

سرعت بحرانی مذاب در ریخته گری آلیاژهای منیزیم (AZ91)

علیرضا میرکⁱ مهدی دیوانداریⁱⁱ، سید محمد علی بوترابیⁱⁱⁱ

چکیده

این پژوهش مبتنی بر ارائه مفهوم سرعت بحرانی مذاب در ریخته گری آلیاژهای منیزیم است. اثر سرعت ورود مذاب به قالب بر روی خواص و سلامت قطعات ریختگی در آلیاژهای آلومینیم گزارش شده است. آلیاژهای منیزیم بدلیل نرخ اکسیداسیون بالا، نسبت به تلامم سطحی در هنگام ریخته گری حساسند. در اثر تلامم سطحی مذاب در لحظه ورود به محفظه قالب، فیلم های اکسید سطحی می توانند وارد مذاب شده و به کاهش خواص مکانیکی قطعات ریختگی منجر شوند. آزمایشات شامل ریخته گری صفحات به ضخامت ۱۰ mm از آلیاژ AZ91 در قالب کف ریز و در سرعت های مختلف ورود مذاب به قالب است. برای مشاهده مورفولوژی جت مذاب در لحظه ورود به قالب و رفتار پر شدن مذاب از تکنیک تصویر برداری ویدیویی استفاده شد. به منظور مقایسه خواص مکانیکی، آزمایش خمش سه نقطه ای بر روی نمونه ها در دو جهت افقی و عمودی انجام شد. نتایج نشان می دهد که مرز شروع تلامم سطحی برای ریخته گری آلیاژ منیزیم (AZ91) هنگامی است که سرعت ورود مذاب به محفظه قالب حدود 0.3 m/s بوده، که سرعت بحرانی است. در سرعت های کمتر از سرعت بحرانی، جت مذاب مشاهده نشده و مذاب به آرامی وارد قالب می شود. با افزایش سرعت ورود مذاب، جبهه حرکت مذاب قارچی شکل و در سرعت های بالاتر به شکل فواره ای همراه با پاشش به اطراف تغییر کرده و موجب کاهش خواص مکانیکی تا ۵۰٪ می شود.

کلمات کلیدی:

سرعت بحرانی، خواص مکانیکی، فیلم های اکسید، آلیاژ منیزیم (AZ91).

Critical Gate Velocity in Casting Magnesium Alloys

A. R. Mirak, M. Divandari, S. M. A. Boutorabi

ABSTRACT:

The concept of critical gate entry velocity was investigated in AZ91 magnesium alloy. The effect of in-gate velocity on the soundness and the mechanical properties of aluminum castings has been reported. Due to surface turbulence resulted by exceeding from the critical velocity and the entrainment of oxide film, mechanical properties and the performance of casting might be reduced significantly. Experimental work consisted of casting of plates, $10 \times 140 \times 200 \text{ mm}$ of the AZ91 alloy in resin sand mold. The molten metal was introduced into the mold cavity at different gate velocities via changing the dimensions of a bottom gated filling system. Video recording was used to evaluate the possibility of the surface turbulence and the direct observation of the morphology of entrance of the melt jetted into the mold cavity at different velocities. Bend tests were carried out to investigate the effect of gate velocity on the mechanical properties of the castings in vertical and horizontal directions. Some results indicated that

ⁱ دانشجوی دکتری مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران mirak@mail.iust.ac.ir

ⁱⁱ استادیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

ⁱⁱⁱ استاد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

critical in-gate velocity for magnesium alloys is approximately 0.3 m/s. Laminar fluid flow was observed at and below this velocity while at higher speed the morphology was changed into a mushroom shape and fountain shape of flow was noticed followed by about 50% decrease in the mechanical properties.

KEYWORDS:

Critical Velocity, Magnesium Alloy, Mechanical Properties, Oxide Film Defects.

Campbell برای اولین بار مفهوم تلاطم سطحی را با عدد

وبر بیان کرد [۴] و نشان داد که عدم تلاطم سطحی مذاب هنگامی رخ می‌دهد که عدد وبر بین ۰/۲ الی ۰/۸ باشد. عدد وبر، عدد بدون بعدی است که شرایط تلاطم سطحی را تعریف می‌کند.

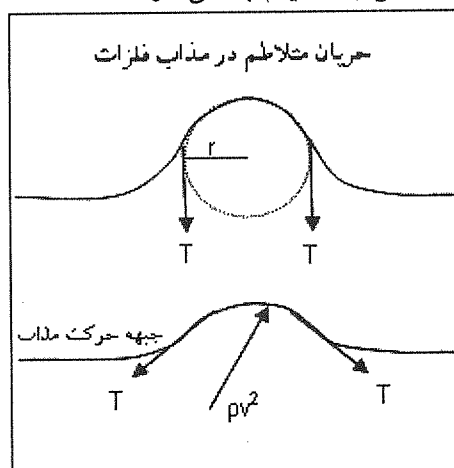
$$We = \frac{v^2 \rho r}{\gamma} \quad (1)$$

که در آن v سرعت سیال (m/s)، ρ چگالی (Kg/m^3)، r شعاع جریان و γ تنش سطحی (N.m^{-1}) است. در صورتی که نیروهای وارد بر مذاب در حال حرکت را در نظر بگیریم (شکل ۲)، فشار اینرسی یا نیروی پیش برنده مذاب، ρv^2 ، دانسیته و v سرعت مذاب) و فشار مانع جریان یا کشش سطحی $T = \frac{2\gamma}{r}$ ، شعاع هاله جبهه مذاب و γ کشش سطحی مذاب) است. اگر فشار اینرسی از فشار تنش سطحی بیشتر شود، سطح مذاب دچار تلاطم می‌شود [۴].

$$\rho v^2 = \frac{2\gamma}{r} \quad (2)$$

$$v = \sqrt{\frac{2\gamma}{\rho r}} \quad (3)$$

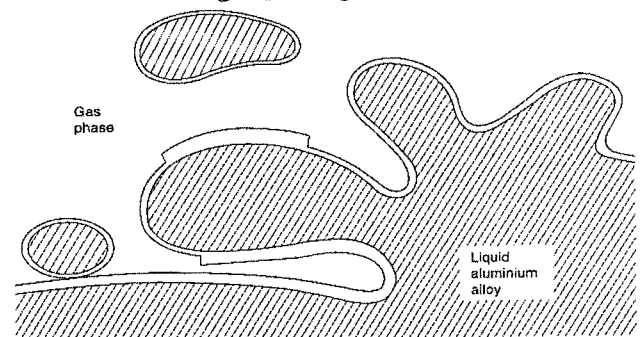
این فرمول تعریفی از سرعت بحرانی مذاب ارائه می‌دهد که در بالاتر از آن با غلبه بر نیروی تنش سطحی، سطح مذاب شکسته شده و تلاطم سطحی رخ می‌دهد. اهمیت این فرمول از این جهت است که سرعت بحرانی فقط به خواص فیزیکی آلیاژ مذاب (تنش سطحی و دانسیته) بستگی دارد.



شکل (۲): بالانس نیروهای وارد بر مذاب در حال حرکت

۱- مقدمه

اثر سرعت ورود مذاب به حفره قالب در آلیاژهای مختلف بر خواص و سلامت قطعات ریختگی در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۱-۳]. Campbell نشان داد که یک سرعت بحرانی برای تمام مذاب فلزات وجود دارد که در بالاتر از آن تلاطم سطحی رخ می‌دهد [۴]. Campbell و Yang [۶] اثبات کردند که طراحی نامناسب سیستم راهگامی موجب افزایش سرعت مذاب و تلاطم سطحی می‌شود. آلیاژهای منیزیم بدلیل نرخ اکسیداسیون بالا، نسبت به تلاطم سطحی در هنگام ریخته‌گری حساسند. در اینصورت فیلم‌های اکسید سطحی بر روی سطح مذاب، همانند شکل ۱ به صورت دو لایه تا می‌خورند. تا خوردگی فیلم اکسید با حبس گاز یا هوا همراه بوده و منبع مناسبی برای تشکیل عیوب ریختگی از جمله مک های گازی و انقباضی است [۵]. لایه‌های اکسید مورد بحث هیچگاه بهم نمی‌پیوندند و تشکیل ترک شناور در قطعه را میدهند، که تا پایان انجماد در قطعه باقی می‌مانند. این یک خطر واقعی است که قطعات ریختگی را تهدید می‌کند.



شکل (۱): شماتیک تاخوردگی فیلم سطحی بر روی مذاب در اثر

تلاطم سطحی [۱]

منشاء ورود آخالهای اکسیدی به مذاب می‌تواند ناشی از شارژ یا مواد اولیه، سرباره، عدم دقت کافی در فرایند ذوب، عملیات کیفی مذاب، ارتفاع بارریزی و در اثر تلاطم سطحی هنگام ورود به محفظه قالب باشد [۷-۸]. ریخته‌گری آلیاژهای منیزیم بواسطه تشکیل فیلم اکسید سطحی متخلخل و غیر محافظ مشکل است، به طوری که در صورت عدم استفاده از اتمسفر محافظ، کل مذاب اکسید شده و می‌سوزد [۹-۱۰]، بنابراین خطر وجود عیوب فیلم‌های اکسید در منیزیم بیشتری دارد.

جدول ۱ نتایج حاصل از تحقیق تعدادی از محققین بر روی سرعت بحرانی را نشان می‌دهد.

جدول (۱): نتایج حاصل از تحقیق تعدادی از محققین بر روی سرعت بحرانی [۱۱-۱۳]، [۳]، [۱]

محققین	آلیاژ	سرعت ورود مذاب به قالب m/s
Eastwood, Grube	Al-10Mg	0.5
Suzuki	Al	0.4
Runyoro, Campbell	Al	0.5
Halvae, Campbell	Cu-10Al	0.37
Bahrinian, Boutorabi	Mg (ZK51)	0.5

مطابق قانون پیوستگی انرژی، دبی حجمی خروجی از پای راهگاه برابر دبی حجمی خروجی از راهباره است. بر این اساس به منظور تغییر سرعت ورود مذاب به داخل محفظه قالب، سطح مقطع‌های راهباره، در آزمایشات مختلف، mm^2 ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ در نظر گرفته شد. بنابراین خواهیم داشت

$$A_1 \times V_1 = A_2 \times V_2 \quad (4)$$

در این رابطه به ترتیب A_1 و A_2 سطح مقطع‌های پای راهگاه و راهباره بوده که در شکل ۳ نشان داده شده است و V نیز سرعت مذاب در این دو مقطع است. سرعت در پای راهگاه عبارت است از:

$$V_1 = \sqrt{2ghe} \quad (5)$$

ارتفاع موثر است و نیروی محرکه برای حرکت مذاب که عبارت است از:

$$he = 210 + 20 - 40 = 190 \text{ mm}$$

که در آن ارتفاع مذاب در حوضچه بارریز (۲۰ mm)، ارتفاع راهگاه (۲۱۰ mm) و ارتفاع راهباره (۴۰ mm) است. بنابراین از معادلات ۴ و ۵ خواهیم داشت:

$$V_2 = \frac{A_1}{A_2} \sqrt{2ghe} \quad (6)$$

یک شیشه دوپل به ضخامت ۶ mm که کناره‌های آن علامت گذاری شده بود، جهت رویت مورفولوژی جبهه مذاب درون قالب در سرعت‌های مختلف مذاب تعبیه شد. از یک دوربین فیلم برداری مدل Sony- HC30-mini DV برای تصویر برداری از حرکت مذاب استفاده شد. سپس با استفاده از نرم افزار کامپیوتری، هرثانیه از فیلم به ۲۵ فریم تقسیم گردید، بنابراین فاصله زمانی بین هر دو فریم ۰/۰۴ ثانیه است. سرعت واقعی مذاب ورودی از راهباره برحسب فاصله طی شده توسط مذاب در طول کانال راهباره و زمان طی شده اندازه گیری شد. کلیه صفحات ریختگی تحت آزمایش رادیوگرافی X-ray قرار گرفتند. برای اندازه گیری خواص مکانیکی، در کلیه شرایط ریخته گری، یک صفحه در جهت عمودی (در راستای راهباره) و یک صفحه در جهت افقی (عمود بر راهباره) تحت آزمایش خمش سه نقطه ای مطابق استاندارد ASTM-E290 قرار داده شد [۱۶].

سطوح شکست نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) مدل Philips X2500 مطالعه شدند. همچنین از نقاط مختلف سطوح شکست جهت آنالیز کمی از تکنیک EDX استفاده شد.

اثرعیوب فیلم اکسید بر روی خواص مکانیکی قطعات ریختگی در آلیاژهای آلومینیوم توسط محققین بررسی شده است [۲]، [۱۴]. Nyahamva و همکارانش [۱۵] اثر تلاطم سطحی بر روی استحکام خستگی آلیاژهای ریختگی آلومینیم را مطالعه و نشان دادند که ترک‌های خستگی از محل فیلم‌های اکسید آغاز می‌شوند. Green و Campbell [۲] اشاره کردند که طراحی سیستم راهگاهی نقش موثری بر استحکام کششی آلیاژ ریختگی AZ91 Mg دارد.

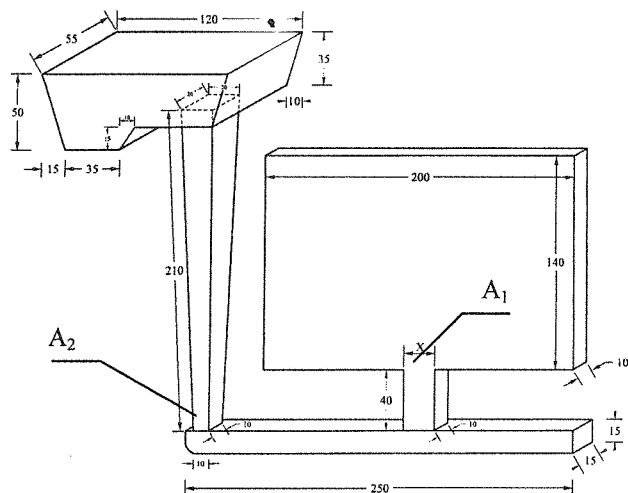
این پژوهش بر توصیف یک سری از آزمایشات برای تعیین سرعت بحرانی آلیاژهای منیزیم و اثر سرعت ورود مذاب به محفظه قالب بر خواص مکانیکی متمرکز است.

۲- روش تجربی انجام کار

آلیاژ منیزیم مورد استفاده در این مطالعه AZ91 دارای ترکیب شیمیایی مطابق جدول ۲ است. مدل و سیستم راه گاهی مورد استفاده مطابق شکل ۳ طراحی شد.

جدول (۲): ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده AZ91

AZ91	Al	Mn	Zn	Mg
Wt%	8.7	0.5	0.1	Base



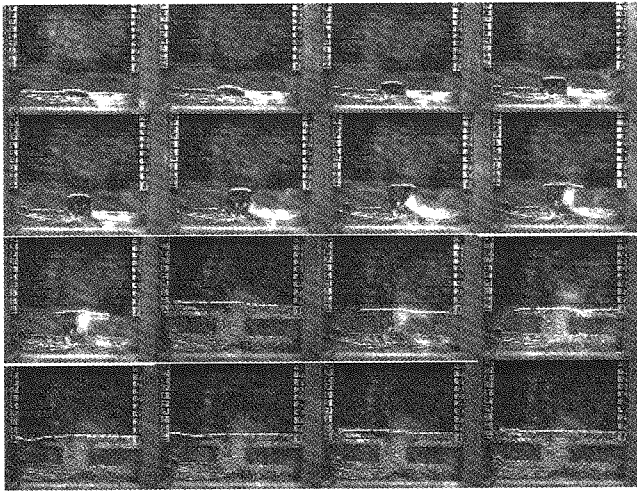
شکل (۳): شماتیک مدل و سیستم راهگاهی مورد استفاده

۳- نتایج

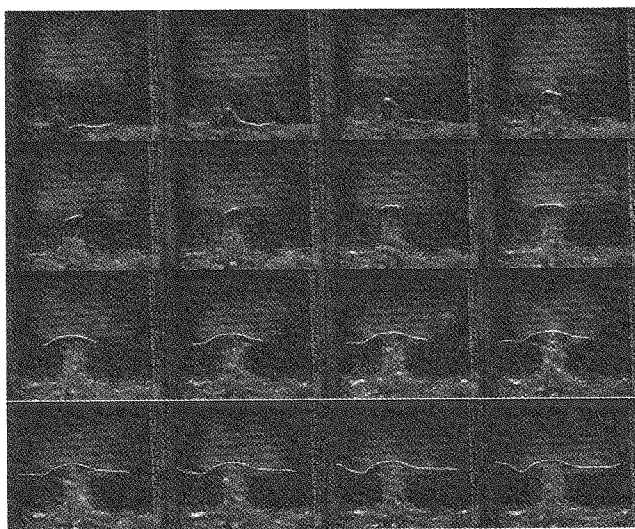
اطلاعات حاصل از ریخته گری صفحات در سرعت‌های مختلف ورود مذاب به محفظه قالب در جدول ۳ خلاصه شده است. سرعت واقعی از محاسبه سرعت متوسط مذاب در لحظه ورود به قالب تعیین و حداکثر میزان ارتفاع جت مذاب در لحظه ورود به محفظه قالب برای هر سرعت اندازه گیری شد. تصاویر انتخاب شده از تجزیه فریم به فریم فیلم‌های تصویر برداری شده از جت مذاب به داخل قالب و نحوه پر شدن قالب در سرعت‌های مختلف ورود مذاب در شکل ۴ مشاهده می‌شود. شکل ۴-الف، تصاویر تجزیه شده از فیلم ریخته گری صفحات با سطح مقطع راهباره 400 mm^2 را نشان می‌دهد سرعت ورود مذاب به محفظه قالب 0.2 m/s اندازه گیری شد. شکل ۴-ب، تصاویر تجزیه شده از ریخته گری صفحات با سطح مقطع راهباره 300 mm^2 را نشان می‌دهد و سرعت ورود مذاب به قالب 0.25 m/s است. شکل ۴-ج، تصاویر تجزیه شده از ریخته گری صفحات با سطح مقطع راهباره 250 mm^2 را نشان می‌دهد و سرعت ورود مذاب به قالب 0.35 m/s است. شکل ۴-د، تصاویر تجزیه شده از ریخته گری صفحات با سطح مقطع راهباره 200 mm^2 را نشان می‌دهد و سرعت ورود مذاب به قالب 0.5 m/s است. شکل ۴-ح، تصاویر تجزیه شده از ریخته گری صفحات با سطح مقطع راهباره 150 mm^2 را نشان می‌دهد و سرعت ورود مذاب به قالب 1 m/s است و شکل ۴-و، تصاویر تجزیه شده از ریخته‌گری صفحات با سطح مقطع راهباره 100 mm^2 را نشان می‌دهد و سرعت ورود مذاب به قالب $1/3 \text{ m/s}$ است. تصاویر شکل ۵، شماتیکی از مورفولوژی ورود جت مذاب به داخل محفظه قالب در سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول (۳): اطلاعات حاصل از ریخته گری صفحات

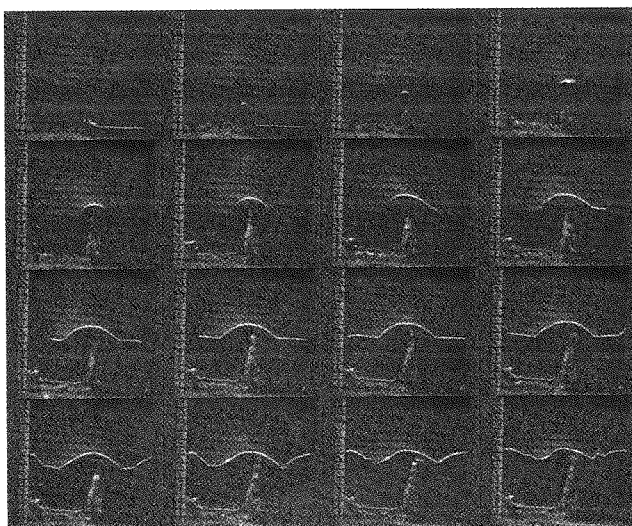
عدد ویر	ضریب تخلیه	دبی جریان $\text{m}^3/\text{s} \times 10^{-4}$	ماکزیمم ارتفاع جت مذاب (mm)	سرعت تئوری (m/s)	سرعت واقعی (m/s)	سطح مقطع راهباره (mm^2)	ردیف
۰/۳	۰/۴	۶۰	۱۰	۰/۵	۰/۲	۴۰۰	۱
۰/۸۸	۰/۳۸	۷۵	۱۵	۰/۶۵	۰/۲۵	۳۰۰	۲
۱/۷	۰/۴۳	۷۵	۲۰	۰/۸	۰/۳۵	۲۵۰	۳
۳/۵۴	۰/۵	۱۰۰	۲۵	۱	۰/۵	۲۰۰	۴
۱۱/۵	۰/۷۰	۱۳۵	۳۵	۱/۳	۱	۱۵۰	۵
۲۴	۰/۶۵	۱۲۰	۶۰	۲	۱/۳	۱۰۰	۶



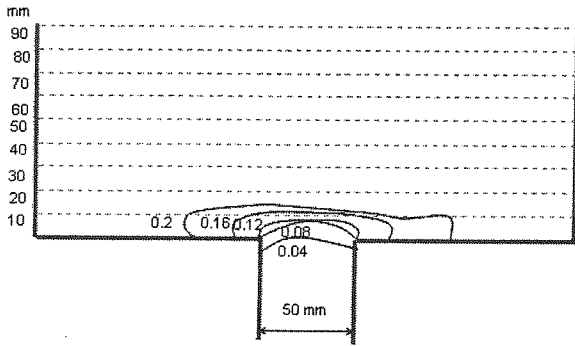
الف) تصاویر تجزیه شده از ذوب شماره ۱
سطح مقطع راهباره 400 mm^2



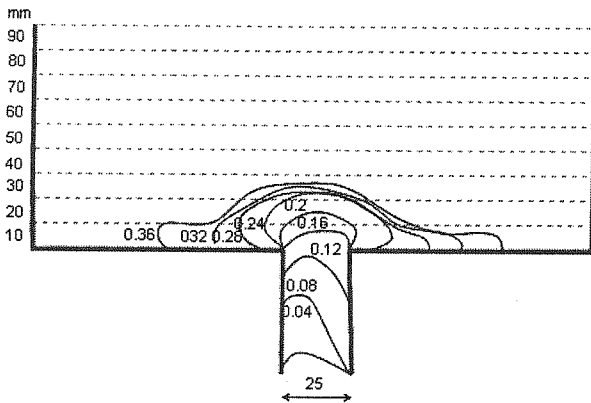
ب) تصاویر تجزیه شده از ذوب شماره ۲
سطح مقطع راهباره 300 mm^2



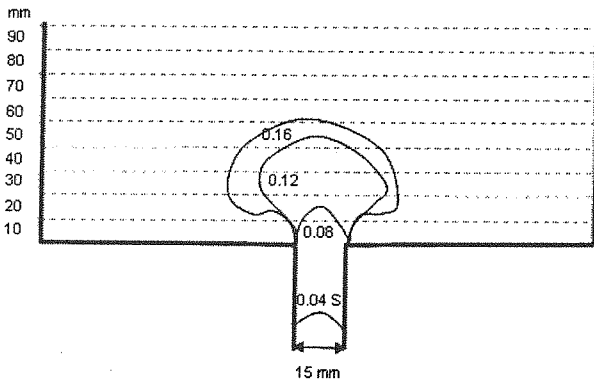
ج) تصاویر تجزیه شده از ذوب شماره ۳
سطح مقطع راهباره 250 mm^2



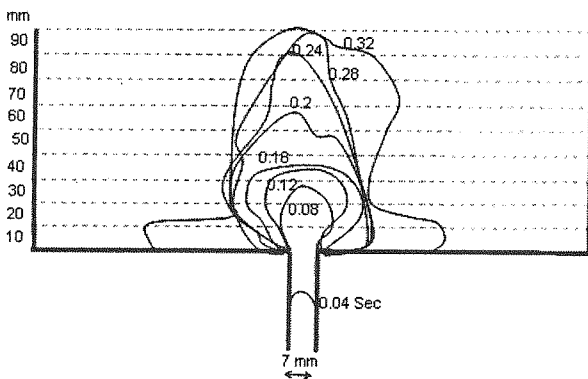
الف) سطح مقطع راهپاره 400 mm^2 ، سرعت مذاب 0.2 m/s



ب) سطح مقطع راهپاره 300 mm^2 ، سرعت مذاب 0.35 m/s

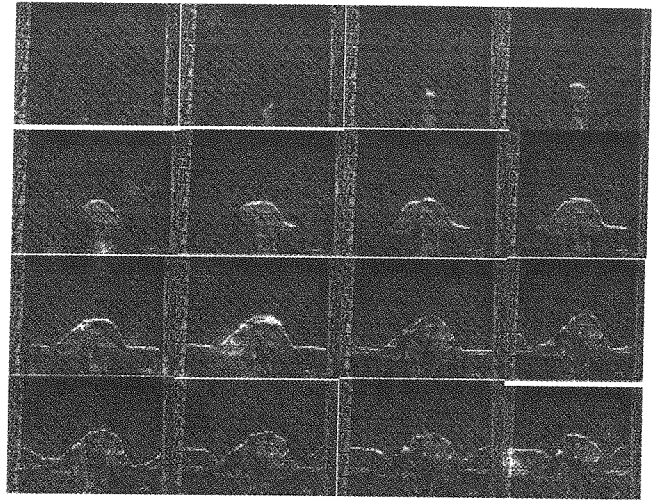


ج) سطح مقطع راهپاره 150 mm^2 ، سرعت مذاب 1 m/s



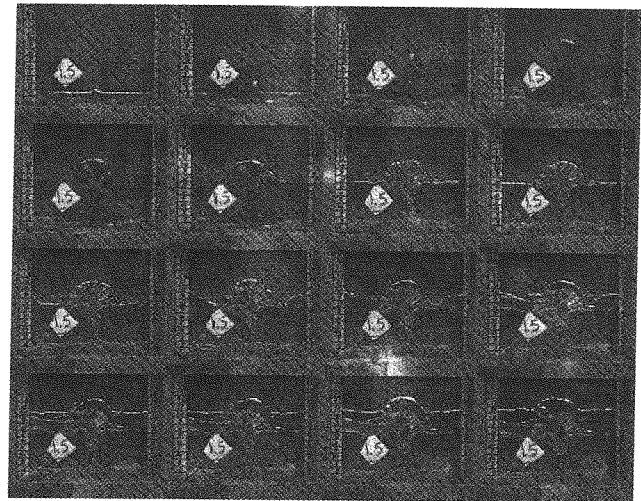
د) سطح مقطع راهپاره 100 mm^2 ، سرعت مذاب $1/3 \text{ m/s}$

شکل ۵: شماتیک جت مذاب بداخل قالب در سرعت های اولیه مختلف ورود مذاب بداخل محفظه قالب



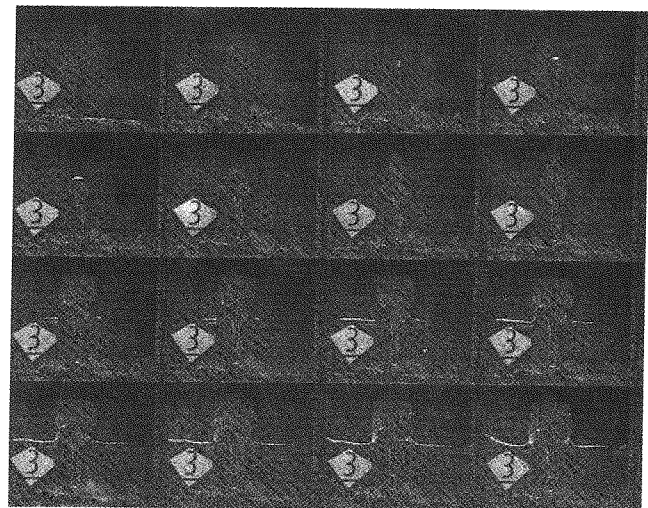
ج) تصاویر تجزیه شده از ذوب شماره ۴

سطح مقطع راهپاره 200 mm^2



ج) تصاویر تجزیه شده از ذوب شماره ۵

سطح مقطع راهپاره 150 mm^2

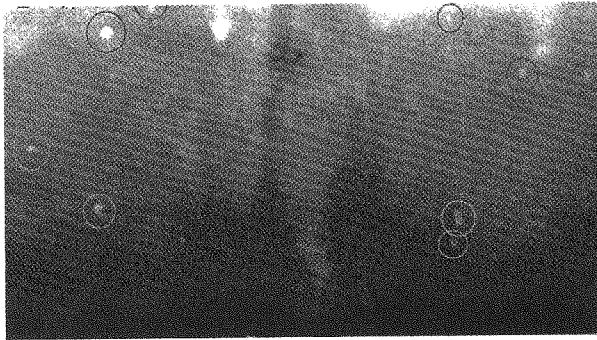


ج) تصاویر تجزیه شده از جت مذاب در ذوب شماره ۶

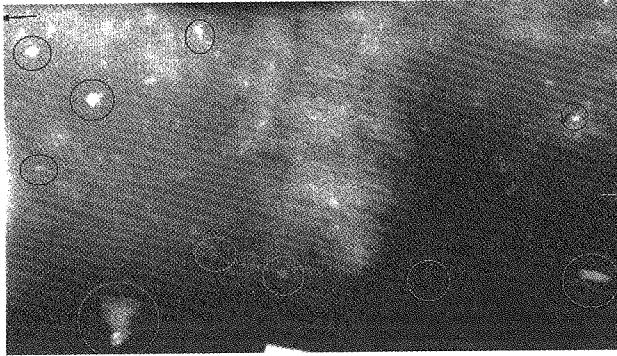
سطح مقطع راهپاره 100 mm^2

شکل (۴): تصاویر تجزیه شده از جت مذاب آلیاژ منیزیم بداخل

قالب با ضخامت 10 mm با سطح مقاطع راهپاره مختلف

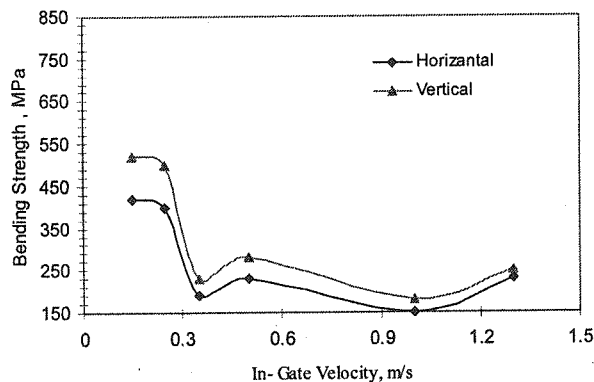


الف



ب

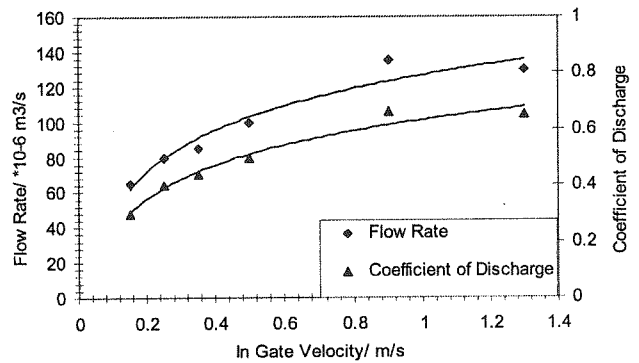
شکل (۸): تصاویر رادیوگرافی از صفحات ریخته شده نمونه های (الف شماره ۲ و ب) شماره ۳ در جدول ۳



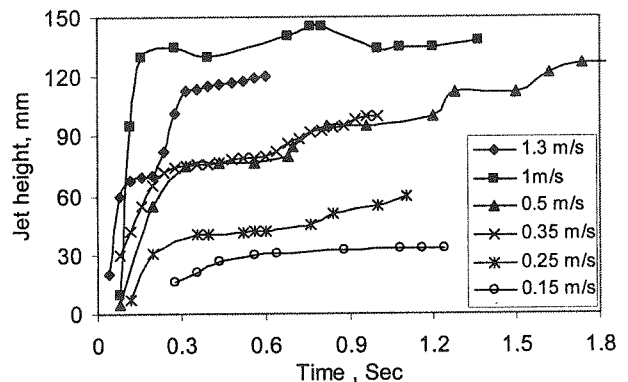
شکل (۹): نمودار نسبت استحکام خمشی به سرعت ورود مذاب به داخل محفظه قالب در دو جهت افقی و عمودی

شکل ۱۰ - الف تصویر SEM از سطح شکست حاصل از آزمایش خمش نمونه ریخته شده از ذوب شماره ۶ را نشان می‌دهد. تصویر شامل حفره‌های انقباضی و فیلم‌های اکسیدی تاخوردگی بر روی دندریت‌ها است. سطح دندریت‌ها نیز به علت دست‌رسی به هوا اکسید شده‌اند. آزمایش EDX نشان داده شده در شکل ۱۰-ب، درصد بالای اکسیژن را در نواحی حفره انقباضی نشان می‌دهد.

در جدول ۳، ضریب تخلیه بر اساس نسبت دبی واقعی به دبی تئوری مذاب در راه‌بار بدست آمد. عدد ویر در کلیه شرایط بر اساس سرعت واقعی مذاب محاسبه شد که در ستون آخر ملاحظه می‌شود. شکل ۶ تغییرات ضریب تخلیه و دبی جریان بر اساس سرعت ورود مذاب به قالب را نشان می‌دهد. با افزایش سرعت مذاب، دبی جریان افزایش یافته و مقدار اصطکاک کاسته می‌شود. تغییرات ارتفاع جت مذاب در قالب بر اساس زمان پر شدن در سرعت‌های مختلف ورود مذاب به قالب در شکل ۷ مشاهده می‌شود.



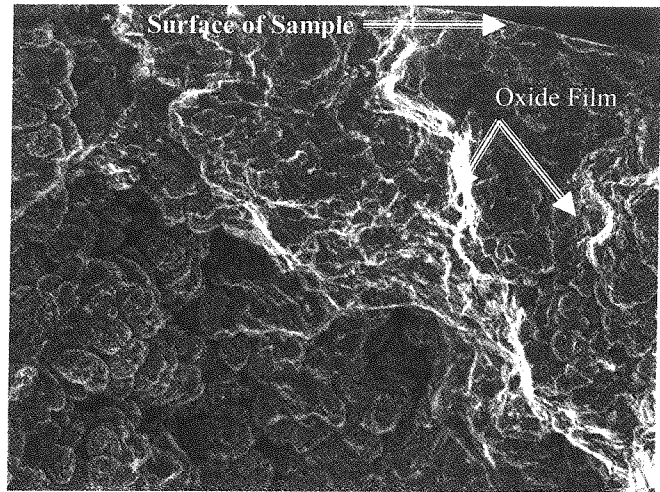
شکل (۶): اثر سرعت ورود مذاب به قالب بر دبی جریان و ضریب تخلیه مذاب آلیاژ منیزیم در قالب کف ریز



شکل (۷): نمودار ارتفاع-زمان پیشروی جبهه مذاب در قالب در سرعت‌های ورودی مختلف

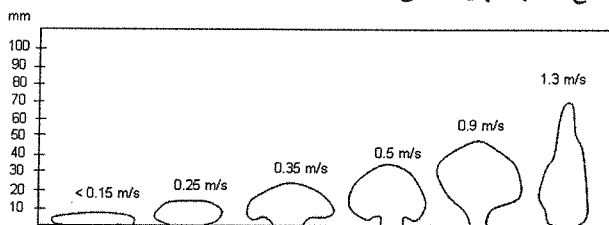
شکل ۸ تصاویر رادیوگرافی از صفحات ریخته شده در سرعت‌های مختلف ورود مذاب به قالب را نشان می‌دهد. در این تصاویر تعداد و توزیع عیوب ریختگی ملاحظه می‌شود. در شکل ۹ نتایج حاصل از آزمایش خمش نمونه‌های ریخته شده در سرعت‌های مختلف در دو جهت افقی و عمودی ملاحظه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که خواص مکانیکی قطعات ریخته شده در سرعت‌های بالاتر از حدود ۰/۳ m/s به میزان ۵۰٪ کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های عمودی نسبت به نمونه‌های افقی استحکام بیشتری دارند.

مورفولوژی جبهه مذاب ورودی به قالب قارچی شکل می‌شود (شکل ۵-ج). ستون مذاب تا اندازه مشخصی بالا می‌رود و پس از توقف، از روی کف قالب شروع به حرکت می‌کند. بعلت نیروی وزن ستون مذاب، لایه‌های بالایی مذاب بر روی لایه‌های زیرین مذاب سر می‌خورند و موجب اختلاط فیلم‌های سطحی با مذاب می‌شوند. در سرعت‌های بالاتر، نزدیک 1 m/s ، مورفولوژی جت مذاب به شکل فورانی تغییر می‌کند (شکل ۵-د). بنابراین مذاب در یک خطر جدی ورود فیلم سطحی تاخورد به داخل مذاب در هنگام سقوط ستون مذاب به پایین قرار گرفته و قطعه پر از ترک می‌شود.

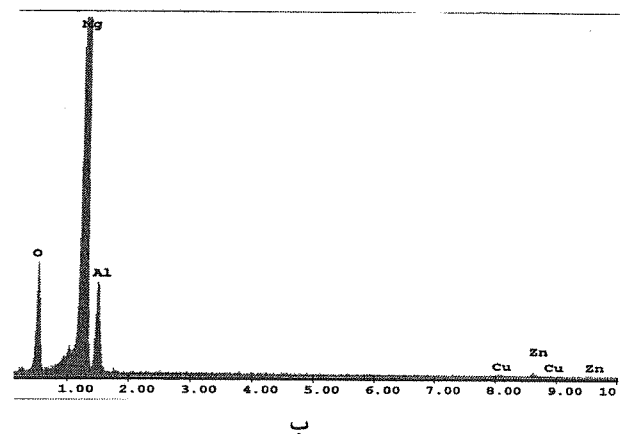


الف

پروفیل مورفولوژی‌های متفاوت جت مذاب به داخل قالب در سرعت‌های مختلف ورود مذاب به قالب در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود. با افزایش سرعت مذاب، ارتفاع جت مذاب افزایش می‌یابد و شکل جبهه مذاب از لایه‌ای در سرعت‌های پایین به قارچی شکل و فواره‌ای در سرعت‌های بالاتر تغییر می‌کند و سطح مذاب ناپایدار می‌شود.



شکل (۱۱): پروفیل مورفولوژی جت مذاب در سرعت‌های مختلف ورود مذاب به محفظه قالب



ب

شکل (۱۰): الف. تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست و ب) آنالیز EDX از سطح شکست

۴- بحث و تحلیل نتایج

ضریب تخلیه ناشی از اختلاف بین دبی حجمی واقعی با تئوری که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، بدلیل اصطکاک در سیستم راهگاهی است. هنگامی که مذاب از درون کانالی عبور می‌کند همواره تحت تاثیر عامل اصطکاک قرار می‌گیرد، در واقع برای معادله سرعت مذاب در لحظه ورود به قالب می‌توان ضریبی در نظر گرفت (f در معادله ۷)، محاسبات برای آلیاژ منیزیم، f را در محدوده 0.4 الی 0.7 نشان می‌دهد.

$$V = f \sqrt{2gh_e} \quad (7)$$

شکل ۷ نشان می‌دهد که در سرعت‌های واقعی کمتر از سرعت بحرانی (2 m/s /)، نمودار ارتفاع جت مذاب - زمان، حالت منظم و پایدار دارد و این نشان می‌دهد که در یک حالت پایدار، مذاب به آرامی قطعه را پر می‌کند، در حالی که در سرعت‌های بالاتر، آشفتگی سطحی موجب افزایش شیب نمودار شده و در ادامه روند نمودار، سطح مذاب دچار تلاطم و آشفتگی می‌شود.

با توجه به تصاویر شکل ۷ و ۹ به نظر می‌رسد که معیار سرعت بحرانی برای آلیاژ منیزیم حدود 0.3 m/s باشد، که این نزدیک به سرعت بحرانی بدست آمده برای آلیاژ آلومینیم در

مشاهده مستقیم جریان مذاب در راهبار و حفره قالب اثبات می‌کند که با تغییر سرعت اولیه ورود مذاب بدخل قالب، هندسه جت مذاب آلیاژ منیزیم (AZ91) تغییر می‌کند. محققین نشان دادند که برای کلیه مذاب فلزات یک محدوده سرعت بحرانی وجود دارد که بین 0.3 m/s الی 0.5 است [۱۲-۱۱]، [۲]، [۱]. در سرعت‌های کمتر از 0.2 m/s (شکل ۵-الف)، جریان مذاب آرام و با یک جبهه مسطح وارد قالب می‌شود و سپس بر روی کف قالب گسترده شده و بشکل لامینار، کل محفظه قالب را پر می‌کند. در این حالت هیچ گونه آثاری از اختلاط لایه سطحی با مذاب مشاهده نمی‌شود. در سرعت 0.25 m/s (شکل ۵-ب)، سطح جبهه مذاب در لحظه ورود به قالب قوسی شکل است. مذاب بشکل مسطح در قالب گسترده شده و آرام قالب را پر می‌کند. در این حالت اثری از اختلاط لایه اکسید سطحی با مذاب وجود ندارد در هنگام پر شدن قالب، ناهمواری‌های سطحی مشاهده می‌شود در سرعت‌های بالاتر،

۵- نتیجه گیری

۱. سرعت بحرانی برای آلیاژهای منیزیم در شرایط قالبی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر در حدود ۰/۳ m/s تعیین می‌شود.
۲. در سرعت‌های پایینتر از سرعت بحرانی، مورفولوژی جت مذاب بشکل لایه‌ای است و با افزایش سرعت نزدیک به سرعت بحرانی، بشکل قارچی تغییر می‌یابد و در سرعت‌های بالاتر تبدیل به شکل فواره ای خواهد شد.
۳. خواص مکانیکی در سرعت‌های بالاتر از سرعت بحرانی حدوداً ۵۰٪ تنزل می‌نماید.

۶- مراجع

- [۱] J. Runyoro, S. M. Boutorabi and J. Campbell, *Critical Velocities for Film-Forming Casting Alloys*, AFS Trans., 92-100, 225-234, 1992.
- [۲] N. R. Green and J. Campbell, *Influence of Oxide Film Filling Defects on the Strength of Al-7Si-Mg Alloy Castings*, AFS Trans., 94114, 341-347, 1994.
- [۳] A. Halvae and J. Campbell, *Critical Mold Entry Velocity for Aluminum Bronze Casting*, AFS, 9718 35-46, 1997.
- [۴] J. Campbell, *Casting*, Oxford, Butterworth, Heinemann, 2003.
- [۵] J. Campbell, *The New Metallurgy of Cast Metals*, Materials Science and Tech., Vol. 4, 194-204, 1998.
- [۶] X. Yang, M. Jolly and J. Campbell, *Minimization of Surface Turbulence During Filling Using a Vortex-Flow Runner*, Aluminum Trans., 2, 67-80, 2000.
- [۷] J. Campbell, *Ten Rules in Casting*, Oxford, Butterworth, Heinemann, 2003.
- [۸] M. Divandari, PhD Thesis, University of Birmingham, 2001, 12-16.
- [۹] E. F. Emely, *Principles of Magnesium Technology*, Pergamon Press, 1966.
- [۱۰] A. W. Brace and F. A. Allen, *Magnesium Casting Technology*, Chapman & Hall Ltd, 1957.
- [۱۱] F. Bahrinian, S.M.A. Boutorabi and J. Campbell, *Critical Gate Velocity for Magnesium Casting Alloy (ZK51A)*, the June Campbell Symposium, TMS, 48, 2005.
- [۱۲] K. Grube and L. W. Eastwood, AFS Transactions, 76 107, 1950
- [۱۳] S. Suzuki, *Modern Casting*, October 38 40, 1989
- [۱۴] C. Nyahamwa, N. R. Green and J. Campbell, *Effect of Mold-Filling Turbulence of Fatigue Properties of Cast Aluminum Alloys*, AFS Trans., 106, 215-223, 1998
- [۱۵] ASTM Standard, E 290-97a, 2000. Standard Test Method Bend testing of Material and ductility.
- [۱۶] J. Campbell, *Invisible Macrodefects in Castings*, de Physique IV Colloque C7 supplement au Journal de Physique III, Vol. 3, November 1993.
- [۱۷] N. R. Green and J. Campbell, *Statistical Distributions of Fracture Strengths of Cast Al-7Si-Mg Alloy*, Materials Science and Eng., A 173, 261-266, 1993.
- [۱۸] H. E. Elliott and J. G. Mezoff, *A New Gating Technique for Magnesium*, 1950, 241- 252.

شرایط یکسان است [۱]. نتایج سرعت بحرانی در سایر آلیاژها اثبات می‌کند که مقادیر بدست آمده بسیار به هم نزدیکند. با مطالعه تئوری سرعت بحرانی (معادله ۳) ملاحظه می‌شود که سرعت مذاب بستگی به جذر نسبت تنش سطحی به دانسیته مذاب فلز دارد که با توجه به اینکه این نسبت عدد کوچکی است، بنابراین جذر آن یک عدد بسیار کوچکی می‌شود. جدول ۴ مقادیر این نسبت را برای چند آلیاژ نشان می‌دهد.

جدول (۴): مقایسه نسبت تنش سطحی به دانسیته برای مذاب

فلزات مختلف

Alloy	Mg	Al	Cu-10Al
γ (nm ⁻¹)	0.5	1	1.5
$(\gamma/\rho)^{0.5}$	0.018	0.019	0.014
V_i (m/s)	0.3	0.5	0.275

- خواص مکانیکی صفحات ریخته شده در سرعت‌های بالاتر از ۰/۳ m/s با شیب تندی به میزان ۵۰٪ کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد که کاهش سریع خواص در این محدوده سرعت ریخته‌گری، نتیجه اغتشاش و اختلاط لایه اکسید با مذاب باشد.
- در اثر تلاطم و تغییر مورفولوژی مذاب در هنگام ورود به قالب، فیلم اکسید سطحی بداخل مذاب وارد می‌شود. گزارش شده است که میزان کاهش خواص مکانیکی در سرعت‌های بالاتر از بحرانی، قابل پیش بینی نیست و پراکندگی نتایج از مشخصات دیگر ریخته‌گری متلاطم است [۲]، [۱۸]. اندازه گیری خواص مکانیکی صفحات ریخته‌گری در دو جهت افقی و عمودی نشان داد که جهت نمونه برداری در آزمایش مکانیکی قطعات ریخته‌گری در تعیین خواص مکانیکی قطعه نقش مهمی دارد. همانطور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، خواص مکانیکی نمونه‌های عمودی بالاتر از نمونه‌های افقی هستند. فیلم‌های اکسید تشکیل شده در محفظه قالب بعلت اینکه در زمان‌های خیلی کوتاه تشکیل شده‌اند، ضخامتشان بسیار کم است. به همین دلیل توسط هیچ یک از آزمایش‌های غیر مخرب قابل شناسایی نیست. تصاویر رادیوگرافی از صفحات ریخته شده در سرعت‌های مختلف ورود مذاب (شکل ۸) نشان می‌دهد که توزیع عیوب ماکرو ریخته‌گری در نمونه‌های ریخته شده در سرعت‌های بالاتر از سرعت بحرانی به نسبت بیشتر از نمونه‌های ریخته شده در سرعت‌های پایین است. این عیوب دارای طبیعت تصادفی هستند. زیرا مکان تشکیل آنها را نمی‌توان پیش بینی کرد. در ریخته‌گری سیستم کف ریز، بعلت اینکه انجماد از دورترین محل به راه‌بار شروع می‌شود و آخرین منطقه انجماد، نزدیک راه‌بار قرار دارد [۱۹]. بیشتر عیوب انقباضی در این محل متمرکز هستند و تشکیل یک سطح ضعیف در قطعه می‌دهند.