



تحلیل عددی پاشش حرارتی پوشش‌های استلایت-۶ روی بستر فولادی

محمد حاجی پور^۱، عرفان میرشکاری^{۲*}، شهرام شهریوی^۲

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران
^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران

برجسته‌ها

- در این مطالعه، فرآیند پاشش حرارتی ذرات سرامیکی بر روی سطح فولاد با استفاده از روش اجزاء محدود شبیه‌سازی شده است.
- از روش سطح پاسخ برای بررسی اثر پارامترهای ورودی بر روی نتایج لایه‌نشانی استفاده شده است.
- اندازه ذرات و زاویه پاشش به‌عنوان دو عامل تأثیرگذار بر روی عمق نفوذ شناسایی شده‌اند.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۱

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

*نویسنده مسئول:

erfan.mirshकारी@gmail.com

کلیدواژه‌ها:

پاشش حرارتی

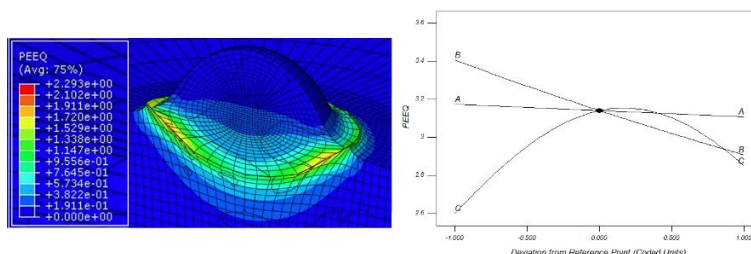
المان محدود

استلایت-۶

کرنش پلاستیک معادل

روش سطح پاسخ

چکیده گرافیکی



چکیده

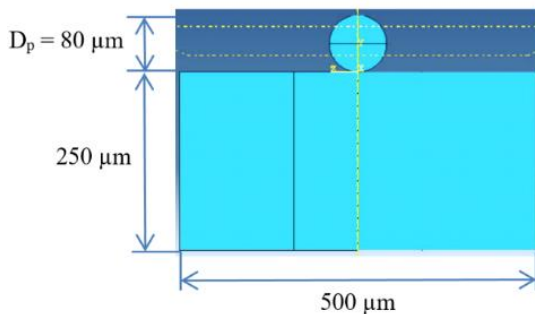
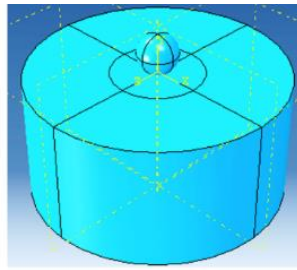
در این مطالعه از روش المان محدود برای شبیه‌سازی پاشش حرارتی میکرو ذرات استلایت-۶ روی زیرلایه فولادی استفاده شده است. اثر اندازه ذرات، دمای پیش‌گرمایش زیرلایه و زاویه پاشش بر روی پارامترهای خروجی فرآیند از جمله تنش، کرنش پلاستیک معادل، عمق نفوذ و توزیع دما بررسی شده‌اند. از طراحی آزمایش‌ها برای تعیین تعداد شبیه‌سازی‌ها و ترکیب پارامترهای ورودی استفاده شده است. برای بررسی رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی، روش سطح پاسخ مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که عمق نفوذ به‌عنوان عامل اصلی مؤثر بر استحکام پیوند، به‌شدت به‌اندازه ذرات وابسته است. همچنین زاویه پاشش به‌عنوان یک پارامتر مهم و تأثیرگذار بر روی عمق نفوذ شناسایی می‌شود. از سوی دیگر، دمای پیش‌گرمایش زیرلایه تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر روی نتایج ندارد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود که عمق نفوذ با افزایش اندازه ذرات و همچنین زاویه پاشش افزایش یافته و در زاویه پاشش ۹۰ درجه، به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

۱- مقدمه

لایه‌نشانی حرارتی یکی از روش‌های ایجاد پوشش سطحی با استفاده از پودرهای فلزی، آلیاژی و سرامیکی است. در این فرآیند، مواد اولیه به‌صورت پودر جامد پس از پاشش به سطح هدف می‌چسبند و پوشش موردنظر را بر روی سطح ایجاد می‌کنند. روش پاشش حرارتی می‌تواند پوشش‌هایی با خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی عالی برای کاربردهای مختلف صنعتی تولید کند. در این روش می‌توان به پوشش‌های نانو ساختار با خواص مطلوب نیز دست‌یافت. از روش پاشش حرارتی می‌توان برای افزایش مقاومت سطح در برابر خوردگی و سایش و یا ایجاد عایق حرارتی استفاده نمود. ضخامت، زبری و تخلخل از ویژگی‌های مهم یک پوشش هستند که به‌شدت به پارامترها و شرایط فرآیند پوشش‌دهی بستگی دارند. ذرات هنگام برخورد با سطح می‌توانند مذاب، نیمه مذاب و یا جامد باشند، بنابراین کیفیت پوشش به دینامیک ذرات و نحوه توزیع آن‌ها بر روی سطح بستگی دارد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که پوشش‌های ایجادشده با روش پاشش حرارتی کاملاً یکپارچه نیستند و بین ذرات پراکنده تخلخل وجود دارد. تخلخل موجود در سطح بیرونی یا لایه‌های زیرین، خواص مکانیکی و حرارتی پوشش را به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد. مطالعات مختلفی در زمینه پاشش حرارتی انجام‌شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. متیوز و همکاران [۱] میزان و سازوکار نفوذ بین پوشش Cr_3C_2-NiCr و بستر آلیاژ پایه نیکل ۶۲۵ را در دماهای مختلف (۵۰۰ الی ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) برای مدت‌زمان ۳۰ روز بررسی نمودند. در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد هیچ‌گونه نفوذی مشاهده نشد، اما نفوذ تا حدودی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و به‌طور قابل‌توجهی در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. همچنین، تشکیل یک لایه اکسیدی پیوسته در سطح مشترک پوشش - بستر به دلیل نفوذ کروم از بستر به پوشش گزارش شد. تیلمن و همکاران [۲] لایه‌نازک $Ni-Cr$ (80-20 at.-%) را از طریق اسپاترینگ مگنترون DC (magnetron sputtering) روی پوشش‌های عایق

Al_2O_3 ایجادشده از طریق پاشش حرارتی، سنتز کردند و اثرات پارامترهای لایه‌نشانی از جمله ولتاژ بایاس (bias-voltage)، توان گرمایش و فشار محفظه را بر روی نیروی خراش بحرانی، سختی، مدول یانگ و مقاومت الکتریکی مطالعه نمودند. آن‌ها مشاهده کردند که ولتاژ بایاس مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر روی نتایج فرآیند است. فانچیچا و همکاران [۳] تنش‌های پسماند و چسبندگی حرارتی پوشش $CoNiCrAlY$ پاشیده شده بر روی بستر سوپر آلیاژ پایه نیکل را از نقطه‌نظر انجماد و تبلور تحلیل نمودند. ساینی و همکاران [۴] روش‌های مختلف پاشش حرارتی از جمله سوخت اکسیژن با سرعت‌بالا (HVOF)، D-Gun و پاشش پلاسما جهت ایجاد پوشش‌های Cr_3C_2-NiCr برای کاربردهای دمابالا را با یکدیگر مقایسه کردند. همچنین، خواص پوشش‌های Cr_3C_2-NiCr در شرایط مختلف محیطی و تأثیر ضخامت و تخلخل پوشش بر ویژگی‌های خوردگی گرم توسط ایشان موردبررسی قرار گرفت. احمد [۵] اثر پارامترهای پوشش مانند ضخامت و میدان‌های تنش تماسی را بر روی عملکرد و مودهای شکست خستگی پوشش‌های WC-12% Co ایجادشده به روش HVOF ارزیابی نموده و افزایش کارایی پوشش را به دلیل بهبود چقرمگی شکست پوشش‌های HVOF گزارش کرد. یو و همکاران [۶] از روش المان محدود برای تحلیل رفتار ضربه‌ای ذرات در فرآیند پاشش سرد و بررسی اثر پیش گرم کردن پودر و بستر بر روی نتایج این فرآیند استفاده کردند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مشاهده شد که روش‌های مختلف پیش‌گرم نمودن منجر به الگوهای مختلف تغییرشکل، نسبت‌های مختلف مسطح شدن و متراکم شدن ذرات مس و حداکثر کرنش‌های پلاستیک معادل متفاوتی می‌شود. روش سوخت هوا با سرعت‌بالا (HVAF) توسط ترومپتر و همکاران [۷] برای لایه نشانی ذرات آلیاژ نیکل کروم بر روی بستر مورد استفاده قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که جنس بستر تأثیر قابل‌توجهی بر روی نوع و شکل ذرات چسبیده به سطح دارد. همچنین به این نتیجه رسیدند که همبستگی بین لکه‌های مذاب و سختی بستر را می‌توان به تبدیل انرژی جنبشی ذرات به تغییرشکل پلاستیک و گرما نسبت داد. ژی و همکاران [۸] از روش عددی

پیکربندی مدل و ابعاد ناحیه شبیه‌سازی شامل زیرلایه و ذره در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): هندسه و ابعاد زیرلایه و ذره در مدل اجزاء محدود.

لازم به ذکر است که ابعاد زیرلایه تقریباً پنج برابر ذره در نظر گرفته شد تا از اثرات ناخواسته احتمالی گره‌های مرزی بر روی ناحیه تغییرشکل زیرلایه-ذره جلوگیری شود. رفتار مکانیکی زیرلایه و ذرات به صورت الاستیک-پلاستیک در نظر گرفته شد. برای این منظور، بخش الاستیک به صورت الاستیک خطی و بخش پلاستیک به کمک مدل جانسون کوک [۱۱، ۱۲] توصیف شد:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \varepsilon^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon / \varepsilon_0$$

$$T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$$

در این رابطه، σ و ε به ترتیب تنش جریان و کرنش پلاستیکی معادل هستند، ε^* نرخ کرنش بدون بعد، ε_0 نرخ کرنش و ε_0 نرخ کرنش اولیه است. T^* ، T_m و T_r به ترتیب دماهای همولوگ بدون بعد، مرجع و ذوب را نشان می‌دهند. در مدل جانسون-کوک اثر سخت‌شوندگی و همچنین اثرات دما و نرخ کرنش بر روی خواص و رفتار مواد در نظر گرفته می‌شود. A ، B ، n ، C و m پارامترهای ماده هستند و مقادیر آنها برای ذرات استلایت-۶ و زیرلایه فولادی AISI-1040 در جدول ۱ ارائه شده است.

اولری-لاگرانژی کوپل شده (CEL) برای شبیه‌سازی فرآیند رسوب ذرات پاشش سرد استفاده کردند. یک ناحیه تنش فشاری در سطح ذره و سطح زیرلایه به دلیل کرنش‌های پلاستیکی بزرگ در مواد مشاهده شد. طبق نتایج گزارش‌شده، منطقه تغییرشکل پلاستیک تنها چند میکرومتر عمق داشته و به صورت موضعی در بین سطح ذرات و بستر قرار داشت. این مشاهدات به فشار تماس بالا و زمان تماس کوتاه نسبت داده شد. لی و همکاران [۹] از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) برای ارزیابی برخورد مایل ذرات مس به سطح در فرآیند پاشش سرد استفاده نمودند. کاهش سطح تماس کل و استحکام پیوند بین ذره و بستر به دلیل وجود مؤلفه مماسی اضافی سرعت ذرات در امتداد سطح زیرلایه مشاهده شد. وانگ و همکاران [۱۰] اثر زاویه پاشش بر استحکام پیوند پوشش‌های ایجادشده با روش پاشش سرد را بررسی نموده و مشاهده کردند که حداکثر استحکام اتصال در زاویه پاشش ۴۵ درجه به دست می‌آید و دریافتند که کاهش زاویه پاشش منجر به کاهش کارایی و استحکام پوشش می‌شود. علی‌رغم مطالعات انجام‌شده، بسیاری از جنبه‌های مرتبط نیازمند مطالعه بوده و باید تحقیقات بیشتری برای شناسایی پارامترهای مؤثر بر کیفیت و عملکرد پوشش‌های ایجادشده به روش پاشش حرارتی انجام شود؛ بنابراین، در مطالعه حاضر برای اولین بار از روش المان محدود برای شبیه‌سازی پاشش حرارتی ذرات پایه کبالت استلایت-۶ بر روی سطح فولادی و بررسی اثر پارامترهای ورودی مختلف از جمله اندازه ذرات، دمای پیش‌گرمایش بستر و زاویه پاشش بر روی عمق نفوذ، تنش، کرنش پلاستیک و توزیع دما در سطح مشترک ذرات-بستر استفاده می‌شود. علاوه بر این، روش سطح پاسخ برای ارزیابی روابط بین پارامترهای ورودی و خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- روش مدل‌سازی و شبیه‌سازی

۲-۱- مدل المان محدود

در این مطالعه، نرم‌افزار آباکوس جهت شبیه‌سازی المان محدود (FEA) سه‌بعدی پاشش حرارتی بکار گرفته شد.

جدول (۱): ضرایب مدل جانسون-کوک [۱۳ و ۱۴].

خواص	زیرلایه	ذره	
	دما	مقدار	
	۳۰۰	۱۲/۹۰	
	۴۰۰	۱۴/۸۲	
رسانش حرارتی (W/m.K)	۲۴/۷	۶۰۰	۱۸/۹۰
		۷۳۰	۱۹
		۸۵۰	۲۳
		۱۰۰۰	۲۴/۸۰
	۱۱۰۰	۲۶/۶۰	
چگالی (kg/m ³)	۷۸۴۵	۸۴۶۰	
مدول یانگ (GPa)	۲۰۵	۲۴۳	
نسبت پواسون	۰/۲۹	۰/۲۹	
ضریب انبساط حرارتی (μm/m.K)	-۵	دما	مقدار (°)
		۳۷۳	۱/۱۳۵
		۸۷۳	۱/۴۵۰
		۱۲۷۳	۱/۷۵۰
گرمای نهان (J/kg)	۲۰۵	۲۴۵	
دمای خط انجماد (K)	۱۳۳۷	۱۵۵۸	
دمای خط مذاب (K)	۱۳۵۶	۱۶۴۰	
A (MPa)	۵۵۳/۱	۱۵۰۰	
B (MPa)	۶۰۰/۸	۱۸۰۰	
n	۰/۲۳۴	۰/۵۷	
m	۱	۱	
دمای ذوب (K)	۱۸۰۰	۱۶۲۰	
دمای گذار (K)	۳۰۰	۳۰۰	
C	۰/۰۱۳	۰/۰۱۴	
نرخ کرنش مرجع (s ⁻¹)	۱	۱	
کسر گرمای غیرالاستیک	۰/۹	۰/۹	
	دما	مقدار	
	۳۰۰	۴۲۷	
	۳۷۳	۴۴۸	
گرمای ویژه (J/kg.K)	۳۸۳	۴۷۳	۴۷۰
		۵۹۰	۴۸۲
		۶۸۰	۵۰۳
		۸۰۰	۵۲۵

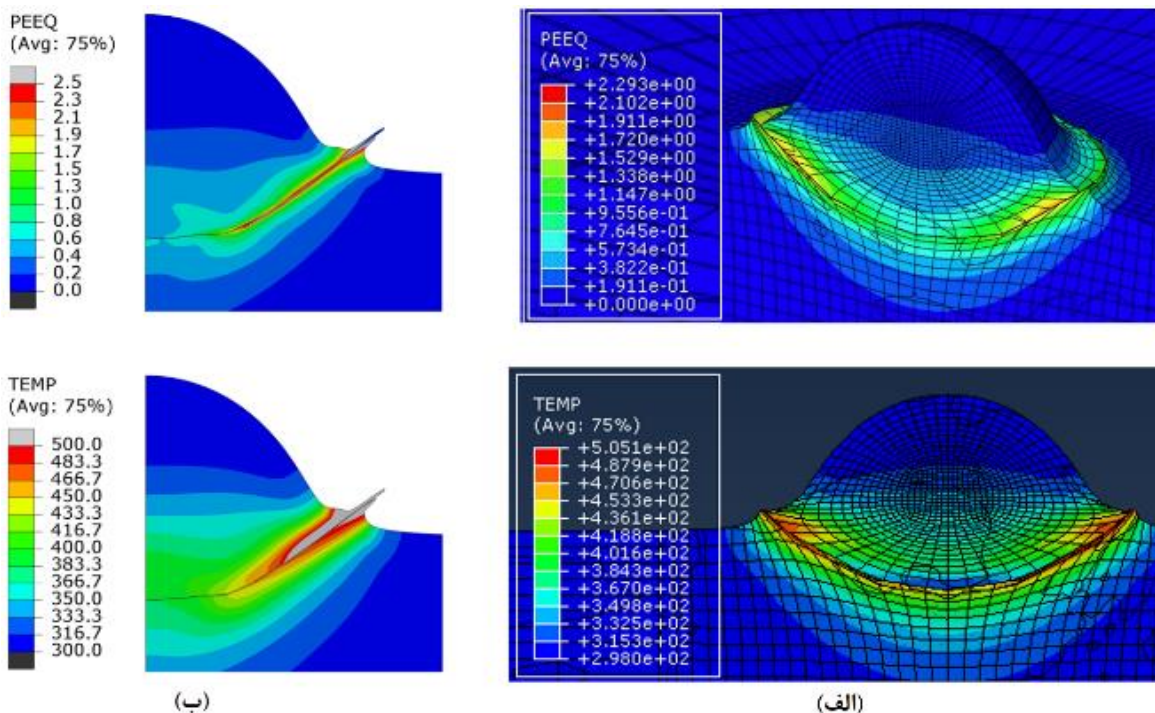
* : ۱۰^{-۵} ×

با توجه به ایجاد حرارت زیاد در حین تغییرشکل غیرالاستیک که بر خواص مواد تأثیر می‌گذارد، پاسخ‌های حرارتی و مکانیکی باید به‌طور هم‌زمان و نه متوالی به دست آیند؛ بنابراین، از تحلیل حرارتی-مکانیکی کوپل شده و المان‌هایی با رفتار دما-جابجایی کوپل شده در این مطالعه استفاده شد و تغییرشکل ذره پس از برخورد، با رویکرد لاگرانژی مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور، مدل با استفاده از المان‌های جامد سه‌بعدی (C3D8RT) با اندازه ۲ میکرومتر، مش‌بندی شد. المان مذکور یک المان مکعبی ۸ گرهی کوپل حرارتی با جابجایی و دمای سه خطی، انتگرال‌گیری کاهش‌یافته و قابلیت کنترل ساعت شنی است. تمام درجات آزادی جابجایی برای زیرلایه ثابت در نظر گرفته‌شده و حرکت ذره صرفاً در یک راستا به سمت زیرلایه محدود شد. لازم به ذکر است که به دلیل تغییرشکل سریع المان‌ها، از مش انطباقی ALE استفاده شد. در تحلیل المان محدود، فرض بر این قرار گرفت که پس از برخورد، ذره از زیرلایه جدا نمی‌شود. این رفتار با در نظر گرفتن خاصیت تماس بدون جدایش بین گره‌های تماسی ذره و زیرلایه مدل‌سازی شده و تماس بر اساس روش پنالتی تعریف شد. برای این منظور از مدل تماس سخت با اصطکاک کولمب همسانگرد بین ذره و زیرلایه استفاده شد. با استفاده از فرمولاسیون لغزش محدود و روش پنالتی بکار گرفته‌شده، امکان حرکت و نفوذ اندک سطوح در یکدیگر به وجود آمد. در طول مدت برخورد، بخش قابل‌توجهی از انرژی جنبشی به گرما تبدیل شده و مابقی آن صرف ایجاد موج الاستیک و تغییرشکل پلاستیک در ناحیه برخورد می‌شود. در این تحقیق فرض بر این قرار گرفت که ۹۰٪ انرژی جنبشی به گرما تبدیل می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، کسر حرارتی غیرالاستیک به میزان ۰/۹ در نظر گرفته شد. رفتار حرارتی مدل‌ها برحسب گرمای ویژه و رسانش حرارتی توصیف شد. خواص حرارتی زیرلایه و ذرات که به‌صورت مقادیر وابسته به دما در جدول ۱ ارائه شده است. در بخش رفتار حرارتی مواد در نرم‌افزار مورد استفاده قرار گرفت. سازوکار انتقال حرارت در نظر گرفته‌شده در تحلیل صریح شامل انتقال گرما از زیرلایه، انتقال گرما از ذره و انتقال گرما در فصل مشترک ذرات و زیرلایه است.

۲-۲- صحت‌سنجی مدل

پاشش ذرات آلومینیوم بر روی زیرلایه آلومینیوم تحت شرایط یکسان صورت گرفت. در شکل ۲ نتایج مربوط به کرنش پلاستیک معادل و توزیع دمای ارائه شده در مطالعه مذکور به صورت کمی با مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی حاضر مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تطابق قابل قبولی بین نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و نتایج منتشر شده در [۸] وجود دارد.

با توجه به اینکه مطالعه تجربی مشابهی در این زمینه صورت نگرفته و داده‌های تجربی برای پوشش حرارتی استلایت-۶ بر روی زیرلایه فولادی با شرایط مطالعه حاضر در دسترس نیست، به منظور صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود، مقایسه کمی بین خروجی‌های مدل ارائه شده در این مطالعه و شبیه‌سازی انجام شده توسط ژای و همکاران [۸] برای فرآیند



شکل (۲): کانتورهای کرنش پلاستیک معادل و دما مربوط به الف) مطالعه حاضر؛ ب) مرجع [۸] برای شبیه‌سازی ضربه Al/Al.

بیشتر بین ذره و زیرلایه است و سطح تماس نیز تابعی از عمق نفوذ ذره می‌باشد. لذا هرچه میزان عمق نفوذ بیشتر باشد، ناحیه تماس ذره و زیرلایه و در نتیجه چسبندگی سطحی افزایش می‌یابد؛ بنابراین در این مطالعه با بررسی تغییرات این پارامترها، میزان چسبندگی پوشش، مورد ارزیابی قرار گرفته است. متغیرهای ورودی و خروجی فرآیند پاشش حرارتی و سطوح تغییرات متغیرهای ورودی در جدول ۲ ارائه شده است.

روش سطح پاسخ (RSM) یکی از روش‌های متداول برای بررسی تعامل بین متغیرهای ورودی مستقل و متغیر (های) خروجی (پاسخ‌های) یک سیستم فیزیکی محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر از روش سطح پاسخ و تکنیک طراحی

۲-۳- طراحی آزمایش‌های شبیه‌سازی

اندازه ذرات، زاویه پاشش و دمای زیرلایه به عنوان متغیرهای ورودی و تنش فون میسز (Von Mises)، کرنش پلاستیک معادل (PEEQ)، عمق نفوذ و توزیع دما، به عنوان متغیرهای خروجی (پاسخ) برای طراحی آزمایش‌ها در نظر گرفته شدند. در مدل‌سازی عددی پاشش حرارتی، خروجی‌هایی نظیر عمق نفوذ، کرنش پلاستیک معادل و تنش را می‌توان به عنوان معیارهایی برای ارزیابی میزان چسبندگی در نظر گرفت. افزایش کرنش پلاستیک معادل نشانه‌ای برای افزایش استحکام چسبندگی (bonding strength) محسوب می‌شود [۱۵]. همچنین، چسبندگی بیشتر مستلزم سطح تماس

می‌شوند. بخش فاکتوریل برای محاسبه ترم‌های خطی و تعاملی و بخش محوری برای محاسبه ترم‌های درجه‌دو مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر اساس طراحی آزمایش‌های انجام‌شده، تعداد ۲۰ مدل طراحی و شبیه‌سازی المان محدود بر روی آن‌ها پیاده‌سازی شد. ماتریس طراحی آزمایش‌ها و پاسخ‌های شبیه‌سازی در جدول ۳ ارائه شده است.

مرکب مرکزی (CCD) استفاده شده است. مزیت این تکنیک این است که امکان ایجاد مدل‌های درجه دوم از متغیرهای خروجی را بدون نیاز به طراحی آزمایش فاکتوریل سه سطحی کامل، فراهم می‌کند. پس از انجام آزمایش‌های طراحی شده، از رگرسیون خطی برای ساخت مدل آماری استفاده می‌شود. طراحی مرکب مرکزی شامل F نقطه فاکتوریل، $2k$ نقطه محوری $(\pm\alpha)$ و n_c نقطه مرکزی می‌باشد. نقاط فاکتوریل از تعداد 2^k طراحی کامل تشکیل

جدول (۲): متغیرهای ورودی و خروجی فرآیند پاشش حرارتی و سطوح تغییرات آن‌ها.

سطوح تغییرات					نماد	واحد	متغیر ورودی	نماد	واحد	متغیرهای خروجی
سطح ۵	سطح ۴	سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱						
-	۵۳	۴۰	۳۰	۲۰	d	(μm)	A: اندازه ذره	D	(mm)	عمق نفوذ
۳۷۳	۳۵۳	۳۳۳	۳۲۳	۳۱۳	T	(K)	B: دمای زیرلایه	ε	-	کرنش پلاستیک معادل
-	-	۹۰	۶۰	۳۰	ϕ	(degree)	C: زاویه پاشش	σ	(MPa)	تنش فون میسز
								T_i	(K)	دمای فصل مشترک

جدول (۳): ماتریس طراحی آزمایش‌های شبیه‌سازی و پاسخ‌های به دست آمده.

شماره آزمایش	متغیرهای ورودی			متغیرهای خروجی (پاسخ‌ها)		
	اندازه ذره (μm)	دمای زیرلایه (K)	زاویه پاشش (degree)	عمق نفوذ (mm)	کرنش پلاستیک معادل (MPa)	تنش فون میسز (K)
۱	۳۰	۳۳۳	۶۰	$1/90 \times 10^{-3}$	۳/۳۲۰	۷۲۷/۹
۲	۴۰	۳۵۳	۶۰	$2/95 \times 10^{-3}$	۲/۹۹۲	۷۷۹/۳
۳	۲۰	۳۱۳	۶۰	$1/51 \times 10^{-3}$	۴/۳۴۹	۷۹۰/۸
۴	۴۰	۳۲۳	۹۰	$2/95 \times 10^{-3}$	۲/۹۶۳	۷۹۹/۵
۵	۵۳	۳۷۳	۳۰	$1/08 \times 10^{-3}$	۲/۶۰۹	۷۴۱/۰
۶	۲۰	۳۲۳	۳۰	$1/71 \times 10^{-3}$	۴/۱۲۸	۶۸۷/۴
۷	۲۰	۳۱۳	۹۰	$1/55 \times 10^{-3}$	۲/۷۲۶	۷۳۰/۱
۸	۵۳	۳۷۳	۹۰	$4/97 \times 10^{-3}$	۲/۸۵۳	۷۷۹/۷
۹	۳۰	۳۳۳	۳۰	$1/98 \times 10^{-3}$	۲/۲۸۳	۵۶۴/۴
۱۰	۴۰	۳۵۳	۶۰	$2/95 \times 10^{-3}$	۲/۹۹۲	۷۷۹/۳
۱۱	۵۳	۳۱۳	۹۰	$4/78 \times 10^{-3}$	۲/۸۹۷	۸۱۱/۶
۱۲	۳۰	۳۵۳	۶۰	$1/94 \times 10^{-3}$	۳/۳۱۰	۷۲۵/۰
۱۳	۲۰	۳۳۳	۶۰	$7/69 \times 10^{-3}$	۲/۹۶۸	۶۹۴/۵
۱۴	۳۰	۳۷۳	۶۰	$1/99 \times 10^{-3}$	۳/۲۶۷	۷۱۷/۱
۱۵	۵۳	۳۳۳	۶۰	$2/50 \times 10^{-3}$	۲/۹۳۵	۸۰۰/۷
۱۶	۴۰	۳۲۳	۶۰	$2/85 \times 10^{-3}$	۲/۹۶۸	۷۹۳/۳
۱۷	۲۰	۳۷۳	۹۰	$1/68 \times 10^{-3}$	۲/۷۶۰	۶۳۶/۴
۱۸	۵۳	۳۱۳	۳۰	$9/93 \times 10^{-3}$	۲/۷۰۷	۷۵۴/۱
۱۹	۳۰	۳۲۳	۶۰	$1/86 \times 10^{-3}$	۳/۳۰۳	۷۳۶/۲
۲۰	۲۰	۳۷۳	۳۰	$1/94 \times 10^{-3}$	۱/۹۵۰	۴۶۶/۴

ANOVA نشان می‌دهد که اندازه ذره، متغیر کنترلی غالب برای خروجی عمق نفوذ است. زاویه پاشش نیز پارامتر مهمی برای این فرآیند محسوب می‌شود.

مقادیر R-Squared (Adj) و R-Squared عالی مدل پیشگو تأیید می‌کند که مدل قابل اعتماد است. معادلات ۲ و ۳ به ترتیب معادلات رگرسیون نهایی برای عمق نفوذ را برحسب مقادیر کدگذاری شده و واقعی متغیرهای ورودی نشان می‌دهند. معادله کدگذاری شده برای تعیین اهمیت نسبی عوامل ورودی با مقایسه ضرایب فاکتورها ارزشمند است. روابط فوق بر مبنای روش سطح پاسخ و با تکیه بر نتایج خروجی شبیه‌سازی ارائه شده است و با توجه به اینکه مدل اجزاء محدود بکار گرفته شده در این مطالعه قبل از انجام شبیه‌سازی‌های اصلی، راستی آزمایی شده است می‌توان به صحت روابط اطمینان داشت.

$$(D)^{0.43} = 0.074339 + 0.017282 A + 0.000241 B + 0.022649 C + 0.002975 AC - 0.00562 A^2 + 0.006128 B^2 - 0.01446 C^2 \quad (2)$$

$$(D)^{0.43} = 0.716969867 + 0.002192557 \times (d) - 0.004662979 \times (T) + 0.002463738 \times (\phi) + 6.01111E-06 \times (d) \times (\phi) - 2.06278E-05 \times (d)^2 + 6.80907E-06 \times (T)^2 - 1.60681E-05 \times (\phi)^2 \quad (3)$$

تمامی شبیه‌سازی‌ها برای مدت ۴۰ نانوثانیه انجام شد و سرعت ضربه مقدار ثابت ۴۰۰ متر بر ثانیه و دمای اولیه ذرات ۶۰۰ کلوین در نظر گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

در این بخش، چهار پاسخ شامل عمق نفوذ، کرنش پلاستیک معادل، تنش فون میسز و توزیع دما و وابستگی آن‌ها به پارامترهای ورودی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در ادامه، تحلیل واریانس، معادلات رگرسیون و نمودارهای RSM برای پاسخ‌ها ارائه شده است.

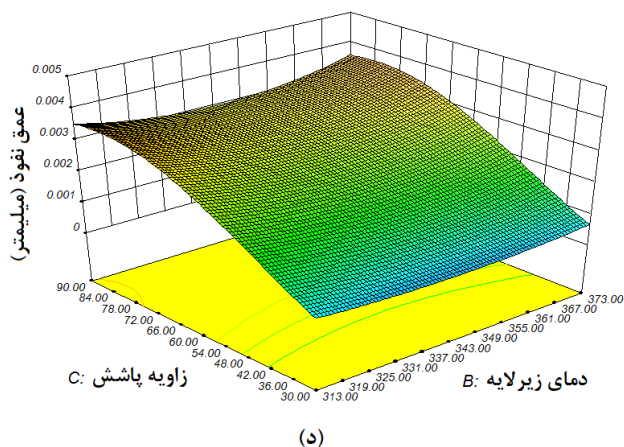
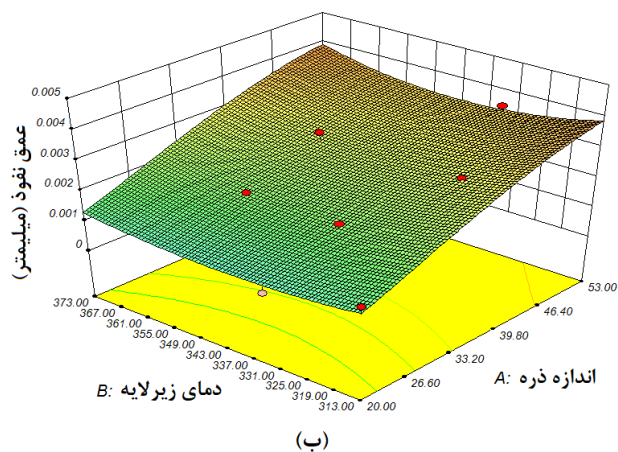
۳-۱- عمق نفوذ

عمق نفوذ به‌عنوان مهم‌ترین عامل در چسبندگی نانو ذرات به سطح زیرلایه شناخته می‌شود [۱۵]. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، چسبندگی به‌طور مستقیم تابعی از سطح تماس بین ذره و زیرلایه است و سطح تماس نیز تابعی از عمق نفوذ ذره می‌باشد. لذا با افزایش عمق نفوذ، ناحیه تماس ذره و زیرلایه و در نتیجه چسبندگی سطحی افزایش می‌یابد؛ بنابراین تغییرات عمق نفوذ به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی چسبندگی حائز اهمیت است. آنالیز واریانس (ANOVA) برای عمق نفوذ در جدول ۴ نشان داده شده است. جدول

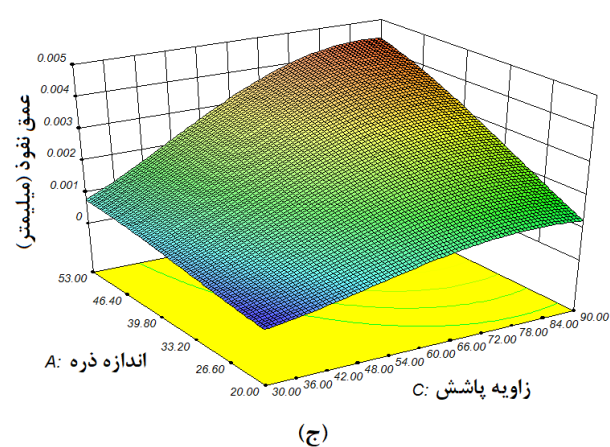
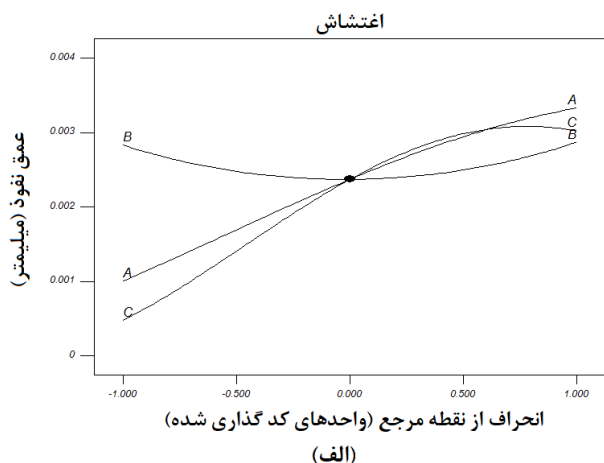
جدول (۴): جدول آنالیز واریانس (ANOVA) برای عمق نفوذ.

منبع	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	۰/۰۱۰۱۲۱	۷	۰/۰۰۱۴۴۶	۹۹/۸۹۹۲۲	<۰/۰۰۰۱
A (اندازه ذره)	۰/۰۰۳۴۲۹	۱	۰/۰۰۳۴۲۹	۲۳۶/۹۳۶۸	<۰/۰۰۰۱
B (دمای زیرلایه)	۶/۲۲×۱۰ ^{-۷}	۱	۶/۲۲×۱۰ ^{-۷}	۰/۰۴۲۹۶۹	۰/۸۳۹۳
C (زاویه پاشش)	۰/۰۰۴۸۰۳	۱	۰/۰۰۴۸۰۳	۳۳۱/۸۵۳۴	<۰/۰۰۰۱
AC	۶/۸۸×۱۰ ^{-۵}	۱	۶/۸۸×۱۰ ^{-۵}	۴/۷۵۳۴۷۶	۰/۰۴۹۹
A ²	۷/۴۲×۱۰ ^{-۵}	۱	۷/۴۲×۱۰ ^{-۵}	۵/۱۳۶۸۶۷	۰/۰۴۲۷
B ²	۵/۹۲×۱۰ ^{-۵}	۱	۵/۹۲×۱۰ ^{-۵}	۴/۰۸۷۳۳۸	۰/۰۶۶۱
C ²	۰/۰۰۰۶۴۵	۱	۰/۰۰۰۶۴۵	۴۴/۵۶۸۹۲	<۰/۰۰۰۱
باقیمانده	۰/۰۰۰۱۷۴	۱۲	۱/۴۵×۱۰ ^{-۵}		
خطای انطباق	۰/۰۰۰۱۷۴	۱۱	۱/۵۸×۱۰ ^{-۵}		
خطای خالص	۰	۱	۰		
کل	۰/۰۱۰۲۹۵	۱۹			
	R-Squared: ۹۸/۰۳۱				
				R-Squared (Adj): ۹۷/۰۳۳	

عمق نفوذ با تغییر تنها یک عامل در محدوده مجاز و ثابت نگاه‌داشتن سایر عوامل در مقادیر مرجع خود، رسم می‌شود. خطوط A، B و C به ترتیب حساسیت عمق نفوذ را به اندازه ذره، دمای بستر و زاویه پاشش نشان می‌دهند. با توجه به نمودار اغتشاش، عمق نفوذ با افزایش اندازه ذره و زاویه پاشش افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش دمای بستر، ابتدا عمق نفوذ کاهش و سپس افزایش می‌یابد. شکل ۳ ب اثرات اندازه ذره و دمای بستر را بر عمق نفوذ نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن این شکل و جدول ANOVA مربوط به اندازه ذره و دمای زیرلایه، مشاهده می‌شود که دمای زیرلایه تأثیر قابل توجهی بر عمق نفوذ ندارد، درحالی‌که اندازه ذره عمق نفوذ را به میزان قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهد.



لازم به ذکر است که معادلات رگرسیون در واقع روند تغییرات خروجی‌های مهم فرآیند پاشش حرارتی را برحسب اندازه ذرات، زاویه پاشش و دمای پیش‌گرمایش زیر لایه نشان می‌دهند. از سوی دیگر، به کمک این روابط ارزیابی اثر مقادیر ورودی لحاظ نشده در شبیه‌سازی‌ها بر روی خروجی‌ها امکان‌پذیر خواهد بود. بر این اساس، اثر هر یک از این پارامترها بر روی عمق نفوذ به کمک معادلات ۲ و ۳ قابل ارزیابی خواهد بود. در بخش‌های بعدی، معادلات رگرسیون برای سایر خروجی‌ها (تنش، کرنش پلاستیک، توزیع دما) نیز ارائه خواهد شد. شکل ۳ الف نمودار اغتشاش عمق نفوذ را نشان می‌دهد. نمودار اغتشاش به مقایسه اثر همه عوامل در نقطه مرکزی در فضای طراحی نشان داده‌شده در شکل، کمک می‌کند.



شکل (۳): (الف) اغتشاش عمق نفوذ؛ (ب) سطح سه‌بعدی عمق نفوذ برحسب اندازه و دمای بستر؛ (ج) سطح سه‌بعدی عمق نفوذ برحسب اندازه ذره و زاویه پاشش؛ (د) سطح سه‌بعدی عمق نفوذ برحسب زاویه پاشش و دمای زیرلایه.

$$\begin{aligned} (\varepsilon)^{-0.67} = & -0.963770064 + 0.019652228 \times (d) \\ & + 0.004782084 \times (T) + 0.004029083 \times (\phi) - \\ & 5.67143E-05 \times (d) \times (T) - 3.1525E-05 \times (T) \\ & \times (\phi) + 5.21682E-05 \times (\phi)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

نمودار اغتشاش PEEQ در شکل ۴ الف نشان داده شده است. خطوط A, B و C به ترتیب تغییرات PEEQ را با توجه به اندازه ذره، دمای بستر و زاویه پاشش نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، PEEQ چندان به اندازه ذره وابسته نیست، درحالی‌که دمای بستر تأثیر نسبتاً قابل توجهی بر PEEQ دارد و PEEQ با افزایش دمای بستر کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه پاشش، PEEQ ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. شکل ۴ ب اثرات اندازه ذره و دمای بستر را بر روی PEEQ نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است برخلاف اندازه ذره، دمای بستر تأثیر قابل توجهی بر روی PEEQ دارد. نمودار سطح سه‌بعدی PEEQ برحسب زاویه پاشش و اندازه ذره در شکل ۴ ج نشان داده شده است. با توجه به شکل، با افزایش زاویه پاشش، PEEQ ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. شکل ۴ د اثرات دمای زیرلایه و زاویه پاشش را بر روی PEEQ نشان می‌دهد. واضح است که PEEQ در حدود مقادیر میانی زاویه به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

همچنین نمودار سطح سه‌بعدی عمق نفوذ برحسب زاویه پاشش و اندازه ذره در شکل ۳ ج نشان داده شده است. با مقایسه شکل‌های ۳ ب و ۳ ج ملاحظه می‌شود که زاویه پاشش مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر عمق نفوذ است و با افزایش این پارامتر، عمق نفوذ افزایش می‌یابد. شکل ۳ د اثرات دمای زیرلایه و زاویه پاشش را بر عمق نفوذ نشان می‌دهد. مطابق این نمودار، عمق نفوذ به‌طور پیوسته با افزایش زاویه پاشش افزایش و در زاویه پاشش ۹۰ درجه به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

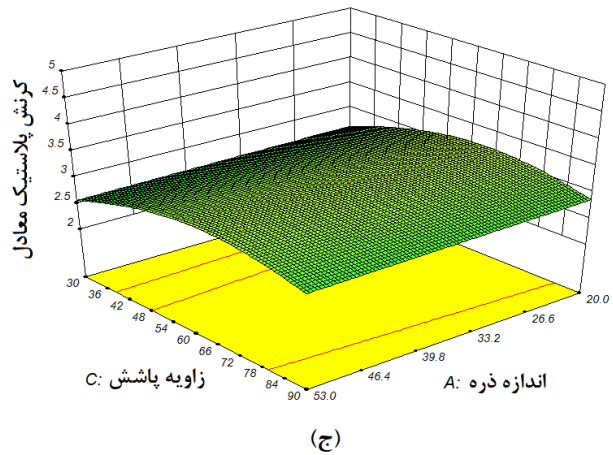
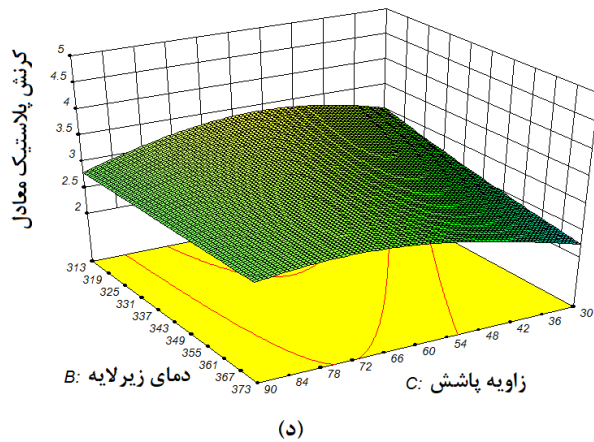
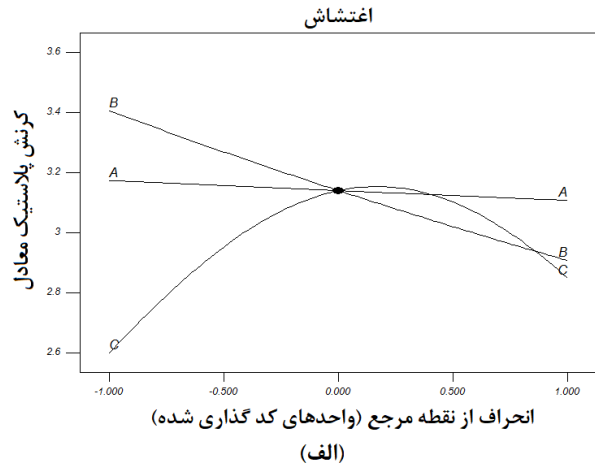
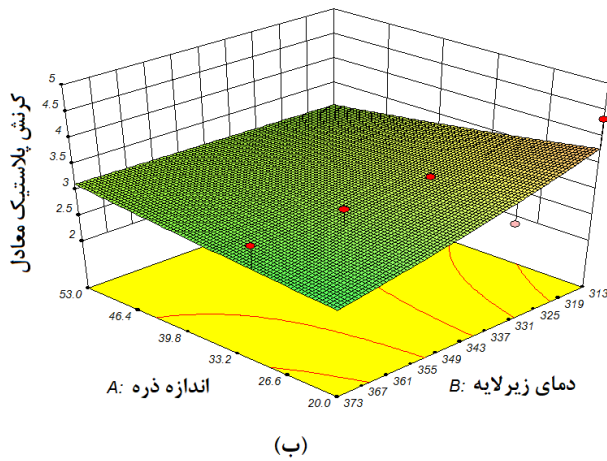
۳-۲- کرنش پلاستیک معادل

آنالیز واریانس برای PEEQ در جدول ۵ نشان داده شده است. جدول ANOVA نشان می‌دهد که تأثیر دمای بستر و همچنین زاویه پاشش بر روی PEEQ از تأثیر اندازه ذره بیشتر است. معادلات ۴ و ۵ معادلات رگرسیون نهایی برای PEEQ را به ترتیب برحسب مقادیر کدگذاری شده و واقعی متغیرهای ورودی نشان می‌دهند.

$$\begin{aligned} (\varepsilon)^{-0.67} = & 0.464522239 + 0.003286928 \times A + \\ & 0.024615339 \times B - 0.015714021 \times C + \\ & 0.028073601 \times A \times B - 0.028372489 \times B \times \\ & C + 0.046951405 \times C^2 \end{aligned} \quad (4)$$

جدول (۵): جدول آنالیز واریانس برای کرنش پلاستیک معادل.

منبع	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	۰/۰۳۷۱۲۹	۶	۰/۰۰۶۱۸۸	۳/۱۲۱۲۷۶	۰/۰۴۰۴ با اهمیت
A (اندازه ذره)	۰/۰۰۰۱۲۳	۱	۰/۰۰۰۱۲۳	۰/۰۶۱۹۸	۰/۸۰۷۳
B (دمای زیرلایه)	۰/۰۰۶۷۴۹	۱	۰/۰۰۶۷۴۹	۳/۴۰۴۲۰۷	۰/۰۸۷۹
C (زاویه پاشش)	۰/۰۰۲۴۳۹	۱	۰/۰۰۲۴۳۹	۱/۲۳۰۴۰۱	۰/۲۸۷۴
AB	۰/۰۰۶۸۶۳	۱	۰/۰۰۶۸۶۳	۳/۴۶۱۴۴۷	۰/۰۸۵۶
BC	۰/۰۰۶۳۱	۱	۰/۰۰۶۳۱	۳/۱۸۲۵۹۳	۰/۰۹۷۸
C ²	۰/۰۱۰۷۶	۱	۰/۰۱۰۷۶	۵/۴۲۷۰۶۹	۰/۰۳۶۶
باقیمانده	۰/۰۲۵۷۷۳	۱۳	۰/۰۰۱۹۸۳		
خطای انطباق	۰/۰۲۵۷۷۳	۱۲	۰/۰۰۲۱۴۸		
خطای خالص	۰	۱	۰		
کل	۰/۰۶۲۹۰۲	۱۹			
	R-Squared : ۵۹٪/۰۳				R-Squared (Adj) : ۴۰٪/۱۱



شکل (۴): (الف) اغتشاش کرنش پلاستیک معادل؛ (ب) سطح سه‌بعدی پلاستیک معادل برحسب اندازه و دمای بستر؛ (ج) سطح سه‌بعدی پلاستیک معادل برحسب اندازه ذره و زاویه پاشش؛ (د) سطح سه‌بعدی پلاستیک معادل برحسب زاویه پاشش و دمای زیرلایه.

۳-۳- تنش فون میسر

تنش به‌طور مداوم با افزایش اندازه ذره افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دمای بستر، ابتدا تنش کاهش یافته و سپس اندکی افزایش می‌یابد. در مورد تأثیر پارامتر زاویه پاشش بر روی تنش، روندی معکوس مشاهده می‌شود. اثرات اندازه ذره و دمای بستر بر تنش فون میسر در شکل ۵ ب نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} (\sigma)^3 = & 423459653.3 + 97178616.69 \times A - \\ & 52945074.72 \times B + 58481667.05 \times C + \\ & 37122699.73 \times A \times B + 48994571.12 \times B^2 - \\ & 102311427 \times C^2 \end{aligned} \quad (۶)$$

$$\begin{aligned} (\sigma)^3 = & 7631147517 - 19833792.94 \times (d) - \\ & 41846917.09 \times (T) + 15590912.5 \times (\phi) + \\ & 74995.35299 \times (d) \times (T) + 54438.41236 \times \\ & (T)^2 - 113679.3633 \times (\phi)^2 \end{aligned} \quad (۷)$$

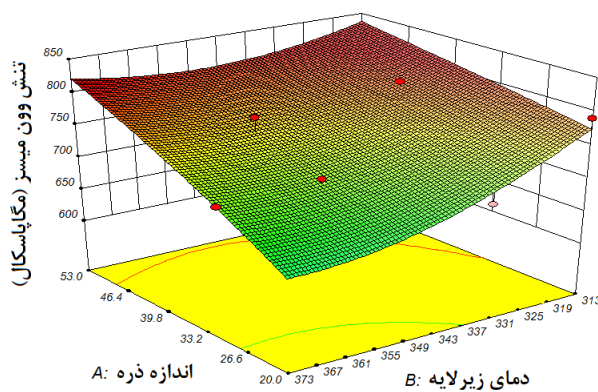
در جدول ۶ آنالیز واریانس برای تنش فون میسر ارائه شده است. بر اساس جدول ANOVA، اندازه ذره مهم‌ترین متغیر مؤثر بر روی تنش فون میسر است. زاویه پاشش و دمای بستر نیز پارامترهای مهمی برای این خروجی هستند. مقادیر R-Squared و R-Squared (Adj) عالی، قابل اعتماد بودن مدل را تأیید می‌کند. رگرسیون نهایی برای تنش فون میسر برحسب مقادیر رمزگذاری شده و واقعی پارامترهای ورودی به ترتیب با معادلات ۶ و ۷ نشان داده شده است. شکل ۵ الف نمودار اغتشاش تنش فون میسر را نشان می‌دهد. خطوط A، B و C به ترتیب تغییرات تنش را برحسب اندازه ذره، دمای بستر و زاویه پاشش نشان می‌دهند. مطابق شکل،

جدول (۶): جدول آنالیز واریانس برای تنش فون میسر.

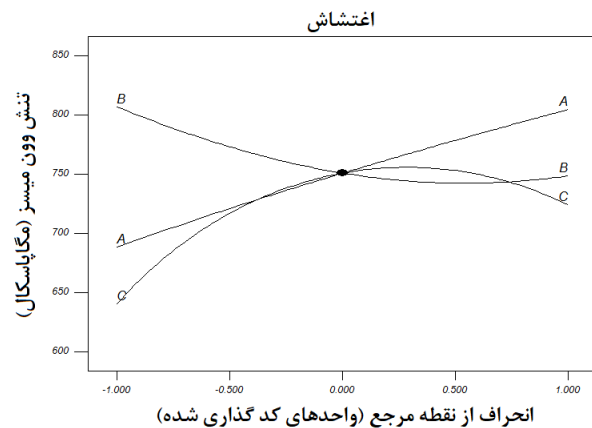
منبع	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	$2/22 \times 10^{+17}$	۶	$3/69 \times 10^{+16}$	۱۷/۹۱۶۷۶	$< 0/0001$ با اهمیت
A (اندازه ذره)	$1/07 \times 10^{+17}$	۱	$1/07 \times 10^{+17}$	۵۲/۰۶۳۶۱	$< 0/0001$
B (دمای زیرلایه)	$3/05 \times 10^{+16}$	۱	$3/05 \times 10^{+16}$	۱۴/۸۰۳۶۴	۰/۰۰۲۰
C (زاویه پاشش)	$3/25 \times 10^{+16}$	۱	$3/25 \times 10^{+16}$	۱۵/۷۹۳۲	۰/۰۰۱۶
AB	$1/20 \times 10^{+16}$	۱	$1/20 \times 10^{+16}$	۵/۸۳۲۷۶۶	۰/۰۳۱۲
B ²	$4/96 \times 10^{+15}$	۱	$4/96 \times 10^{+15}$	۲/۴۰۸۳۵۲	۰/۱۴۴۷
C ²	$3/51 \times 10^{+16}$	۱	$3/51 \times 10^{+16}$	۱۷/۰۳۵۱۸	۰/۰۰۱۲
باقیمانده	$2/68 \times 10^{+16}$	۱۳	$2/06 \times 10^{+15}$		
خطای انطباق	$2/68 \times 10^{+16}$	۱۲	$2/23 \times 10^{+15}$		
خطای خالص	۰	۱	۰		
کل	$2/48 \times 10^{+17}$	۱۹			

R-Squared (Adj): ۸۴٪/۳۳

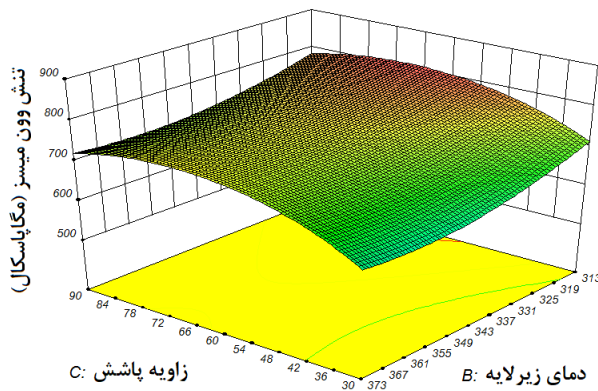
R-Squared: ۸۹٪/۲۱



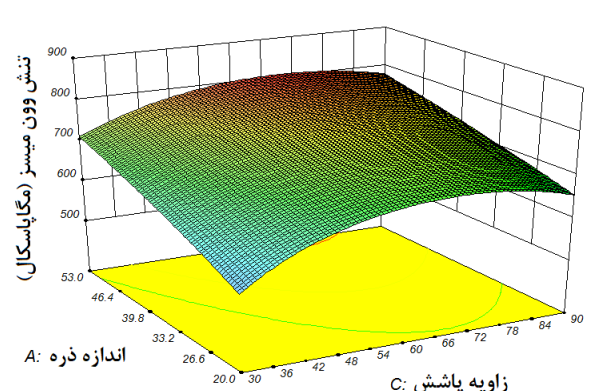
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۵): (الف) اغتاش تنش فون میسر؛ (ب) سطح سه بعدی تنش فون میسر برحسب اندازه و دمای بستر؛ (ج) سطح سه بعدی تنش فون میسر برحسب اندازه ذره و زاویه پاشش؛ (د) سطح سه بعدی تنش فون میسر برحسب زاویه پاشش و دمای زیرلایه.

تقریباً به صورت خطی کاهش می‌یابد. شکل ۶-ج) نمودار سطح سه‌بعدی دما را برحسب زاویه پاشش و اندازه ذره نشان می‌دهد. با توجه به شکل، با افزایش زاویه پاشش، دما ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. اثرات دمای زیرلایه و زاویه پاشش بر روی دما در شکل ۶-د) نشان داده شده است. مطابق شکل، حداکثر مقادیر دما در محدوده سطوح میانی زاویه پاشش رخ می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، پاشش حرارتی ذرات استلایت-۶ بر روی سطح فولاد با استفاده از روش اجزاء محدود شبیه‌سازی شد. اندازه ذرات استلایت-۶، دمای پیش‌گرمایش بستر و زاویه پاشش به‌عنوان متغیرهای ورودی اصلی در نظر گرفته شده و اثرات آن‌ها بر عمق نفوذ، تنش فون میسر، کرنش پلاستیک معادل و توزیع دما در منطقه برخورد بررسی شد. روش سطح پاسخ (RSM) برای ارزیابی تأثیر پارامترها و استخراج مدل‌های رگرسیون استفاده شد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، اندازه ذرات و زاویه پاشش پارامترهای ورودی اصلی هستند که بر عمق نفوذ تأثیر می‌گذارند. عمق نفوذ با افزایش اندازه ذرات و زاویه پاشش افزایش می‌یابد. کرنش معادل پلاستیک عمدتاً تحت تأثیر دمای بستر و تا حدی تحت تأثیر زاویه پاشش قرار دارد. همچنین مشاهده شد که تنش فون میسر به شدت به اندازه ذرات وابسته است. دمای محل برخورد ذرات با افزایش اندازه ذرات و دمای بستر، کاهش می‌یابد.

۵- مراجع

- [1] Matthews S, Berger L-M. Inter-diffusion between thermally sprayed Cr3C2-NiCr coatings and an Alloy 625 substrate during long-term exposure at 500 °C, 700 °C and 900 °C. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;770:1078-99.
- [2] Tillmann W, Kokalj D, Stangier D. Optimization of the deposition parameters of Ni-20Cr thin films on thermally sprayed Al2O3 for sensor application. *Surface and Coatings Technology*. 2018;344:223-32.
- [3] Fanicchia F, Maeder X, Ast J, Taylor AA, Guo Y, Polyakov MN, et al. Residual stress and adhesion of thermal spray coatings: Microscopic view by solidification and crystallisation analysis in the epitaxial CoNiCrAlY single splat. *Materials & Design*. 2018;153:36-46.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تنش به شدت به اندازه ذره وابسته بوده و به‌طور پیوسته با افزایش اندازه ذره افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، اثر دمای بستر روندی معکوس را نشان می‌دهد. نمودار سطح سه‌بعدی تنش برحسب زاویه پاشش و اندازه ذره در شکل ۵ ج) نشان داده شده است. با توجه به شکل، با افزایش زاویه پاشش ابتدا تنش افزایش و سپس کاهش می‌یابد. شکل ۵ د) تأثیر دمای بستر و زاویه پاشش را بر تنش فون میسر نشان می‌دهد. حداکثر مقادیر تنش در محدوده مقادیر میانی زاویه پاشش و سطوح پایین دمای بستر مشاهده می‌شود.

۳-۴- درجه حرارت

آنالیز واریانس برای دما در جدول ۷ ارائه شده است. با توجه به جدول ANOVA مشخص است که اندازه ذره، متغیر ورودی غالب برای دما محسوب می‌شود. زاویه پاشش و دمای بستر نیز پارامترهای نسبتاً مهمی برای این خروجی هستند. معادلات ۸ و ۹ معادلات رگرسیون نهایی دما را به ترتیب برحسب مقادیر کدگذاری شده و واقعی متغیرهای ورودی نشان می‌دهد.

$$(T_i)^{-3} = 1.16414E-09 + 1.63951E-10 \times A + 6.54352E-11 \times B + 6.46912E-11 \times C - 6.85633E-11 \times A \times B - 1.29241E-10 \times A \times C - 6.8861E-11 \times B \times C + 2.15022E-10 \times C^2 \quad (8)$$

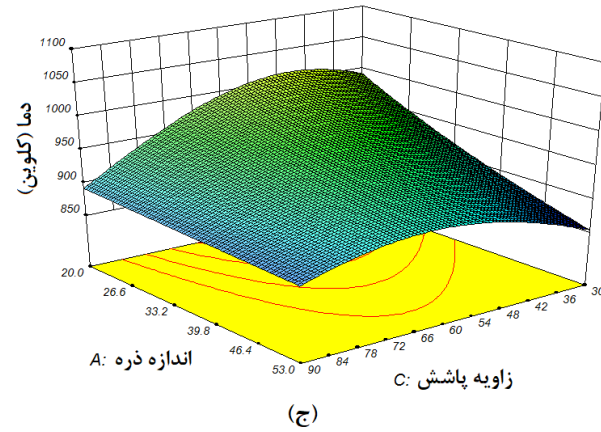
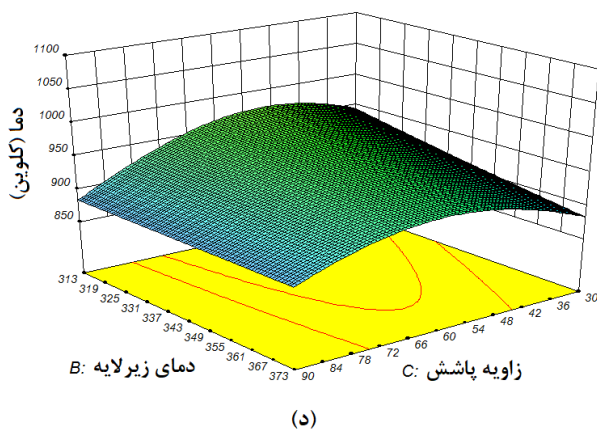
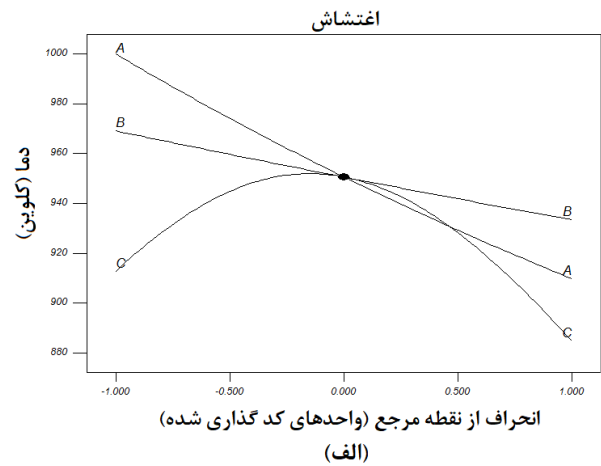
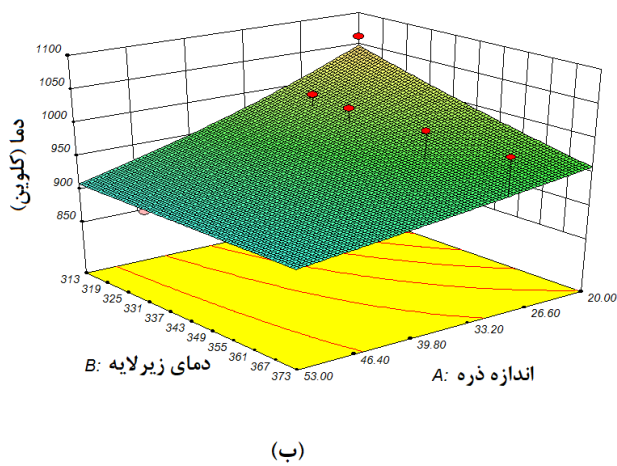
$$(T_i)^{-3} = -3.09649E-09 + 7.31115E-11 \times (d) + 1.18276E-11 \times (T) + 9.26037E-12 \times (\phi) - 1.38512E-13 \times (d) \times (T) - 2.61094E-13 \times (d) \times (\phi) - 7.65123E-14 \times (T) \times (\phi) + 2.38914E-13 \times (\phi)^2 \quad (9)$$

در شکل ۶ الف) نمودار اغتشاش دما نشان داده شده است. خطوط A، B و C به ترتیب تغییرات دما را با توجه به اندازه ذره، دمای بستر و زاویه پاشش نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، دما با افزایش اندازه ذره به شدت کاهش می‌یابد. روند مشابهی با شیب نسبتاً ملایم در مورد اثر دمای بستر مشاهده می‌شود. با افزایش زاویه پاشش، دما ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. شکل ۶ ب) اثرات اندازه ذره و دمای بستر را بر روی دما نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اندازه ذره تأثیر قابل توجهی بر روی دما دارد و با افزایش اندازه ذره و دمای بستر، دما

جدول (۷): جدول آنالیز واریانس برای دما.

منبع	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	$9/73 \times 10^{-19}$	۷	$1/39 \times 10^{-19}$	۷/۰۴۹۹۹۱	۰/۰۰۱۸
A (اندازه ذره)	$3/06 \times 10^{-19}$	۱	$3/06 \times 10^{-19}$	۱۵/۵۰۷۴۴	۰/۰۰۲۰
B (دمای زیرلایه)	$4/77 \times 10^{-20}$	۱	$4/77 \times 10^{-20}$	۲/۴۱۹۳۴۷	۰/۱۴۵۸
C (زاویه پاشش)	$4/13 \times 10^{-20}$	۱	$4/13 \times 10^{-20}$	۲/۰۹۶۴۰۷	۰/۱۷۳۳
AB	$4/۰۹ \times 10^{-20}$	۱	$4/۰۹ \times 10^{-20}$	۲/۰۷۳۸۵۶	۰/۱۷۵۴
AC	$1/۳۶ \times 10^{-19}$	۱	$1/۳۶ \times 10^{-19}$	۶/۸۹۳۳۹۱	۰/۰۲۲۲
BC	$3/71 \times 10^{-20}$	۱	$3/71 \times 10^{-20}$	۱/۸۸۲۳۱۲	۰/۱۹۵۲
C ²	$2/25 \times 10^{-19}$	۱	$2/25 \times 10^{-19}$	۱۱/۴۲۷۸۷	۰/۰۰۵۵
باقیمانده	$2/37 \times 10^{-19}$	۱۲	$1/97 \times 10^{-20}$		
خطای انطباق	$2/37 \times 10^{-19}$	۱۱	$2/15 \times 10^{-20}$		
خطای خالص	۰	۱	۰		
کل	$1/21 \times 10^{-18}$	۱۹			

R-Squared (Adj): ۶۹٪/۰۳ R-Squared: ۸۰٪/۰۴۴



شکل (۶): (الف) اغتشاش دما؛ (ب) سطح سه بعدی دما برحسب اندازه و دمای بستر؛ (ج) سطح سه بعدی دما برحسب اندازه ذره و زاویه پاشش؛ (د) سطح سه بعدی دما برحسب زاویه پاشش و دمای زیرلایه.

- [4] Saini H, Kumar D, Shukla VN. Hot Corrosion behaviour of Nanostructured Cermet based Coatings Deposited by Different Thermal Spray Techniques: A Review. *Materials Today: Proceedings*. 2017;4(2, Part A):541-5.
- [5] Ahmed R. Contact fatigue failure modes of HVOF coatings. *Wear*. 2002;253(3):473-87.
- [6] Yu M, Li WY, Wang FF, Suo XK, Liao HL. Effect of particle and substrate preheating on particle deformation behavior in cold spraying. *Surface and Coatings Technology*. 2013;220:174-8.
- [7] Trompetter W, Hyland M, McGrouther D, Munroe P, Markwitz A. Effect of substrate hardness on splat morphology in high-velocity thermal spray coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2006;15(4):663-9.
- [8] Xie J, Nélias D, Walter-Le Berre H, Ogawa K, Ichikawa Y. Simulation of the Cold Spray Particle Deposition Process. *Journal of Tribology*. 2015;137(4):1-15.
- [9] Li W-Y, Yin S, Wang X-F. Numerical investigations of the effect of oblique impact on particle deformation in cold spraying by the SPH method. *Applied Surface Science*. 2010;256(12):3725-34.
- [10] Wang X, Feng F, Klecka MA, Mordasky MD, Garofano JK, El-Wardany T, et al. Characterization and modeling of the bonding process in cold spray additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2015;8:149-62.
- [11] Johnson GR. A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures. *Proc 7th Int Sympo Ballistics*. 1983:541-7.
- [12] Johnson GR, Cook WH. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*. 1985;21(1):31-48.
- [13] Ugur L. 3D end milling of AISI 1040 finite element thermal analysis. *Journal of Engineering Research and Applied Science*. 2019;8(2):1286-1290.
- [14] Azizpour M], Tolouei-Rad M. Evaluation of residual stress in HVOF stellite-6 coatings using noncontact drilling. *Materials Research Express*. 2019;6:066577.
- [15] Yu T, Chen M, Wu Z. Experimental and numerical study of deposition mechanisms for cold spray additive manufacturing process. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2022;35(2): 276-290.



Finite Element Analysis of Thermal Sprayed Stellite-6 Coatings on Steel Substrate

Mohammad Hajipour¹, Erfan Mirshekari^{2*}, Shahram Shahrooi²

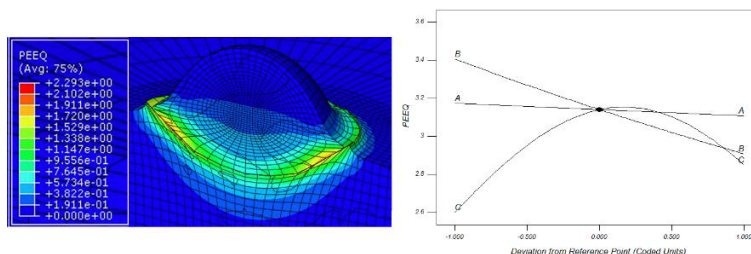
¹ Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

² Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

HIGHLIGHTS

- Thermal spraying of ceramic particles on the steel substrate was simulated using the finite element method.
- The response surface methodology was utilized to investigate the effect of input parameters on the coating results.
- Particle size and spraying angle were identified as two effective parameters on the penetration depth.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 12 November 2022

Received in revised form: 2 December 2022

Accepted: 13 February 2023

Available online: 20 February 2023

*Correspondence:

erfan.mirshekari@gmail.com

How to cite this article:

M. Hajipour, E. Mirshekari, S. Shahrooi. Finite element analysis of thermal sprayed stellite-6 coatings on steel substrate. Journal of Aerospace Mechanics. 2023; 19(2):25-39.

Keywords:

Thermal spraying

Finite element

Stellite-6

PEEQ

Response surface methodology

ABSTRACT

In this study, finite element method is applied to simulate thermal spraying of Stellite-6 microparticles on steel substrate. The effects of particle size, substrate pre-heating temperature and spraying angle are investigated on the process output parameters including stress, equivalent plastic strain, penetration depth, and temperature distribution. The simulations are designed and performed based on the Design of Experiments (DOE). Response surface methodology (RSM) is used to explore the relationships between the input factors and responses. The simulation results revealed that penetration depth as the main factor, affecting the bonding strength of coating, is highly dependent on the particle size. Spraying angle is also found to be a significant and effective parameter on the penetration depth. On the other hand, the pre-heating temperature of the substrate is observed to have no substantial effect on the penetration depth. The depth of penetration increases with increasing the particle size and spraying angle, and reaches its maximum value in spraying angle of 90°.

* Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Imam Hossein University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>.

