



مدلسازی آماری تشکیل پوشش سطحی با استفاده از فرآیند پاشش حرارتی

ابراهیم کمالی^۱، محمد پسندیده فرد^۲، علیرضا تیمورتاش^۳

چکیده:

در این مقاله برای شبیه‌سازی مورفولوژی پوشش سطح بدست آمده از فرآیند پاشش حرارتی و بدست آوردن مشخصات آن از روشی آماری استفاده شده است. در این روش، برخورد تک تک قطرات آلومینا و تأثیر گذاری آنها در شکل‌گیری لایه‌های پوشش بررسی گردیده است. به این منظور مدل‌های تحلیلی برای دینامیک پخش شدن قطره و برگشتن لبه قطرات پخش شده به سمت بالا (Splat Curl-up) مورد استفاده قرار گرفته و فرض شده است که تنها عامل ایجاد تخلخل همین برگشتگی لبه‌های Splat می‌باشد. از روش نسبت حجمی سیال (VOF) نیز برای پیدا کردن سطح آزاد هر قطره و کل پوشش استفاده شده است. در نهایت، مقدار متوسط تخلخل (Porosity) پوشش در ناحیه‌ای محدود تعیین شده و ضخامت پوشش محاسبه گردیده است که با نتایج موجود مطابقت دارد. علاوه بر آن نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی برخورد ذرات آلومینیوم با سطح فولادی نیز با نتایج تجربی مقایسه شده است که مطابقت خوبی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه:

پوشش سطحی، پاشش حرارتی، روش آماری، تخلخل.

^۱ دانشجوی دوره دکتری مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ استادیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ استادیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

مدلسازی آماری تشکیل پوشش سطحی با استفاده از فرآیند پاشش حرارتی

ابراهیم کمالی^۱ محمد پسندیده فرد^۲ علیرضا تیمورتاش^۳

چکیده

در این مقاله برای شبیه‌سازی مورفولوژی پوشش سطح بدست آمده از فرآیند پاشش حرارتی و بدست آوردن مشخصات آن از روشی آماری استفاده شده است. در این روش، برخورد تک تک قطرات آلومینا و تأثیر گذاری آنها در شکل‌گیری لایه‌های پوشش بررسی گردیده است. به این منظور مدل‌های تحلیلی برای دینامیک پخش شدن قطره و برگشتن لبه قطرات پخش شده به سمت بالا (Splat Curl-up) مورد استفاده قرار گرفته و فرض شده است که تنها عامل ایجاد تخلخل همین برگشتگی لبه‌های Splat می‌باشد. از روش نسبت حجمی سیال (VOF) نیز برای پیدا کردن سطح آزاد هر قطره و کل پوشش استفاده شده است. در نهایت، مقدار متوسط تخلخل (Porosity) پوشش در ناحیه‌ای محدود تعیین شده و ضخامت پوشش محاسبه گردیده است که با نتایج موجود مطابقت دارد. علاوه بر آن نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی برخورد ذرات آلومینیوم با سطح فولادی نیز با نتایج تجربی مقایسه شده است که مطابقت خوبی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پوشش سطحی، پاشش حرارتی، روش آماری، تخلخل

مقدمه

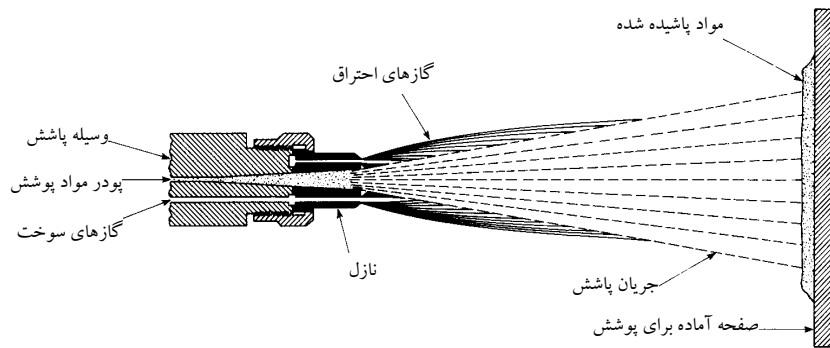
فرآیند لایه‌نشانی حرارتی یکی از روشهای ایجاد پوشش سطحی با استفاده از پودر فلزات، آلیاژها و سرامیکها می‌باشد. در این فرآیند، مواد اولیه به شکل پودر یا سیم توسط روشهای حرارتی یا انفجاری به ذرات مذاب یا نیمه مذاب تبدیل می‌شود. این ذرات پس از پاشیده شدن به سطح مورد نظر به آن چسبیده و از پخش آنها بصورت لایه لایه بر روی هم پوشش سطحی شکل می‌گیرد (شکل ۱). از این روش پوشش‌دهی، برای ایجاد مقاومت سطح در مقابل خوردگی، سایش و عایق حرارتی استفاده می‌شود [۱]. کیفیت پوشش بدست آمده به دینامیک برخورد قطره با سطح و پخش شدن آن بستگی دارد. شناسایی عوامل موثر بر خواص پوشش و نحوه کنترل این عوامل برای بدست آوردن پوشش مطلوب به کمک مدلسازی تشکیل پوشش با روش آماری امکان پذیر است. بلاشچنکو و چرنیاک [۲] و سیرولینی و

۱- دانشجوی دوره دکتری مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

همکاران [۳] از روش آماری دو بعدی بدون در نظر گرفتن برگشتگی لبه قطرات پخش شده به سمت بالا (Curl-up) به منظور بهینه‌سازی فرآیند پاشش حرارتی استفاده کردند. غفوری آذر و همکاران [۴] روش آماری مونت کارلو را برای مدل سازی شکل گیری پوشش روی سطح بکار بردند. در این تحقیق، از یک روش آماری با توزیع پواسون و روش تحلیلی جدیدی برای محاسبه Curl-up استفاده شده است.



شکل ۱- شماتیک روش پاشش حرارتی به منظور تشکیل پوشش سطحی

روش حل عددی فرآیند پاشش حرارتی

مدل آماری

سه فرض اساسی مدل آماری عبارتند از: ذرات مذاب با یکدیگر تداخل ندارند، پاشش ذرات بصورت تصادفی است (هر ذره دارای یک اندازه، سرعت V و محل برخورد مشخص است)، و احتمال وجود یک ذره در هر لحظه مستقل از وقوع سایر ذرات می باشد. با این که پاشش فرایندی وابسته به زمان است و بالطبع بایستی از تعریف زنجیره مارکوف برای تعیین متغیرهای تصادفی برای پارامترهای فرایند استفاده شود ولی برای ساده‌سازی فرایند را یکنواخت فرض کرده و با توجه به فرضیات فوق، در این مدل فرض شده که سرعت و اندازه ذره از تابع توزیع پواسون (با متوسط λ و انحراف معیار σ) مطابق زیر پیروی می کند و محل برخورد ذره نیز توزیع یکنواخت دارد:

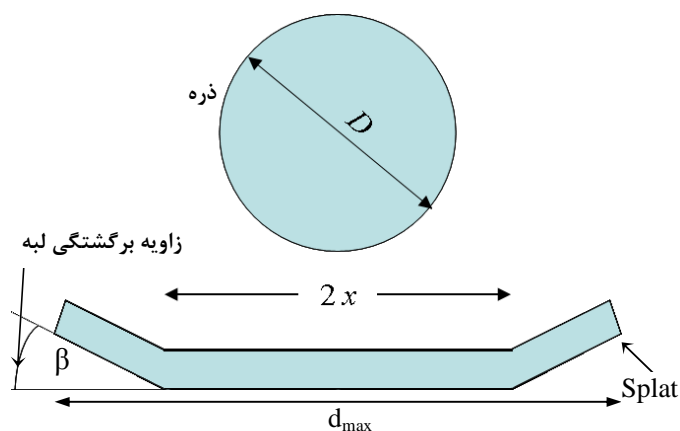
$$f(k; \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}, \quad f_{Poisson}(k; \lambda) \approx f_{normal}(k; \mu = \lambda, \sigma^2 = \lambda) \quad (1)$$

در این رابطه، k متغیر تصادفی مورد نظر می باشد. این توزیع در صورتی که $n > 100$ و $(n \times p) < 10$ باشد می تواند تقریبی از توزیع نرمال باشد، که در آن n تعداد وقوع و p احتمال وقوع است.

غفوری آذر و همکاران [۴] برای سرعت از توزیع لگاریتمی نرمال و برای سایر پارامترها از توزیع نرمال استفاده کردند.

مدل پخش شدن قطره

در مدل استفاده شده در این تحقیق برای پخش شدن قطره، از هم پاشیدگی قطره (Splashing) هنگام برخورد با سطح صرف نظر شده است. در این مدل، فرض می شود هر ذره قبل از برخورد با سطح به شکل کره ای با قطر D بوده و بعد از برخورد به شکل دیسک استوانه ای (به قطر d_{max}) در آمده و بر روی سطح می نشیند (شکل ۲).



شکل ۲- شماتیک ذره قبل و بعد از برخورد، و برگشتگی لبه Splat

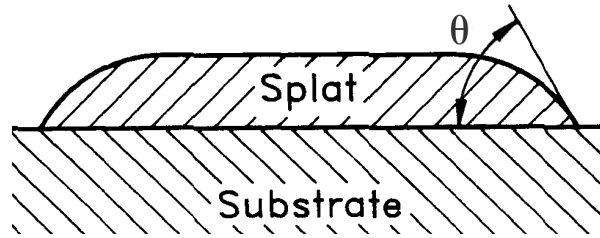
برای محاسبه حداکثر ضریب پخش K_{max} از رابطه ای استفاده شده که توسط پسندیده فرد و همکاران [۵] با حل عددی برخورد یک قطره به سطح و انجام آزمایشات مرتبط با آن بدست آمده است (رابطه ۲). مبنای روش حل عددی آنها و رابطه بدست آمده بر اساس توازن کلی انرژی است. انرژی جنبشی و پتانسیل (ناشی از تنش سطحی) اولیه قطره، پس از برخورد با سطح برای غلبه بر اثرات لزجت در هنگام پخش شدن قطره مصرف می شود. توازن بین انرژی جنبشی؛ سطحی و انرژی تلف شده نرخ پخش شدن قطره را تعیین می کند. این رابطه توسط محققان زیادی مورد استفاده قرار گرفته است که به آقایان غفوری آذر و همکاران [۴] و مستقیمی و همکاران [۶] اشاره کرد. رابطه مورد اشاره بصورت زیر می باشد:

$$\xi_{\max} = \frac{d_{\max}}{D} = \sqrt{\frac{We + 12}{3(1 - \cos \theta) + 4(We / \sqrt{Re}) + We \sqrt{\frac{3 Ste}{4 Pe}}}} \quad (2)$$

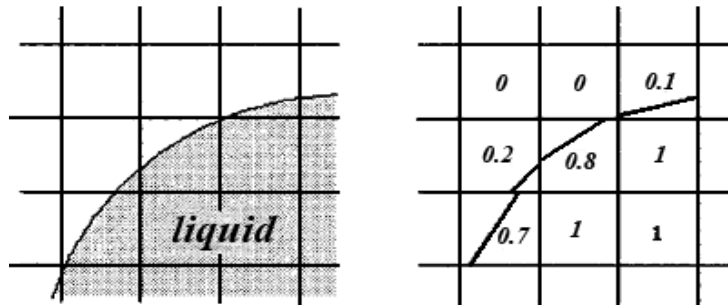
که در آن اعداد بدون بعد رینولدز (Re)، وبر (We)، پرانتل (Pr) و استفان (Ste) طبق روابط زیر تعریف می شوند:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}, \quad We = \frac{\rho V^2 D}{\sigma}, \quad Pr = \frac{C_l \mu}{k}, \quad Ste = \frac{C_l (T_m - T_{w,i})}{H_f}$$

و θ زاویه تماس بین مایع و سطح تحت پوشش (شکل ۳)، $Pe = Re.Pr$ عدد پکلت، $T_{w,i}$ دمای اولیه سطح، C_l گرمای ویژه، T_m دمای ذوب و H_f گرمای نهان ذوب ذره است. چگونگی قرارگیری لایه های ناشی از پخش ذرات بر روی هم با روش نسبت حجمی سیال (VOF) انجام می شود. در این روش از تابع اسکالر f برای هر سلول محاسباتی استفاده می شود که اگر داخل سلول پر از سیال باشد مقدار f برابر با یک است. در سلولهای خالی مقدار آن صفر و روی مرز قطره $0 < f < 1$ می باشد (شکل ۴).



شکل ۳ - زاویه تماس قطره با سطح



شکل ۴ - روش نسبت حجمی سیال VOF برای پیدا کردن سطح آزاد قطره

مدل تحلیلی برگشتن لبه Splat

بر اثر تنشهای پسماند حرارتی، لبه هر قطره پخش شده به سمت بالا برمی گردد. به دلیل وجود اختلاف دما بین دیواره و قطره، بعد از پخش شدن، قطره شروع به سرد شدن و جامد شدن می کند. بدلیل تفاوت نرخ انجماد در لایه نزدیک دیواره و لایه نزدیک سطح آزاد، و با در نظر گرفتن وجود ضریب انقباض

حرارتی ماده در اثر انجماد، تنشهای پسماند در Splat شکل می گیرد. این پدیده یکی از مهمترین دلایل بوجود آمدن تخلخل در پوشش می باشد. در برگشتن لبه Splat دو پارامتر مهم، محل شروع و میزان برگشتگی آن است. محل شروع بالا رفتگی و میزان آن به ماده قطره و شرایط برخورد و نیز به عواملی چون اختلاف ضریب انبساط حرارتی فاز مایع با فاز جامد، کشش سطحی در فاز مایع، زبری سطح و ذوب شدن مجدد ذره بستگی دارد. فوکانووا [۷] مشاهده کرد که بیشتر حفره ها در کناره Splat در فاصله ای حدود ۶۰ در صد شعاع شکل می گیرند. غفوری آذر و همکاران [۴] از همین مقدار برای تحلیل خود استفاده نمودند. زو و همکاران [۸] یک رابطه ساده برای محاسبه زاویه برگشتن لبه بدست آوردند که در این تحقیق از آن استفاده شده است. این رابطه به صورت زیر می باشد:

$$\beta = \arctan\left(\frac{xR\alpha\Delta T}{h_s}\right) \quad (3)$$

که در آن h_s ضخامت Splat، α ضریب انبساط حرارتی، $R=D/2$ شعاع Splat، ΔT اختلاف دما بین قطره و سطح و x نقطه شروع برگشتگی است (شکل ۲) که بر اساس داده های تجربی بدست آمده است.

روش حل

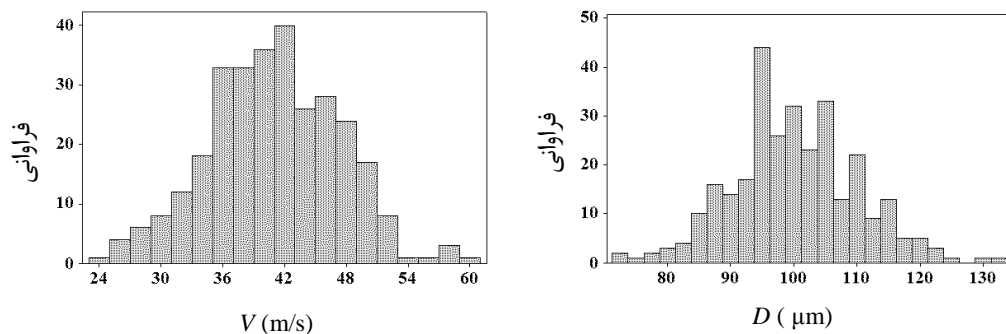
پس از شبکه بندی میدان حل، ابتدا با استفاده از روش آماری پارامترهای مورد نیاز ایجاد می شوند. با برخورد هر قطره به سطح از رابطه ۲ برای پیدا کردن قطر Splat استفاده کرده و با روش VOF مرز Splat در میدان حل مشخص می شود. پس از پخش شدن قطره با توجه به رابطه ۳ و ثابت فرض کردن مقدار $\alpha=0.6$ زاویه Curl-up محاسبه و از آن در جابجایی مرزهای Splat استفاده می گردد که این عمل منجر به خالی شدن فضای زیر لبه های آن می شود. برای قطره بعدی همین روال ادامه یافته، با این تفاوت که در هنگام استفاده از روش VOF برای پیدا کردن مرز قطره وجود قطرات قبلی در داخل میدان حل مد نظر قرار گرفته است و پس از پیدا شدن سطح زیرین محل قطره پخش شده جدید تعیین می گردد.

برای تولید اعداد تصادفی از الگوریتم نوشته شده توسط باری براون و جیمز لووتو برای زبان برنامه نویسی فرترن استفاده شده است. در نهایت پس از اتمام مرحله پاشش قطرات برای محاسبه ضخامت و میزان تخلخل، الگوریتم های متفاوتی بکار برده شده است. رابطه ای که برای تعیین میزان تخلخل استفاده شده بصورت زیر می باشد:

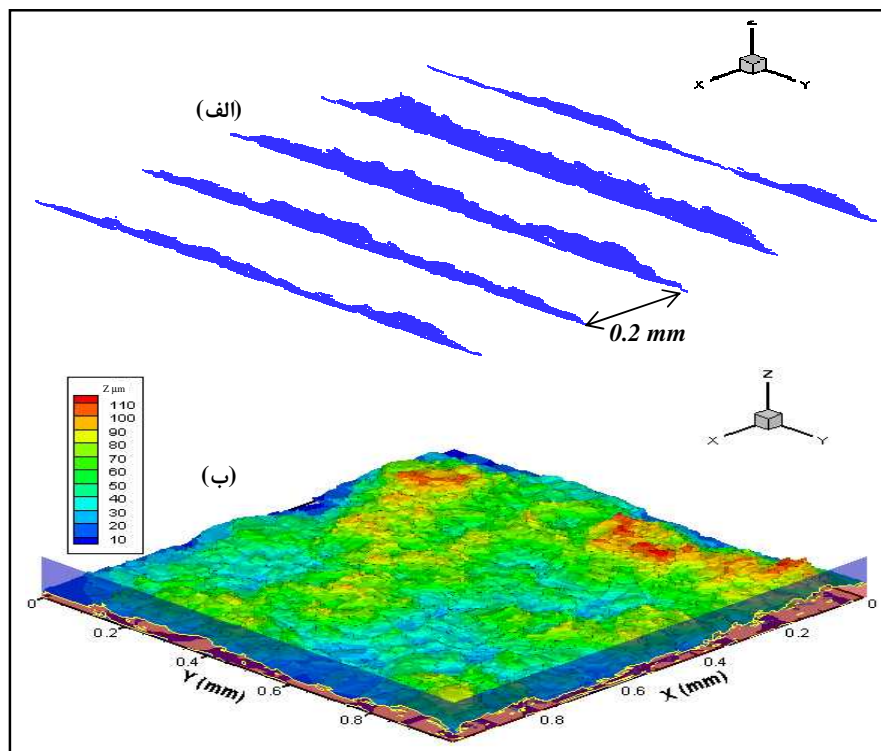
$$porosity = \frac{V_g}{V_g + V_m} \times 100 \quad (4)$$

نتایج و بحث

در فرآیند لایه‌نشانی مدل شده فرض شده است که ۳۰۰ ذره مذاب از جنس آلومینا بر هر واحد سطحی از جنس فولاد زنگ نزن (1mm×1mm) برخورد می‌کند. سرعت متوسط برخورد قطرات ۱۰۰m/s و قطر متوسط آنها ۴۰μm [۱] و دمای سطح 800 K است، شکل ۵ توزیع آماری سرعت و قطر ذره در هنگام برخورد با سطح را نشان می‌دهد. میزان تخلخل در این مدل ۸ درصد و ضخامت متوسط حدود 70 μm و حداکثر ضخامت حدود 110 μm بدست آمده است. شکل ۶ نتایج بدست آمده از مدل برای توپولوژی سطح و تخلخل درون لایه پوشش را نشان می‌دهد. در شکل ۶-الف چند برش از سطح مقطع پوشش نشان داده شده که حفره‌های درون پوشش را مشخص می‌سازد. شکل ۶-ب نیز ضخامت پوشش در قسمتهای مختلف سطح را با تغییر رنگ مشخص کرده است. شکل ۷ نیز تغییرات تخلخل با افزایش عدد رینولدز متوسط را نشان می‌دهد که روند رو به افزایش آن منطقی و متناسب با تحقیقات فوکانوما [۷] می‌باشد. افزایش تخلخل با کاهش پارامتر x و مطابقت آن با نتایج بدست آمده توسط زو و همکاران [۸] نشان دهنده درستی مدل و صحت نتایج به لحاظ کیفی می‌باشد. برای بررسی بیشتر مدل از پاشش ۲۰۰ ذره آلومینیوم با مشخصات مندرج در جدول ۱ بر روی سطح فولاد استفاده شده و نتایج بدست آمده با نتایج تجربی عابدینی و همکاران [۹] در جدول ۲ مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود محدوده نتایج تجربی گسترده بوده و نتایج تحقیق حاضر در این گستره قرار گرفته است. مغایرت مشاهده شده در حالات ۱ و ۲ در دمای بالای سطح، به علت در نظر نگرفتن مقاومت حرارتی سطح، زبری سطح و ازهم‌پاشیدگی قطره در مدل است. این عوامل سبب بروز تخلخل بیشتر می‌گردند. در دمای پایین به خاطر تماس بیشتر قطره با سطح مقدار x افزایش یافته و پیرو آن مقدار Curl-up کاهش می‌یابد که منجر به تخلخل کمتر می‌گردد، ولی با ثابت فرض کردن x این مقدار در محاسبات منظور نشده است.



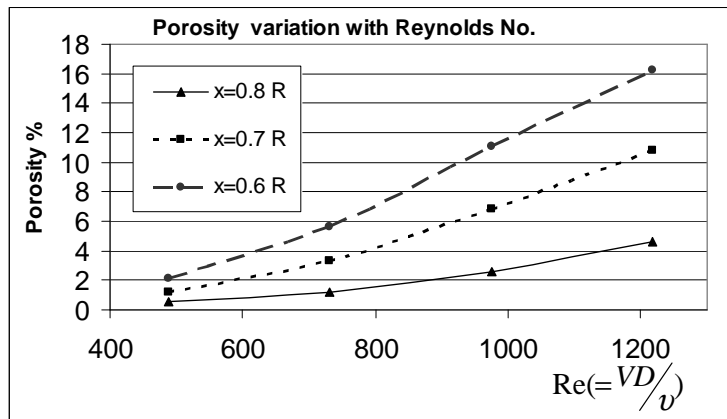
شکل ۵ - توزیع آماری سرعت و قطر ذرات



شکل ۶- پوشش حاصل از برخورد ۳۰۰ قطره آلومینا به واحد سطح (1mm×1mm). الف) تغییرات ضخامت و حفره‌ها در چند سطح مقطع مختلف- ب) توپولوژی سطح شامل ضخامت و ناصافی

نتیجه‌گیری

در این تحقیق ایجاد پوشش سطحی طی فرآیند پاشش حرارتی مدل شده است. برای دو نمونه پودر آلومینا و آلومینیوم با فرض توزیع آماری پواسون برای اندازه قطره و سرعت آن در هنگام برخورد با سطح مشخصات پوشش بررسی و با نتایج تجربی مقایسه شده است که علیرغم محدودیت در فرضیات نتایج قابل قبولی را ارائه کرده است. عامل اصلی ایجاد تخلخل در پوشش برگشتگی لبه‌های Splat بدست آمده است. برای مدل‌سازی بهتر می‌توان موارد تأثیرگذار دیگری از قبیل مقاومت حرارتی تماس، زبری سطح و اکسیداسیون مواد را در روش مدل‌سازی اعمال نمود و با استفاده از مدل‌های تحلیلی بدست آمده از حل CFD گامی در جهت بهبود مدل برداشت.



شکل ۷- تغییرات میزان تخلخل بر حسب عدد رینولدز متوسط برای مقادیر مختلف x

جدول ۱- شرایط اعمال شده برای برخورد ذرات آلومینیوم بر سطح فولادی (مطابق با داده های مرجع ۹)

حالت	سرعت متوسط m/s	دمای متوسط $^{\circ}C$	قطر متوسط μm
(High Speed) 1	143 ± 3	2132 ± 10	71 ± 3
(Low Speed) 2	109 ± 2	2140 ± 7	71 ± 3

جدول ۲- مقایسه نتایج بدست آمده از مدل حاضر با نتایج تجربی [۹]

میزان تخلخل در حالت 2 (سرعت متوسط $109 \pm 2 m/s$)		میزان تخلخل در حالت 1 (سرعت متوسط $143 \pm 3 m/s$)		دمای صفحه $^{\circ}C$
نتایج مدل	محدوده مقادیر تجربی	نتایج مدل	محدوده مقادیر تجربی	
1.626	0.9 - 2.5	---	---	100
1.630	0.7 - 3.1	---	---	150
1.631	0.2 - 3.6	2.143	0.9 - 1.3	200
1.634	1.8 - 3.8	2.148	0.8 - 3.5	250
1.628	2.5 - 4.1	2.139	2.2 - 2.4	300

مراجع

- [1] L. Pawlowski. "The science and engineering of thermal spray coatings", 1st edition John Wiley&Sons, 1995.
- [2] V.E. Belashchenko and Yu. B. Chernyak, "Stochastic approach to the modeling and optimization of thermal spray coating formation", J. of Thermal Spray Technology. Vol.2 (2), 1993.
- [3] S.Cirolini, H.Harding, and G. Jacucci, "Computer Simulation of plasma-sprayed coatings deposition model", Surf. Coat. Technology, Vol. 48, 1991.
- [4] R. Ghafouri-Azar, J. Mostaghimi, S.Chandra and M. Charmchi, "A stochastic model to simulate the formation of a thermal spray coating", J. of Thermal Spray Technology, Vol.12, 2003.
- [5] M.Pasandideh-Fard, R.Bhola, S.Chandra and J.Mostaghimi, "Deposition of tin droplets on a steel plate: simulation and experiments", Int. J. of Heat and Mass Transfer. Vol.41, 1998.
- [6] J. Mostaghimi, S.Chandra. "Splat formation in plasma-spray coating process", Pure Applied Chemistry, Vol.74 No.3, 2002.
- [7] H. Fukanuma, "A porosity formation and flattening model of an impinging molten droplet in thermal spray coatings", J. of Thermal Spray Technology., Vol.3 (1), 1994.
- [8] M. Xue, S. Chandra and J. Mostaghimi, "Investigation of splat curling up in thermal spray coatings", J. of Thermal spray Technology, Vol.15 (4), 2006.
- [9] A.Abedini, A. Pourmousa, S. Chandra and J. Mostaghimi, "Effect of substrate temperature on the properties of coatings and splats deposited by wire arc spraying", J. Surface and Technology, 2006.

On a Stochastic Model of Coating Formation in a Thermal Spray Process

E. Kamali¹, M.Pasandideh Fard², A.R. Teymourtash³

ebkamali@gmail.com, mpfard@um.ac.ir, teymourtash@um.ac.ir

ABSTRACT:

In this paper, a 3-D stochastic model is used to simulate the coating morphology in a thermal spray coating process. The model is based on prescribed rules in calculating the splat size during the impact of individual droplets on the substrate. Due to thermal stresses, the edge of the splats is curled up. A new analytical model is used for the curl up mechanism. The curl up was assumed to be the sole reason for porosity formation. Simulations were performed for a small section of a substrate on which alumina droplets are sprayed. The computed thickness and porosity were found to be in good agreement with those reported in the literature. In another simulation for aluminum droplets impinging on a steel substrate, the results of the model for porosity were found in the range measured in experiments.

Keywords: Stochastic model, Thermal spray process, Coating porosity, Coating thickness

1- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

2- Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

3- Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad