

ایجاد لایه سوپرآلیاژ بر روی فومهای نیکلی توسط عملیات پاشش گرمایی

حمید رضا سلیمی جزی*، طیبه بهزاد* و جواد مستقیمی**

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تورنتو، کانادا

(دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۵/۱۵ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۱/۱/۱۶)

چکیده -

Wire-Arc APS HVOF

APS

HVOF

واژگان کلیدی :

** - استاد

* - استادیار

Superalloy Skin on Nickel Open-Pore Foam Deposited by Thermal Spray Processes

H. R. Salimijazi, T. Behzad and J. Mostaghimi

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Toronto, Canada

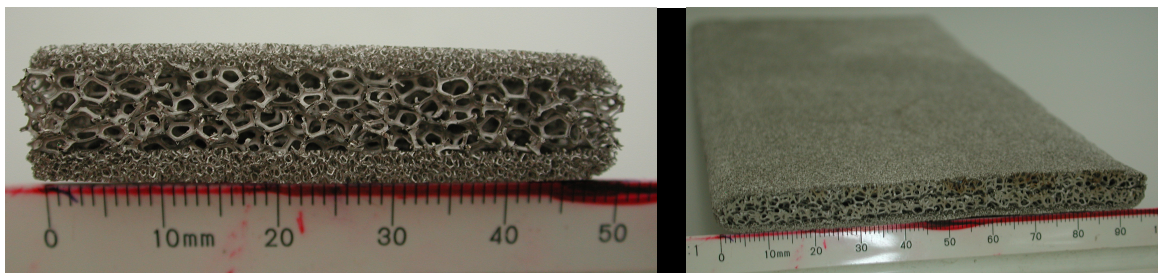
Abstract: *Open pore metallic foams can be used for high temperature, high performance heat exchanger due to their high gas permeability and heat conductivity provided that skins properly attach to the foam's struts on the surface. In the current study, a novel process was successfully developed to fill pores on the surface of the foam sheet in order to deposit skin on the foam specimens by thermal spraying. Nickel based superalloy (Inconel 625) skins were deposited on each side of a sheet of nickel metal foam with different pore densities of 10 and 20 pores per inch by high velocity oxy-fuel (HVOF), atmospheric plasma spraying (APS), and twin wire arc spraying to form a sandwich structure. The sandwich structure can be used in high temperature heat exchanger applications. The penetration of the coating materials into the foam struts can be controlled through the filling process before spraying. The microstructure of the skins and the adhesion at the interface between the nickel foam's struts and skins were characterized. Results showed dense skins with good adhesion to the surfaces of the foam. The foam's struts were imbedded into the coatings deposited by HVOF more deeply than the coatings deposited by APS and wire arc spraying. Skins deposited by HVOF and wire arc spraying showed higher bending strength than the skin deposited by APS due to lower porosity and oxide content in the coating.*

Keywords: *thermal spray, heat exchangers, metallic foams, super alloys*

۱- مقدمه

به منظور عبور سیال و انتقال گرما از طریق فومها لازم است که بر روی سطوح فوم لایه‌های نازکی از فلز قرار داده شود تا جریان عبور سیال از طریق حفره‌ها ی به هم پیوسته را تسهیل کند. در طول دهه گذشته فرایندهای تولیدی مختلفی نظیر پوشش دهی^۱ و جوشکاری به روش اتصال انتشاری^۲ برای قرار دادن لایه نازک فلزی بر روی سطح فومها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مشکلاتی نظیر قرار دادن لایه‌های نازک فلزی بر روی فومها با سطوح پیچیده و همچنین ناکافی بودن اتصال بین فومها و لایه قرار داده شده باعث شده است که انتقال گرما از فوم به لایه سطحی به طور کامل صورت نگیرد و به همین دلیل کاربرد این نوع ساختار ساندویچی را در صنعت محدود کرده است. فرایندهای پوششهای گرمایی برای ایجاد لایه نازک سطحی بر روی فومهای فلزی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. توسط این نوع فرایندهای پوشش دهی می‌توان لایه‌هایی با ضخامت مناسب بر روی سطوح پیچیده فومها با اندازه حفره مختلف و شکلهای متنوع ایجاد کرد.

اخیراً به خاطر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی منحصر به فرد فومهای فلزی مانند وزن کم، استحکام ویژه و چقرمگی بالا، این نوع مواد مورد توجه خاصی قرار گرفته‌اند. فومها می‌توانند در مواد و ساختارهایی با وزن کم، عایقهای گرمایی و صوتی، جاذبهای انرژی و ارتعاشی مورد استفاده قرار گیرند. مقدار حفره موجود در فومهای فلزی بین ۲۰ تا ۹۵ درصد است که بستگی به نوع ماده، و عملیات ساخت آن دارد. حفره‌ها در فومها می‌توانند به دو صورت به هم پیوسته و جدا از هم وجود داشته باشند. فومهایی با حفره‌های پیوسته به خاطر داشتن خصوصیات منحصر به فرد خود نظیر دانسیته پایین، استحکام بالا و انتقال گرمایی زیاد مورد توجه خاصی قرار گرفته‌اند [۱-۶]. به دلیل قابلیت عبور بالای سیال، و انتقال گرمای خیلی خوب فومها با حفره‌های پیوسته این نوع مواد در کاربردهایی که به نوعی جریان سیال و انتقال گرما دخیل باشد نظیر مبدل‌های گرمایی و جداسازها، تبخیرکننده‌ها و محفظه‌های احتراق می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند [۱].



شکل ۱- ساختار فومی با دانسیته حفرات مختلف ساخته شده از ۲ لایه فوم داخلی ۱۰PPI و دو لایه فوم خارجی ۶۰PPI

دمای 1200°C به مدت ۲ ساعت تحت نیروی $15\text{g}/\text{cm}^2$ به همدیگر متصل شده‌اند.

برای ایجاد یک ساختار فومی با دانسیته مختلف نیز از ۲ ورق فوم ۱۰ PPI و دو ورق ۴۰ PPI در دو طرف استفاده شده است، شکل (۱).

می‌توان گفت که ایجاد لایه پوششی بر روی سطح فوم تقریباً ناممکن است به دلیل اینکه ذرات مذاب در حال پاشش دارای قطر متوسط $50\ \mu\text{m}$ میکرون بوده و سرعت بسیار بالایی هستند (بستگی به فرایند پاششی دارد) که به سادگی از داخل حفره‌های فوم عبور می‌کنند. برای جلوگیری از این نفوذ بایستی حفره‌های موجود در سطح فوم توسط ماده‌ای خمیرمانند به صورت موقت پر شده و پس از انجام عملیات پوشش‌دهی از داخل فوم خارج شود.

در این تحقیق از یک نوع ترکیب حاوی پودر سوپرآلیاژ ۶۲۵ و چسب استفاده شده است و خمیر حاصله بر روی سطوح مالیده شده و حداکثر ۲ میلیمتر به داخل حفره‌ها نفوذ می‌کند. سپس عملیات آماده‌سازی سطح توسط پاشش ماسه انجام شده تا علاوه بر تمیز کردن سطح فوم از خمیر اضافی باعث بیرون آمدن فوم فلزی موجود در سطح برای ایجاد چسبندگی مناسب با لایه پوششی شود. شکل (۲) یک قطعه فوم نیکلی به کار رفته در این فرایند را قبل و بعد از عملیات آماده‌سازی سطح نشان می‌دهد.

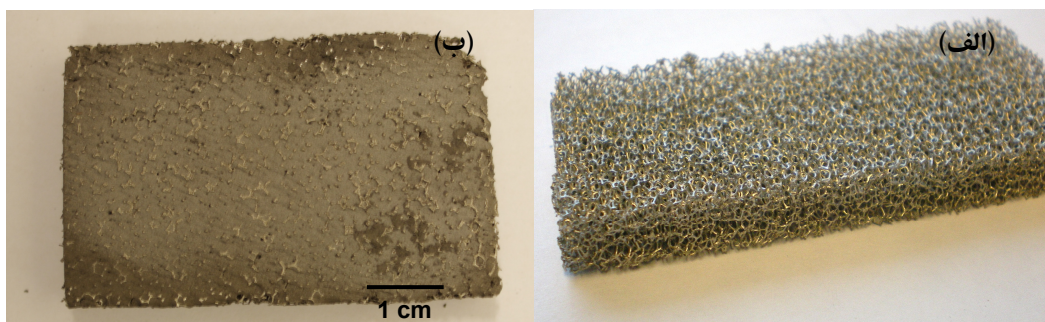
لایه‌های پوششی از سوپرآلیاژ ۶۲۵ با ضخامت متوسط $400\ \mu\text{m}$ میکرون بر روی سطح آماده شده توسط عملیات پاشش گرمایی ایجاد می‌شود. پارامترهای مؤثر پوشش‌دهی برای هر سه نوع

برای ایجاد لایه پوشش بر روی سطوح فومها توسط فرایندهای پاششی گرمایی به نحوی از نفوذ ذرات مذاب در حال حرکت به داخل حفره‌های فوم بایستی جلوگیری شود. در این تحقیق یک فرایند جدیدی جهت ایجاد پوشش بر روی فومها ارائه و اجرا شده است. لایه‌هایی از جنس سوپرآلیاژ ۶۲۵ بر روی سطوح فومهای نیکلی با عملیات پوشش‌دهی پاششی HVOF و APS و قوس سیمی^۳ ایجاد شده است. در آخر یک لایه از نوع عایق گرمایی اکسید زیرکونیم پایدار شده با ایتریا $\text{ZrO}_2 - 7\%\text{Y}_2\text{O}_3$ (YSZ) بر روی لایه سوپرآلیاژ ایجاد شده و قرار داده شده است. زیرساختار لایه‌های ایجاد شده و فصل مشترک بین پوششها و فوم مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین خصوصیات مکانیکی ساختار ساندویچی ایجاد شده توسط آزمون خمش چهار نقطه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این تحقیق از سه نوع فوم نیکلی با اندازه حفره ۱۰PPI (۱۰ حفره در هر اینچ طول)، ۲۰PPI و ۴۰PPI استفاده شده است.

۲- روش آزمایش

ورقهای نیکلی فوم با ضخامت 10mm و اندازه حفره ۱-۲ میلیمتر در هر اینچ (20 PPI) و ضخامت ۳ میلیمتر با اندازه حفره ۲-۳ میلیمتر در هر اینچ (10 PPI) و $0/2 - 0/5$ میلیمتر حفره در هر اینچ (40 PPI) توسط شرکت Inco Special Product, Canada تهیه شده است.

ورقهای فوم نیکلی به ابعاد 100×220 میلیمتر مربع بریده شده است. برای ایجاد ضخامت ۱۰ سانتیمتر از فومهای نیکلی با ضخامت ۳ میلیمتر این فومها توسط مکانیزم انتشاری در



شکل ۲- (الف) تصویر نمونه فوم نیکلی و (ب) نمونه فومی با خلل و فرج پر شده سطحی

جدول ۱- پارامترهای مورد استفاده در عملیات پوشش دهی

Parameter	APS, alloy 625	HVOF, alloy 625	APS, YSZ
Gun	SG-100	Diamond Jet DJ	SG-100
Current, A	600	-	750
Voltage, V	56	-	60
Total gas flow rate, (Ar/He), slpm	50/1	-	55/1
Feed rate, g/min	12	30	6
Spray distance, mm	60	300	60
Total Oxygen/Fuel/Air, SCFH	-	578/176/857	-

تیره) و یک لایه عایق گرمایی YSZ (به رنگ روشن مشخص شده با فلش) ایجاد شده به روش پاشش گرمایی بر روی سطح فوم نیکلی را نشان می‌دهد.

در شکل (۴) سطح مقطع این نوع ساختار قابل مشاهده است. در این سطح مقطع می‌توان نقاط تماس بین فوم نیکلی و لایه‌های پاشش ایجاد شده را به خوبی مشاهده کرد. در این تصویر که سطح مقطع حدود ۲ سانتیمتر از این ساختار ساندویچی را نشان می‌دهد بالغ بر ۱۰ نقطه تماس بین پوشش و فوم دیده می‌شود.

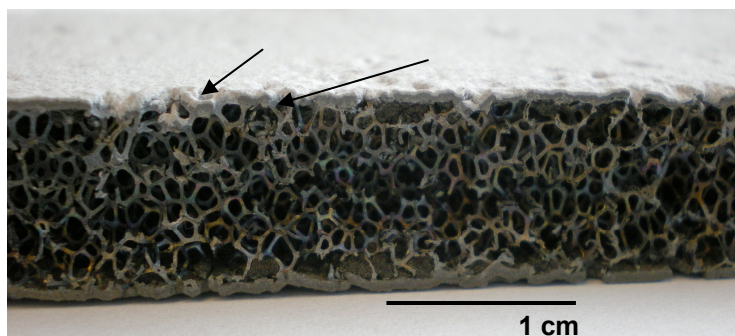
شکل (۵) تصاویر میکروسکوپی از شکل (۴) در دو نقطه تماس بین فوم فلزی و لایه پوشش ایجاد شده را نشان می‌دهد. ضخامت لایه فلزی پوشش حدود ۴۰۰ میکرون بوده و این لایه عاری از حفره‌های به هم پیوسته و امتداد داده شده تا سطح پوشش است. سطح مشترک بین فوم و پوشش یک تماس و چسبندگی خوبی را نشان می‌دهد. حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرون

عملیات پاششی گرمایی به کار گرفته شده در این تحقیق در جدول (۱) خلاصه شده است. سطح مقطع پوشش و فصل مشترک پوشش و فوم بعد از برشکاری و پوشش توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. خصوصیات مکانیکی ساختار ساندویچی ایجاد شده با روش آزمون خمش چهار نقطه ای توسط دستگاه کشش استاندارد (Instron 1331) در دمای محیط با سرعت حرکت ۰.۶mm/min، اندازه‌گیری شده است. فاصله بین دو نگهدارنده نمونه در این آزمون ۶۵mm و فاصله بین فشارآورنده‌ها ۲۰mm بوده است.

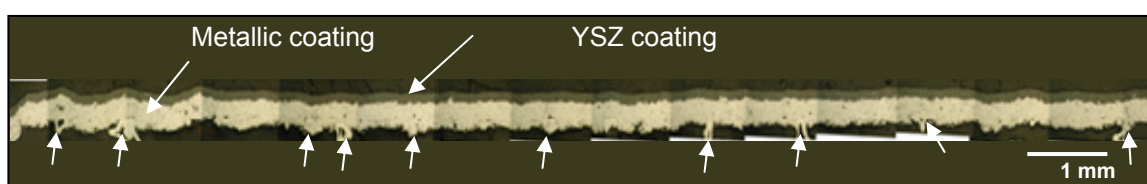
۳- نتایج

۳-۱- لایه پوشش

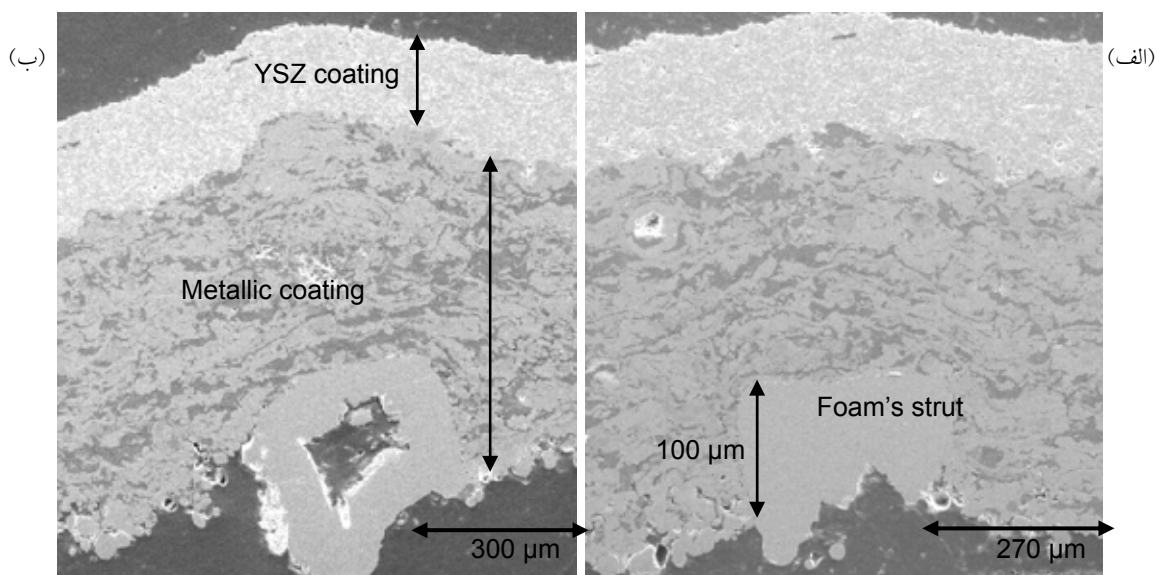
شکل (۳) یک ساختار ساندویچی شامل یک لایه فوم نیکلی با اندازه حفره ۲۰PPI در مرکز و ۲ لایه پوشش فلزی (به رنگ



شکل ۳- تصویر ساختار ساندویچی شامل یک لایه فوم نیکلی در مرکز و ۲ لایه پوشش فلزی (به رنگ تیره) و یک لایه عایق گرمایی YSZ (به رنگ روشن مشخص شده با فلش)



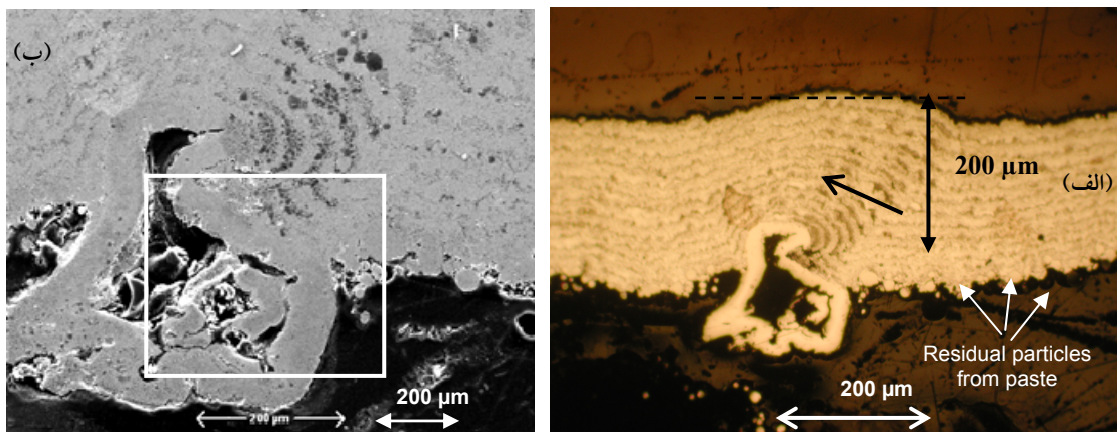
شکل ۴- تصویر میکروسکوپی نوری سطح مقطع ساختار ساندویچی. وجود بالغ بر ۱۰ نقطه تماس بین پوشش و فوم.



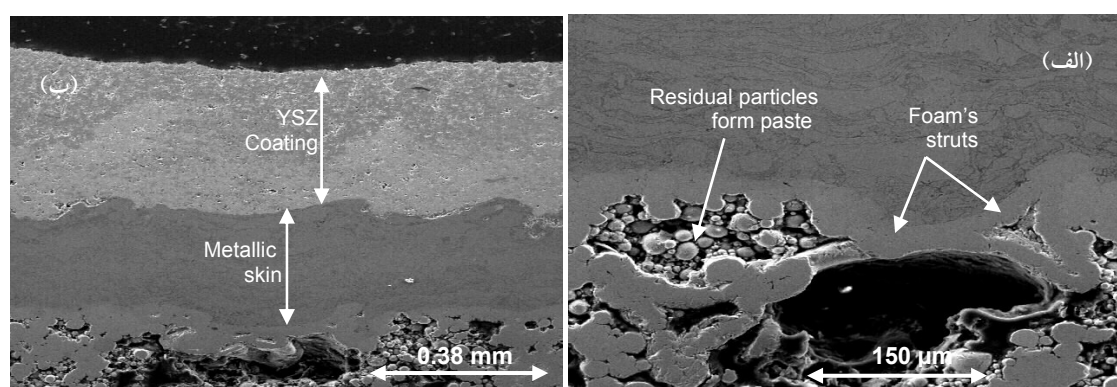
شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از محل‌های مختلف شکل ۴ شامل عایق گرمایی و لایه فلزی ایجاد شده توسط روش APS و همچنین سطح مشترک بین فوم نیکلی و لایه پوشش فلزی.

تکمیلی در خصوص بررسی زیرساختار ایجاد شده به روش پاشش گرمایی در مراجع [۷ و ۸] آورده شده است. زیرساختار نشان داده در شکل (۶) یک سطح مقطع از فصل مشترک بین فوم نیکلی و پوشش فلزی ایجاد شده به روش HVOF را نشان می‌دهد. ضخامت لایه ایجاد شده در این روش

از ضخامت لایه پوشش داده شده به داخل ساختار فوم نیکلی نفوذ کرده است که باعث افزایش لایه پوششی به فوم و همچنین افزایش استحکام ساختار ساندویچی می‌شود. تخلخل اندازه‌گیری شده از لایه پوشش داده شده فلزی حدود ۰.۴٪ است که کلاً مربوط به حفره‌های مجزا از هم است. توضیحات



شکل ۶- (الف) تصویر میکروسکوپی نوری از سوپر آلیاژ ۶۲۵ پوشش داده شده بر روی فوم نیکلی به روش HVOF. (ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مشخص شده در تصویر (الف).



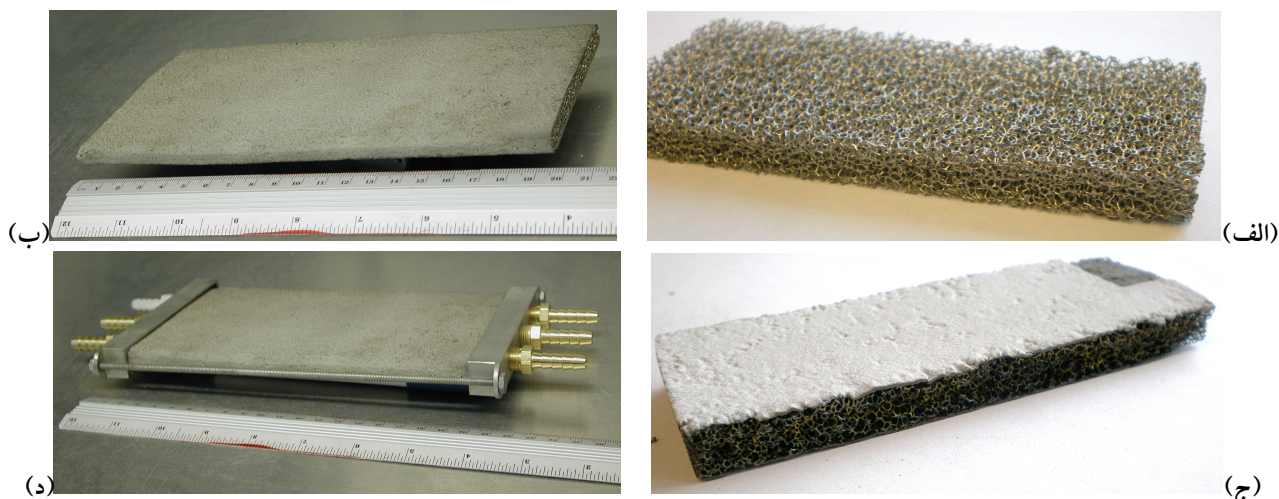
شکل ۷- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از (الف) لایه فلزی ایجاد شده به روش Wire Arc و (ب) لایه عایق گرمایی ایجاد شده به روش APS بر روی فوم نیکلی.

شکل (۷) زیرساختار لایه ایجاد شده به روی فوم نیکلی به روش قوس سیمی را نشان می‌دهد. بر روی این لایه فلزی، یک لایه عایق گرمایی YSZ به روش APS پوشش داده شده است. ضخامت لایه فلزی ایجاد شده حدود ۳۵۰ میکرون است. لایه ایجاد شده دارای چسبندگی خوبی به فوم نیکلی بوده و دارای تخلخل حدود ۲٪ است.

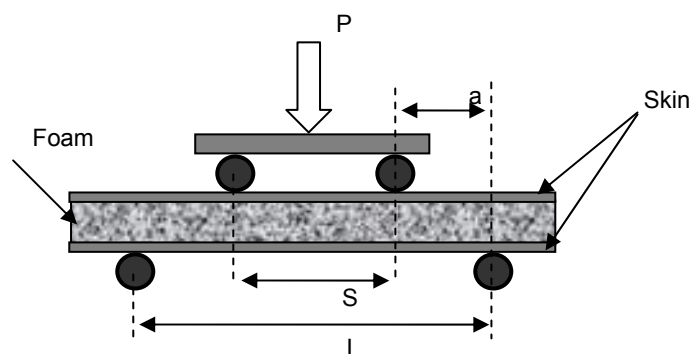
۲-۳- ساختار ساندویچی

برای ایجاد ساختارهای ساندویچی در این تحقیق از دو نوع فوم نیکلی با تخلخل ۱۰ و ۲۰ PPI استفاده شده است. شکل (۸) یک قطعه فوم نیکلی با تخلخل ۲۰ PPI و ضخامت ۱۰ mm را

حدود ۴۵۰ میکرون است. لایه ایجاد شده به خوبی به فوم نیکلی متصل شده و خالی از تخلخل است. در برخی نقاط لایه پوششی به داخل فوم نیکلی نفوذ کرده است و حتی قسمتهای تحتانی فوم نیکلی نیز نفوذ داشته است که این نشان‌دهنده چسبندگی عالی این لایه به فوم نیکلی است. لایه پوششی ایجاد شده به روش HVOF به داخل فوم نیکلی نفوذ بالاتری داشته است که این به خاطر بالا بودن سرعت حرکت ذرات پودر در حال پاشش در روش HVOF نسبت به APS می‌باشد. لایه پوشش داده شده در این روش دارای تخلخل کمتر (حدود ۱٪) است. جزییات بیشتر از ورود زیرساختار ایجاد شده در این روش در منبع [۷] آورده شده است.



شکل ۸- الف) فوم نیکلی با تخلخل ۲۰ PPI (ب) فوم ساندویچی با تخلخل داخلی ۲۰ PPI و تخلخل لایه خارجی ۱۰ PPI (ج) فوم فلزی پوشش داده شده با لایه‌های سوپر آلیاژ و اکسید زیرکونیم (د) مبدل حرارتی تولیدی جهت آزمون راندمان حرارتی



شکل ۹- شماتیکی از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای برای ساختارهای ساندویچی.

ساختارهای ساندویچی تولید شده به روش HVOF دارای استحکام بالاتری نسبت به ساختارهای تولیدی به روش APS هستند که می‌تواند ناشی از ایجاد لایه‌های پوششی فشرده تر با تخلخل کمتر توسط روش HVOF باشد. در آزمایش خمش چهار نقطه ای تنش ایجاد شده بر روی لایه پوششی، σ ، تنش برشی ایجاد شده بر روی ساختار فوم در مرکز، τ ، را برای یک ساختار ساندویچی که بر روی آن نیروی (P) اعمال شده باشد به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$\sigma = \frac{PL}{4t(d+c)b} \quad (1)$$

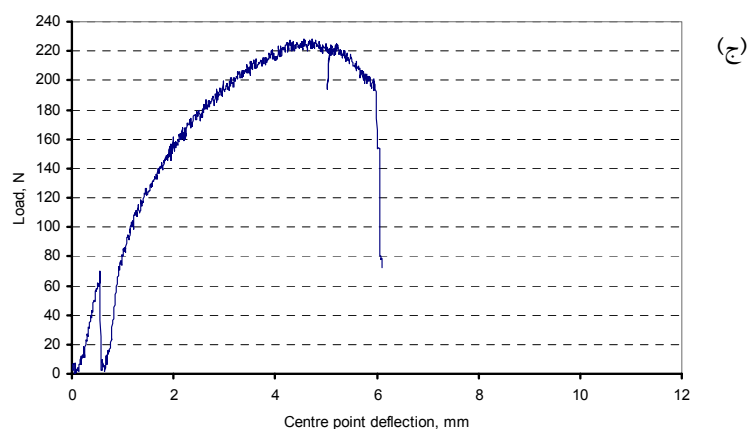
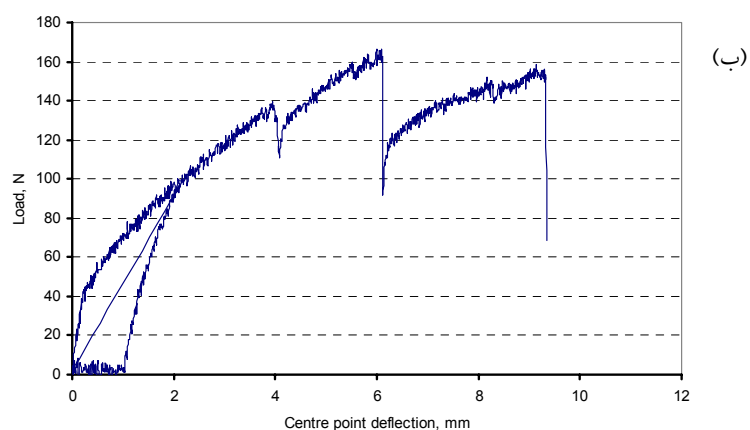
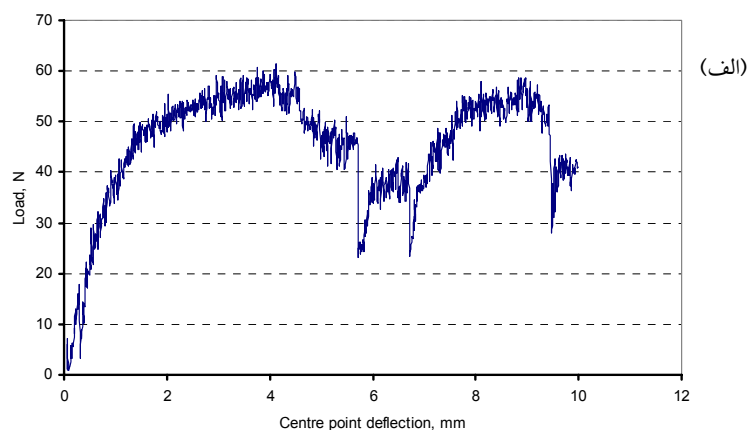
$$\tau = \frac{P}{(d+c)b} \quad (2)$$

در جایی که L فاصله بین نگهدارنده‌ها و t ضخامت لایه پوشش

قبل و بعد از عملیات پوشش‌دهی و ایجاد یک مبدل گرمایی نشان می‌دهد، برای ایجاد مبدل گرمایی دو طرف متقابل این ساختار توسط دو قطعه در پوشش حاوی سه نقطه ورود و خروج سیال پوشیده شده است.

استحکام و انعطاف‌پذیری این ساختارهای ساندویچی که حاوی فوم نیکلی در مرکز و پوشش فلزی آلیاژ اینکنل ۶۲۵ در سطح است توسط آزمون خمش چهار نقطه ای اندازه‌گیری شده است. شکل (۹) یک شماتیکی از آزمایش فوق را برای ساختارهای ساندویچی نشان می‌دهد.

شکل (۱۰) منحنی نیرو- تغییر مکان نقطه میانی را که نشان‌دهنده رفتار ساختار ساندویچی در طی فرایند آزمون خمش چهار نقطه‌ای است را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- منحنی نیرو تغییر شکل ساختار ساندویچی ایجاد شده به وسیله (الف) APS، (ب) HVOF و (ج) قوس سیمی

این آزمایش محاسبه و در جدول (۲) آورده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، ماکزیمم استحکام لایه پوششی در ساختارهای ساندویچی ایجاد شده به دو روش HVOF و قوس سیمی بیشتر از ساختارهای ایجاد به روش APS

داده شده و d ضخامت کل ساختار ساندویچی، و c ضخامت لایه مرکزی (فوم نیکلی) و b عرض ساختار ساندویچی است. [۹-۱۱]. ماکزیمم استحکام خمشی لایه پوششی و همچنین ماکزیمم استحکام برشی لایه مرکزی به دست آمده در

جدول ۲- ماکزیمم استحکام خمشی لایه پوشش داده و استحکام برشی لایه مرکزی ساختار ساندویچی.

Sandwich structure	σ max, MPa	τ max, MPa
APS	6.3±0.5	0.15±0.02
HVOF	18±8	0.5±0.2
Wire Arc	28	0.6

بر روی سطوح فوم ایجاد شده است. میزان نفوذ لایه پوششی به داخل فوم نیکلی توسط فرایند آماده‌سازی سطح قابل کنترل است. نفوذ لایه پوششی ایجاد شده به روش HVOF به داخل فوم نیکلی بیشتر از لایه‌های پوششی ایجاد شده به روش‌های APS و قوس سیمی است که این نفوذ به چسبندگی بالاتر این لایه‌ها به فوم‌های نیکلی کمک می‌کند. نتایج حاصله از آزمایش خمشی نشان‌دهنده استحکام بالاتر ساختارهای ساندویچی ایجاد شده به روش HVOF و قوس سیمی نسبت به ساختارهای ایجاد شده به روش APS است. به دلیل ایجاد لایه‌های خالی از حفره‌های به هم پیوسته بر روی سطوح فوم‌های نیکلی و دارا بودن چسبندگی عالی بین این لایه‌ها و فوم‌ها می‌توان از این نوع ساختارها برای ایجاد مبدل‌های گرمایی با راندمان انتقال گرمای بسیار عالی استفاده کرد.

است. که می‌تواند ناشی از کمتر بودن میزان حفره‌های بین لایه‌هایی در پوشش‌های ایجاد شده به روش HVOF و قوس سیمی نسبت به APS و همچنین چسبندگی بهتر لایه‌های پوششی و اسپلتها^۴ در روش HVOF و قوس سیمی باشد. در ضمن میزان ترکیبات اکسیدی ایجاد شده در حین عملیات پوشش‌دهی به روش APS (۱۰٪) بیشتر از HVOF (۴٪) برای پوشش اینکسل ۶۲۵ است. [۷].

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک روش جدید برای ایجاد پوشش‌های پاششی گرمایی بر روی ساختارهای فوم با تخلخل مختلف ابداع شده که پس از اعمال لایه خمیری بر روی سطح و عملیات ماسه پاششی قابل اجراست. لایه‌های فشرده دارای چسبندگی خوب از سوپرآلیاژ ۶۲۵ به روش‌های پاششی گرمایی

واژه نامه

1. cladding
2. diffusion bonding
3. wire-arc
4. splat

مراجع

1. Bonnet, J.-P., Topin, F., and Tadrist, L. "Flow Laws in Metal Foams: Compressibility and Pore Size Effects", *Transp Porous Med*, 2008, Vol. 73, p. 233-254.
2. Salimijazi, H.R., Pershin, L., Coyle, T. W., Mostaghimi, J., and Chandra, S. "Metal Foam Sandwich Structure as a High Temperature Heat Exchanger," *International Thermal Spray Conference & Expositions, Thermal Spray Crossing Borders*, on CD-ROM, 2008. B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.-C. Lau, C.-J. Li, R.S. Lima, and G. Montavon, Ed., June 02 - 04, 2008 Maastricht, The Netherlands, ASM International, p 230-235, 2008.
3. Boomsma, K., Poulikakos, D., and Zwick, F., "Metal Foams as Compact High Performance Heat Exchangers", *Mechanics of Materials*, Vol. 35, 1161-1176, 2003.
4. Bhattacharya, A., Calmidi, V. V., Mahajan, and R. L., "Thermophysical Properties of High Porosity Metal Foams", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 1017/1031, 2002.
5. Aziz, W., Roberts, W.L., and Rabiei, A., "A Study on Pressure Drop and Heat Transfer in Open Cell Metal Foams for Jet Engine Applications", *Materials & Design*, Vol. 28, No. 2, 569-574, 2007.
6. Dukhan, N., and Chen, K.-C. "Heat Transfer Measurements in Metal Foam Subjected to Constant Heat Flux", *Experimental Thermal and Fluid*

- Science*, Vol. 32, 624-631, 2007.
7. Sasedi, J., Coyle, T.W., Mirdamadi, S., Arabi, H., and Mostaghimi, J., Phase Formation in a Ni-50Cr HVOF Coating, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 202, p 5804-5811, 2008.
 8. Azarmi, F., Saaedi, J., Coyle, T.W., and J., Mostaghimi, "Microstructure Characterization of Alloy 625 Deposited on Nickel Foam Using Air Plasma Spraying", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 10, No. 5, p 459-565, 2008.
 9. *Cellular Solids, Structure & Properties*, Gibson, L. J., and Ashby, Pergamon Press, M.F., 1988.
 10. Choe H., and Dunand, D.C., "Synthesis, Structure, and Mechanical Properties of Ni-Al and Ni-Cr-Al Superalloy Foams", *Acta Materialia*, Vol. 52, 1283/95, 2004.
 11. Boomsma, K., and Poulikakos, D., "On the Effective Thermal Conductivity of a Three-Dimensionally Structured Fluid-Saturated Metal Foam," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, 827-836, 2001.