



تحلیل تنش‌های حرارتی در یک قالب ریخته‌گری تحت فشار آلومینیوم

حمیدرضا خیاطی، یداله علی‌نیا*

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۵
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۱۶
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۷/۲۰

کلمات کلیدی:

تزریق تحت فشار
تنش حرارتی
تنش ون میسر
روش اجزای محدود
پوشش محافظ حرارتی

خلاصه: در این پژوهش توزیع تنش‌های ناشی از تزریق آلومینیوم مذاب طی فرآیند ریخته‌گری تحت فشار در یک قالب فولادی گرم کار بررسی می‌شود. با توجه به تقارن چرخشی موجود در هندسه قالب، مدل یک هفتم مسئله تحت شرایط کرنش صفحه‌ای به کمک روش اجزای محدود شبیه‌سازی می‌گردد. در اینجا فرض می‌شود تغییرات دما بر روی مرزهای درگیر با مذاب از الگوی هموار پیروی می‌کند و مرز بیرونی قالب در حال تبادل حرارت جابجایی با محیط اطراف است. نتایج تحقیق اخیر دارای همخوانی مناسبی با نتایج تحلیلی موجود تحت شرایط مرزی خاص می‌باشد. تحلیل حساسیت مسئله به ازای دمای پیش گرم قالب، هندسه گوشه‌های شیار تزریق و پوشش‌های محافظ حرارتی مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج حاکی از آن است که پیش گرم کردن قالب قبل از تزریق، نقش بسزایی در کاهش سطح تنش کل مجموعه ایفا می‌کند. همچنین با افزایش شعاع انحنا گوشه‌های شیار تزریق، ماکزیمم تنش ون میسر در نقاط مستعد رشد ترک حداقل ۲۵٪ کاهش خواهد یافت. کاربرد پوشش‌های محافظ کروم سخت و نیتريد سیلیکون به طور چشمگیری مقاومت قالب در برابر شوک‌های حرارتی را ارتقاء می‌دهد به نحوی که استفاده از یک پوشش کروم سخت با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر می‌تواند تا ۴۹٪ مقدار ماکزیمم تنش ون میسر را نسبت به نمونه بدون پوشش کاهش دهد. علاوه بر این، مقدار ماکزیمم تنش ون میسر برای پوشش تابعی مدرج حدود ۷۰٪ کمتر از نمونه بدون پوشش است.

۱- مقدمه

شکست نهایی قالب می‌گردد. شناخت رفتار حرارتی - مکانیکی قالب و همچنین پیش‌بینی مکان‌های مستعد تشکیل ترک یک ضرورت به نظر می‌رسد. دلیل این امر هزینه بالای ساخت قالب، توقف روند تولید و صرف زمان طولانی برای بازگشت به شرایط اولیه است. یک قالب دایکست هنگام تزریق، تحت ترکیب پیچیده‌ای از بارهای حرارتی و مکانیکی قرار می‌گیرد از جمله: فشار هیدرواستاتیک مذاب، نیروهای گیره‌بندی، بارگذاری ناشی از تشدید فشار، بارگذاری ناشی از انتقال حرارت حین انجماد قطعه و شوک حرارتی تولیدشده به دلیل استفاده از اسپری روان‌کننده بر روی سطح قالب. تغییرات دمایی شدید و متناوب، می‌تواند تنش‌های حرارتی قابل توجهی تولید کند که خود

فرآیند ریخته‌گری تحت فشار^۱ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا به دلیل استفاده از فشار و سرعت بالا در این فرآیند، امکان تولید قطعات با لبه‌ها و گوشه‌های تیز و قطعات جدار نازک فراهم می‌شود. از طرفی، تعیین تغییر شکل‌های حرارتی قالب تحت بارگذاری ترمومکانیکی حائز اهمیت است زیرا تنش‌های حرارتی ناشی از تغییرات شدید دما در هر سیکل تزریق می‌تواند باعث خستگی حرارتی قالب و در نتیجه تشکیل ترک‌های ریز در سطح خارجی آن شود. چرخه‌های پیاپی عملیات ریخته‌گری موجب گسترش این ترک‌ها و

1 Die Cast

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: y.alinia@hsu.ac.ir



سطحی مانند نیتروژن‌دهی، پوشش‌دهی به روش رسوب گذاری تبخیر فیزیکی^۶ و پوشش‌دهی تیتانیوم بر نحوه انتشار ترک در فولاد گرم کار بررسی شد. نتایج آنها نشان داد که تنش فشاری باقی‌مانده توسط فرآیند پوشش‌دهی تیتانیوم می‌تواند تنش‌های حرارتی ایجاد شده در طول آزمون خستگی حرارتی را کاهش دهد. نتایج حاصل از تحلیل المان محدود حاکی از آن است که سرعت انتشار ترک در شرایط دمایی ۷۲۰ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با شرایط دمایی ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد (به رغم تفاوت نسبتاً کوچک دما) افزایش قابل توجهی دارد. یان و همکاران^۷ [۶] پدیده گسترش ترک ناشی از خستگی حرارتی و واکنش شیمیایی در قالب ریخته‌گری را شبیه‌سازی کردند. نتایج آنها حاکی از آن است که کاهش سختی باعث افزایش سرعت انتشار ترک می‌شود. علاوه بر این، نیتراشه کردن سطح می‌تواند مقاومت در برابر خستگی را بهبود و به طور همزمان عمق ذوب شدن سطح قالب را کاهش دهد.

هان و وو^۸ [۷] به کمک نرم‌افزار پروکست^۹ میدان دمای قالب ریخته‌گری تحت فشار آلومینیوم را استخراج کردند. علاوه بر این، آنها تأثیر دمای پیش‌گرم و لوله‌های خنک‌کاری با آب را بر روی میدان ترموالاستیک قالب بررسی نمودند. مدجدوب و همکاران^{۱۰} [۸] تأثیر شرایط محیطی و آزمایشگاهی بر خرابی تجمعی حاصل از خستگی حرارتی را بر روی فولاد AISI H11 مطالعه کردند. بر اساس نتایج آنها، مکانیزم تشکیل ترک‌های حرارتی میکروسکوپی از ترک‌خوردگی اکسید سطح نشأت می‌گیرد و عمق ترک‌خوردگی عمدتاً به ضخامت اکسید محدود می‌شود. همچنین شکل‌گیری ترک‌های حرارتی میکروسکوپی و ماکروسکوپی ناشی از تنش- کرنش مکانیکی چندمحوره است که به علت تنش‌های حرارتی گذرا در فاز انجماد ایجاد می‌شود. کلوبکار و توچک^{۱۱} [۹] به بررسی تنش‌های حرارتی در قالب ریخته‌گری تحت فشار آلیاژ آلومینیوم پرداخته‌اند. بر اساس نتایج حاصل از مطالعه آنها، طول عمر قالب می‌تواند با کاهش گرادیان دمایی در زمان ریخته‌گری افزایش یابد. همچنین آنها برای کاهش گرادیان دمایی روش‌های مختلفی را ارایه کرده‌اند که عبارتند از: طراحی هندسه گوشه‌های تیز و شکاف‌ها، کاهش تنش

این مسأله منجر به ترد شدن ماده خواهد شد. در این صورت ماده قابلیت تحمل شوک حرارتی را ندارد. تکرار تنش‌های حرارتی می‌تواند منجر به تولید کرنش‌های پلاستیک چرخه‌ای قابل ملاحظه‌ای در جسم شوند که به تدریج باعث از بین رفتن یک بخش یا کل ساختار می‌گردد. پدیده اخیر خستگی حرارتی نامیده می‌شود [۱].

سلامی و ملتجی حق^۱ [۱] به بررسی خستگی حرارتی قالب‌های دایکست و روش‌های پیشگیری از آن پرداخته‌اند. بر اساس مطالعات آنها، روش‌های مؤثر برای جلوگیری از خستگی حرارتی عبارتند از پیش‌گرم کردن قالب، استفاده از مواد مناسب در ساخت قالب‌های دایکست و بهینه‌سازی خطوط خنک‌کاری. گرباخ و همکاران^۲ [۲] به بررسی خستگی حرارتی قالب فولادی برای ریخته‌گری آلومینیوم پرداختند. یافته‌های آنها نشان می‌دهد که مقدار تنش حرارتی به خواص ترمومکانیکی مواد، نرخ گرمایش و خنک‌کاری قالب و محدوده تغییرات دمایی چرخه تزریق بستگی دارد. در مطالعه آنها، تغییر شکل قالب به صورت تجربی تعیین شده است و اثر ترکیبی بارهای مکانیکی و تنش حرارتی شبیه‌سازی شده است. بر پایه نتایج آنها فولاد N21M2T2B یک ماده مناسب برای ساخت قالب‌های ریخته‌گری آلیاژهای آلومینیوم است. گارزا^۳ [۳] به مدل‌سازی تغییر شکل قالب دایکست حین عملیات ریخته‌گری پرداخته است. وی همچنین یک مدل المان محدود را برای پیش‌بینی اثرات نامطلوب بارها توسعه داده است. سریواستاوا و همکاران^۴ [۴] با مدل‌سازی مسأله خستگی حرارتی قالب‌های ریخته‌گری نشان دادند که جهت تشکیل ترک به مواضع تمرکز کرنش در قالب وابسته است. نتایج حاصل از مطالعه آنها نشان می‌دهد که گوشه‌ها بیشتر در معرض رشد ترک قرار دارند. ترک‌های گوشه‌ای می‌تواند در دو جهت عمود بر لبه (به علت کرنش مداوم) و در امتداد لبه گسترش یابد. اغلب آزمایشات حاکی از آن است که ترک‌های عمود بر لبه بیشتر اتفاق می‌افتد. از طرفی خواص ترمومکانیکی ماده قالب با اعمال حرارت و گذشت زمان تغییر می‌کند که این مسأله ممکن است باعث کاهش مقاومت حرارتی شود.

یان و همکاران^۵ [۵] رفتار خستگی حرارتی فولاد AISI H13 را حین فرآیند ریخته‌گری آلومینیوم بررسی نمودند. تأثیر عملیات

6 Physical vapor deposition
7 Youn et al.
8 Han and Wu
9 ProCast
10 Medjedoub
11 Klobčar et al

1 Salami and Moltgahigh
2 Gorbach et al.
3 Garza
4 Srivastava et al.
5 Youn et al.

مشخصات بین پوشش و زیر لایه می‌باشد. بر اساس نتایج آن‌ها، پوشش آلیاژی پایه نیکل دارای بالاترین مقاومت در برابر سایش و کمترین ضریب اصطکاک در مقایسه با پوشش‌های سرامیکی پایه زیرکونیا می‌باشد. گوسون و همکاران^۶ [۱۵] به بررسی تأثیر هندسه قالب بر خستگی حرارتی فولاد H-13 طی فرآیند ریخته‌گری تحت فشار آلیاژ آلومینیوم پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که نرم‌شدن فولاد مهم‌ترین شاخص شروع ترک است. همچنین افزایش درجه حرارت می‌تواند منجر به نرم‌شدن ماده شود لذا طراحی خطوط خنک‌کاری در نزدیکی دیواره‌ها می‌تواند باعث کاهش ترک‌خوردگی شود. لو و همکاران^۷ [۱۶] به ارائه یک مدل برای پیش‌بینی عمر خستگی قالب فولادی H-13 طی فرآیند ریخته‌گری تحت فشار پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها حاکی از اینست که کاهش اختلاف درجه حرارت می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای عمر خستگی قالب را افزایش دهد.

با توجه به مطالب اخیر، در این پژوهش توزیع تنش حاصل از بارگذاری حرارتی در یک قالب صنعتی ریخته‌گری تحت فشار بررسی می‌شود. هدف اصلی این تحقیق شناسایی مواضع تمرکز تنش و نقاط مستعد وقوع خرابی است. علاوه بر این، تأثیر انجام عملیات پیش‌گرم قبل از تزریق به منظور استخراج محدوده دمایی مطلوب پیش‌گرم برای کاهش سطح تنش‌ها. تغییر هندسی نقاط بحرانی قالب و قابلیت اثرگذاری پوشش دهی سطح قالب بر میدان تنش حرارتی- مکانیکی مد نظر قرار می‌گیرد.

۲- تعریف مساله

مطالعات گذشته و بررسی قالب نمونه صنعتی نشان می‌دهد که قالب‌های ریخته‌گری تحت فشار غالباً دچار ترک‌های سطحی می‌شوند که ادامه این روند سبب گسترش ترک‌ها و شکست کلی قالب خواهد شد. در این تحقیق رفتار ترموالاستیک یک قالب ریخته‌گری تحت فشار با در نظر گرفتن خصوصیات هندسی، مکانیکی و شرایط مرزی متناظر با یک نمونه صنعتی شبیه‌سازی می‌شود. بدین منظور بعد از مدل‌سازی هندسی قالب، تجزیه و تحلیل آن در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس^۸ انجام می‌گردد.

در نمونه صنعتی، مذاب آلومینیوم از انتهای قالب در مدت زمان

پسماند در هنگام ساخت قالب، خنک‌کاری یکنواخت نواحی مختلف قالب، پیش‌گرم قالب تا دمایی مناسب، کاهش دمایی فلز مذاب و زمان چرخه تزریق شود. فازارینک و همکاران^۱ [۱۰] رفتار خستگی حرارتی مواد هدفمند را به منظور بهبود عملکرد قالب‌های ریخته‌گری تحت فشار مطالعه کردند. در تحقیق آن‌ها لایه‌های سطحی متفاوت بر پایه مواد هدفمند با تکنیک پوشش‌دهی لیزری در معرض خستگی حرارتی قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمون خستگی حرارتی نشان داد که غلظت عناصر آلیاژی به کاررفته در لایه سطحی بر مقاومت خستگی حرارتی مؤثر است. به نحوی که مقاومت خستگی حرارتی در نمونه‌های با مقدار سیلیکون کمتر تقریباً ۲۷ برابر مقدار مشابه برای ماده پایه است. همچنین با افزایش چرخه‌های حرارتی و در پی آن افزایش اندازه کاربیدها، مقاومت خستگی حرارتی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مقاومت خستگی حرارتی به سختی لایه سطحی قالب وابسته است که این مسأله به نسبت حجمی کاربید و عملیات حرارتی مرتبط می‌باشد.

پاولوسکی و همکاران^۲ [۱۱] به بررسی دلایل خرابی زود هنگام در قالب ریخته‌گری تحت فشار آلومینیوم پرداخته‌اند. بر اساس مطالعه آن‌ها، دلیل اصلی شکست قالب عیوب موجود در ریزساختار ماده و عملیات حرارتی انجام‌شده روی قالب می‌باشند. پان و همکاران^۳ [۱۲] یک مدل سه‌بعدی المان محدود برای تحلیل قالب ریخته‌گری آلیاژ آلومینیوم ارائه کردند. منحنی تغییرات درجه حرارت از سطح حفره قالب تا هسته آن نشان می‌دهد که به علت تغییرات شدید دمایی در سطح قالب، عمق خستگی حرارتی محدود به ۰/۹ میلی‌متر از روی سطح قالب است. چا^۴ [۱۳] به بررسی تجربی تأثیر پوشش‌دهی قالب ریخته‌گری به وسیله چند پوشش مختلف پرداخته است. بر اساس نتایج بدست‌آمده پوشش TiAl/Cr/SiC/N از نظر طراحی نانو لایه، عناصر تشکیل‌دهنده و اثرات ناشی از شرایط حرارتی، جایگزین مناسبی برای مواد گران قیمت می‌باشد. همچنین پوشش مذکور دارای مقاومت بسیار خوبی در برابر چسبندگی آلومینیوم و حفظ خواص سطحی در درجه حرارت بالا می‌باشد. پیتر و همکاران^۵ [۱۴] به بررسی پوشش‌های محافظ برای قالب‌های ریخته‌گری تحت فشار آلومینیوم پرداخته‌اند. بررسی آن‌ها متمرکز به سایش و توصیف

1 Fazarinc et al.

2 Pawłowski et al

3 Pan et al.

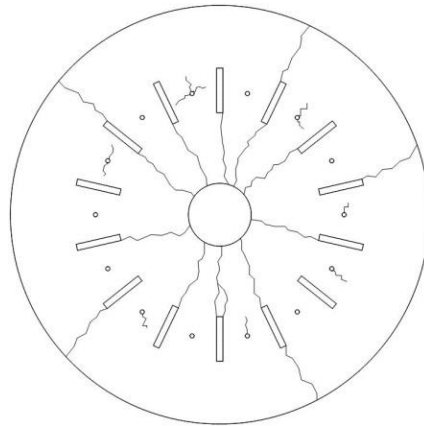
4 Cha

5 Peter et al

6 Ghusoon et al

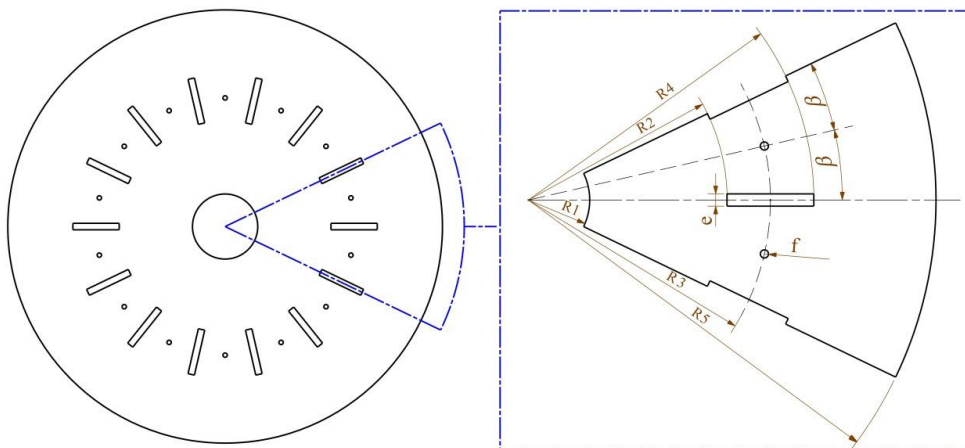
7 Lu et al

8 Abaqus



شکل ۱. شماتیک ترک‌های سطحی مشاهده‌شده در سطح یک قالب ریخته‌گری صنعتی

Fig. 1. The schematic of the surface cracks in a typical die cast die



شکل ۲. تقارن چرخه‌ای موجود در هندسه قالب

Fig. 2. The cyclic symmetry of the die geometry

یک هفتم از هندسه قالب برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار کفایت می‌کند بنابراین کاهش چشمگیری در هزینه‌های محاسباتی فراهم می‌آید. از آنجا که برای قالب مورد بررسی، نسبت ضخامت به شعاع حفره تزریق و نسبت ضخامت به عرض شیار تزریق به ترتیب برابر ۲۵ و ۸/۳ می‌باشد بنابراین می‌توان مساله مورد بررسی را تحت شرایط کرنش صفحه‌ای فرض کرد. همچنین با توجه به شرایط کاری قالب، عموماً از فولاد گرم‌کار برای ساخت آن استفاده می‌شود که از جمله مزایای آن می‌توان به استحکام مناسب در دمای بالا، مقاومت در برابر شوک حرارتی، چقرمگی شکست و مقاومت سایشی مناسب در دمای بالا اشاره نمود. قالب صنعتی مورد بحث از فولاد گرم‌کار H11 ساخته

کمتر از ۰/۰۵ ثانیه به داخل قالب تزریق می‌شود. از آنجا که دمای مذاب آلومینیوم حدود 650°C است بنابراین شوک حرارتی قابل توجهی به سطح داخلی قالب اعمال می‌گردد. گرادیان دمایی بالا و تکرار چرخه‌های پیاپی تزریق منجر به تشکیل و گسترش ترک‌های ریز در سطح داخلی قالب می‌شود. شکل ۱ به طور شماتیک، ترک‌های سطحی به‌وجودآمده ناشی از شوک حرارتی را در سطح زیرین قالب مورد نظر نشان می‌دهد.

شکل ۲ تقارن چرخه‌ای^۱ موجود در هندسه قالب را نشان می‌دهد که ابعاد هندسی آن در جدول ۱ آمده است. بر این اساس، مدل‌سازی

1 Cyclic Symmetry

جدول ۱. ابعاد هندسی قالب (بر حسب میلی‌متر)

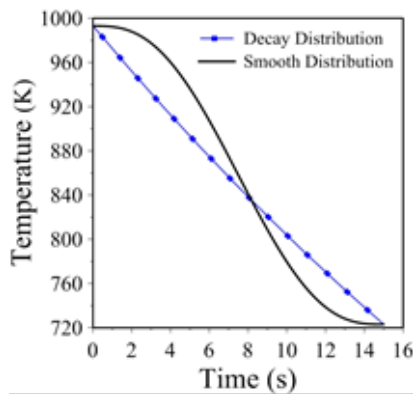
Table 1. The geometric dimensions of the die (in mm)

$R1$	$R2$	$R3$	$R4$	$R5$	e	f	β	پارامتر
۳۰	۹۷/۳۳	۱۱۸/۶	۱۳۹/۸۸	۱۹۹/۷۵	۶	۲	۱۲/۸۶°	مقدار

جدول ۲. خواص ترمومکانیکی فولاد H11 [۱۷]

Table 2. The thermo-mechanical properties of H17[11]

واحد	مقدار (۳۰۰ K)	خاصیت
g/cm^3	۷/۸۰	چگالی
GPa	۲۱۶	مدول الاستیک
MPa	۱۵۷۰	تنش تسلیم ۰/۲٪
$\times 10^{-6}/K$	۱۰/۴	ضریب انبساط حرارتی
W/m.K	۲۵	ضریب هدایت حرارتی
J/g.K	۰/۴۶	ظرفیت گرمای ویژه



شکل ۴. توزیع دما بر روی مرزهای درگیر با مذاب بر مبنای الگوهای نمایی و هموار

Fig. 4. Temperature distribution for the molten metal affected boundaries

الگوهای مذکور به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$T = Ae^{-(t/t_d)}, \quad \text{for } t \geq 0 \quad (1)$$

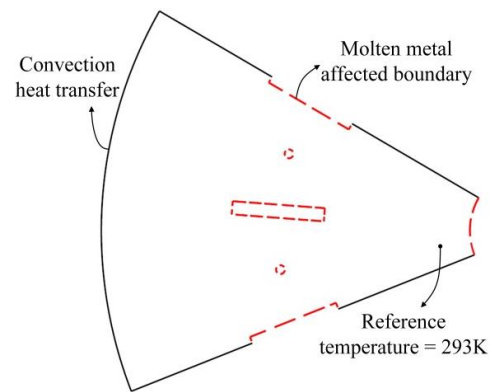
$$A = 993K, \quad t_d = 47.2s$$

$$T = B_0 + (B_1 - B_0)\xi^3(10 - 15\xi + 6\xi^2) \quad \text{for } 0 \leq t \leq t_e \quad (2)$$

$$\xi = t/t_e, \quad B_0 = 993K, \quad B_1 = 723K, \quad t_e = 15s$$

ثوابت معادلات اخیر به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که دمای مرزهای

درگیر با فلز مذاب طی ۱۵ ثانیه از مقدار ۹۹۳ کلین به ۷۲۳ کلین



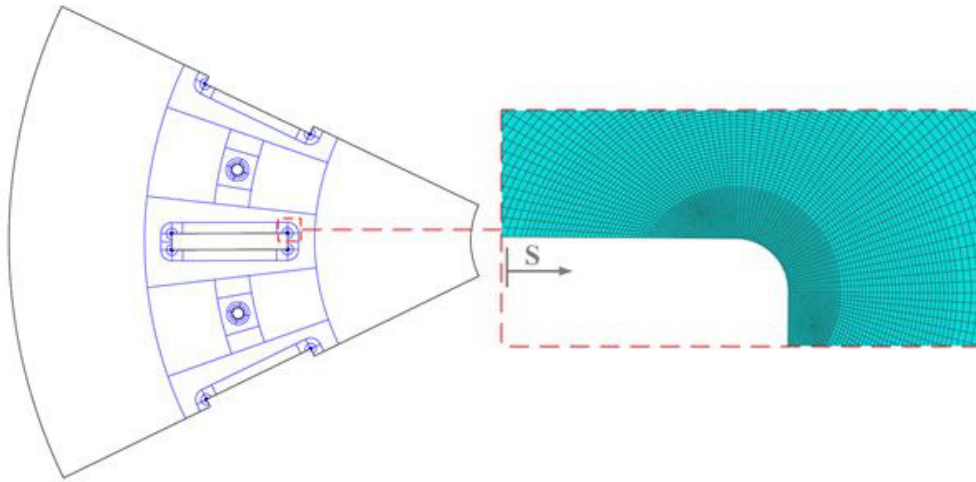
شکل ۳. شرایط مرزی حرارتی متناظر با فرآیند تزریق

Fig. 3. The thermal boundary conditions corresponding to the die casting process

شده که خواص ترمومکانیکی آن در جدول ۲ آمده است [۱۷].

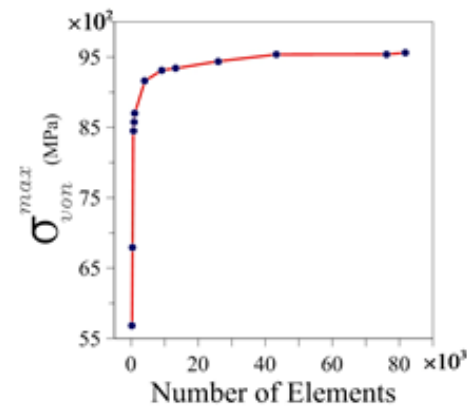
فلز مذاب پس از تزریق، در مجاورت سطوح داخلی قالب در فاز انجماد قرار می‌گیرد و با گذشت زمان به دلیل انتقال حرارت بین سطوح داخلی قالب و مذاب، شکل نهایی قطعه حاصل می‌شود. شکل ۳ نواحی تحت تأثیر فلز مذاب را برای قالب مورد نظر نشان می‌دهد. برای اعمال بارگذاری حرارتی می‌توان از الگوهای متداول کاهش دما نسبت به زمان در نرم‌افزار استفاده نمود. بدین منظور دو الگوی نمایی^۱ و هموار^۲ برای تغییر درجه حرارت استفاده می‌شود. توابع متناظر با

1 Decay
2 Smooth



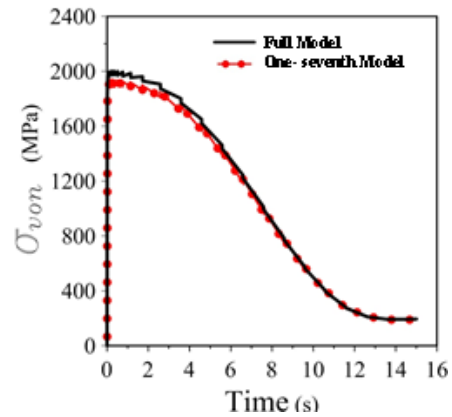
شکل ۵. نحوه پارتیشن‌بندی مدل اجزای محدود و توزیع المان‌ها در گوشه شیار تزریق

Fig. 5. The finite element model partitioning and the mesh scheme near a typical groove corner



شکل ۷. تغییرات مقدار ماکزیمم تنش ون میسسز بر حسب تعداد المان‌های به کاررفته

Fig. 7. Variation of the maximum von Mises stress versus the number of elements



شکل ۶. تغییرات توزیع تنش ون میسسز برای مدل کامل و یک هفتم قالب

Fig. 6. The variation of von Mises stress for the full and the one-seventh models

شیارها و حفره‌های تزریق ایجاد می‌شود. شکل ۵ توزیع المان‌ها را اطراف گوشه یک شیار تزریق نشان می‌دهد. برای تحلیل‌های حرارتی و سازه‌ای به ترتیب از المان‌های نوع DC2D4 و CPE4R استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که مسائل ترموالاستیک را می‌توان به دو صورت کوپل کامل^۲ یا ترتیبی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی نمود. از طرفی حل مسأله در حالت کوپل کامل نیازمند نمونه‌های زمانی بسیار زیاد است که با توجه به پیچیدگی مسأله حاضر و تعداد قابل توجه المان‌های به کاررفته زمان حل به شدت افزایش می‌یابد. در مقابل حل مسأله حاضر به صورت ترتیبی چالش مذکور را رفع می‌نماید.

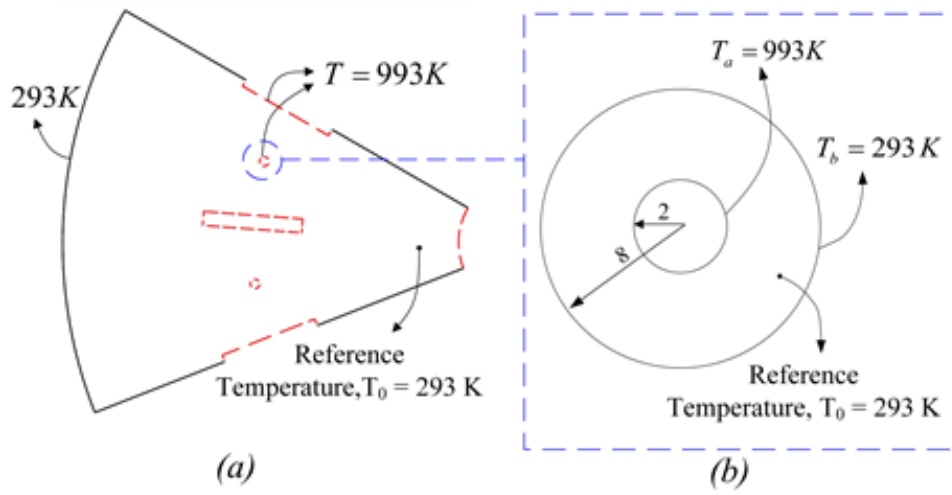
برسد. شکل ۴ تغییرات دما را بر روی مرزهای شیار با گذشت زمان نشان می‌دهد. همچنین در اینجا فرض می‌شود مرز بیرونی قالب در حال تبادل حرارت جابجایی با هوای محیط اطراف می‌باشد

$$(T_{air} = 293K, h_{air} = 5W/m^2.K)$$

تحلیل‌های اولیه بدست‌آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود حاکی از آن است که گرادینان تنش در گوشه شیارها و حفره‌های تزریق بسیار بزرگتر از سایر مناطق جسم است بنابراین با استفاده از ابزارهای موجود در نرم‌افزار می‌توان تعداد المان‌های بیشتری را به مواضع تمرکز تنش هدایت کرد. بدین منظور همانند شکل ۵ چندین پارتیشن^۱ در اطراف

2 Fully coupled

1 Partition



شکل ۸. معادل‌سازی حفره دایروی قالب (a) با یک استوانه همگن ایزوتروپ (b)
 Fig. 8. The circular cavity of die (a) simplified by a hollow cylinder (b)

۳-۲- اعتبارسنجی جواب در حالت متقارن محوری

از آنجا که اندازه حفره دایروی تزریق بسیار کوچکتر از سایر ابعاد هندسی قالب است بنابراین در لحظات اولیه اعمال بارگذاری حرارتی (مقادیر کوچک زمان) می‌توان میدان ترموالاستیک اطراف حفره را با جواب مسأله ترموالاستیک یک استوانه همگن ایزوتروپ معادل فرض کرد. بر این اساس، توزیع تنش‌های حرارتی بوجودآمده برای یک استوانه همگن ایزوتروپ تحت اثر بارگذاری حرارتی همانند شکل ۸ مدنظر است.

میدان دما برای یک استوانه که در دمای مرجع T_0 قرار دارد و در لحظه $t = 0$ یکباره مرز داخلی و بیرونی آن به ترتیب تحت اثر دمای T_a و T_b قرار می‌گیرند به صورت زیر قابل بیان است [۱۸]:

$$T(r,t) = T_0 \pi \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\kappa \alpha_n^2 t} \frac{J_0^2(\alpha_n a) U_0(\alpha_n r)}{J_0(\alpha_n a) + J_0(\alpha_n b)} - \pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\{T_b J_0(\alpha_n a) - T_a J_0(\alpha_n b)\} J_0(\alpha_n a) U_0(\alpha_n r)}{J_0^2(\alpha_n a) - J_0^2(\alpha_n b)} e^{-\kappa \alpha_n^2 t} + \frac{T_a \ln(b/r) + T_b \ln(r/a)}{\ln(b/a)} \quad (3)$$

در اینجا κ پخش گرمایی، t زمان، r فاصله شعاعی، a شعاع داخلی، b شعاع خارجی و توابع $J_0(ar)$ ، $Y_0(ar)$ به ترتیب معرف تابع بسل نوع اول و دوم از مرتبه صفرم هستند. همچنین α_n ها ریشه‌های معادله شاخصی ذیل می‌باشند:

$$U_0(ar) = J_0(ar)Y_0(ab) - J_0(ab)Y_0(ar) \quad (4)$$

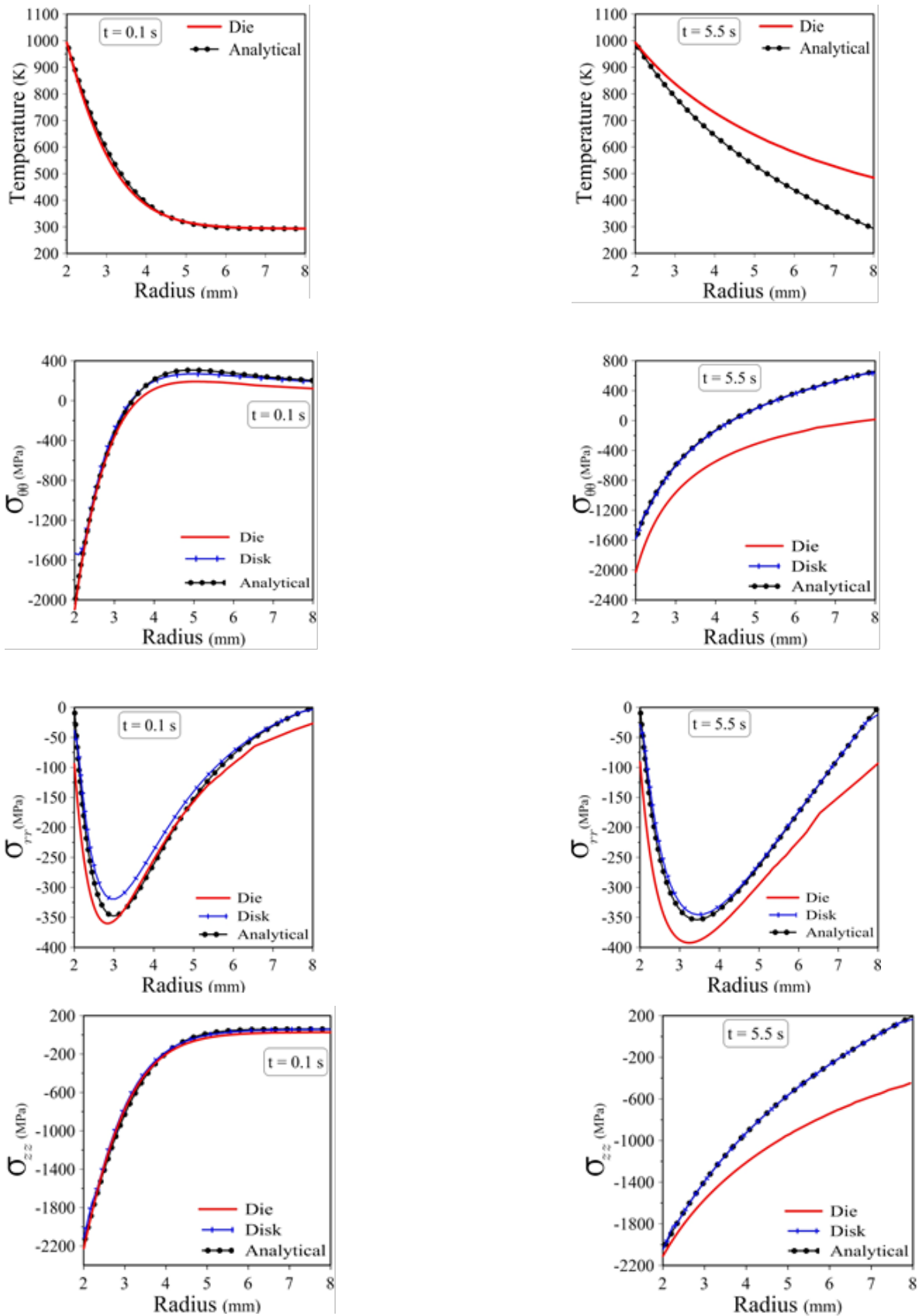
بدین منظور، ابتدا میدان دما استخراج و سپس نتایج حاصل از آن به عنوان ورودی برای تحلیل سازه‌ای تعریف می‌شود. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده، نتایج حاصل از شبیه‌سازی ترتیبی تفاوت قابل ملاحظه‌ای با حل مسأله به صورت کوپل کامل ندارد به همین دلیل در این پژوهش از حل ترتیبی استفاده شده است. در نهایت باید اشاره نمود که مساله به صورت صفحه‌ای مدل‌سازی می‌شود بنابراین تحت اثر هیچگونه نیروهای مکانیکی یا قیود جابجایی نمی‌باشد. شکل ۶ توزیع تنش ون میسر را در گوشه شیار متناظر با مدل کامل و یک هفتم قالب بر حسب زمان ارایه می‌کند. همانطور که ملاحظه می‌شود مدل یک هفتم می‌تواند با دقت مناسبی نتایج مدل کامل قالب را استخراج نماید.

۳- اعتبارسنجی نتایج

۳-۱- تحلیل حساسیت جواب به تعداد المان‌ها

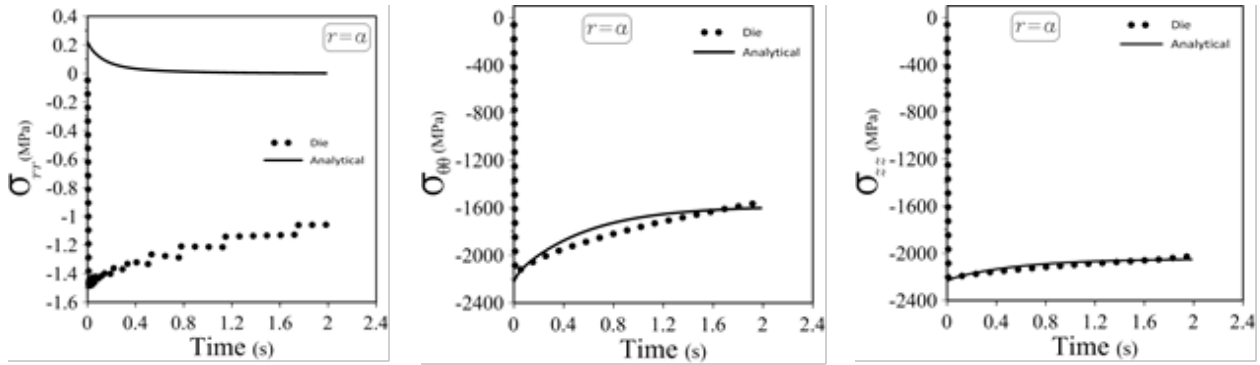
یکی از پارامترهای مؤثر در همگرایی نتایج، افزایش تعداد المان‌ها و ایجاد شبکه‌بندی متناسب با هندسه مسأله است. اگرچه افزایش تعداد المان‌ها می‌تواند دقت جواب را افزایش دهد ولیکن در مقابل هزینه‌های محاسباتی نیز بالا می‌رود. در مسأله اخیر، تغییرات مقدار ماکزیمم تنش ون میسر^۱ در قالب بر حسب تعداد المان‌های به‌کاررفته به عنوان معیار همگرایی جواب استفاده می‌شود. همانطور که در شکل ۷ ملاحظه می‌گردد به ازای تعداد المان‌های بیشتر از ۴۵۰۰۰ همگرایی قابل قبولی حاصل می‌آید.

1 von Mises



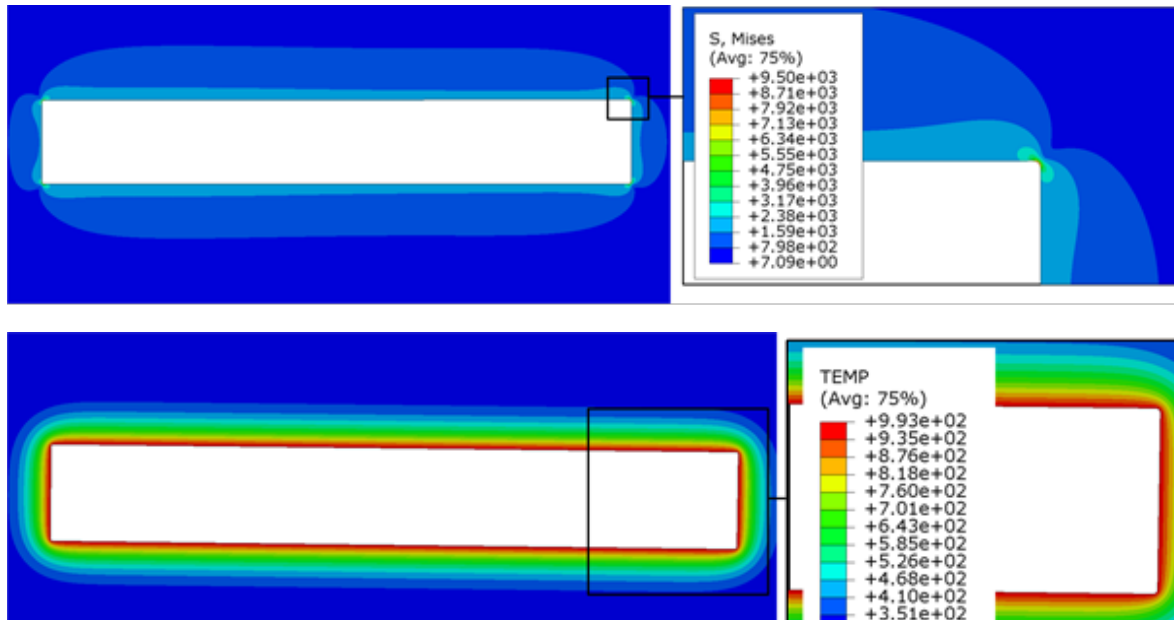
شکل ۹. توزیع دما و مؤلفه‌های تنش در راستای شعاعی برای حفره دایروی قالب و استوانه معادل

Fig. 9. Distribution of temperature and stress components along a radial path for the die cavity and the hollow cylinder



شکل ۱۰. تغییرات مؤلفه‌های تنش با گذشت زمان بر روی مرز داخلی حفره دایروی قالب و استوانه معادل

Fig. 10. Transient stresses distribution over the inner boundary for the die cavity and the hollow cylinder



شکل ۱۱. کانتور تنش ون میسز و توزیع دما در اطراف گوشه شیار تزریق متناظر با $t = \Delta/5$ s

Fig. 11. von Mises stress and temperature distribution contours around the groove corner at

که در اینجا E مدول الاستیسیته، ν نسبت پواسون و $\theta = T(r, t) - T_0$ است. با جایگذاری رابطه (۳) در روابط (۵) مؤلفه‌های تنش به صورت ذیل استخراج می‌شوند:

$$\sigma_{rr} = \frac{E\alpha}{1-\nu} \left[\frac{1}{b^2-a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) A_1 - \frac{1}{r^2} A_2 \right]$$

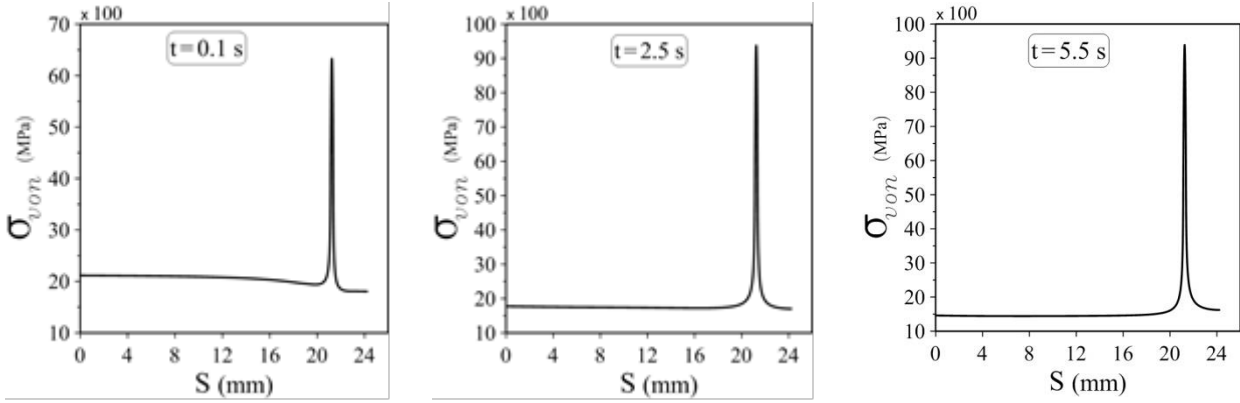
$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{E\alpha}{1-\nu} \left[\frac{1}{b^2-a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) A_1 + \frac{1}{r^2} A_2 - \theta \right] \quad (6)$$

میدان تنش در یک مسأله متقارن محوری برای حالت کرنش صفحه‌ای با توجه به روابط ذیل قابل حصول است [۱۹]:

$$\sigma_{rr} = \frac{E\alpha}{1-\nu} \left[\frac{1}{b^2-a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \int_a^b \theta r dr - \frac{1}{r^2} \int_a^r \theta r dr \right]$$

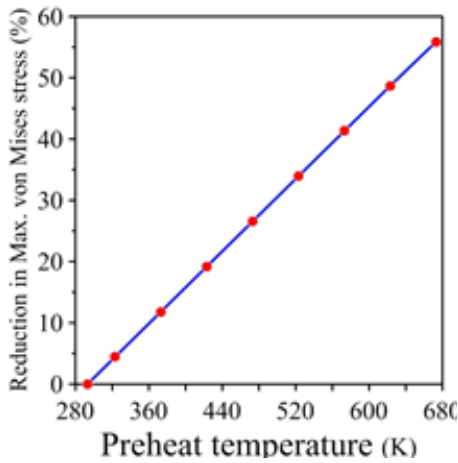
$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{E\alpha}{1-\nu} \left[\frac{1}{b^2-a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \int_a^b \theta r dr + \frac{1}{r^2} \int_a^r \theta r dr - \theta \right] \quad (5)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{E\alpha}{1-\nu} \left[\frac{2\nu}{b^2-a^2} \int_a^b \theta r dr - \theta \right]$$



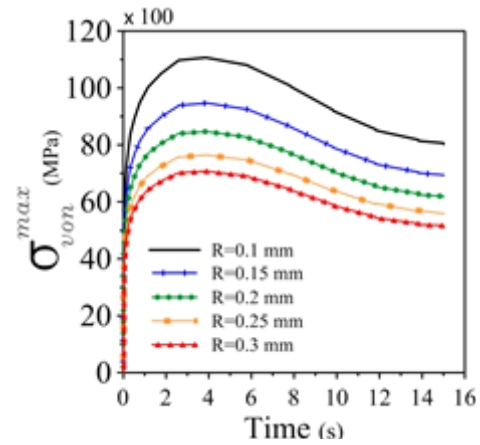
شکل ۱۲. تغییرات تنش ون میسز بر روی لبه یک شیار تزریق

Fig. 12. The von Mises stress distribution along the edge of an injection groove



شکل ۱۴. تاثیر دمای پیش گرم بر میزان کاهش ماکزیمم تنش ون میسز

Fig. 14. The impact of die preheat temperature on the maximum von Mises stress reduction



شکل ۱۳. تأثیر اندازه شعاع انحناي گوشه شیار بر مقدار ماکزیمم تنش ون میسز

Fig. 13. The effect of groove corner radius of curvature on the maximum von Mises stress

$$\left[(\alpha_n r) \left(J_1(\alpha_n r) Y_0(\alpha_n b) - J_0(\alpha_n b) Y_1(\alpha_n r) \right) - \left(\frac{2 J_0(\alpha_n b)}{\pi J_0(\alpha_n a)} \right) \right]$$

شکل ۹ توزیع دما و مؤلفه‌های تنش را در راستای شعاعی برای حفره و استوانه معادل از مرز داخلی تا مرز خارجی را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود در لحظات اولیه اعمال بارگذاری حرارتی ($t \leq 0.1$ s)، رفتار بدست‌آمده از شبیه‌سازی قالب همخوانی خوبی با جواب تحلیلی متناظر با استوانه دارد. علاوه بر این، شکل ۱۰ توزیع مؤلفه‌های تنش با گذشت زمان را در مرز داخلی حفره قالب و استوانه نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، به ازای $t < 2$ s جواب‌های

$$\sigma_{zz} = \frac{E\alpha}{1-\nu} \left[\frac{2\nu}{b^2 - a^2} A_1 - \theta \right]$$

که در اینجا:

$$A_1 = \pi \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2}{\pi \alpha_n^2} \frac{e^{-\kappa \alpha_n^2 t} J_0(\alpha_n a)}{J_0(\alpha_n a) + J_0(\alpha_n b)} \left(T_0 - \frac{T_b J_0(\alpha_n a) - T_a J_0(\alpha_n b)}{J_0(\alpha_n a) - J_0(\alpha_n b)} \right) \left(1 - \frac{J_0(\alpha_n b)}{J_0(\alpha_n a)} \right) \right] \quad (7)$$

$$A_2 = \pi \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2}{\alpha_n^2} \frac{e^{-\kappa \alpha_n^2 t} J_0(\alpha_n a)}{J_0(\alpha_n a) + J_0(\alpha_n b)} \left(T_0 - \frac{T_b J_0(\alpha_n a) - T_a J_0(\alpha_n b)}{J_0(\alpha_n a) - J_0(\alpha_n b)} \right) \right]$$

جدول ۳. خواص ترمومکانیکی پوشش‌های متداول [۲۲، ۲۱]

Table 3. Thermo-mechanical properties of typical industrial coatings [22, 21]

واحد	نیتريد آلومينيوم تيتانيوم (۳۰۰ K)	نیتريد سيليسيم (۳۰۰ K)	کروم سخت (۳۰۰ K)	خاصیت
g/cm ³	۴/۷	۳/۲۹	۹	چگالی
GPa	۳۸۰	۳۱۰	۱۰۳/۴	مدول الاستیک
	۰/۲۳	۰/۲۷	۰/۳	نسبت پواسون
×10 ⁻⁶ /K	۷/۵	۳/۳	۶/۶	ضریب انبساط حرارتی
W/m.K	۴/۶۳	۳۰	۶۹	ضریب هدایت حرارتی
J/g.K	۷/۸	۰/۷۴	۰/۴۳	ظرفیت گرمای ویژه

جدول ۴. خواص ترمومکانیکی پوشش تابعی مدرج [۲۳]

Table 4. Thermo-mechanical properties of the functionally graded coating [23]

واحد	نیکل، کروم، آلومینیوم، ایتريوم	ایتريوم-زیر کونیوم	خاصیت
GPa	۱۳۷/۹	۲۶/۷	مدول الاستیک
	۰/۲۷	۰/۲۵	نسبت پواسون
×10 ⁻⁶ /K	۱۵/۱۶	۱۳/۹۱	ضریب انبساط حرارتی
W/m.K	۲۵	۱	ضریب هدایت حرارتی

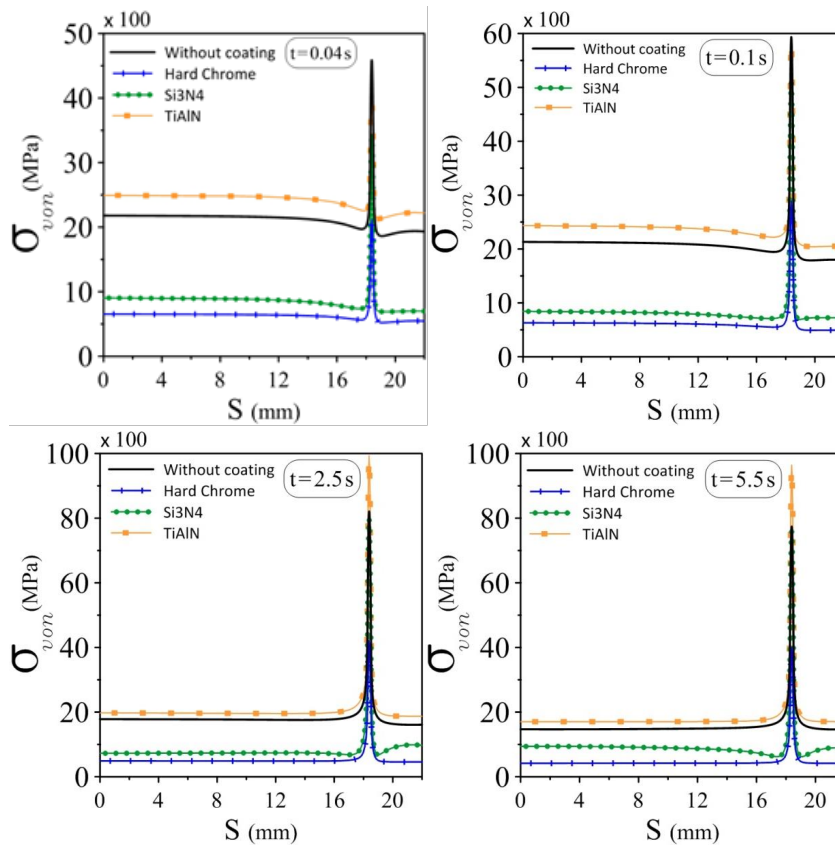
وجود ناپیوستگی در هندسه قطعات همانند حفره‌ها و شیارها موجب افزایش قابل توجه سطح تنش در اطراف ناپیوستگی می‌شود که این مساله تمرکز تنش و خرابی را به دنبال خواهد داشت. در اینجا شعاع انحنای گوشه شیار قالب می‌تواند یک عامل موثر بر میزان تمرکز تنش این ناحیه باشد. غالباً شیارهای موجود در قالب ریخته‌گری توسط روش وایرکات ایجاد می‌شود که بسته به اندازه سیم برش شعاع انحنای گوشه‌ها در محدوده ۰/۵-۰/۱ میلی‌متر قرار می‌گیرد. تأثیر اندازه شعاع انحنای گوشه شیار بر مقدار ماکزیمم تنش ون‌میسز در شکل ۱۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست‌آمده، استفاده از سیم برش ۰/۲ میلی‌متر می‌تواند به مقدار ۲۵٪ ماکزیمم تنش ون‌میسز را نسبت به سیم ۰/۱ میلی‌متر کاهش دهد.

تنش‌های حرارتی در اثر اختلاف درجه حرارت و یا تفاوت در ضریب انبساط حرارتی ایجاد می‌شوند. کاهش گرادیان دمایی موجب کاهش تنش حرارتی و در نهایت کاهش کرنش‌های ناشی از آن خواهد

بدست‌آمده از روش اجزای محدود برای قالب با جواب تحلیلی استوانه معادل تطابق مناسبی دارند. همچنین با گذشت زمان جواب دو مساله از هم فاصله می‌گیرند.

۳- نتایج

در این بخش تأثیر پارامترهای مؤثر بر میدان تنش مساله همانند شعاع انحنای گوشه‌های شیار، دمای پیش‌گرم قالب، جنس و ضخامت پوشش سطحی بررسی می‌شود. تحلیل اجزای محدود مساله مورد نظر حاکی از آن است که سطح تنش بر روی لبه شیارهای تزریق بسیار بزرگتر از سایر مناطق جسم است. شکل ۱۱ کانتور تنش ون‌میسز و توزیع دما را در اطراف یک شیار تزریق قالب نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۲ توزیع تنش ون‌میسز را بر روی لبه شیار با گذشت زمان نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود گوشه‌های شیار همان نقاط بحرانی مساله هستند.



شکل ۱۵. تغییرات تنش ون میسز بر روی لبه شیار برای انواع پوشش‌های محافظ حرارتی

Fig. 15. Distribution of the von Mises stress along the groove edge for the different coating types

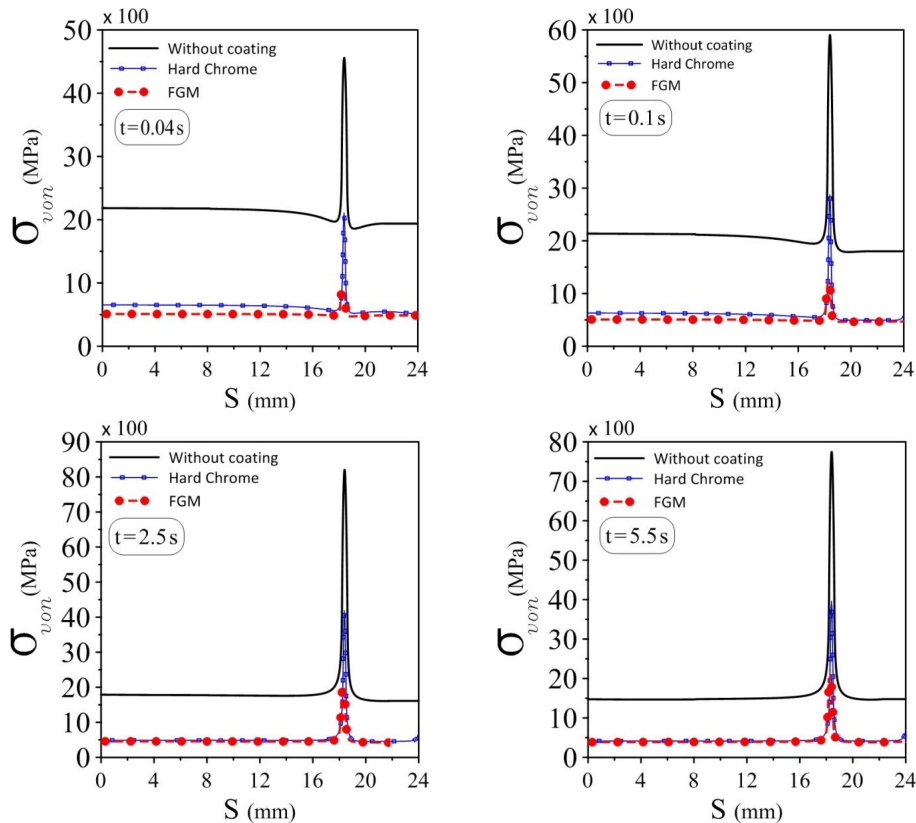
همانند خستگی، خوردگی و سایش به طور گسترده‌ای از پوشش‌ها و لایه‌های با ضخامت کم استفاده می‌شود. با توجه به میزان حساسیت و هزینه ساخت قطعه مورد نظر می‌توان از پوشش‌های فلزی متداول برای کاهش خرابی و افزایش عمر مفید آن استفاده کرد [۲۰]. در این پژوهش، تاثیر پوشش‌دهی با در نظر گرفتن یک لایه کوچک به ضخامت ۰/۱ میلی‌متر به عنوان پوشش در اطراف شیار و حفره تزریق قالب و تخصیص مشخصات ترمومکانیکی متناظر با آن بررسی شده است. بدین منظور پوشش‌های کروم سخت^۱، نیتريد تیتانیوم آلومینیوم^۲، نیتريد سیلیسیم^۳ و تابعی مدرج^۴ مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

اگرچه پوشش‌دهی کروم سخت یکی از متداول‌ترین انواع پوشش مقاوم در برابر حرارت است ولیکن از جمله نقاط ضعف این نوع پوشش می‌توان به تردی و شکنندگی، استحکام خستگی پایین و ترک‌های ریز سطحی طی فرآیند پوشش‌دهی اشاره کرد. از دیگر پوشش‌های مقاوم

شد. اختلاف دمای بین قالب و فلز مذاب می‌تواند شوک حرارتی قابل توجهی را به قالب وارد آورد بنابراین با پیش‌گرم کردن قالب می‌توان این اختلاف دما را تا حد زیادی کاهش داد. شکل ۱۴ میزان کاهش ماکزیم تنش ون میسز را به ازای مقادیر مختلف دمای پیش‌گرم قالب نسبت به حالت بدون پیش‌گرم نشان می‌دهد. در اینجا هشت دمای مختلف برای پیش‌گرم قالب تعریف و نتایج حاصل با وضعیت بدون پیش‌گرم مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تغییرات تنش فون میسز بر حسب دمای پیش‌گرم از یک رفتار خطی پیروی می‌کند. با توجه به نتایج شکل ۱۴، پیش‌گرم کردن قالب تا دمای حدود ۲۰۰°C می‌تواند ماکزیم تنش ون میسز را به مقدار ۲۵٪ نسبت به حالت بدون پیش‌گرم کاهش دهد. اگرچه با افزایش دمای پیش‌گرم تا ۴۰۰°C، مقدار ماکزیم تنش ون میسز بیش از ۵۰٪ کاهش می‌یابد ولیکن در مقابل ممکن است به طور همزمان استحکام مکانیکی قالب کاهش یابد.

به منظور محافظت قطعات مکانیکی در برابر آسیب‌های سطحی

- 1 Hard Chrome
- 2 TiAlN
- 3 Si₃N₄
- 4 Functionally Graded Material (FGM)



شکل ۱۶. تغییرات تنش ون میسز بر روی لبه شیار برای پوشش تابعی مدرج

Fig. 16. Distribution of the von Mises stress along the groove edge for the FGM coating type

عنوان پوشش می‌تواند موجب دستیابی به خواص ایده‌آل مکانیکی و حرارتی شود. مواد تابعی مدرج به دلیل پیوستگی در خواص مکانیکی و حرارتی، پس از قرارگیری تحت بارگذاری ترمومکانیکی منجر به تولید یک میدان تنش پیوسته می‌شوند. در این مطالعه به مدل‌سازی یک پوشش تابعی مدرج پرداخته می‌شود که سطح پوشش از ۱۰۰٪ ایتریوم-زیرکونیوم^۱ و انتهای پوشش از ۱۰۰٪ نیکل، کروم، آلومینیوم و ایتریوم^۲ تشکیل شده است. خواص ترمومکانیکی اجزای تشکیل‌دهنده این پوشش در جدول ۴ آمده است. تغییرات خواص ترمومکانیکی این پوشش را می‌توان با رابطه زیر تقریب زد [۲۳]:

$$p(x) = p_0 e^{\beta x}, \quad 0 \leq x \leq h \quad (A)$$

در رابطه اخیر، $p(x)$ معرف یک خاصیت ترمومکانیکی پوشش همانند مدول الاستیک، نسبت پواسون، ضریب انبساط حرارتی،

به حرارت نیتريد سيليسيم است که به دلیل خواص ترمومکانیکی مناسب می‌تواند به عنوان پوشش در قالب ریخته‌گری تحت فشار استفاده شود. از جمله ویژگی‌های این پوشش می‌توان به ضریب رسانش گرمایی بالا، ضریب انبساط حرارتی پایین و مقاومت به شوک حرارتی بالا اشاره نمود. نیتريد آلومینیوم تیتانیوم از دیگر پوشش‌های مورد استفاده جهت افزایش مقاومت اکسیداسیون و افزایش سختی است. افزایش درصد تیتانیوم در این پوشش موجب افزایش ضریب انبساط حرارتی در دمای بالا می‌شود [۲۱، ۲۲]. خواص ترمومکانیکی پوشش‌های مذکور در جدول ۳ آمده است.

مواد تابعی مدرج نوعی کامپوزیت به شمار می‌آیند که به دلیل تغییرات تدریجی خواص در یک یا چند بعد، می‌تواند مقاومت به خوردگی، فرسایش و شکست در حرارت بالا را افزایش دهد. این مواد به طور کلی از ترکیب سرامیک و فلز و یا ترکیبی از فلزات مختلف ساخته می‌شود. سرامیک‌ها به دلیل رسانایی گرمایی پایین از مقاومت حرارتی بالایی برخوردار هستند که استفاده از آنها در کنار فلزات به

1 Zirconia-Yttria
2 NiCrAlY

پوشش‌های متداول می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ماکزیمم مقدار تنش فون میسز در گوشه شیار به ازای پوشش مواد تابعی مدرج ۷۰٪ کمتر از حالت بدون پوشش خواهد بود. بر این اساس، استفاده از پوشش تابعی مدرج می‌تواند به شکل چشمگیری عمر خستگی حرارتی قالب را افزایش دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، توزیع تنش‌های به‌وجودآمده در یک قالب تزریق آلومینیوم طی فرآیند ریخته‌گری تحت فشار مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از روش اجزای محدود شرایط مرزی متناظر با مسأله مذکور شبیه‌سازی شد. با فرض اینکه توزیع دما بر روی شیارهای تزریق به صورت یک تابع هموار تغییر می‌کند، توزیع تنش ون میسز استخراج گردید. به عنوان راهکارهای مؤثر بر کاهش سطح تنش نقاط بحرانی، رفتار سیستم به ازای مقادیر مختلف دمای پیش‌گرم، شعاع انحنای گوشه‌های شیار تزریق و اعمال پوشش محافظ حرارتی بررسی شد. نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهد که هر یک از راهکارهای مذکور نقش بسزایی در افزایش مقاومت قالب در برابر شوک‌های حرارتی ایفا می‌کنند. بر این اساس، پیش‌گرم نمودن قالب در محدوده دمایی ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند مقدار ماکزیمم تنش ون میسز را به نحو مناسبی کاهش دهد و در عین حال استحکام مکانیکی قالب حفظ شود. همچنین افزایش شعاع انحنای گوشه شیار تزریق تا ۰/۲ میلی‌متر و استفاده از پوشش کروم سخت منجر به کاهش چشمگیر سطح تنش ون میسز در نقاط بحرانی مساله خواهد شد. علاوه بر این، پوشش تابعی مدرج به دلیل دارا بودن خواص منحصر به فرد می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای مقدار تمرکز تنش در قالب را کاهش و در نتیجه عمر خستگی قالب را افزایش دهد.

مراجع

- [1] P. Salami, M. Moltaghihagh, Investigation of thermal fatigue of die casting and its prevention methods, 11th Iranian Conference on Manufacturing Engineering, ICME293_11 (2010) (in Persian).
- [2] V. Gorbach, V. Alekhin, G. Kurganova, Determining thermal fatigue of steels for die casting of aluminum alloys, Metal science and heat treatment, 985-982 (1977) (11)19.

ضریب هدایت حرارتی، چگالی یا گرمای ویژه می‌باشد. همچنین ثابت p_0 مقدار خاصیت در سطح پوشش، متغیر x مقدار فاصله از سطح پوشش و h مقدار ضخامت پوشش را نشان می‌دهد. در نهایت، پارامتر ناهمگنی پوشش به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = \frac{1}{h} \ln \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \quad (9)$$

لازم به ذکر است که E_1 و E_2 به ترتیب مدول الاستیسیته پوشش در سطح و انتهای آن می‌باشند. در اینجا برای مدل‌سازی پوشش تابعی مدرج، می‌توان چند لایه همگن با اختصاص خواص متناظر با موقعیت هر لایه در نظر گرفت به طوری که برای لایه سطحی بیشترین درصد ماده سرامیکی و در آخرین لایه نزدیک به بستر بیشترین درصد عناصر پایه فلزی تعریف شده است.

شکل ۱۵ تغییرات تنش ون میسز بر روی لبه شیار تزریق طی زمان‌های مختلف را برای پوشش‌های متداول (جدول ۳) نشان می‌دهد. با توجه به نتایج می‌توان گفت پوشش‌های کروم سخت و نیتريد سیلیسیم سطح تنش سیستم را نسبت به حالت بدون پوشش کاهش داده‌اند ولیکن کاربرد پوشش نیتريد آلومینیوم تیتانیوم موجب افزایش مقدار تنش در لبه شیار تزریق می‌شود. ماکزیمم مقدار تنش در گوشه شیار اتفاق می‌افتد که به ازای پوشش کروم سخت و نیتريد سیلیسیم به ترتیب ۴۹٪ و ۱۰٪ نسبت به حالت بدون پوشش کمتر خواهد بود. از آنجا که سطح تنش به ازای پوشش نیتريد سیلیسیم کاهش قابل قبولی نسبت به حالت بدون پوشش ایجاد می‌کند بنابراین می‌تواند به عنوان یک جایگزین مناسب برای پوشش کروم سخت استفاده شود. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت استفاده از پوشش‌های مقاوم به حرارت می‌بایست با توجه به شرایط کاری، دامنه دمایی و جنس بستر قطعه انتخاب شود. استفاده از پوشش نیتريد تیتانیوم آلومینیوم عملکرد نامناسبی بر خلاف خواص عناصر تشکیل‌دهنده آن به هنگام قرارگیری در شرایط دمایی مذکور نشان داده است که بیانگر عدم سازگاری پوشش و بستر آن می‌باشد. استفاده از پوشش نیتريد تیتانیوم آلومینیوم روی بستر فولاد معمولی بر خلاف فولاد گرم‌کار در کاهش تنش‌های حرارتی مؤثر می‌باشد.

تغییرات تنش ون میسز برای پوشش تابعی مدرج بر روی لبه شیار تزریق طی زمان‌های مختلف در شکل ۱۶ آمده است. بر اساس نتایج، سطح تنش در اطراف شیار قالب به طور قابل توجهی کمتر از دیگر

- in: S.C. Cha, A. Erdemir (Eds.) Coating Technology for Vehicle Applications, Springer International Publishing, Cham, 2015, pp. 175-163.
- [14] I. Peter, M. Rosso, F.S. Gobber, Study of protective coatings for aluminum die casting molds, *Applied Surface Science*, 571-563 (2015) 358.
- [15] R. Ghusoon, H. Rawaa, H. Basim, Effect of die geometry on thermal fatigue of tool steel in aluminium alloy die-casting, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2019, pp. 032042.
- [16] Y. Lu, K. Ripplinger, X. Huang, Y. Mao, D. Detwiler, A.A. Luo, A new fatigue life model for thermally-induced cracking in H13 steel dies for die casting, *Journal of Materials Processing Technology*, 454-444 (2019) 271.
- [17] D. Klobčar, J. Tušek, B. Taljat, Thermal fatigue of materials for die-casting tooling, *Materials Science and Engineering: A*, 207-198 (2008) (2-1)472.
- [18] H.S. Carslaw, J.C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, Clarendon Press, 1986.
- [19] R.B. Hetnarski, M.R. Eslami, G. Gladwell, *Thermal stresses: advanced theory and applications*, Springer, 2009.
- [20] A. Hasanabadi, M. Zarei, Investigation and comparison of wear characteristics of steel surface in three ways, 11th Iranian Conference on Manufacturing Engineering, ICME2010) 418_11) (in Persian).
- [21] H. Huang, Z.X. Li, M.J. Wang, C. Xie, Microstructural and mechanical properties of TiAlN and Ti3AlN films deposited by reactive magnetron sputtering, in: *Materials Science Forum*, Trans Tech Publ, 2015, pp. 288-283.
- [22] C. Wang, H. Wang, X. Fan, J. Zhou, H. Xia, J. Fan, Fabrication of dense β -Si3N4-based ceramic coating on porous Si3N4 ceramic, *Journal of the European Ceramic Society*, 1750-1743 (2015) (6)35.
- [23] P. Aghasafari, V. Arabzadeh, A. Daraei, M. Salimi, Three dimensional finite element study of rack in functionally graded material under thermal loading, 13th International Conference on Fracture, (2013).
- [3] H. Ahuett-Garza, Characterization of loads in die casting and prediction of die deflections, The Ohio State University, 1996.
- [4] A. Srivastava, V. Joshi, R. Shivpuri, Computer modeling and prediction of thermal fatigue cracking in die-casting tooling, *Wear*, 43-38 (2004) (2-1)256.
- [5] K.T. Youn, Y.M. Rhyim, W.J. Yang, J.H. Lee, C.G. Lee, Evaluation of Thermal Fatigue Properties of Surface Treated AISI H13 Steel for Aluminum Die-Casting, in: *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publ, 2006, pp. 1176-1173.
- [6] K.T. Youn, Y.M. Rhyim, J.H. Lee, C.G. Lee, Y.C. Jung, An Evaluation of Thermal Fatigue Cracking and Chemical Reaction in Die Casting Mould, in: *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publ, 2007, pp. 704-701.
- [7] X.-w. HAN, W. WU, Numerical Analysis of Temperature Field of Aluminum Alloy Die Casting Dies [J], *Journal of Changshu Institute of Technology*, 2007) 4).
- [8] F. Medjedoub, G. Dour, S. Le Roux, P. Lamesle, M. Salem, P. Hairry, F. Rezai-Aria, Experimental conditions and environment effects on thermal fatigue damage accumulation and life of die-casting steel X38CrMoV5 (AISI H11), *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 349-336 (2008) (3-2)3.
- [9] D. Klobčar, J. Tušek, Thermal stresses in aluminium alloy die casting dies, *Computational Materials Science*, (4)43 1154-1147 (2008).
- [10] M. Fazarinc, T. Muhič, G. Kugler, M. Terčelj, Thermal fatigue properties of differently constructed functionally graded materials aimed for refurbishing of pressure-die-casting dies, *Engineering Failure Analysis*, 249-238 (2012) 25.
- [11] P. Pawłowski, P. Bała, T. Tokarski, J. Krawczyk, Premature cracking of dies for aluminium alloy die-casting, *Archives of Metallurgy and Materials*, 2013) 58).
- [12] C. Pan, W. Ma, H. Yang, Q. Xiao, J. Zhou, Q. Chang, Finite Element Study on Thermal Fatigue Depth of Aluminum Alloy Die Casting Die, *DEStech Transactions on Materials Science and Engineering*, (icmea) (2015).
- [13] S.C. Cha, *Coatings for Aluminum Die-Casting Dies*,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. R. Khayyati, Y. Alinia, Thermal stress analysis for an aluminum die cast die, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(Special Issue 4) (2021) 2687-2702.

DOI: 10.22060/mej.2020.18049.6723



