مجلة الدراسات التربوية والعلمية - كلية التربية - الجامعة العراقية
العدد السابع والعشرون - المجلد التاسع - علوم الفيزياء - نيسان 2026 م
doi.org/10.52866/esj.2026.09.27.07

تحسين الخواص الفيزيائية والميكانيكية لطلاء سبيكة Cu–Al–Ni المدعّم بجسيمات Al_2O_3 على الفولاذ المقاوم للصدأ باستخدام تقنية الرش الحراري باللهب

جابر مجيد حسين[1*] ، صالح يونس درويش[2]
[1 2] . قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة تكريت، تكريت، العراق
* البحث مستل من رسلة ماجستير الباحث الأول
Email: 1jaber.majed@st.tu.edu.iq, 2salih.younis@tu.edu.iq

مستخلص:

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير إضافة نسب منخفضة من أوكسيد الألمنيوم Al_2O_3 إلى مسحوق سبيكة Cu–Al–Ni على تحسين الخواص الفيزيائية للطلاء المترسب على الفولاذ المقاوم للصدأ باستخدام تقنية الرش الحراري باللهب. أظهرت النتائج أن تدعيم الطلاء بجسيمات Al_2O_3 بنسب تتراوح بين٪ 12–0 أدى إلى انخفاضٍ واضح في امتصاصية الماء والمسامية الظاهرية والحقيقية، مما يشير إلى تقليل المسامات المفتوحة وتراصٍّ أفضل للحبيبات داخل الطلاء. كما لوحظ ارتفاع كل من الكثافة الظاهرية والحقيقية مع زيادة محتوى Al_2O_3، وهو ما يعكس تحسنًا في البنية المجهرية للطبقة المترسّبة وزيادة نسبة المادة الصلبة. تؤكد هذه النتائج أن إضافة Al_2O_3 تُعدّ وسيلة فعالة في تحسين جودة الطلاءات الحرارية المعدنية، وتزيد من مقاومتها للرطوبة وتآكل العوامل البيئية، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات الصناعية التي تتطلب طلاءات عالية التماسك ومنخفضة النفاذية. بالإضافة إلى ذلك، لوحظ تحسن عام في الصلادة (صلادة فيكرز) في كل النسب المدروسة مع زيادة نسب التدعيم من Al_2O_3. تم الحصول على أعلى قيمة للصلادة عند نسبة تدعيم 12٪ من Al_2O_3، حيث بلغت حوالي 304.23 Kg/mm^2. تؤكد هذه النتائج أن إضافة Al_2O_3 تُعدّ وسيلة فعالة في تحسين جودة الطلاءات الحرارية المعدنية، وتزيد من مقاومتها للرطوبة والتآكل والاحتكاك، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات الصناعية التي تتطلب طلاءات عالية التماسك والمتانة.

الكلمات المفتاحية: سبيكة Cu–Al–Ni، أوكسيد الالمنيوم، الرش الحراري باللهب، الخصائص الفيزيائية، الخصائص الميكانيكية.

Improving the physical and mechanical properties of Cu–Al–Ni alloy coating reinforced with Al_2O_3 particles on stainless steel using flame thermal spraying technology

Jaber Majeed Hussen1* , Salih Y. Darweesh2
1,2 Department of physics, Collage of Sciences, Tikrit University, Tikrit, Iraq.
Email: 1jaber.majed@st.tu.edu.iq , 2 salih.younis@tu.edu.iq

Abstract :

This study aimed to evaluate the effect of adding low percentages of aluminum oxide (Al_2O_3) to Cu–Al–Ni alloy powder on improving the physical properties of the coating deposited on stainless steel using flame-spraying technology. The results showed that reinforcing the coating with Al_2O_3 particles at percentages ranging from 0% to 12% resulted in a significant decrease in water absorption and apparent and true porosity, indicating a reduction in open pores and better particle compaction within the coating. An increase in both apparent and true density was also observed with increasing Al_2O_3 content, reflecting an improvement in the microstructure of the deposited layer and an increase in solids content. These results confirm that Al_2O_3 addition is an effective method for improving the quality of metallized heat-treated coatings, increasing their resistance to moisture and corrosion from environmental factors, making them suitable for industrial applications requiring high-strength, low-permeability coatings. In addition, an overall improvement in hardness (Vickers hardness) was observed at all studied ratios with increasing Al_2O_3 reinforcement. The highest hardness value was obtained at a 12% Al_2O_3 reinforcement ratio, reaching approximately 304.23 kg/mm^2. These results confirm that the addition of Al_2O_3 is an effective way to improve the quality of metal thermal coatings, increasing their resistance to moisture, corrosion, and abrasion, making them suitable for industrial applications requiring high-strength and durable coatings.

Keywords: Cu–Al–Ni alloy; Aluminum oxide (Al_2O_3); Flame thermal spraying; Physical properties; Mechanical properties.

1- المقدمة:

يعد تحسين الخواص السطحية للمواد الهندسية من الاتجاهات البحثية المهمة في التطبيقات الصناعية التي تتطلب مقاومة عالية للتآكل والاحتكاك ودرجات الحرارة المرتفعة. ويُعد الفولاذ المقاوم للصدأ (Stainless Steel) من أكثر المواد استخدامًا في البيئات الصناعية بفضل مقاومته الجيدة للصدأ، إلا أنّ خواصه السطحية قد لا تكون كافية في ظروف التشغيل القاسية، مما يستلزم تعزيز أدائه عبر تطبيق طلاءات معدنية أو سيراميكية ملائمة .[1]

تعد تقنية الرش الحراري باللهب (Flame Thermal Spraying) إحدى التقنيات الاقتصادية والفعّالة لترسيب طبقات معدنية أو مركبة على الأسطح بهدف تحسين مقاومتها للتآكل والاهتراء. وتمتاز هذه التقنية بسهولة التشغيل وإمكانية التحكم في سماكة الطلاء ونوع المادة المُرشوشة، إضافة إلى ملاءمتها للمواد المعدنية التي لا تتحمل درجات حرارة عالية جدًا أثناء عمليات الطلاء الأخرى. [2,3]

وفي هذا السياق، تُعتبر سبائك Cu–Al–Ni من المواد الواعدة في تطبيقات الطلاء بسبب امتلاكها خصائص ميكانيكية جيدة، واستقرار حراري، وقدرة عالية على مقاومة التآكل، فضلاً عن بنيتها المجهرية التي تجمع بين المتانة والصلابة النسبية. كما تمتاز هذه السبيكة بخواصها الشكلية (Shape Memory)، مما يجعلها خيارًا مناسبًا في التطبيقات التي تتطلب بُنى سطحية مستقرة .[4,5]

ومن جهة أخرى، تُسهم جسيمات أوكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) في تحسين أداء الطلاء عبر زيادة صلادته، وتقليل معدلات التآكل، وتقوية البنية المجهرية نتيجة دورها كأداة تثبيت للحبيبات داخل المصفوفة المعدنية. وقد أثبتت الدراسات أن إضافة نسب صغيرة من (Al_2O_3) أقل من 12٪ يمكن أن تقلل المسامية وتزيد الكثافة الظاهرية وتحسّن التلاصق بين جزيئات الطلاء .[6,7]

وبذلك فإن دمج نسب خلط منخفضة من Al_2O_3 داخل مسحوق سبيكة Cu–Al–Ni وترسيبها على الفولاذ المقاوم للصدأ باستخدام تقنية الرش الحراري باللهب يُعدّ توجهاً فعالاً للحصول على طبقات محسّنة في الخواص الفيزيائية. وتشمل هذه الخواص: المسامية، الكثافة الحقيقية، الكثافة الظاهرية، الامتصاصية المائية، واستقرارية البنية السطحية. ويمثل فهم العلاقة بين نسب إضافة Al_2O_3 والخواص الناتجة خطوة أساسية للوصول إلى تحسينات ملموسة في أداء الطلاء في التطبيقات الصناعية المختلفة .[8,9]

يهدف هذا البحث إلى تقييم تأثير نسب الخلط المنخفضة من جسيمات أوكسيد الألمنيوم Al_2O_3 المضافة إلى مسحوق سبيكة Cu–Al–Ni على تحسين الخواص الفيزيائية والميكانيكية للطلاء المترسب على الفولاذ المقاوم للصدأ باستخدام تقنية الرش الحراري باللهب. ويركز العمل على تحليل خمس خصائص فيزيائية أساسية تشمل المسامية، الكثافة الحقيقية، الكثافة الظاهرية، الامتصاصية المائية، وكذلك على الصلادة واستجابة البنية السطحية للتعديل بالمواد المقوّية، بهدف تحديد النسبة المثلى من Al_2O_3 القادرة على تحقيق أفضل أداء في تطبيقات الحماية السطحية.

2- الجانب النظري:

2-1 الخصائص الفيزيائية

الكثافة الظاهرية هي نسبة كتلة المادة إلى حجمها الظاهري الكلي، والذي يشمل المواد الصلبة بالإضافة إلى كل المسامات المفتوحة والمغلقة. تُستخدم هذه الخاصية لتقييم درجة التماسك الداخلي للمواد والطلاءات الناتجة عن عمليات الرش أو التلبيد [3].

$$P_a = \frac{\rho_w \times W_d}{W_s - W_{sub}} \dots\dots\dots\dots (1)$$

الكثافة الحقيقية تُعرّف بأنها كتلة المادة الصلبة فقط مقسومة على الحجم الحقيقي للمواد الصلبة دون تضمين أي مسامية. تُستخدم الكثافة الحقيقية كمرجع أساسي لحساب باقي الخواص الحجمية مثل المسامية والكثافة الظاهرية [4].

$$P_t = \frac{\rho_w \times W_d}{W_d - W_{sub}} \dots\dots\dots\dots (2)$$

المسامية الظاهرية هي النسبة بين حجم المسامات المفتوحة داخل المادة وبين الحجم الكلي للعينة، وتشمل فقط المسامات القابلة لاختراق السوائل، دون احتساب المسامات المغلقة. تعد هذه الخاصية ضرورية لتقييم جودة المواد الملبدة والطلاءات لأنها تؤثر بشكل مباشر في الامتصاصية، التآكل، والمتانة [1].

$$P_a(\%) = \left[\frac{(Ws - Wd)}{W_s - W_{sub}}\right] \times 100 \dots\dots\dots\dots (3)$$

المسامية الحقيقية تمثل المجموع الكلي للمسامات المفتوحة والمغلقة داخل المادة، وهي قياس أدق للبنية المجهرية الداخلية مقارنة بالمسامية الظاهرية، وتُستخدم بشكل واسع في وصف المواد المسامية والهياكل المتلبدة [2].

$$P_t(\%) = \left[1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right] \times 100 \dots\dots\dots\dots (4)$$

الامتصاصية المائية هي النسبة المئوية للزيادة في كتلة العينة بعد تشبعها بالماء مقارنة بكتلتها الجافة، وتعكس قدرة المادة على امتصاص السوائل عبر المسامات المفتوحة. تُعد هذه الخاصية معيارًا مهمًا لتقييم جودة المواد السيراميكية والطلاءات الحرارية [5][6].

$$WA(\%) = \left[\frac{(W_s - W_d)}{W_d}\right] \times 100 \dots\dots\dots\dots (5)$$

حيث ان ρ_w هي كثافة الماء، W_d وزن العينة الجافة، و W_s وزنها بعد الإشباع بالماء، و W_{sub} وزنها عند التعليق في الماء، ρ_s هي الكثافة الحقيقية للمادة.

2-2 الخصائص الميكانيكية

يمكن تعريف صلادة فيكرز (Vickers hard-ness) على انها هي مقياس لمقاومة المادة للخدش أو التشوه الدائم تحت تأثير القوة المسلطة. تُقاس صلادة فيكرز عن طريق ضغط رأس مخروطي رباعي الزوايا (pyramidal diamond indenter) على سطح العينة بقوة محددة، ثم قياس متوسط طول القطرين الناتجين عن الاثر الناتج على السطح، وتعتمد صلادة المواد على نوع القوة الرابطة بين الجزيئات أو الذرات، نوع السطح، درجة الحرارة العالية والمعاملة الحرارية. والتي يمكن حسابها من خلال المعادلة الاتية[7]:

$$HV = 1.854\ P / d^2 \dots\dots\dots\dots (6)$$

حيث ان:

HV– صلادة فيكرز، p– مقدار القوة المسلطة بوحدة (Kg)، d– يمثل متوسط القطر للأثر الهرمي

بوحدة (mm^2).

3- طريقة العمل:

3-1 تحضير المواد والعينات

بدأت المرحلة الأولى بتحضير العينات المعدنية من فولاذ Stainless Steel بأبعاد مناسبة للفحص cm(2*2). بعد تصنيعها، تم تنظيف سطح العينات باستخدام الكحول لإزالة الزيوت والشوائب، ثم جُفِّفت بالكامل. بالتوازي، تم تحضير المساحيق المستخدمة في الطلاء عن طريق وزن مسحوق Cu–Al–Ni الأساسي ومسحوق المادة الداعمة أوكسيد الألمنيوم Al_2O_3 باستخدام ميزان إلكتروني 0.0001 g. علما ان الاحجام الحبيبة لجميع المواد المستخدمة كانت اقلمن m75µ بعد ذلك، خُلِطَت المساحيق بالنسب المعتمدة في البحث wt٪(0.5,1,1.5,2,2.5)، ثم جُفِّفت عند 50°C لمدة 20 دقيقة في فرن Muffle Furnace للتخلص من الرطوبة ومنع تكتل الحبيبات، وتُرِكت لتبرد داخل الفرن لمدة 10 دقائق قبل الاستخدام.

3-2 عملية الرش الحراري والتلبيد

نفذت عملية الطلاء باستخدام جهاز الرش الحراري باللهب ROTOTEC 80 من إنتاج شركة Castolin + Eutectic. ثُبِّتَت العينات على حامل مخصص، وضُبِطَت مسافة الرش القياسية بين فوهة المسدس وسطح العينة (تُفضل 120–150 mm. استُخدم خليط غازي من الأوكسجين O_2 بضغط 4 bar والإستيلين C_2H_2 بضغط 0.7 bar ، حيث تصل درجة حرارة اللهب الناتج إلى حوالي 2000°C. استغرقت مدة الرش لكل عينة 3 دقائق، مع فاصل زمني قدره 5 ثوانٍ بين كل رشة والأخرى. بعد اكتمال عملية الرش، تم إدخال العينات إلى الفرن Mullf-12 لإجراء عملية التلبيد الحراري (Sintering) عند C° (1200) لمدة h(24)، بهدف تحسين الترابط بين جزيئات الطلاء وتقليل المسامية وزيادة التماسك الداخلي.

3-3 الفحوصات الفيزيائية

بعد التلبيد وتبريد العينات في الهواء، أُجريت الفحوصات الفيزيائية على طبقات الطلاء وفقاً للمعايير القياسية، وهي:

حساب الوزن الجاف W_{dry}: تم تجفيف العينات عند 110°C ثم وزنها بدقة.

حساب الوزن المشبع W_{sat}: غُمرت العينات بالماء لمدة 24 ساعة للسماح لها بالتشبع الكامل، ثم أُعيد وزنها وهي مشبعة.

حساب الوزن المغمور W_{imm}: تم وزن العينات أثناء غمرها بالكامل داخل الماء.

حساب الامتصاصية المائية (٪): حُسبت الامتصاصية المائية كنسبة مئوية بناءً على قيمتي الوزن المشبع والوزن الجاف، وفقاً للمواصفة ASTM C20.

حساب الكثافة والمسامية الظاهرية والحقيقية: حُسبت الكثافة الظاهرية والحقيقية والمسامية الظاهرية والحقيقية باستخدام العلاقات الرياضية المبينة في الجزء النظري.

3-3 الفحوصات الميكانيكية

تم اجراء اختبار الصلادة المايكروية نوع فيكرز في جهاز الصلادة نوع (METKON) ، فرنسي المنشأ والذي يتكون من اداة التغلغل والتي هي عبارة عن رأس مجهري مدبب بشكل هرم ماسي مربع القاعدة تتقاطع مستوياته عند القمة بزاوية °(136) حيث يتم تثبيت العينة تحت هذه الاداة لذلك تم تقطيع العينات بشكل مربع طول ضلعة cm(2*2)

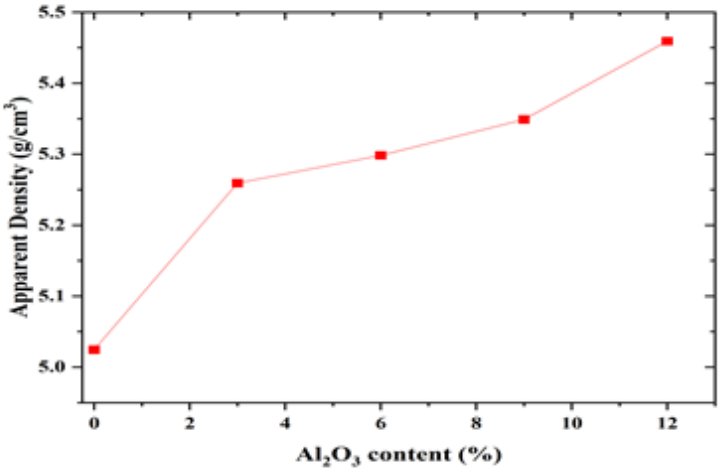
وبسمك cm(1)حيث سلط حمل بمقدار (N50) وبزمن (20)sec يتم حساب رقم فيكرز للصلادة عن طريق قياس اطوال القطرين ومعدل القيمة لهما.

4- النتائج والمناقشة:

4-1 الخصائص الفيزيائية

يبين الشكل (1) زيادة تدريجية في الكثافة الظاهرية مع ارتفاع نسبة Al_2O_3، ويُعزى هذا التحسن إلى عدة عوامل، أبرزها أنّ الجسيمات السيراميكية تمتلك كثافة نوعية أعلى نسبيًا من السبيكة المعدنية نفسها، مما يؤدي إلى زيادة الكتلة النوعية الكلية للطلاء. إضافةً إلى ذلك، فإن Al_2O_3 يعمل كعامل تعبئة (Filler) يحدّ من حجم المسامات المفتوحة، وهو ما يؤدي إلى تقليل الحجم الظاهري للعينات وزيادة الكثافة المقاسة، وهذا يتفق مع النتائج التي توصل إليها Wang وآخرون بأن دمج الجسيمات السيراميكية بنسب صغيرة داخل الطلاءات المعدنية يؤدي إلى تحسين التراص الداخلي، وبالتالي زيادة الكثافة الظاهرية .[10]

كما أن زيادة الكثافة الظاهرية تعكس جودة ترابط الجزيئات أثناء عملية الرش الحراري باللهب، إذ تعمل درجة الحرارة العالية على إذابة السبيكة جزئيًا، بينما تبقى جسيمات Al_2O_3 غير منصهرة بالكامل، لتملأ الفجوات بين القطرات المعدنية المنصهرة، وهذا ما أكدته دراسات على الطلاءات الحرارية المركبة .[11]



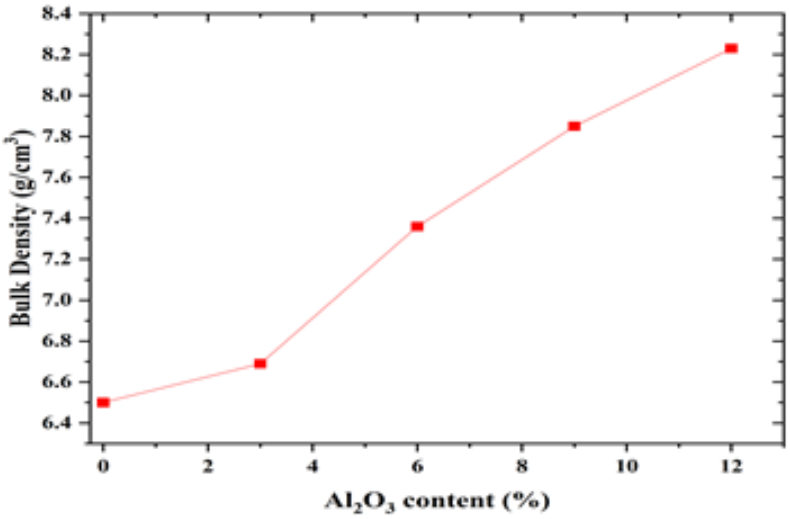
الشكل (1): الكثافة الظاهرية لطلاءات Cu-Al-Ni كدالة لنسب خلط Al_2O_3.

يبين الشكل (2) أن الكثافة الحقيقية للطلاء تزداد أيضًا مع زيادة نسب الخلط من Al_2O_3، ولكن بمعدل أقل من الكثافة الظاهرية. ويُعزى ذلك إلى أن الكثافة الحقيقية تعتمد على حجم المادة الصلبة فقط دون المسامات المغلقة، وعليه فإن الزيادة في هذا النوع من الكثافة دليل على أن الجسيمات السيراميكية قد اندمجت داخل البنية المجهرية للمادة الصلبة نفسها، وليس فقط داخل المسامات المفتوحة.

وتشير هذه النتائج إلى تحسن في البنية الدقيقة

Microstructure للطلاء، حيث تعمل جسيمات Al_2O_3 كعوامل تقوية (Reinforcements) تحدّ من نمو الحبيبات أثناء الترسيب الحراري، ما يؤدي إلى بنية أكثر استقرارًا وأقل فراغًا، وهو ما أكدته أبحاث منشورة حول الطلاءات الحرارية المركبة Al_2O_3-metal composites [12].

وتدعم هذه الزيادة في الكثافة الحقيقية النتائج اللاحقة المتعلقة بانخفاض المسامية الحقيقية والظاهرية، كما يظهر في الشكلين (3) و (4).

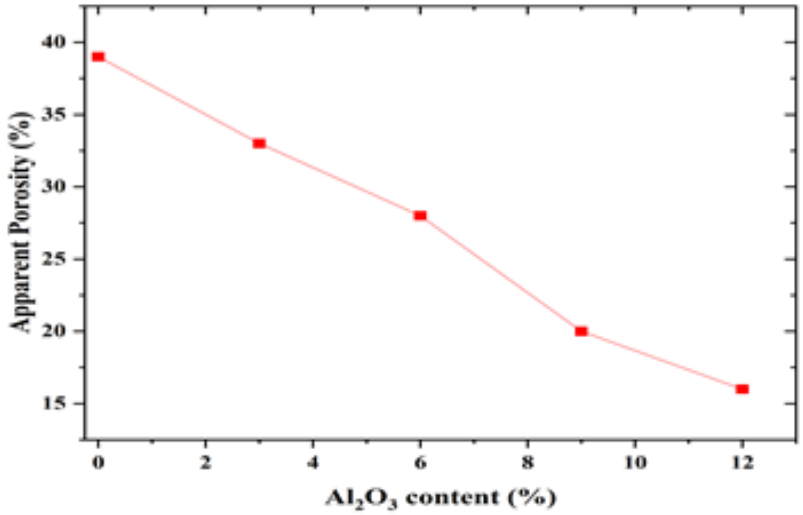


الشكل (2): التباين الحقيقي في الكثافة لطلاءات Cu–Al–Ni المخلوطة بنسب منخفضة من Al_2O_3.

تظهر بيانات الشكل (3) انخفاضًا كبيرًا في المسامية الظاهرية مع زيادة نسب Al_2O_3. ويرجع ذلك إلى أن الجسيمات السيراميكية تنجذب إلى الفراغات المفتوحة أثناء عملية الرش نتيجة لارتفاع درجة الحرارة وقوة الدفع الناتجة من اللهب، مما يؤدي إلى تقليل القنوات المسامية المفتوحة التي تسمح بنفاذ الماء والهواء.

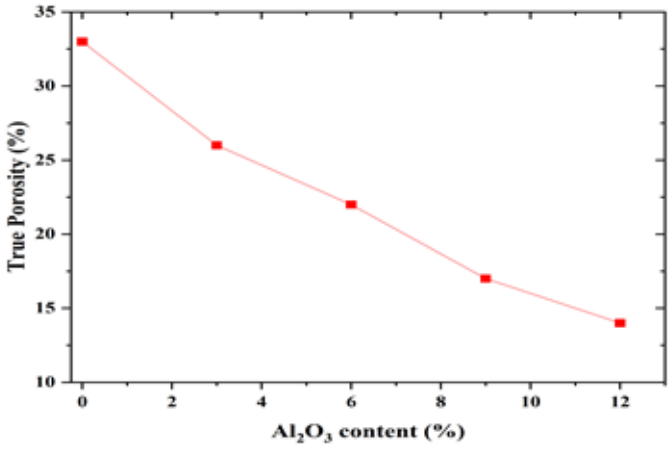
ويُعد هذا الانخفاض مؤشرًا واضحًا على تحسن جودة الطلاء بطبقات متماسكة ومنخفضة النفاذية، وهو ما يتفق مع تقرير Singh وغيره الذي بيّن أن إضافة جسيمات سيراميكية بنسب صغيرة يؤدي إلى تقليل المسامية بنسبة قد تصل إلى 40٪ في بعض الطلاءات الحرارية [13–15]

كما أن الانخفاض في المسامية الظاهرية يتوافق مع الانخفاض الذي لوحظ في الامتصاصية المائية (5)، مما يعزز الارتباط بين هاتين الخاصيتين ودورهما في تقييم أداء الطلاء[16,17] .



الشكل (3): المسامية الظاهرة (٪) لطلاءات Cu–Al–Ni المرشوشة باللهب عند نسب خلط مختلفة Al_2O_3.

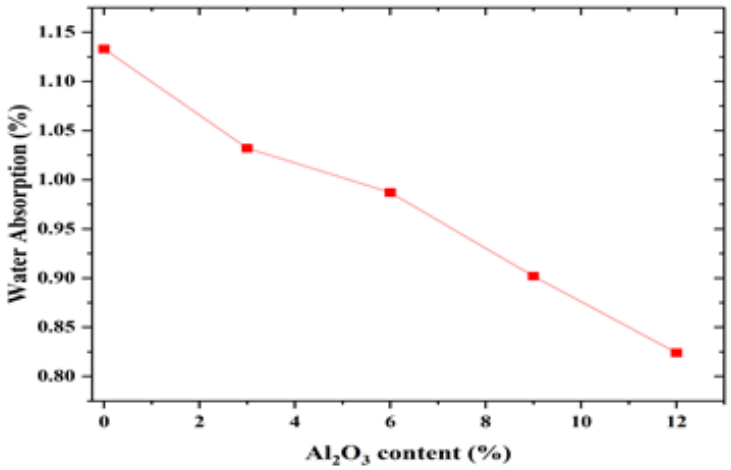
يبين الشكل (4) انخفاضًا ملحوظًا في المسامية الحقيقية، وإن كان الانخفاض أقل من المسامية الظاهرية، ويرجع ذلك إلى أن الجسيمات السيراميكية تملأ المسامات المفتوحة بشكل أكبر من المسامات المغلقة. ومع ذلك، فإن انخفاض المسامية الحقيقية يؤكد حصول تحسن عميق في البنية المجهرية الداخلية للطلاء، وليس فقط في السطح.



الشكل (4): المسامية الحقيقية لطلاءات Cu–Al–Ni مع زيادة محتوى Al_2O_3.

يوضح الشكل (5) أن امتصاصية الماء للعينات المطلية بسبيكة Cu–Al–Ni تنخفض بشكل واضح مع زيادة نسب الخلط من جسيمات Al_2O_3. ويمكن تفسير هذا السلوك بأن إضافة الجسيمات السيراميكية ذات الصلادة العالية تعمل على ملء الفراغات المفتوحة داخل طبقة الطلاء، مما يؤدي إلى انخفاض المسامات السطحية القابلة لاختراق الماء. فكلما ارتفع محتوى Al_2O_3 زادت كثافة المادة الصلبة داخل المصفوفة المعدنية، الأمر الذي انعكس على تقليل قدرة الطلاء على امتصاص الماء، وهو ما يتوافق مع الدراسات التي أكدت أن إضافة الأكاسيد السيراميكية داخل الطلاءات الحرارية تُعدّ من أكثر الطرق فعالية في تقليل النفاذية وزيادة مقاومة الرطوبة [19,18].

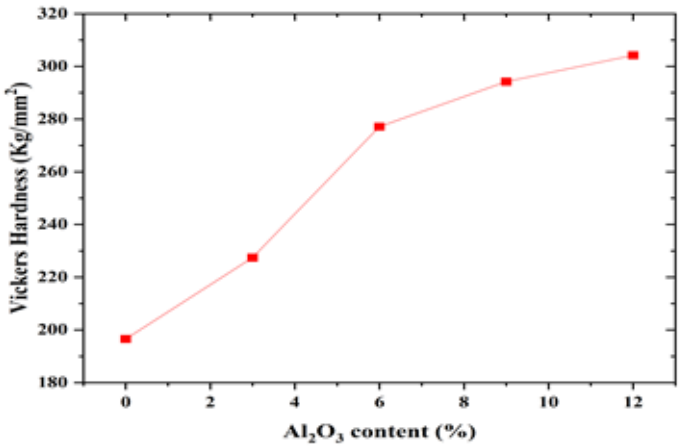
كما أن انخفاض الامتصاصية يرتبط ارتباطًا مباشرًا بزيادة الكثافة الظاهرية والحقيقية، كما يظهر سابقا في الشكلين (1) و(2)، ما يؤكد أن Al_2O_3 ساهم في تقليل المسامية المفتوحة وزيادة التراص بين الحبيبات. وقد أشارت دراسات مشابهة للطلاءات المركّبة إلى أن تقليل الامتصاصية يُعد مؤشرًا مهمًا على تحسن التلاصق الداخلي وفقدان القنوات المسامية التي تسمح بانتقال السوائل داخل البنية المجهرية [21,20].



الشكل (5): تباين امتصاص الماء مع نسب خلط مختلفة من Al_2O_3 في طلاءات Cu–Al–Ni المحضرة بالرش الحراري باللهب.

4-2 صلادة فيكرز

يوضح الشكل (6) التباين الحاصل في صلادة فيكرز (Hv) للطلاءات المدروسة مع نسب تدعيم مختلفة من Al_2O_3 على التوالي. لوحظ تحسن عام في الصلابة في كل النسب مع زيادة نسب التدعيم من Al_2O_3، حيث زادت قيم الصلادة تدريجيًا مع زيادة محتوى Al_2O_3 ان اعلى قيمة للصلادة تم الحصول عليها هي عند نسبة التدعيم 12٪ وكانت بحدود($304.23 Kg/mm^2$) ، والذي يعزى الى ان التكتل الناتج من المادة المدعمة وهو نتيجة لتجمع ذرات الكروم بمكان واحد دون باقي الامكان والذي يعمل بشكل سلبي على الصلادة والذي بدوره يعيق عملية التشابك الميكانيكي لذرات المادتين الاساد والتدعيم [22-24].



الشكل (6): تباين قيم صلادة فيكرز مع نسب خلط مختلفة من Al_2O_3 في طلاءات Cu–Al–Ni المحضرة بالرش الحراري باللهب.

5- الاستنتاجات:

يتبين من نتائج هذا البحث إلى أن إضافة نسب منخفضة من أوكسيد الألمنيوم Al_2O_3 إلى مسحوق سبيكة Cu–Al–Ni المستخدم في طلاء الفولاذ المقاوم للصدأ بتقنية الرش الحراري باللهب قد أدّت إلى تحسينات واضحة في جميع الخواص الفيزيائية المدروسة. فقد انخفضت امتصاصية الماء والمسامية الظاهرية والحقيقية بشكل ملحوظ مع زيادة محتوى Al_2O_3، مما يؤكد الدور الفعال للجسيمات السيراميكية في ملء القنوات المسامية وتكثيف بنية الطلاء وتقليل نفاذية السوائل. كما أظهرت الكثافة الظاهرية والحقيقية ارتفاعًا تدريجيًا مع زيادة نسب الخلط، وهو ما يعكس زيادة المادة الصلبة وتناقص الفراغات الداخلية وتطورًا في البنية المجهرية للطبقة المترسّبة. وتوصي الدراسة بأن نسب الخلط بين (0,3,6,9,12)wt.٪ تُعدّ الأكثر ملاءمة لتحقيق أفضل توازن بين الكثافة المنخفضة للمسامية واستقرار البنية، علاوة على ذلك، لوحظ تحسن عام في صلادة فيكرز (Hv) مع زيادة نسب التدعيم من Al_2O_3، حيث بلغت أعلى قيمة للصلادة عند نسبة التدعيم 12٪، مما يشير إلى زيادة مقاومة السطح للتشوه الدائمي. وبناءً على هذه النتائج، تُعد نسب الخلط المدروسة الأكثر ملاءمة لتحقيق أفضل توازن بين الكثافة العالية والصلادة واستقرار البنية، مما يجعل هذه الطلاءات مناسبة للتطبيقات الصناعية التي تتطلب طبقات ذات تماسك عالٍ ومتانة ومقاومة ممتازة للرطوبة والتآكل .

المصادر:

1. R. M. German, Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles, Elsevier, 2014.
2. M. F. Ashby and D. R. H. Jones, Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design, 4th ed., Butterworth-Heinemann, 2012.
3. W. D. Callister and D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 9th ed., Wiley, 2014.
4. J. F. Shackelford, Introduction to Materials Science for Engineers, 8th ed., Pearson, 2015.
5. ASTM C20-00, "Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick," ASTM International, 2015.
6. T. S. Sudarshan and M. Jeandin, "Composite coatings by thermal spray," Surface Engineering, vol. 18, no. 2, pp. 120–128, 2002.
7. R. S. Lima and C. C. Berndt, "Thermal spray coatings," Surface & Coatings Technology, vol. 201, no. 8, pp. 4699–4706, 2006.
8. L. Pawlowski, The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings, 2nd ed., Wiley, 2008.
9. M. Fukumoto et al., "Porosity and mechanical properties of flame-sprayed coatings," Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions, pp. 433–438, 2007.
10. M. F. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design, 4th ed., Butterworth-Heinemann, 2010.
11. R. Lima and B. Marple, "Influence of spray parameters on the porosity of ceramic coatings," Surface & Coatings Technology, vol. 200, pp. 3428–3435, 2006.
12. A. Gupta et al., "Effect of alumina addition on microstructure and wettability of composite coatings," Ceramics International, vol. 46, pp. 11255–11263, 2020.
13. Jaleel, N. I., & Darweesh, S. Y. (2025, November). Influence of nano-silica and graphite on the mechanical properties and porosity of copper-based composites fabricated by powder metallurgy. In AIP Conference Proceedings (Vol. 3395, No. 1, p. 020009). AIP Publishing LLC.
14. L. Wang et al., "Densification mechanisms in metal–ceramic thermal spray coatings," Materials & Design, vol. 167, p. 107630, 2019.
15. Majeed, Z. N., Mohammed, T. A., & Darweesh, S. Y. (2025). The effect of adding nano-nickel oxide on the physical properties of (Al-SiO2) by powder method. Journal of Theoretical and Applied Physics, 19(5).
16. K. Annavarapu, "Strengthening mechanisms in Al_2O_3-reinforced metallic coatings," J. Mater. Eng. Perform., vol. 30, pp. 4217–4226, 2021.
17. [17]Salih, W. A., Allah, S. M. A., & Darweesh, S. Y. (2023). Effect of spray angle

on some physical properties of a ceramic system produced by thermal spraying coating. Al-Bahir Journal for Engineering and Pure Sciences, 2(2), 4.

18. [18] Ahmed, M. N., Daham, N. A., & Darweesh, S. Y. (2024, February). Structural and mechanical properties for (Ni-WC) system by using thermal spray. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2885, No. 1, p. 020013). AIP Publishing LLC.
19. [19] Dahham, A. T., Jassim, T. Q., & Darweesh, S. Y. (2023, December). Retraction: Study the effect of adding nano-magnesium oxide on some structural and mechanical properties of (Cu-10% Fe). In AIP Conference Proceedings (Vol. 2977, No. 1, p. 040031). AIP Publishing LLC.
20. [20] Wu, F., Zheng, J., Ou, X., & Liu, M. (2019). Two in one: modified polyurethane foams by dip-coating of halloysite nanotubes with acceptable flame retardancy and absorbency. Macromolecular Materials and Engineering, 304(10), 1900213.
21. [21] Liu, Y. C., Lin, G. S., Wang, J. Y., Cheng, C. S., Yang, Y. C., Lee, B. S., & Tung, K. L. (2018). Synthesis and characterization of porous hydroxyapatite coatings deposited on titanium by flame spraying. Surface and Coatings Technology, 349, 357-363.
22. [22] Antar, R. S., Darweesh, S. Y., & Ridha, F. W. (2024). Production of a double cermet coating to treatment of the turbine blades. Engineering Research Express, 6(1), 015407.
23. [23] Peng, C., Huang, A., Ma, X., Zhong, J., Chen, G., Luo, W., … & Dai, L. (2023). Transparent and flame-retardant hybrid protective coating with high surface hardness, yet foldability. Progress in Organic Coatings, 175, 107346.
24. [24] Abdullah, M. A., Hadi, R. Z., & Darweesh, S. Y. (2025). Protection of turbine blades by adding metals to ceramic materials using flame coating method. Journal of King Saud University–Engineering Sciences, 37(7), 54.