقد چسب پر شده، سپس توسط ارتعاش به حداکثر چگالی حجمی می رسد. ماسه سیلیسی با ۸۰ AFS به همان صورتی که در فرایند خلاء مصرف شده است، بکار می رود. درست قبل از ریخته گری ماسه داخل درجه تحت خلاء قرار می گیرد. بارریزی در حالت معمولی و با استفاده از پاتیل کف ریز انجام می گیرد. پس از گذشت چند دقیقه می توان خلاء را حذف کرد. پس از این مرحله می توان عملیات تمیز کاری و سایر عملیات تکمیلی را انجام داد.

این روش نیز مزایای عمده فرایند کلی را دارا می باشد و از نظر کیفیت، قطعاتی با کیفیت بسیار عالی و قابل مقایسه با روش دقیق ارائه می کند و هزینه آن بسیار کمتر است.

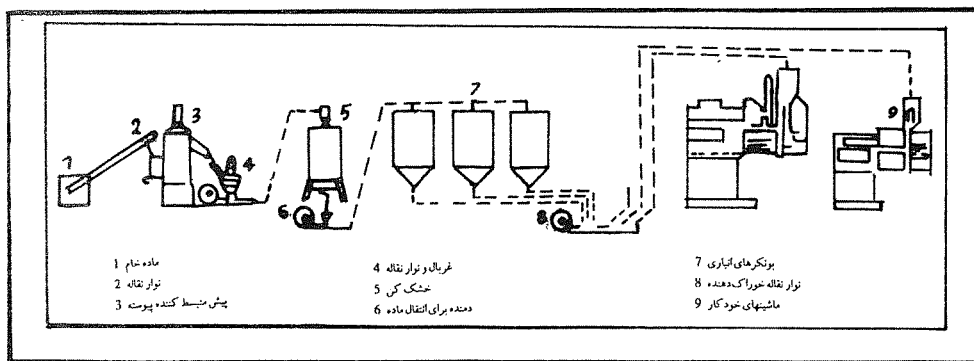
شکل ۱۲ یک قطعه چرخ زنجیر شنی نفربر زرهی می باشد که از فولاد ۸۶۴۰ تهیه شده است؛ دندانها به صورت ریختگی مصرف می شوند و همه ماشینکاری این قسمت حذف شده است. صرفه جوی ناشی از کاهش ماشینکاری به ازاء هر قطعه نزدیک به ۳۰۰ دلار است.



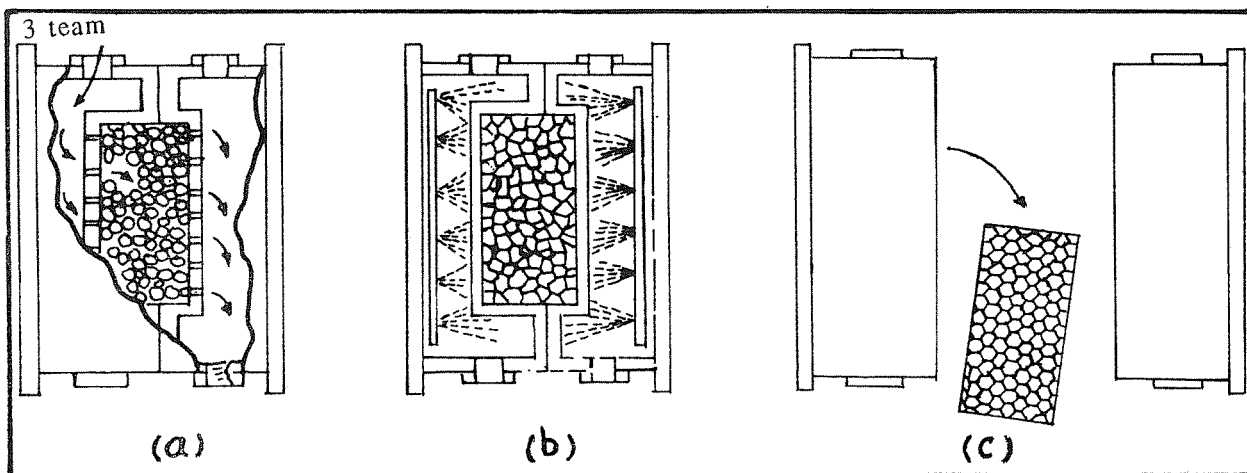
شکل ۱: ساختار سلولی پلی استیرین انبساط یافته، کمتر از دو درصد از حجم، مواد آلی است و مابقی هواست (مرجع ۶)



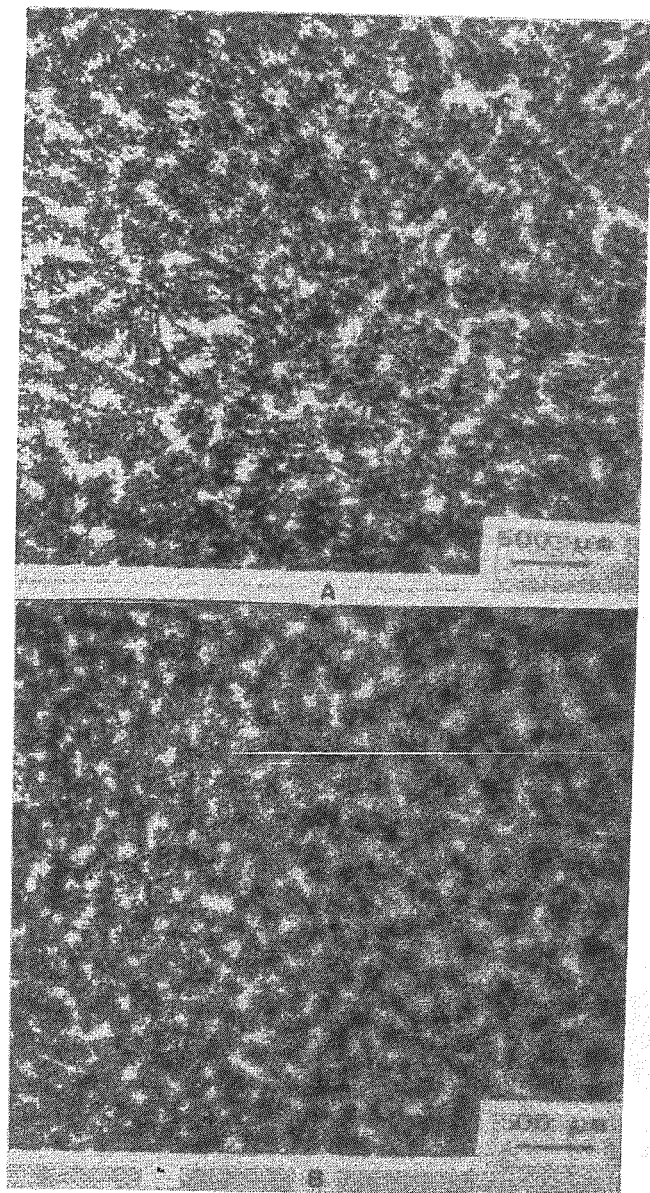
شکل ۲: تجزیه حرارتی EPS، غلظت چند ماده مهمتر، در اتمسفر گازی در درجه حرارتهای متفاوت (مرجع ۸)



شکل ۳: عملیات متوالی برای تبدیل پلی استیرن به محصول ساخته شده (مرجع ۲)



شکل ۴: نمایش شماتیک (a) ترکیب و امتزاج (b) سرد کردن (c) خارج سازی، مواد مدل کف از میان رونده (مرجع ۱)



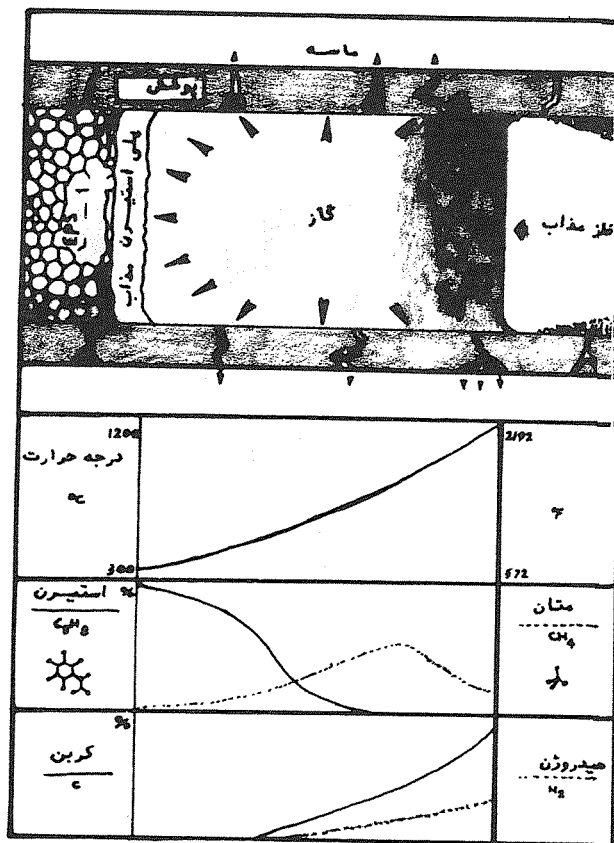
شکل ۶: درجه جوانه زنی یوتکتیک در یک قطعه با ضخامت

10mm که در دو حالت حاصل شده است:

A: فرایند ماسه تر

B: فرایند LFC

(مرجع ۸)



شکل ۵: منحنیهای شاخص ترکیب گاز، درحین بارریزی به

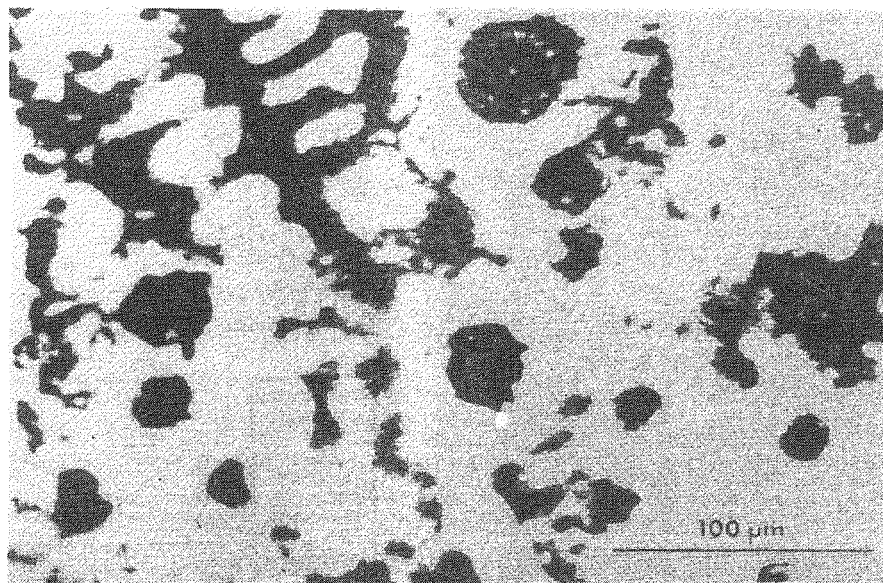
صورت تابعی از موقعیت نسبت به جبهه فلز مذاب

(مرجع ۸)

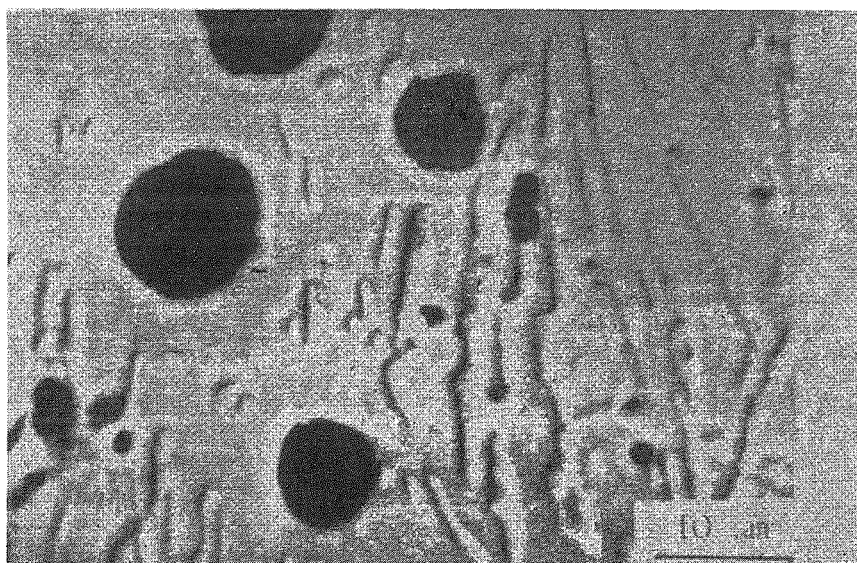


شکل ۷: آخال کربنی براق در یک قطعه چدن با گرافیت

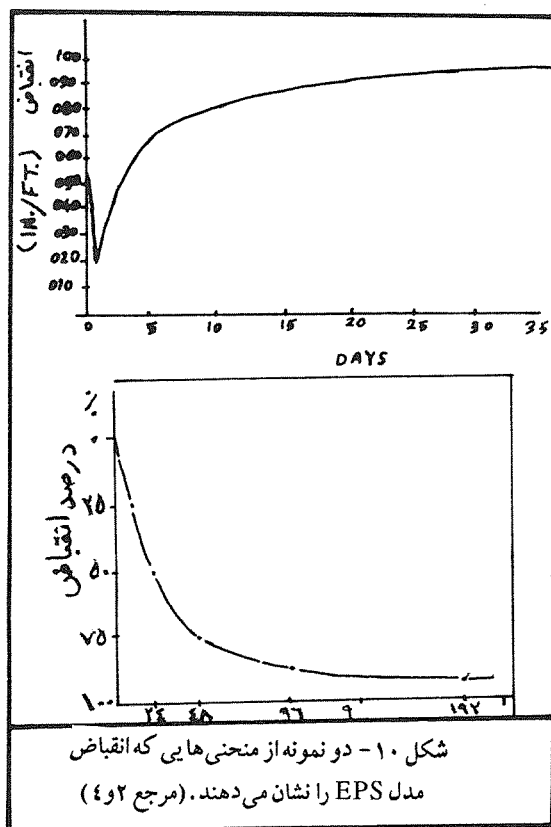
کروی (مرجع ۸)



شکل ۸: تشکیل دندرت در ساختار یک قطعه ریختگی از چدن با گرافیت کروی (مرجع ۱۴)

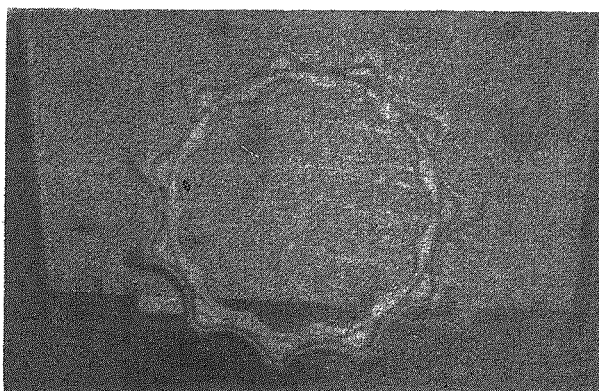


شکل ۹: کاربیدها در پوشش بیرونی یک قطعه چدن با گرافیت کروی (مرجع ۱۴)



شکل ۱۰- دو نمونه از منحنی‌هایی که انقباض مدل EPS را نشان می‌دهند. (مرجع ۴ و ۲)

شکل ۱۱: فلوجارت روش رپلی کست با پوسته سرامیکی (مرجع ۹)



شکل ۱۲: یک قطعه چرخ زنجیر شنی نفربر زرهی (مرجع ۹)

جدول ۱ - رده‌های پلی‌استیرن انبساط پذیر (مرجع ۱)

رده‌های دانه	قطر دانه خام		قطر در چگالی $24 \text{ kg/m}^3$		مصروف نوعی
	mm	in	mm	in	
A	۰/۸۳-۲/۰	۰/۰۳۳-۰/۰۷۸	۲/۵-۵/۹	۰/۰۹۷-۰/۲۳۱	عایق
B	۰/۵۸-۱/۲	۰/۰۲۳-۰/۰۴۷	۱/۷-۳/۵	۰/۰۶۸-۰/۱۳۸	بسته بندی
C	۰/۳۳-۰/۷۱	۰/۰۱۳-۰/۰۲۸	۱/۰-۲/۱	۰/۰۴۰-۰/۰۸۲	فنجان (قهوه)
T	۰/۲۵-۰/۵۱	۰/۰۱۰-۰/۰۲۰	۰/۷۴-۱/۵	۰/۰۲۹-۰/۰۵۸	فنجان-مدل ریخته گری
X	۰/۲۰-۰/۳۳	۰/۰۰۸-۰/۰۱۳	۰/۶۱-۱/۰	۰/۰۲۴-۰/۰۴۰	مدل ریخته گری

جدول ۲ - مرجع ۳

فهرست خواص مورد نیاز برای یک ماده جدید به عنوان مدل در فرایند LFC

خواص رزین	خواص قالبگیری	خواص ریخته گری
- عمر انبار طولانی	- سازگاری با تجهیزات قالبگیری	- عدم وجود عیوب کربنی براق
- اندازه دانه‌ها، کوچک	- سیکل قالبگیری کوتاه	- افزایش کرنین کم باشد
- از نظر اقتصادی مناسب باشد	- پایداری ابعادی سریع	- استحکام بالا
	- سطح هموار و صاف	- محصول گازی کم
	- مدل‌های ارتجاعی و محکم	- از نظر موارد بهداشتی کم زیان

جدول ۴ - چگالی‌های مدل مورد نیاز برای ریخته گری با مدل کف از میان رونده LFC (مرجع ۱)

فلز	درجه حرارت بارریزی		چگالی مدل EPS	
	°C	°F	kg/m <sup>3</sup>	lb/ft <sup>3</sup>
آلومینیم	۷۰۵-۷۹۰	۱۳۰۰-۱۴۵۰	۲۴-۲۷	۱/۵-۱/۷
برنج - برنز	۱۰۴۰-۱۲۶۰	۱۹۰۰-۲۳۰۰	۲۰-۲۱/۶	۱/۲۵-۱/۳۵
چدن خاکستری	۱۳۷۰-۱۴۵۵	۲۵۰۰-۲۶۵۰	≤۲۰	≤۱/۲۵
فولاد	۱۵۹۵-۱۶۵۰	۲۹۰۰-۳۰۰۰	≤۱۷/۶	≤۱/۱۰

جدول ۳- ترکیب شیمیایی گازها. (مرجع ۸)

مواد	ترکیب محصولات تجزیه حرارتی EPS														
	100°C (212°F)	200°C (392°F)	300°C (572°F)	400°C (752°F)	500°C (932°F)	600°C (1112°F)	700°C (1292°F)	800°C (1472°F)	900°C (1652°F)	1000°C (1832°F)	1100°C (2012°F)	1200°C (2192°F)	1300°C (2372°F)	1400°C (2552°F)	1500°C (2732°F)
هیدروژن H <sub>2</sub>	-	-	tr.	0.01	0.5	1.5	3.0	4.5	6.0	8.0	9.0	10.0	10.5	11.0	11.5
نیواکسید کربن CO	-	0.2	0.5	2.0	6.0	7.5	8.5	10.5	11.5	11.5	12.5	10.5	9.0	7.5	5.0
متان CH <sub>4</sub>	-	tr.	0.15	1.0	4.0	8.5	9.0	11.5	16.0	19.5	15.0	13.0	10.5	9.0	8.0
دی اکسید کربن CO <sub>2</sub>	-	1.0	2.0	4.0	12.5	17.5	20.0	16.5	8.5	6.0	4.0	2.5	1.0	0.5	tr.
ایتیلن C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	-	-	0.1	0.5	1.0	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	10.0	12.5	11.0	9.5	8.0
ایتیلن C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	-	tr.	0.5	1.0	4.0	5.5	6.0	7.5	6.0	4.0	3.5	2.5	2.0	1.5	1.2
انان C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-	tr.	0.1	0.5	1.0	3.0	5.0	7.0	4.0	2.5	1.5	1.0	0.5	0.2	0.05
پروپیلن C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	-	tr.	0.15	0.5	1.5	3.0	4.5	2.5	1.0	0.5	0.1	tr.	-	-	-
پنتان C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.01	0.15	0.25	0.5	1.5	0.5	0.08	0.01	tr.	-	-	-	-	-	-
بنزن C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	-	0.05	0.5	3.0	6.0	14.0	16.0	10.5	7.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.5	0.02
تولنن C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	-	0.05	0.5	3.5	6.5	8.0	4.0	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.1	0.01	tr.
استرون C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	tr.	0.05	23.5	62.0	45.0	20.0	10.0	5.0	3.5	2.0	1.5	1.0	0.6	0.3	0.06
ایتیل بنزن C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	-	-	tr.	0.1	0.5	1.0	1.5	0.8	0.5	0.1	0.05	tr.	-	-	-
کریلن C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	-	-	-	-	-	6.0	10.0	17.0	21.0	25.0	30.0	35.0	43.0	50.0	57.0
پاتنانه مجموع گازهای مخلوط mg/g	99.5	96.5	70.0	20.0	8.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
کل	10.0	25.0	50.0	100.0	150.0	200.0	350.0	500.00	650.0	800.0	900.0	950.0	1000	1050	1 100
	99.5	98.0	98.2	98.6	98.0	98.0	100.0	98.3	90.5	91.1	90.6	90.3	89.2	90.0	90.8



1. M.patz & T.S.Piwonka, " unbonded sand Molds ", Metals Handbook , 9th ed., vol., 15,ASM Inter.1988, pp.230-234
2. C.A.Goria & G. Dolgaudio & G. Gaironi & G.silva & M. Selli, " Molding of Iron Castings with Evaporative Polystyrene foam patterns ". Foundry Trade journal inter, Dec., 1983, pp,234-241.
3. N.Moll & D.Johnson, " A new Moldable Foam for casting Ferrous materilas without lustrous Carbon defects." Advanced casting technology , ASM Inter, 1987,pp. 175-185.
4. R.H. Immel, " Expandable polystyrene and its processing into patterns for the evaporative casting process, " Foundry Technology Source Book, ASM & AFS, 1982, pp. 59-64.
5. R.D. Butler & R.J. Pope , " Some Factors involved in full mould casting with unbonded sand moulds, " The British Foundryman, 1964, pp. 178-191.
6. R.D.Butler, " The full mould Casting Process, " The British Foundryman, 1964, pp.265-273.
7. " Discussion on full mould casting with unbonded sand moulds," The British Foundryman, 1964,pp.540-542.
8. C.A. Garia & G. Serramoglia.Acritical Parameter of the evaporaitive pattern proces", AFS Transactions ( 86-101 ), 1986, pp.,589-600.
- 9.R.E.Grote, " Replicast Ceramic shell Molding : The process and its capabilities," AFS Transactions ( 86-33 ), 1980,pp.181-186.
- 10.A.Duca & M.C. Flemings & H.F. Taylor, " ART Casting ,"Transactions of the American Foundrymen's Society , 70 ( 1964),,pp.801-810.
- 11.E.G.Donaldson," The use of Polystyren patterns in the Foundry " The Foundryman, 1988,pp.60-65.
- 12.D.Kinvig, " A Traditional Foundry's experience in setting up Polystyrne Moulding". The foundryman, 1988,pp.66-68.
- 13.A.M. Arzt & P.M. Bralower, " Questions about EPC Vaporize with proper practice," Modern casting , Jan, 1987 , . pp.21-24.
14. C.A. Goria & Cr. serramoglia, " Quality problem in production of SG iron castings by the policast lost foam Process, " B.C.I.R.A. Conference Proceedings, April, 1987.
15. " Lost foam casting - shaping up to the future " , The British Foundryman, 1986-pp.466-469.
- 16.H.J.Heine," A Progress Report: Evaporative Polystyrene pattens-Part II, foundry M & T, Dec. 1982, pp.22-25.
- 17.H.J.Heine, " A Progress Report " Evaporative Polystyrene Patterns-Part I, Foundry M & T, Jan, 1983, pp. 64-70
- 18.H.F. Shroyer, " Cavityless casting mould and method of making same, " us patent No.: 2830343, 15 April 1958.
- 19.M.C. Flemings, " Solidification Processing " Mc. Grawhill, 1974, pp. 6-12.
- 20 R. Mrdjenovich, "Evaporative Pattern casting at Ford, " Modern casting , Feb.1984, pp.18-20.
- 21.Us Patent No.:3023175, Feb.27 ,1962.
- 22.U.S. patent No.3752641, Sept.18,1973.