

بررسی اثر دما و ضخامت پره‌های شبکه لانه‌زنبوری بر قابلیت ریخته‌گری و خواص قطعات شبکه ای تولید شده از آلیاژ فولاد St37 به روش ریخته‌گری دقیق

علی دلبری، مهدی دیوانداری، حسین عربی

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران

Study the Effect of Temperature and Thickness of Base Network on Casting Capability and Properties of Honeycombs Produce from St37 Steel Alloy via Investment Casting

Ali Delbari, Mehdi Divandari, Hoesein Arabi

School of Metallurgy and Material Engineering, Iran University of Science and Technology

چکیده

لانه‌زنبوری‌ها جزو سازه‌های سبک به شمار آمده و در صنایع مختلف و بویژه صنعت هوا و فضا کاربرد دارند. ویژگی ساختاری این سازه‌ها طوری است که تولید آنها را به روش ریخته‌گری محدود نموده و فقط روشهایی مانند ریخته‌گری دقیق و توپر و برخی روشهای خاص می‌تواند برای تولید آنها مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق تاثیر دما و ضخامت پره‌های شبکه لانه‌زنبوری (شبکه مبنا) تولید شده از آلیاژ فولاد St37 به روش ریخته‌گری دقیق مورد بررسی قرار گرفته است. تاثیر شرایط ریخته‌گری بر روی سلامت قطعات مطالعه و دمای مناسب در بین سه دمای مختلف تعیین شد. بمنظور محاسبه استحکام، نمونه‌هایی به ضخامت ۱۳ میلی‌متر از قطعات لانه‌زنبوری ریخته شده تهیه و تحت آزمایش فشار قرار گرفت. مقاطع شکست نیز تحت بررسی به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش دمای بارریزی قابلیت پر شدن قالب و استحکام فشاری لانه‌زنبوری کاهش می‌یابد. همچنین مشخص گردید که با افزایش ضخامت پره‌های شبکه استحکام فشاری تا حد زیادی افزایش می‌یابد. بررسی سطح شکست مقاطع نشان داد که این نوع لانه‌زنبوری‌ها به صورت نرم شکسته می‌شوند و آخال‌ها نقش غالبی در بروز آن دارند.

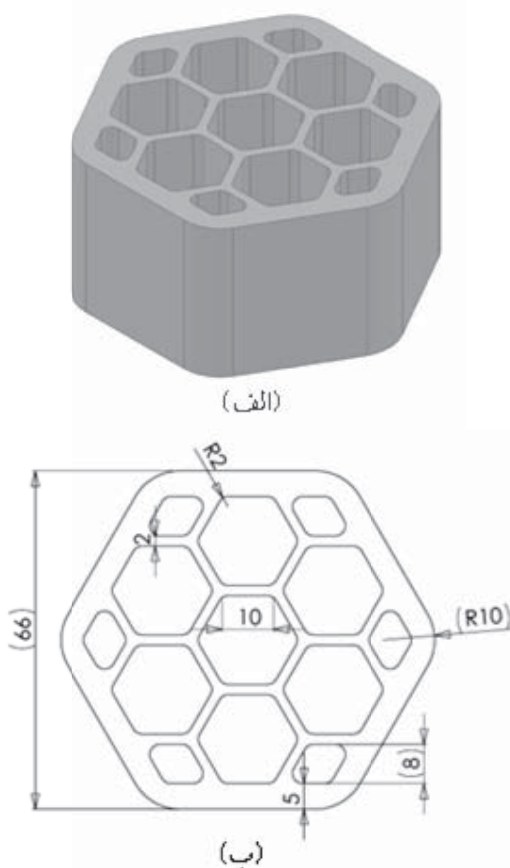
واژگان کلیدی: لانه‌زنبوری، ریخته‌گری دقیق، فولاد St37، شکست نرم، آخال

ABSTRACT

Honeycombs are known as structures which present special and unique properties. They are used in various industries and in particular aerospace industry. The effect of casting temperature and inner wall thickness of honeycombs on fillability and structural integrity of the samples were studied in this research. Various honeycomb samples of 13mm height were prepared and pressed along their diameters. Then the fracture sections were studied by a Scanning Electron Microscope. The results showed that the higher the pouring temperature, the lower were the fillability of the mold and pressure strength of the honeycombs. It is also found that as the inner wall thicknesses of honeycombs increased their pressure strength increased too. Furthermore, the fracture mode in all of the fractured surfaces was ductile and inclusions have a significant effect on the formation of such fracture surfaces.

Keywords: Honeycomb, Investment Casting, inclusion, st37 Steel

شبكة ۲، ۳ و ۴ میلیمتر طراحی گردید. یک نمونه از مدل طراحی شده با ضخامت مبنای شبکه ۲ میلیمتر و نقشه مکانیکی آن در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: (الف) مدل سه بعدی و (ب) شماتیک نمای سطح مقطع لانه زنبوری

Fig. 1: (a) 3D model and (b) Schematic view of the cross section of honeycomb

در این تحقیق برای ساخت مدل از بین رونده از فوم پلی استیرنی استفاده شده است. با استفاده از روش برش بوسیله سیم داغ، مدل های مورد نظر با ابعاد ۲، ۳ و ۴ میلیمتر برش داده شده و سپس بر روی یک خوشه قرار داده شدند. به منظور تهیه پوسته سرامیکی، در ۳ مرحله بر مدل فومی دوغاب سرامیکی داده شد. در مرحله اول دوغاب حاوی اتیل سیلیکا به عنوان چسب و سیلیکات کلسیم به عنوان پودر چسب بود. در این مرحله از پودر سیلیس گداخته و خاک زیرکون با اندازه دانه AFS60 استفاده گردید. پس از خشک شدن کامل پوسته، در دو مرحله مجزا دوغاب

لانه زنبوری ها جزو سازه های سبک به شمار آمده و در صنایع مختلف و بویژه صنعت هوا و فضا کاربرد دارند. این نوع سازه می تواند از جنس مواد فلزی (آلیاژهای سبک و فولاد) یا مواد غیر فلزی (مقوا، پلیمر و یا بافت های حاوی شیشه) باشد. لانه زنبوری های فلزی نسبت به نوع غیر فلزی ارزان تر و مقاوم ترند در حالیکه نوع غیر فلزی آن ها نسبت به محیط های خورنده حساسیت کمتری داشته و جزو عایق های حرارتی مناسب دسته بندی می شوند. خواصی از قبیل میرا کردن ارتعاشات، ذخیره سازی حرارت و جذب انرژی ضربه ای، از جمله خواص ویژه ای است که این سازه ها با داشتن وزن کم دارا هستند [۱-۳].

این خانواده از مواد عموماً به صورت ساندویچی مورد استفاده قرار می گیرند. سازه های ساندویچی سازه ای دارای یک لایه میانی به شکل لانه زنبوری و یا یک هسته فومی دارند که دو طرف آن با صفحه از جنس مناسب پوشانده شده است. سازه های ساندویچی لانه زنبوری با تغییر مواردی نظیر جنس و ترکیب، اندازه سلول، ضخامت دیواره سلول و چگالی لایه لانه زنبوری و همچنین ماده و ضخامت صفحات مورد استفاده در آنها، محدوده وسیعی از خواص را ارائه می دهند. در نتیجه می توان از آنها در کاربردهای متعددی استفاده کرد [۴-۶].

لانه زنبوری فلزی به طور متداول با چهار روش زیر تولید می شود [۶-۷]:

- ۱- چسباندن نوارهای فلزی به هم و بسط آنها
- ۲- ایجاد چین در فویل
- ۳- ریخته گری
- ۴- اکستروژن

در روش ریخته گری می توان مدل از بین رونده را از جنس موم و یا پلاستیک تهیه و با استفاده از ریخته گری دقیق، سازه فلزی مورد نظر را تولید نمود [۸-۹].

مواد و روش تحقیق

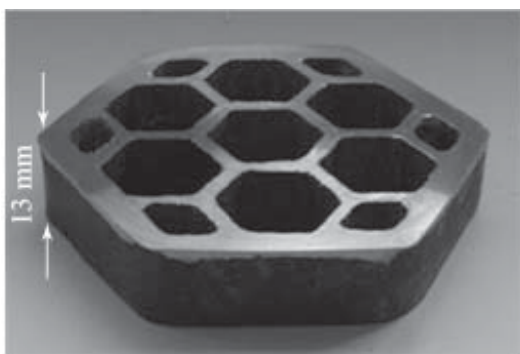
به منظور بررسی خواص لانه زنبوری های فولادی و تاثیر ضخامت پره های شبکه در آن، ابتدا چند مدل با ضخامت پره

فشار قرار گرفتند. سپس سطوح شکست نمونه‌ها بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی تحت بررسی و مطالعه قرار گرفت.

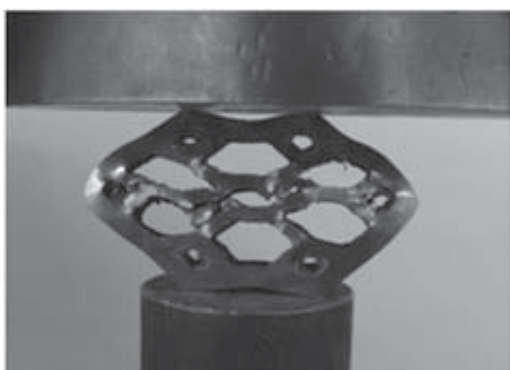
جدول ۱: میانگین ترکیب شیمیایی فولاد St37 مورد استفاده در این تحقیق

Table1: Chemical composition average of St37 steel which use in this investigation

نام عنصر	C	Si	Mn	P	S
درصد وزنی	۰/۳۰	۰/۳۳	۰/۷۱	۰/۰۲۳	۰/۰۲۱
نام عنصر	Cr	Mo	Ni	Al	Co
درصد وزنی	۰/۱۳	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۱۸	۰/۰۰۵
نام عنصر	Sn	B	As	Zr	Fe
درصد وزنی	۰/۰۰۷	---	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	پایه
نام عنصر	Cu	Nb	Ti	V	W
درصد وزنی	۰/۰۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۷	۰/۰۱۵



(الف)

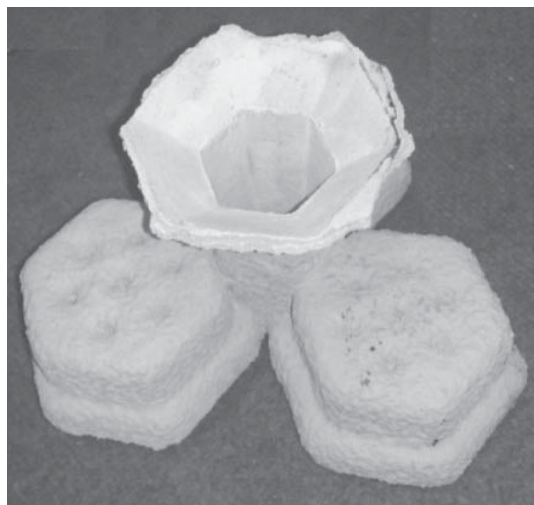


(ب)

شکل ۳: (الف) نمونه تهیه شده برای آزمایش فشار و (ب) نمونه‌ای لانه‌زنبوری قرار گرفته تحت آزمایش فشار

Fig. 3: (a) Test specimen and (b) specimen under compression test

سرامیکی‌ای حاوی اتیل سیلیکا به عنوان چسب و مولایت به عنوان پودر چسب داده شد. در مرحله اول و دوم به ترتیب از مخلوط مولایت با اندازه دانه AFS50 و خاک شاموت سمیرم با اندازه دانه AFS40 و AFS65 به عنوان اندود استفاده گردید. پس از پوشش دهی کامل، ضخامت نهایی پوسته به ۴ mm رسید. به منظور موم‌زدایی، پوسته سرامیکی به مدت ۴۵ دقیقه در کوره‌ای با دمای ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد. پوسته سرامیکی نهایی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: پوسته سرامیکی نهایی جهت انجام ریخته‌گری

Fig. 2: Final ceramic shell ready for casting

با توجه به کاربرد سازه‌های لانه‌زنبوری فولادی و به منظور داشتن اطلاعات مقایسه‌ای، فولاد St37 برای ذوب‌ریزی انتخاب گردید. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۱ ارائه شده است.

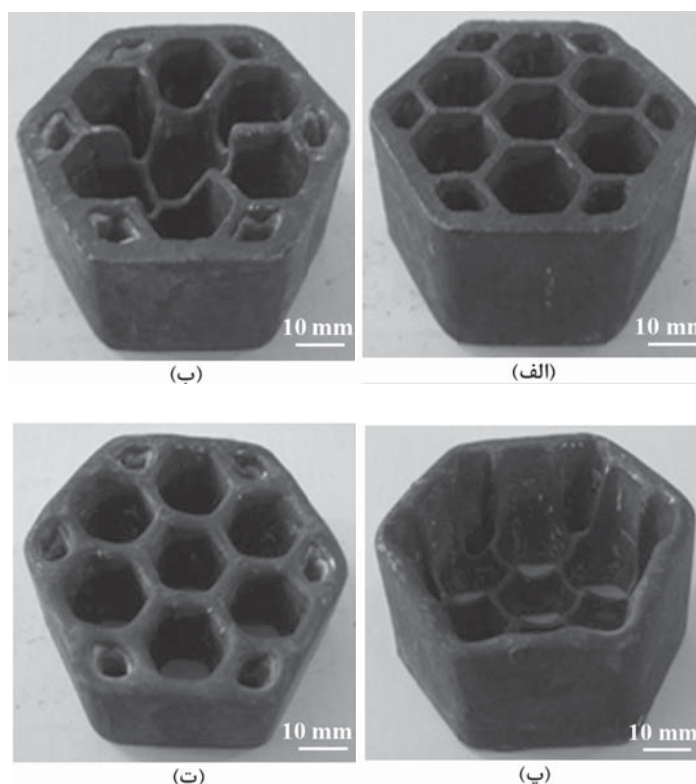
به منظور بررسی دمای بارریزی بر روی قابلیت پُر شدن و همچنین خواص مکانیکی لانه‌زنبوری، نمونه‌ها در سه دمای بارریزی ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ درجه سانتیگراد ریخته‌گری شدند. با توجه به شکل خاص نمونه‌ها و عدم وجود آزمایش استاندارد برای آن‌ها، نمونه‌هایی مانند شکل ۳ (الف) به منظور بررسی خواص فشاری تهیه گردید. ضخامت این شبکه‌های لانه‌زنبوری ۱۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

بمنظور محاسبه استحکام فشاری نمونه‌های تهیه شده مطابق روش نشان داده شده در شکل ۳ (ب)، تحت آزمایش

نتایج

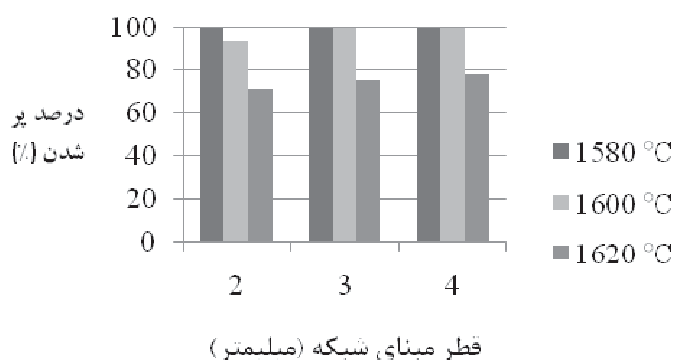
بارریزی 1600°C به خوبی مشهود است. بیشترین نیامد در نمونه با ضخامت مبنای شبکه 2mm بروز پیدا کرده است. درصد پر شدن نمونه‌های ریختگی بر حسب دمای بارریزی و ضخامت مبنای شبکه در نمودار شکل ۵ آورده شده است.

در شکل ۴ نمونه‌هایی از قطعات ریخته‌گری شده در دماهای بارریزی مختلف نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش دمای بارریزی نمونه‌ها دچار نیامد شده‌اند. این عیب در نمونه‌های ریخته‌گری شده در دمای



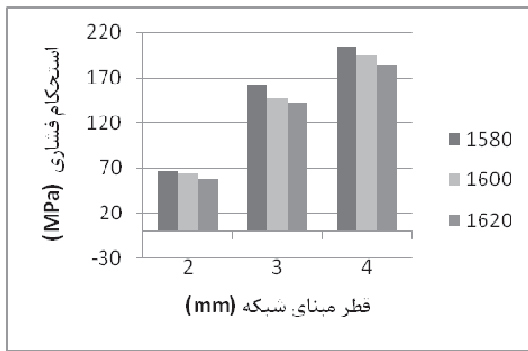
شکل ۴: نمونه‌های ریختگی با ضخامت مبنای شبکه (بر حسب میلی‌متر) و دمای بارریزی (بر حسب درجه سانتیگراد) بترتیب (الف) ۲ و 1580°C ، (ب) ۲ و 1600°C ، (پ) ۲ و 1620°C و (ت) ۴ و 1620°C

Fig. 4: Various samples prepared at different casting (a) 2mm, 1580°C , (b) 2mm, 1600°C , (c) 2mm, 1620°C , (d) 4mm, 1620°C

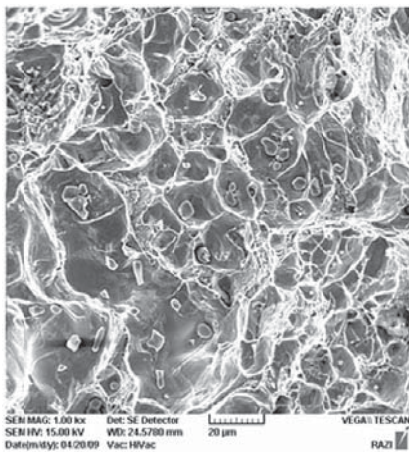


شکل ۵: نمودار درصد پر شدن بر حسب ضخامت مبنای شبکه

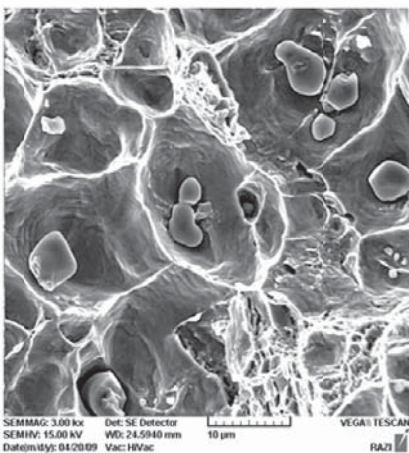
Fig. 5: Filling percent at various base network thicknesses and Pouring temperatures



شکل ۷: نمودار استحکام فشاری نمونه‌های ریخته‌گری شده برای ضخامت‌های مختلف مبنای شبکه بر حسب دمای بارریزی
 Fig. 7: Compression strength of casting at various base network thicknesses and pouring temperatures



(الف)

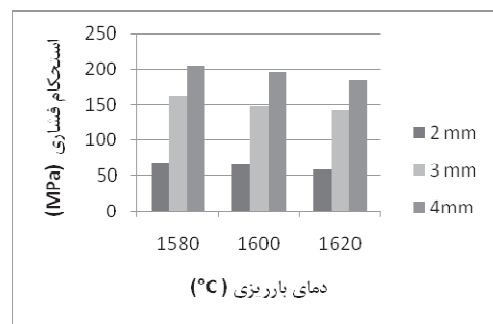


(ب)

شکل ۸: سطح شکست نمونه با ضخامت مبنای شبکه ۴ mm و ریخته‌گری شده در دمای بارریزی ۱۵۸۰ °C
 Fig. 8: Fracture surface of sample cast in 1580 °C (with 4mm thickness)

در شکل‌های ۶ و ۷ داده‌های بدست آمده از آزمایش فشار نمونه‌های لانه‌زنبوری ارائه شده است. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که در هر سه ضخامت مبنای شبکه با افزایش دمای ریخته‌گری استحکام فشاری کاهش پیدا می‌کند. بطوریکه در نمونه‌های با ضخامت مبنای شبکه ۲ mm با افزایش دمای بارریزی از ۱۵۸۰ °C به ۱۶۲۰ °C استحکام فشاری حدود ۱۵٪ کاهش یافته است. از طرفی نیز با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل ۷ می‌توان گفت که بر اثر افزایش ضخامت مبنای شبکه در هر ۳ دمای بارریزی، استحکام فشاری افزایش یافته است. بطوریکه در دمای بارریزی ۱۵۸۰ °C نمونه با افزایش ضخامت مبنای شبکه از ۲ mm به ۳ mm وزن قطعه به میزان ۸٪ و استحکام فشاری آن حدود ۱۴۰٪ افزایش پیدا کرده است.

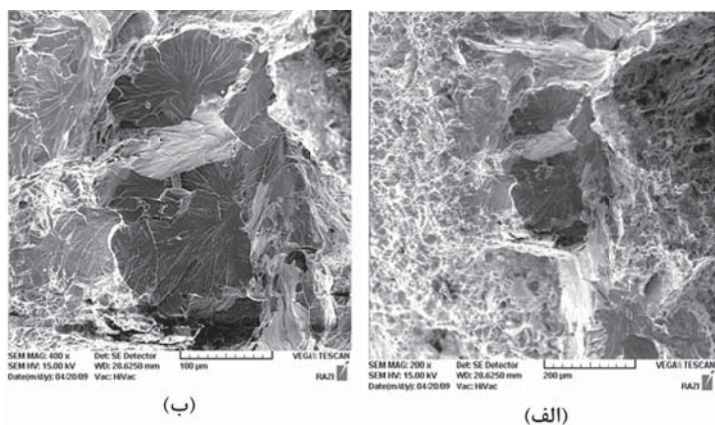
در شکل‌های ۸ و ۹ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه با ضخامت مبنای شبکه ۴ میلی‌متر و ریخته‌گری شده در دمای بارریزی ۱۵۸۰ درجه سانتیگراد نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها می‌توان گفت که شکست عمدتاً نرم بوده است. البته همانگونه که شکل ۹ نشان می‌دهد در قسمت‌هایی از سطح شکست رخ برگ‌هایی مشاهده می‌شود که دلالت بر شکست ترد یا شبه ترد در این قسمت‌ها دارد. این مناطق احتمالاً غنی از آخال‌های ترد سیلیکاتی است که منجر به ایجاد چنین ویژگی‌هایی شده است. شکل ۸ تعداد زیادی آخال در دیپیل‌های سطح شکست را نشان می‌دهد. تجمع آخال‌ها، در برخی موارد، باعث بوجود آمدن دیپیل‌های بزرگ‌تر شده است. در شکل ۱۰ آنالیز نمونه‌ای از آخال‌های موجود در سطح شکست آورده شده است. این آنالیز ماهیت سولفیدی این آخال را نشان می‌دهد.



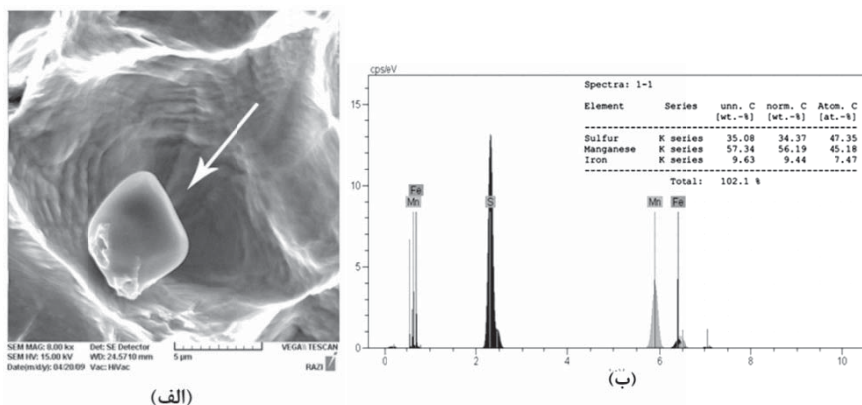
شکل ۶: نمودار استحکام فشاری نمونه‌های لانه‌زنبوری برای ضخامت‌های مختلف مبنای شبکه بر حسب دمای بارریزی

Fig. 6: Compression strength of casting at various pouring temperatures and base network thicknesses

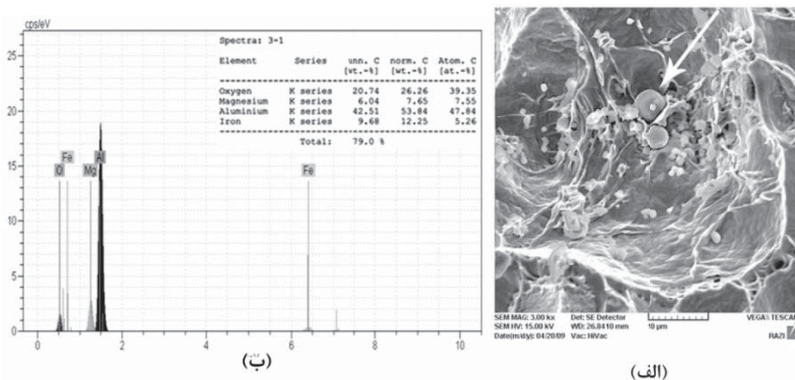
شکل ۱۱ نمونه‌ای از یک آخال اکسیدی را نشان می‌دهد. این آخال‌ها شکلی کاملاً کروی دارند. با توجه با آنالیز اکسید آلومینیم است. نشان داده شده می‌توان دریافت که جنس این آخال



شکل ۹: سطح شکست نمونه با ضخامت مبنای شبکه ۳ mm و ریخته‌گری شده در دمای بارریزی ۱۵۸۰ °C
 Fig. 9: Fracture surface of sample cast in 1580 °C (with 3mm thickness)

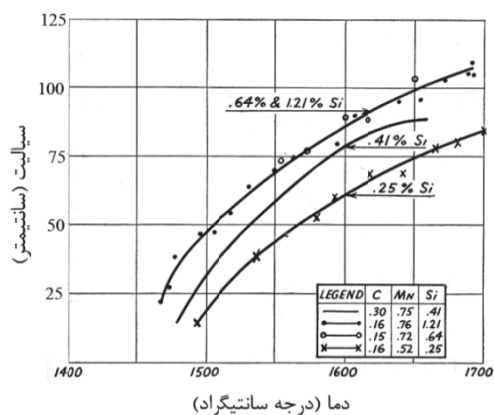


شکل ۱۰: (الف) سطح شکست نمونه با ضخامت مبنای شبکه ۴ mm و دمای بارریزی ۱۵۸۰ °C و (ب) آنالیز EDAX از آخال نشان داده شده
 Fig. 10: (a) Fracture surface of sample cast in 1580 °C (with 4mm thickness), (b) EDAX analysis of shown inclusion



شکل ۱۱: (الف) سطح شکست نمونه با ضخامت مبنای شبکه ۴ mm و دمای بارریزی ۱۶۲۰ °C و (ب) آنالیز EDAX از آخال نشان داده شده
 Fig. 11: (a) Fracture surface of sample cast in 1620 °C (with 4mm thickness), (b) EDAX analysis of shown inclusion

سیلیسیم مذاب است. شکل ۱۳ این وابستگی را به خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: تاثیر محتوای سیلیسیم مذاب بر روی سیالیت [۱۰-۱۱]
Fig. 13: Effect of Si content of molten metal on fluidity

با افزایش دمای بارریزی واکنش سیلیسیم با اکسیژن موجود در مذاب افزایش می‌یابد. این افزایش از طرفی محتوای سیلیسیم مذاب را کاهش می‌دهد و از طرف دیگر کسر حجمی آخال‌های سیلیکاتی را افزایش می‌دهد. این دو مطلب باعث می‌شود تا خواص مکانیکی لانه‌زنبوری کاهش یابد. نمونه‌ای از آخال‌های سیلیکاتی در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

مورفولوژی سولفید منگنز

همانطور که در شکل‌های ۸ و ۱۱ مشاهده می‌گردد، اکثر آخال‌های موجود در نمونه‌های ریختگی از جنس سولفید منگنز هستند. اندازه این آخال‌ها از حدود ۱ μm تا ۵ μm متغیر است. شکل این آخال‌ها به میزان اکسیژن‌زدهای قوی مورد استفاده بستگی دارد. سولفید منگنز بوجود آمده در فولاد بر اساس گزارشات منتشر شده، می‌تواند ۳ نوع مورفولوژی داشته باشد [۱۲-۱۳]:

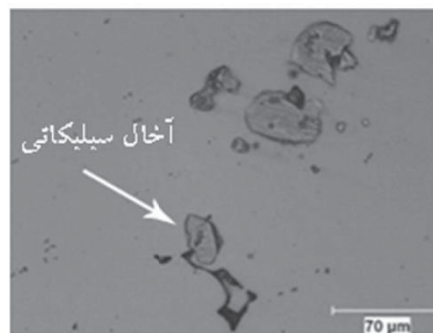
۱- نوع اول به شکل کروی

۲- نوع دوم به شکل زنجیره‌ای یا لایه‌ای

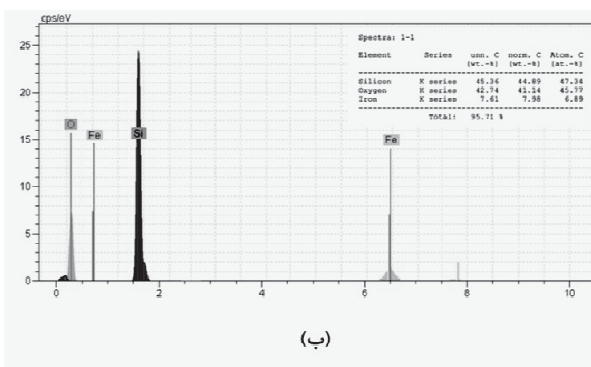
۳- نوع سوم به شکل گوشه‌دار

در فولادهای با کربن متوسط چنانچه مقدار کافی آلومینیم به مذاب اضافه گردد بطوریکه مقداری از آن در مذاب باقی بماند، در صورتی که باقیمانده کمتر از ۰/۰۰۴ درصد وزنی باشد، در این حالت شکل ناخالصی سولفیدی از نوع اول

در شکل ۱۲ آخال‌های نسبتاً درشتی دیده می‌شوند که با توجه به آنالیز EDAX آن‌ها می‌توان گفت که این آخال‌ها از جنس اکسید سیلیسیم هستند.



(الف)



(ب)

شکل ۱۲: (الف) تصویر متالوگرافی از مقطع نمونه با ضخامت مبنای شبکه 4 mm دمای بارریزی 1580°C و (ب) آنالیز EDAX از آخال نشان داده شده

Fig. 12: (a) Metallographic image of sample cast in 1580°C (with 4mm thickness), (b) EDAX analysis of shown inclusion

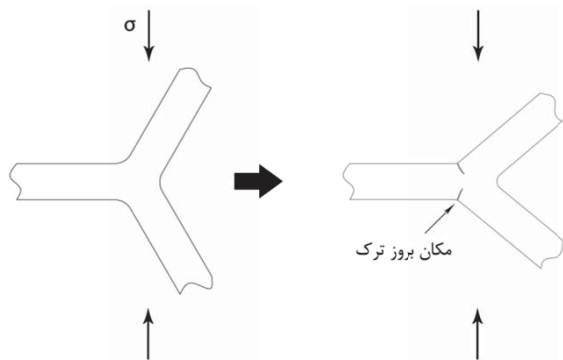
بحث:

قابلیت پر شدن قالب

همانطور که عنوان شد با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش دمای بارریزی قابلیت پر شدن نمونه‌های ریختگی کاهش می‌یابد. این کاهش در نمونه‌های با قطر مبنای شبکه ۲ mm و ریخته‌گری شده در دمای بارریزی 1620°C به خوبی مشهود است. این در حالیست که انتظار می‌رود با افزایش دمای بارریزی سیالیت افزایش پیدا کرده و قابلیت پر شدن قالب افزایش یابد. با توجه به واقعیات علمی [۱۰-۱۱] یک از عواملی که می‌تواند سیالیت فولاد را تا این حد کاهش دهد، کاهش محتوای

یافته است. با توجه به مطالب گفته شده در بخش مشخصات ذوب، می‌توان مهمترین دلیل برای کاهش خواص مکانیکی بر اثر افزایش دما را افزایش کسر حجمی آخال‌ها دانست. در بین این ناخالصی‌ها، آخال‌های سولفید منگنز و آخال‌های سیلیکاتی مهمترین نقش را دارا هستند. زیرا بنظر می‌رسد تجمع آخال‌های سولفیدی و همچنین وجود آخال‌های سیلیکاتی باعث شده‌اند که بخشی از مناطق سطح شکست بصورت ترد بشکنند (شکل ۹).

در شکل‌های ۸ تا ۱۱ تصاویر مربوط به نحوه بروز شکست در نمونه‌ها آورده شده است. در این اشکال می‌توان بخوبی مشاهده نمود که الگوی کاملاً مشخصی را نمی‌توان برای شکست نمونه‌ها تعریف کرد. این پدیده را می‌توان به ناهمسانگردی خواص در اکثر قطعات تولیدی به روش ریخته‌گری مربوط دانست. شکل ۱۵ شماتیک نحوه بروز ترک در بازوهای لانه‌زنبوری را نشان می‌دهد.

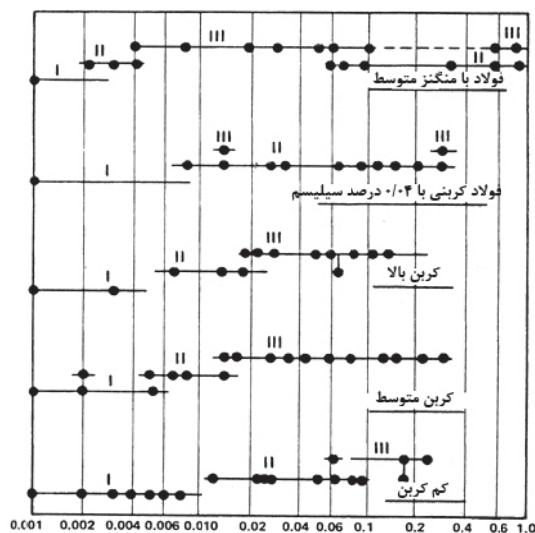


شکل ۱۵: شماتیک نحوه بروز ترک در بازوهای لانه‌زنبوری

Fig. 15: schematic of cracking mode in honeycomb arms

یکی از مهمترین نقش‌هایی که منگنز در فولادهای ساده کربنی ایفا می‌کند ترکیب شدن با گوگرد محلول در مذاب است. در غیر این صورت گوگرد با آهن، ترکیب سولفید آهن را بوجود می‌آورد. سولفید آهن با مذاب یک سیستم یوتکتیک تشکیل می‌دهند و در مرز دانه‌ها رسوب می‌کنند. افزودن منگنز موجب می‌گردد که ترکیب سولفید منگنز تشکیل شده و این ترکیب به صورت آخال در درون دانه‌ها قرار گیرد. این امر باعث شده است که در عمل تجمع این آخال‌های نسبتاً نرم شکست بصورت کلیواژ گسترش یابد. آخال‌های سولفید منگنز با اینکه آخال‌های نرمی به حساب

خواهد بود. چنانچه مقدار آلومینیم باقیمانده در محدوده ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۱۵ باشد، شکل ناخالصی سولفیدی از نوع دوم خواهد بود و در صورتیکه مقدار باقیمانده از ۰/۰۱۵ تجاوز کند، شکل ناخالصی سولفیدی از نوع سوم خواهد بود [۱۲]. این مقادیر بحرانی بر حسب مقدار کربن، سیلیسیم و منگنز موجود در فولاد تغییر می‌کند که این ارتباط در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. در این تحقیق با توجه به مقدار آلومینیم باقیمانده در مذاب (۰/۱۸ درصد وزنی)، مورفولوژی سولفید منگنز در نمونه‌ها از نوع گوشه‌دار است. گوشه‌دار بودن آخال‌ها خود می‌تواند تا حدودی بر روی خواص مکانیکی فولاد تاثیرگذار باشد. این درحالیست که چنانچه با کنترل ذوب، شرایط به گونه‌ای ایجاد شود که سولفید منگنز نوع اول بوجود آید، خواص مکانیکی افزایش خواهد یافت.



درصد آلومینیم قابل حل در اسید

شکل ۱۴: ارتباط بین کربن موجود و اثر آلومینیم در تعیین نوع ناخالصی‌های سولفیدی در فولادهای کربن‌دار [۱۲]

Fig. 14: Schematic diagram showing sulphide formation in various Al & C content of carbon steel

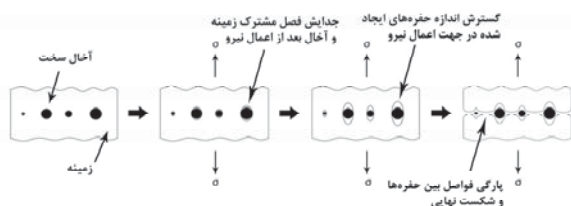
نوع شکست

با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل ۶ می‌توان دریافت که در هر سه قطر مبنای شبکه با افزایش دمای بارریزی استحکام فشاری نمونه‌های ریختگی کاهش یافته است. دلیل این امر را می‌توان در میزان عیوب نمونه‌ها جستجو کرد. به عبارت دیگر با افزایش دما، عیوب قطعات ریختگی افزایش

نتیجه گیری:

- ۱- با افزایش دمای بارریزی فولاد St37 کسر حجمی آخال‌ها در پره‌های لانه‌زنبوری افزایش می‌یابد.
- ۲- افزایش دمای بارریزی واکنش بین مذاب و قالب را افزایش داده و گاز بیشتری تولید می‌کند.
- ۳- کاهش سیلیسیم و منگنز محلول در مذاب سیالیت مذاب را کاهش چشمگیری می‌دهد.
- ۴- با افزایش ضخامت مبنای شبکه استحکام فشاری لانه‌زنبوری تا حد زیادی افزایش می‌یابد.
- ۵- با افزایش دمای بارریزی استحکام فشاری لانه‌زنبوری کاهش می‌یابد.
- ۶- اکثر آخال‌های موجود در لانه‌زنبوری ریختگی از جنس فولاد St37 از جنس سولفیدمنگنز بوده و منشاء داخلی دارند.
- ۷- مکانیزم غالب در شکست لانه‌زنبوری‌های لانه‌زنبوری ریختگی از جنس فولاد St37 از نوع شکست نرم بوده و به وسیله آخال‌ها کنترل می‌گردد.

می‌آیند اما سختی آن‌ها از زمینه فریتی بیشتر است. از طرفی آخال‌های اکسیدی نیز آخال‌های سختی محسوب می‌شوند. این آخال‌ها (اکسیدی و سولفیدی) موجب می‌شوند فصل مشترک آن‌ها موقعی که تحت تنش قرار می‌گیرند از زمینه جدا شده و در محل جهت اعمال تنش، حفره‌های پلاستیکی ایجاد گردد. این پدیده باعث شکست نرم می‌شود [۱۳-۱۴]. شکل ۱۶ تصویر شماتیک مراحل تشکیل شکست نرم را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶: تصویر شماتیک مراحل مکانیزم شکست نرم

Fig. 16: Schematic view of ductile fracture mechanism

لازم به ذکر است که با افزایش تغییرشکل پلاستیک و با بزرگ شدن حفره‌ها به اندازه کافی، نمونه از نظر مکانیکی در یک وضعیت ناپایدار قرار می‌گیرد و با به هم پیوستن این حفره‌ها ماده دچار شکست می‌گردد [۱۴].

مراجع:

1. M. He, W. Hu, "A Study on Composite Honeycomb Sandwich Panel Structure", Materials and Design 29, 2008, 709-713
2. R.K. Oruganti, A.K. Ghosh, "Fabrication of Nickel Honeycombs", Acta Materialia 55, 2007, 6074-6083
3. D. Gay, S. V. Hoa, Stephen W. Tsai, "Composite Materials Design and Applications", 2003, CRC Press
4. C. C. Foo, G. B. Chai, Leong Key Seah, "Mechanical Properties Of Nomex Material and Nomex Honeycomb Structure", Composite Structures 80, 2007, 588-594
5. L. Aktay, A. F. Johnson, B. H. Kroplin, "Numerical Modelling of Honeycomb Core Crush Behaviour", Engineering Fracture Mechanics 75, 2008, 2616-2630
6. F.C. Campbell, "Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials", 2006, Butterworth-Heinemann
7. M. Meoa, R. Vignjevic, G. Marengo, "The Response of Honeycomb Sandwich Panels under Low-Velocity Impact Loading", International Journal of Mechanical Sciences 47, 2005, 1301-1325
8. H. Zarei, M. Kroger, "Optimum Honeycomb Filled Crash Absorber Design", Materials and Design 29, 2008, 193-204
9. S. T. Hong, J. Pan, T. Tyan, P. Prasad, "Quasi-Static Crush Behavior of Aluminum Honeycomb Specimens under Non-Proportional Compression-Dominant Combined Loads", International Journal of Plasticity 22, 2006, 1062-1088
10. C. W. Briggs, "The metallurgy of steel castings", 1946, McGraw-Hill

11. R. W. Heine, C. R. Loper, P. C. Rosenthal, " Principles of metal casting", 1967, McGraw-Hill
۱۲. محمود فرزایی، "فولاد سازی"، ۱۳۷۹، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان
۱۳. مجید عباسی فیروزجاه، " بررسی روش اکسیژن زدایی بر مشخصه های آخال و خواص مکانیکی فولاد AISI: 9335"،
پایان نامه دوره کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۸
14. M. F. Ashby, C. Ganhi, M. R. Taplin, "Fracture-Mechanism Maps and Their Construction for F.C.C. Metals and Alloys", Acta Metallurgica, Volume 27, 1979, 699-729