مجلة الدراسات التربوية والعلمية - كلية التربية - الجامعة العراقية
العدد السابع والعشرون - المجلد الحادي عشر - علوم الفيزياء - آيار 2026 م
doi.org/10.52866/esj.2026.11.27.03

دراسة الخواص الفيزيائية والميكانيكية لسبيكة التيتانيوم-الموليبدينيوم ومقارنتها مع التيتانيوم النقي

عبدالملك سلطان مرعي [1] ، عدنان محمود خالد[2]
[1,2]جامعة تكريت ، كلية العلوم ، قسم الفيزياء
E-mail (1) . abdalmalek.sultan@st.tu.edu.iq Email (2) . adnan.mahmod@tu.edu.iq

مستخلص:

تتناول هذه الدراسة إلى أن المعالجة الحرارية (التلبيد) عند 1150 C° تُعد العامل الأكثر حسمًا في الارتقاء بالخصائص الميكانيكية والفيزيائية لعينات التيتانيوم النانوي، حيث نجحت في خفض المسامية ورفع الكثافة النسبية بنسبة 30٪، مما أدى لزيادة حمل الكسر والصلادة مقارنة بالعينة الخام الهشة. ومن جهة أخرى، ساهمت إضافة الموليبدنيوم بنسبة 30 wt.٪ في تعزيز صلادة السبيكة واستقرار الطور β، وهو ما حقق توازنًا بنيويًا بين الصلابة والمتانة، ورغم أن الموليبدنيوم رفع الكثافة الكلية وحسّن الترابط بين الجسيمات، إلا أن التيتانيوم النقي الملبد ظل متفوقًا في مقاومة الأحمال القصوى؛ مما يؤكد أن التكامل بين عمليات التكثيف الحراري والتدعيم بالعناصر السبائكية هو المفتاح لتحسين الأداء الميكانيكي طويل الأمد لسبائك التيتانيوم المتطورة.

الكلمات المفتاحية : تيتانيوم نانوي (Ti NPs)، تلبيد ، موليبدنيوم (Mo)، مقاومة الكسر ، صلادة فيكرز ، سبائك التيتانيوم .

Study of the Physical and Mechanical Properties of Titanium-Molybdenum Alloy and its Comparison with Pure Titanium

Abdulmalek Sultan Merie [1] , Adnan Mahmoud Khalid [2]
E-mail (1) . abdalmalek.sultan@st.tu.edu.iq
Email (2) . adnan.mahmod@tu.edu.iq

Abstract :

This study demonstrates that heat treatment (sintering) at 1150°C is the most critical factor in enhancing the mechanical and physical properties of nano-titanium samples. This process successfully reduced porosity and increased relative density by 30%, resulting in a significant improvement in fracture load and hardness compared to the brittle green compact. Furthermore, the addition of 30 wt% Molybdenum enhanced the alloy's hardness and promoted beta-phase stability, thereby achieving a structural balance between hardness and toughness. Although Molybdenum increased the overall density and improved inter-particle bonding, the pure sintered titanium exhibited superior resistance to maximum loads. These findings confirm that the integration of thermal densification and alloying is key to optimizing the long-term mechanical performance of advanced titanium alloys.

Keywords: Titanium Nanoparticles (Ti NPs), Sintering, Molybdenum (Mo), Fracture Resistance, Vickers Hardness, Titanium Alloys.

1- المقدمة

تُعد السبائك المعدنية من الركائز الأساسية في التطبيقات الهندسية والصناعية المتقدمة، لا سيما في قطاعات الطيران، والطب الحيوى، وعلوم المواد؛ ويعزى ذلك إلى ما تظهره من خصائص فيزيائية وميكانيكية فائقة. وفي هذا السياق، تبرز سبيكة التيتانيوم-الموليبدنيوم (Ti-Mo) كإحدى المواد ذات الأداء الوظيفي العالي (High-performance materials)؛ نظرًا لما تتمتع به من سمات بنيوية فريدة، تشمل المتانة العالية، والمقاومة الاستثنائية للتآكل، والكفاءة في التوصيل الحراري، بالإضافة إلى استقرار خواصها تحت ظروف الإجهاد الحراري المرتفع [1].

يُعد التيتانيوم (Ti) عنصراً استراتيجياً ذو خصائص فيزيائية وكيميائية استثنائية، مما يجعله مادة محورية في هندسة الفضاء والتطبيقات الطبية الحيوية؛ ويُعزى ذلك إلى انخفاض كثافته ومقاومته الفائقة للتآكل في الأوساط القاسية. ومن ناحية أخرى، يتميز الموليبدنيوم (Mo) بخصائص ميكانيكية متميزة، حيث يتمتع بقوة شد (Tensile Strength) عالية واستقرار حراري بنيوي، مما يمنحه القدرة على الحفاظ على خواصه الفيزيائية تحت درجات حرارة مرتفعة [2]، ويؤدي دمج الموليبدنيوم كعنصر سبيكة مع التيتانيوم إلى إنتاج مادة مؤلفة (Alloy) تظهر تفوقاً ميكانيكياً ملحوظاً مقارنة بالتيتانيوم النقي، حيث تساهم هذه الإضافة في تعزيز الصلادة (Hardness) ورفع إجهاد الخضوع (Yield Strength)، فضلاً عن تحسين الاستقرار البنيوي تحت ظروف الإجهاد الحراري المرتفع، مما يحد من ظاهرة الزحف الميكانيكي [3].

تستهدف هذه الدراسة إجراء تحليل مقارن وشامل للخواص الفيزيائية والميكانيكية لسبيكة التيتانيوم-الموليبدنيوم (Ti-Mo) مقابل التيتانيوم النقي (Commercially Pure Ti). وينصب تركيز البحث على تقييم بارامترات حيوية تشمل الصلادة ، والانضغاطية كما تسعى الدراسة إلى استقصاء العلاقة الارتباطية بين التركيب الكيميائي للسبيكة وتطور بنيتها المجهرية (Microstructure)، ومدى انعكاس ذلك على كفاءة أدائها الوظيفي في التطبيقات الهندسية [4].

وعلاوة على ذلك، ستتولى الدراسة تقييم الاستجابة الميكانيكية لهذه السبائك تحت تأثير المتغيرات الحرارية، بهدف رصد التغيرات في السلوك الإنشائي واستقرار الأطوار عند درجات حرارة متباينة. وتكتسب هذه الخطوة أهمية جوهرية في تحديد الحدود التشغيلية للسبيكة، وتقييم مدى مواءمتها للتطبيقات الصناعية المتقدمة التي تتطلب موثوقية عالية في بيئات ذات إجهاد حراري مكثف.

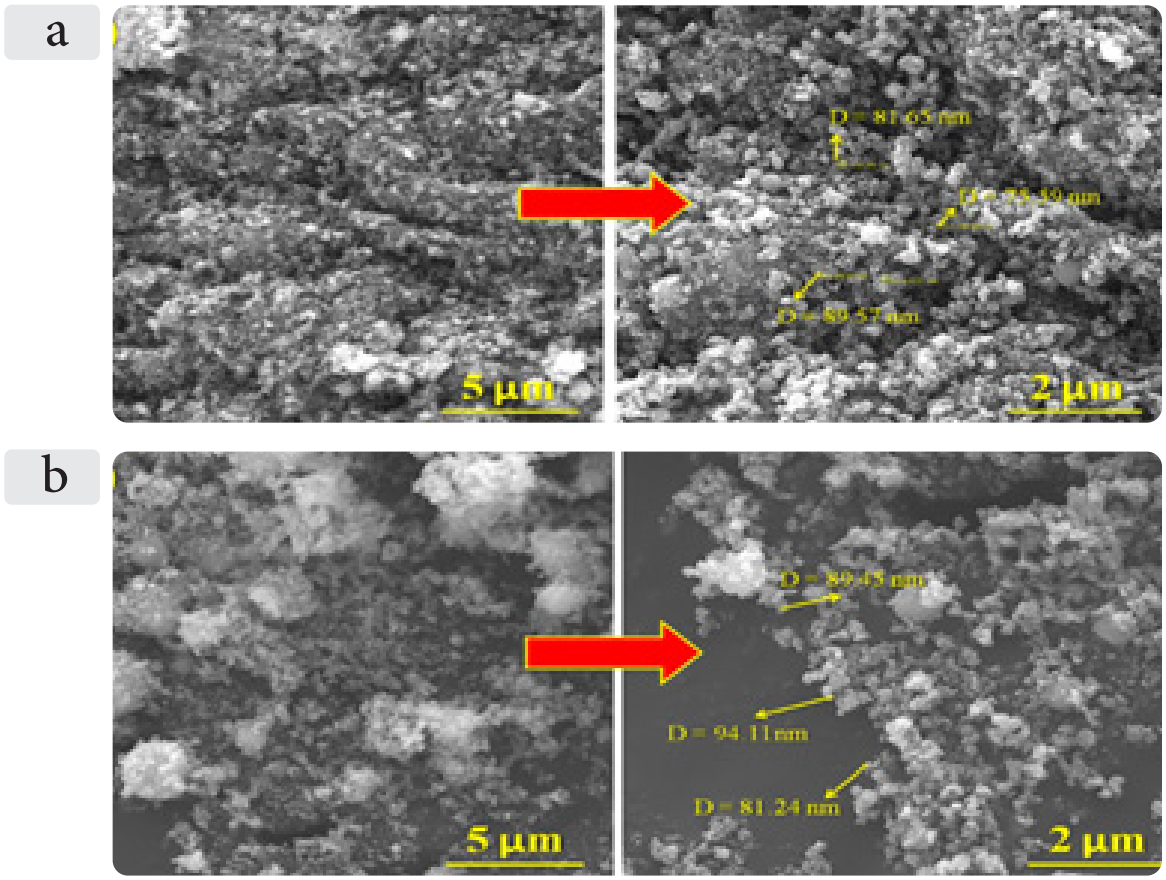
2 - طريقة العمل

2-1 تحضير العينات

اشتملت المنهجية التجريبية لهذه الدراسة على تحضير ثلاث عينات ذات بنية نانوية (Nanostructured samples) باحجام (60 ~ 80 nm) لاستقصاء دور عملية التلبيد (Sintering) وإضافة الموليبدنيوم كعنصر سبائكي في تعديل الخصائص الفيزيائية والميكانيكية. اعتُمدت العينة الأولى من التيتانيوم النقي النانوي (في حالته الخام قبل التلبيد) كعينة مرجعية (Control Sample) للمقارنة. بينما خضعت العينة الثانية لعملية تلبيد حراري لتقييم أثر التراص الحبيبي على التيتانيوم النقي. أما العينة الثالثة، فتمثلت في سبيكة التيتانيوم-الموليبدنيوم (Ti-

Mo) النانوية الملبدة، حيث تم اختيار الموليبدنيوم نظراً لدوره الجوهري كمثبت للطور بيتا β كما هو موضح في الشكل()، وقدرته الفائقة على تعزيز المتانة البنيوية وتحسين الأداء العام للسبيكة .[5]

أجريت عملية الخلط للعينات باستخدام المطحنة الكروية (Ball Milling) بسرعة دوران بلغت 360 rbm .

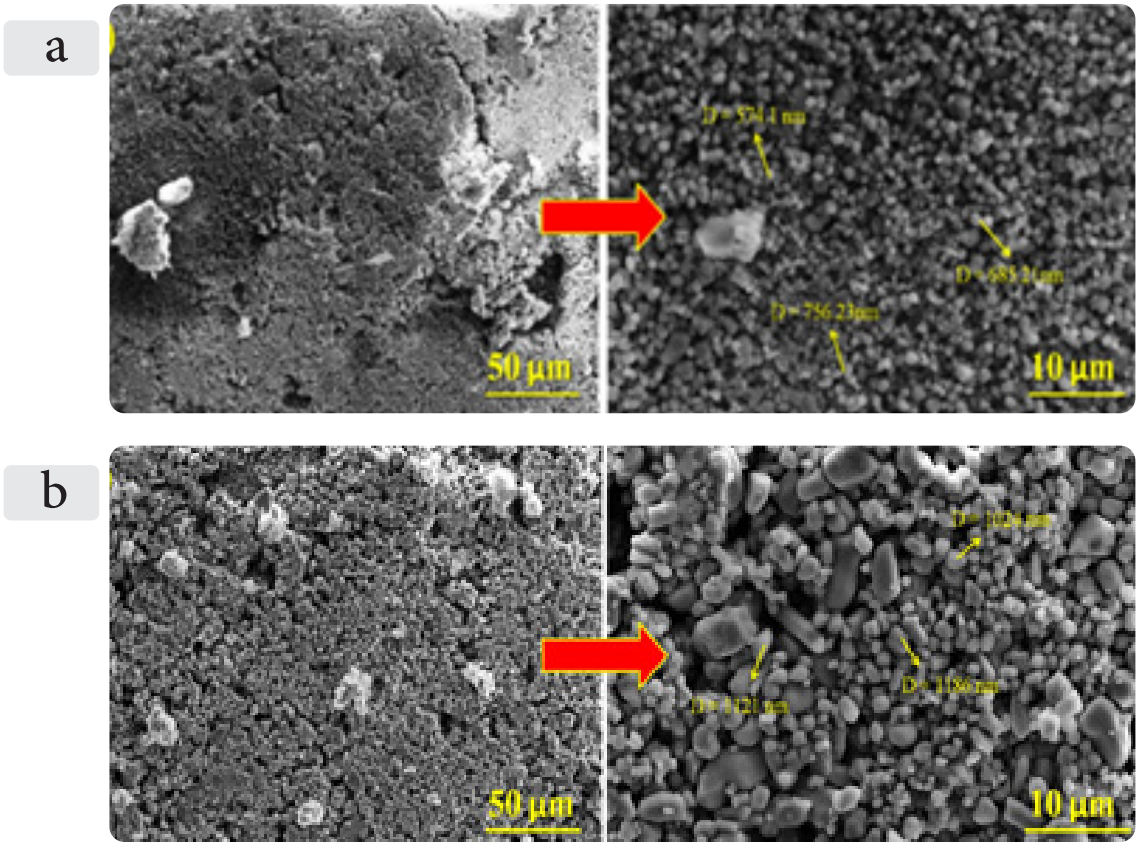


الشكل () يبين صور المجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال للنماذج المحضرة قبل عملية التلبيد (.30 % wt) Ti + Mo (b) Ti NPs (a) .

2-2 التلبيد

خضعت العينتان لعملية تلبيد حراري داخل فرن أنبوبي (Tubular Furnace) عالي الإحكام كما هو موضح في الشكل()، وذلك تحت بيئة خاملة من غاز الأرجون (Ar)؛ لضمان عزل العينات عن الوسط المحيط ومنع حدوث الأكسدة الجوية. وتكتسب هذه المعالجة الوقائية أهميتها من الحساسية الكيميائية العالية التي يبديها التيتانيوم تجاه الأكسجين عند درجات الحرارة المرتفعة، حيث يميل لتكوين طبقات أكسيد قد تؤثر سلباً على الخصائص الميكانيكية النهائية للسبيكة [6] . وسخن إلى 1150 درجة مئوية، وبمعدل تسخين ثابت (Heating Rate) قدره 10 درجات مئوية/ دقيقة. وعقب بلوغ الدرجة المستهدفة، جرى تثبيتها

حرارياً لمدة 120 دقيقة (Soaking Time) لتهيئة الظروف الحركية اللازمة لإتمام عمليتي الانتشار الذري (Atomic Diffusion) والاندماج البيني بين الجسيمات النانوية. وفي المرحلة الختامية، أُخمد الفرن لتبدأ عملية التبريد الرتيب داخل المقصورة (Furnace Cooling) حتى العودة لدرجة حرارة الغرفة؛ وقد اعتُمدت آلية التبريد البطيء هذه لضمان التحرر من الإجهادات الحرارية المتبقية (Residual Stresses) والحد من حدوث أي تشوهات في البنية المجهرية (Microstructural Distortions) للعينات [7] .



الشكل () يبين صور المجهر الالكتروني الماسح الباعث للمجال
للنماذج المحضرة بعد عملية التلبيد عند درجة حرارة 1150 °C (30 wt .%) Ti + Mo (b) Ti NPs (a).

2-3 اختبار الخواص الميكانيكية

أُجريت اختبارات الانضغاط (Compression Tests) لتقييم السلوك الميكانيكي للعينات. وقد جرى تحضير العينات وفقاً للمواصفات القياسية (Standard Dimensions)، مع تطبيق حِمل استاتيكي بمعدل إزاحة ثابت طوال فترة الاختبار. تم رصد وتسجيل البيانات لترسيم منحنيات الإجهاد–الانفعال (Stress-Strain Curves)، والتي استُخلصت منها قيم مقاومة الانضغاط القصوى (Ultimate Compressive Strength) ومعامل المرونة والقدرة على التشوه اللدن.

ويُعد اختبار الانضغاط منهجية مثالية لتقييم المواد الناتجة عن مساحيق المعادن والمواد المسامية، نظراً لقدرته على توصيف متانة الهياكل المتراكبة المعتمدة على التيتانيوم بشكل دقيق [8].

قُيمت الصلادة المجهرية للعينات باستخدام اختبار فيكرز (Vickers Hardness Test)، حيث أُجريت سلسلة من القياسات المتكررة في مواضع عشوائية ومتعددة على سطح كل عينة؛ لضمان الدقة الإحصائية واستخراج المتوسط الحسابي الممثل للصلادة الكلية. ويُصنف اختبار فيكرز كأداة تحليلية محورية في علوم المواد لتقييم مدى فاعلية عمليات التلبيد ودور العناصر السبائكية في تعزيز مقاومة البنية المجهرية للتشوه اللدن (Plastic Deformation)، كما يوفر مؤشراً دقيقاً حول مدى تجانس توزيع الأطوار داخل السبيكة [9] .

2-4 تقييم الخواص الفيزيائية

اعتمدت الدراسة على تقييم الخواص الفيزيائية للنماذج من خلال حساب ثلاثة مؤشرات رئيسية للكثافة، وذلك وفق المنهجية الآتية:

1. الكثافة النظرية: حُسبت الكثافة النظرية للخليط المسحوقي (قبل التلبيد) لجميع النسب المعتمدة استناداً إلى قاعدة الخلط (Rule of Mix-tures)، وذلك باستخدام العلاقة التالية:

$$\frac{w_{Ti}}{\rho_{Ti}} + \frac{w_{Mo}}{\rho_{Mo}} = \frac{1}{\rho_{Theoretical}} \quad \ldots\ldots (1)$$

حيث ان:

w_{Ti}, w_{Mo}: الكسر الوزني لمسحوق التيتانيوم والموليبدينيوم على التوالي ضمن النموذج.

ρ_{Ti}, ρ_{Mo}: الكثافة النظرية للتيتانيوم والموليبديوم على التوالي (g/cm^3).

$\rho_{Theoretical}$: الكثافة النظرية الخليط (g/cm^3).

2. الكثافة الحقيقية

بعد إتمام عملية التلبيد، تم تعيين الكثافة الحقيقية للنماذج (Sintered Density) تجريبياً عبر حساب النسبة بين الكتلة والحجم وفق العلاقة :

$$\rho_{s\,intered} = \frac{m}{v} \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

حيث ان:

m: كتلة النموذج بعد التلبيد (g).

V: حجم النموذج بعد التلبيد (cm3).

ρ: الكثافة الحقيقية للنموذج بعد التلبيد (g/cm3).

3. الكثافة النسبية

لتقييم كفاءة عملية التلبيد ومدى تخلص المادة من المسامية، استُخرجت الكثافة النسبية (أو ما يُعرف بنسبة التلبيد) عبر إيجاد النسبة المئوية للكثافة الحقيقية مقارنة بالنظرية، وفقاً للعلاقة الآتية:

$$\rho_R = \frac{\rho_{sintered}}{\rho_{theoretical}} \times 100\% \ldots\ldots\ldots (3)$$

حيث ان:

psintered: الكثافة بعد عملية التلبيد (g/cm3).

theoreticalρ: الكثافة النظرية (g/cm3).

ويُعد هذا المؤشر معياراً أساسياً لتحديد جودة الاندماج الحبيبي داخل البنية المجهرية للسبيكة [11,12,13].

الكثافة العملية

يُعد قياس الكثافة (Density) أحد المعايير الجوهرية لتقييم التطور البنيوي (Evolution) وكفاءة الأداء الوظيفي للمسبوكات المعدنية؛ إذ تعكس الكثافة التجريبية (Experimental Density) درجة الاندماج الحبيبي (Particle Cohesion) ومستوى المسامية الداخلية المتبقية في البنية المجهرية. وتكمن الأهمية التحليلية في المقارنة بين الكثافة التجريبية

والكثافة النظرية (Theoretical Density) لاستنباط الكثافة النسبية (Relative Density)، والتي تُتخذ مؤشراً حيوياً على الارتقاء بالخصائص الميكانيكية الشاملة. كما تُسهم هذه القيمة في توصيف مدى التراص البنيوي واستقرار التركيب المجهري للمسبوكات، لاسيما بعد إدخال العناصر السبائكية أو الخضوع لعمليات المعالجة الحرارية [14].

3- النتائج والمناقشة

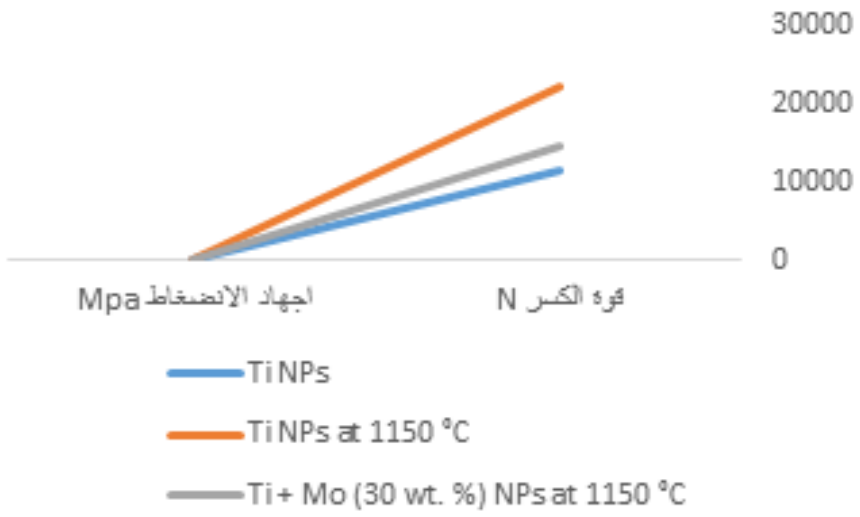
أُجريت اختبارات الانضغاط لتوصيف الاستجابة الميكانيكية للعينات من خلال قياس مقاومة الكسر (Fracture Load) وإجهاد الانضغاط (Compressive Stress)، بهدف تقييم المتانة البنيوية تحت ظروف الأحمال الاستاتيكية. كما هو موضح في الجدول 1.

جدول (1) يبين قيم مقاومة الانضغاط والقوة للنماذج المحضرة.

العينة	قوة الكسر (N)	اجهاد الانضغاط (MPa)
Ti NPs	11542	38.44
Ti NPs at 1150 °C	22225	78.38
Ti + Mo (30 wt. %) NPs at 1150 °C	14685	51.79

عينة التيتانيوم النانوي الخام (Ti NPs): سجلت أدنى قيمة لحمل الكسر عند 11,542 N؛ ويعزى هذا الضعف الميكانيكي إلى غياب المعالجة الحرارية، مما أبقى المادة في حالة من التخلخل البنيوي مع انعدام الروابط القوية بين الجسيمات النانوية.أثر التلبيد (Ti NPs at 1150 °C): طرأ تحسن جوهري في الأداء، حيث قفز حمل الكسر إلى 22,225 N. ، مما أدى إلى تقليص المسامية وتعزيز التماسك البلوري. أثر إضافة الموليبدنيوم (Ti + 30wt% Mo): سجلت هذه السبيكة قيمة متوسطة بلغت 14,685 N. وعلى الرغم من تفوقها على العينة غير الملبدة، إلا أنها جاءت أقل من التيتانيوم النقي الملبد. ويُعزى ذلك ميتالورجياً إلى دور الموليبدنيوم كمثبت للطور β، الذي يمنح السبيكة استقراراً بنيوياً وتوازناً بين الصلادة والمتانة، وإن كان ذلك قد صاحبه انخفاض نسبي في حمل الكسر القصي مقارنة بالتيتانيوم النقي.

أظهرت النتائج تبايناً واضحاً؛ حيث سجلت العينة الخام (Ti NPs) إجهاداً منخفضاً قدره 38.44 MPa، مما يشير إلى هشاشة البنية المسامية الأولية.بالمقابل، حققت العينة الملبدة (Ti NPs at 1150 °C) أعلى إجهاد انضغاط بمقدار 78.38 MPa، وهو ما يؤكد دور التكثيف (Densification) في رفع قدرة المادة على مقاومة الأحمال الانضغاطية. أما سبيكة (Ti-Mo)، فقد سجلت 51.79 MPa، مما يظهر بوضوح القيمة المضافة للموليبدنيوم في تعزيز المقاومة الميكانيكية مقارنة بالحالة الخام، مع المساهمة في تحسين المتانة (Toughness) عند درجات الحرارة العالية كما هو موضح في الشكل 1.



الشكل(1) يبين العلاقة بين اجهاد الانضغاط وقوة الكسر

أثبتت النتائج أن التلبيد عند 1150 C° هو المتغير الحاسم في تحويل المساحيق النانوية من حالة التجمع الهش إلى هيكل صلب متماسك عبر تقليل العيوب البنيوية والمسام.

أدت إضافة الموليبدنيوم بنسبة 30 wt.٪ إلى إحداث توازن وظيفي؛ فبينما ساهم في استقرار الطور β وزيادة الصلابة والتحمل الحراري، أظهر سلوكاً ميكانيكياً مختلفاً في اختبار الانضغاط، مما يجعله مرشحاً مثالياً للتطبيقات التي تتطلب استقراراً بنيوياً طويل الأمد عوضاً عن مقاومة الأحمال اللحظية القصوى.

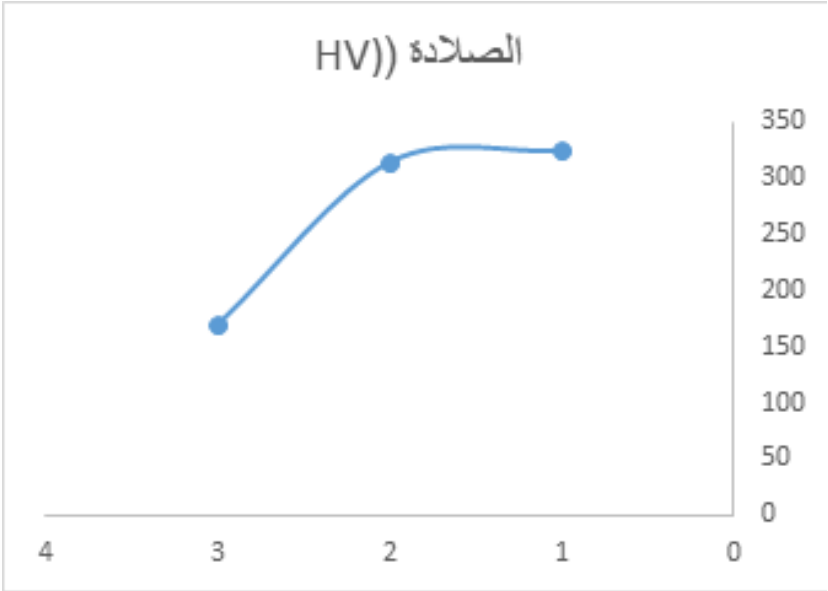
أُجريت اختبارات صلادة فيكرز لتقييم مقاومة العينات للتشوه اللدن الموضعي (Local Plastic De-formation)، حيث تعكس قيم الصلادة المستخرجة كفاءة الاندماج البنيوي وتأثير العناصر السبائكية كما موضح في الجدول 2.

جدول (2) يبين قيم صلادة فيكرز للنماذج المحضرة.

العينة	الصلادة (HV)
Ti NPs	170
Ti NPs at 1150 °C	315
Ti + Mo (30 wt. %) NPs at 1150 °C	325

عينة التيتانيوم النانوي الخام (Ti NPs):سجلت هذه العينة أدنى قيمة صلادة بمقدار 170 HV؛ وهو ما يعكس هشاشة البنية الأولية للمساحيق غير المعالجة حرارياً. ويُعزى هذا الانخفاض إلى ارتفاع نسبة المسامية البينية وضعف الروابط الكيميائية والميكانيكية بين الجسيمات النانوية، مما يحد من قدرة المادة على مقاومة اختراق أداة الغرز (Indenter). 2. تأثير عملية التلبيد (Ti NPs at 1150

°C):أدى التلبيد الحراري عند 1150 °C إلى قفزة نوعية في قيم الصلادة لتصل إلى 315 HV. وتبرهن هذه الزيادة على نجاح عملية التكثيف البنيوي (Densification) وتقليص المسام، حيث تساهم الطاقة الحرارية في تعزيز التراص البلوري وتشكيل روابط قوية بين الحبيبات، مما يرفع من جساءة المادة ومقاومتها للتشوهات الدائمة.3. التأثير السبائكي للموليبدنيوم (Ti + 30 wt.% Mo):حققت سبيكة التيتانيوم-موليبدنيوم أعلى قيمة صلادة بين جميع العينات المختبرة بواقع 325 HV كما هو موضح في الشكل (2). ويُعزى هذا التفوق الميكانيكي إلى الدور المزدوج للموليبدنيوم؛ حيث يعمل كعنصر مُثبت للطور بيتا β ذو البنية المكعبة مركزية الجسم (BCC). تساهم هذه التحولات في إعاقة حركة الانخلاقات داخل الشبكة البلورية، مما يعزز من صلادة المادة ومتانتها، خاصة في ظل ظروف الإجهاد العالي.



الشكل (2) يبين قيم صلادة فيركز للعينات

أن استجابة الصلادة في هذه الدراسة محكومة بمتغيرين أساسيين:آلية التلبيد: التي أثبتت قدرتها على تحويل التجمعات النانوية الهشة إلى هياكل متماسكة عبر تقليل حجم الفراغات البينية وزيادة مساحة التلامس البلوري.هندسة الأطوار: حيث أظهرت إضافة الموليبدنيوم بنسبة 30 wt..٪ كفاءة عالية في رفع الصلادة المجهرية، مما يتوافق مع الأدبيات العلمية التي تشير إلى أن سبائك التيتانيوم من نوع β تتمتع بخصائص ميكانيكية متفوقة بفضل استقرار تركيبها الميكروي ومقاومتها العالية للزحف والتشوه.

من خلال قياس الكثافات النظرية والعملية والنسبية، لتقييم كفاءة عملية التلبيد وأثر العنصر السبائكي.: استُخرجت القيم بناءً على الحسابات التركيبية وقاعدة الخلط؛ حيث بلغت لعينة التيتانيوم النانوي (Ti NPs) وعينة التيتانيوم الملبد

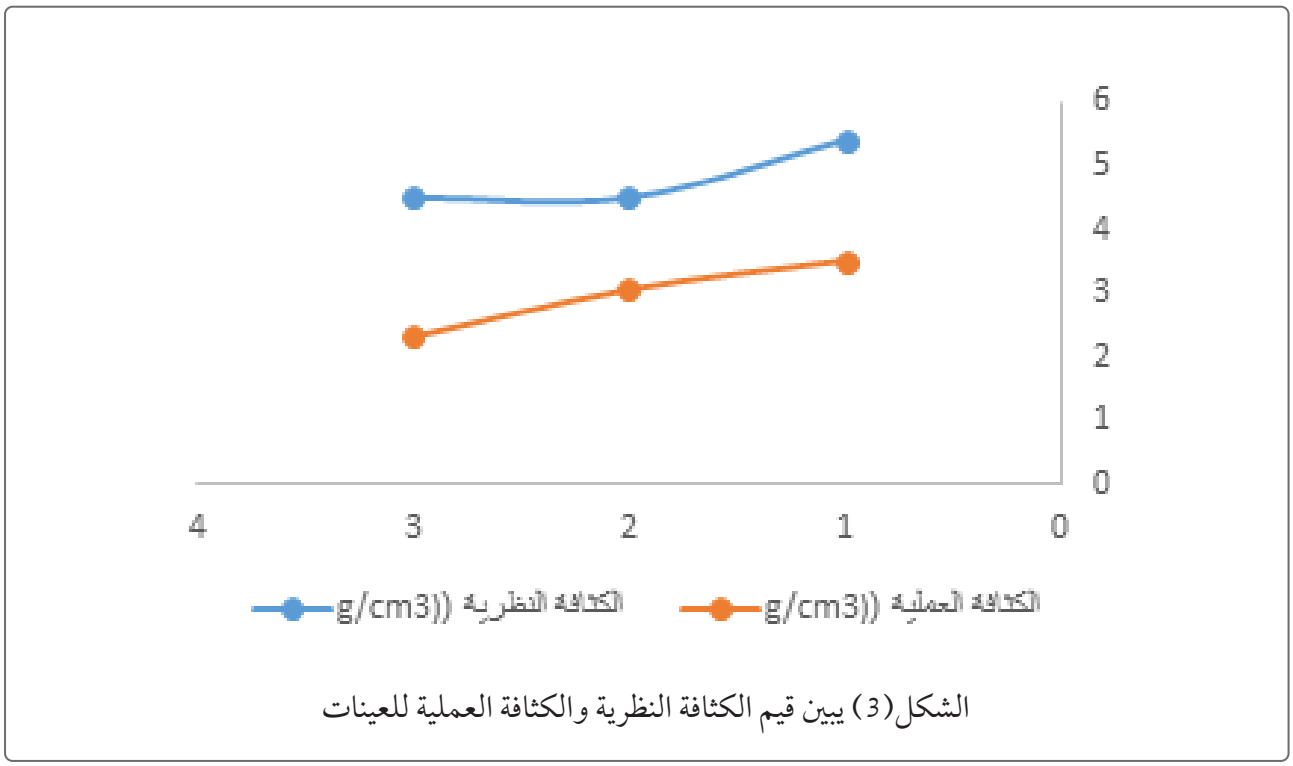
(Ti NPs at 1150 °C) قيمة ثابتة قدرها 4.5 (g/cm^3). في حين سجلت سبيكة (Ti + 30 wt.% Mo) ارتفاعاً ملحوظاً لتصل إلى 5.41 (g/cm^3) كما هو موضح في جدول 3. ويُعزى هذا الفارق الجوهري إلى الكثافة النوعية المرتفعة للموليبدنيوم 10.2 (g/cm^3) مقارنة بالتيتانيوم، مما يرفع من الكتلة الحجمية الكلية للسبيكة الناتجة وتم قياس الكثافة الفعلية .

جدول (3) يبين قيم الكثافة للنماذج المحضرة.

العينة	الكثافة النظرية (g/cm^3)	الكثافة العملية (g/cm^3)	الكثافة النسبية (٪)
Ti NPs	4.5	2.31	51
Ti NPs at 1150 °C	4.5	3.06	68
Ti + Mo (30 wt. %) NPs at 1150 °C	5.41	3.51	64.5

وجاءت النتائج كالتالي:العينة الخام (Ti NPs): سجلت 2.31 (g/cm^3)، مما يشير إلى وجود مسامية بينية عالية ناتجة عن غياب التلاحم الحراري.عينة التيتانيوم الملبد (Ti NPs at 1150 °C): ارتفعت الكثافة إلى 3.06 (g/cm^3)، مما يبرهن على نجاح عملية التلبيد في تحفيز التراص وتقليل الفراغات.

سبيكة (Ti-Mo): حققت أعلى كثافة عملية بمقدار 3.51 (g/cm^3) كما موضح في الشكل (3)، مما يعكس الدور الإيجابي للموليبدنيوم في تعزيز عملية التكثيف (Densification) وتحسين الترابط بين الجسيمات النانوية.



الشكل(3) يبين قيم الكثافة النظرية والكثافة العملية للعينات

سجلت الكثافة النسبية للعينة الغير ملبدة نسبة ٪51 فقط، مما يؤكد هيمنة المسامية على بنيتها. ارتفعت النسبة في التيتانيوم الملبد إلى ٪68، وهو تحسن جوهري يعكس كفاءة الدورة الحرارية في غلق المسام.بالنسبة لسبيكة (Ti-Mo)، بلغت الكثافة النسبية ٪64.5. ورغم أنها أقل قليلاً من التيتانيوم النقي الملبد، إلا أنها تمثل تطوراً ملحوظاً مقارنة بالحالة الخام. ويُفسر الانخفاض النسبي مقارنة بالتيتانيوم الملبد بالتعقيدات المرافقة لانتشار ذرات الموليبدنيوم داخل شبكة التيتانيوم وتكوين الطور بيتا β، مما قد يتطلب ظروف تلبيد أكثر كثافة للوصول إلى التراص الكامل .تُظهر البيانات ترابطاً وثيقاً بين المعالجة الحرارية والتركيب الكيميائي في تحديد الكفاءة الفيزيائية للمادة ، أثبتت المعالجة عند 1150 C° قدرتها على رفع الكثافة العملية بنسبة تجاوزت ٪30، مما يؤكد أن الطاقة الحرارية الموفرة كانت كافية لبدء عمليات الانتشار في الحالة الصلبة (Solid-state diffusion) وتقليل حجم المسام. ساهمت إضافة الموليبدنيوم في رفع الكثافة الكلية للسبيكة وتعزيز التلاحم البيني. ومع ذلك، تشير النتائج إلى أن التفاعل بين العنصرين يؤدي إلى تغييرات في استقرار الأطوار البلورية، مما يؤثر على «قابلية التلبيد» (Sinterability)؛ حيث تعمل الأطوار الغنية بالموليبدنيوم على تغيير ديناميكية انكماش المسام، مما يتوافق مع النظريات الميتالورجية حول سبائك التيتانيوم المتقدمة.

لقد أظهرت نتائجنا أن إضافة wt٪ 30 من الموليبدنيوم كانت كافية لتثبيت الطور β في البنية المجهرية. وهذا يتوافق مع التوجهات الحديثة في التطبيقات الطبية، حيث يُعرف الطور β بامتلاكه معامل مرونة (Elastic Modulus) منخفض مقارنة بالتيتانيوم النقي (طور α). هذا الانخفاض في معامل المرونة هو المفتاح لتقليل ظاهرة (حجب الإجهاد) (Stress Shielding) التي تؤدي عادةً إلى تآكل العظام حول الزرعة [16,15].

تشير قيم الكثافة النسبية والمسامية المتبقية في العينات المدروسة إلى إمكانية توظيف هذه المواد في تطبيقات تعتمد على المسامية المتحكم بها (Controlled Porosity)، مثل الدعامات الحيوية (Scaffolds) وهياكل امتصاص الطاقة. إذ تلعب المسامية دورًا محوريًا في تعزيز الاندماج العظمي في التطبيقات الطبية، وكذلك في تحسين خصائص امتصاص الصدمات والطاقة في التطبيقات الهندسية المتقدمة [17].

4- الاستنتاج

أظهرت الدراسة أن عملية التلبيد عند 1150 °C تلعب دوراً محورياً في تأهيل التيتانيوم النانوي للاستخدامات الطبية، حيث نجحت في تحسين الخواص الميكانيكية مع الحفاظ على مسامية متبقية ومسيطر عليها، وهو عامل حيوي لتعزيز الاندماج العظمي (Osseointegration) في الغرسات الطبية. كما بينت النتائج أن إضافة الموليبدنيوم بنسبة wt..٪ 30 تعزز استقرار الطور بيتا (β) وترفع الصلادة بشكل ملحوظ، مما يمنح السبيكة مقاومة فائقة للتآكل الاحتكاكي، وهي خاصية ضرورية لضمان ديمومة المفاصل الصناعية والأطراف التعويضية. وبناءً على ذلك، تُقدم الدراسة سبيكة (Ti-Mo) كخيار واعد ومنافس في مجال المواد الحيوية (Bio-materials)، حيث توفر توازناً مثالياً بين المتانة اللازمة لتحمل الأحمال الفسيولوجية، والخصائص السطحية والبنيوية التي تضمن التوافق الحيوي

والاستقرار طويل الأمد داخل جسم الإنسان.

5- المصادر

[1] Jones, R., & Smith, P. (2015). *Mechanical Properties of Titanium Alloys*. Journal of Materials Science, 50(12), 4500-4513.

[2] Zhi, C., & Li, Y. (2019). *High-Temperature Performance of Ti-Mo Alloys*. Materials Science and Engineering A, 741, 212-222.

[3] Singh, A., & Sharma, M. (2017). *Comparison of Titanium Alloys with Mo Addition*. International Journal of Material Science, 35(8), 967-980.

[4] Allen, T., & Gray, J. (2018). *Titanium Alloys: Properties and Applications*. Springer.

[5] Leyens, C., & Peters, M. (2003). *Titanium and Titanium Alloys*. Wiley-VCH.

[6] Niinomi, M. (2008). Mechanical properties of biomedical titanium alloys. *Materials Science and Engineering A*, 243, 231–236.

[7] ASM Handbook, Vol. 7 (1998). *Powder Metallurgy Technologies and Applications*. ASM International.

[8] German, R. M. (2007). *Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing*. MPIF.

[9] Dowling, N. E. (2013). *Mechanical Behavior of Materials*. Pearson.

[10] Humphreys, C. J. (2013). The significance of Bragg's law in electron diffraction and microscopy, and Bragg's second law. Foundations of Crystallography, 69(1), 45-50.

[11] Robertson, I. M., & Schaffer, G. B. (2009). Suitability of nickel as alloying element in titanium sintered in solid state. Powder metallurgy, 52(3), 225-232.

[2] Parsafar, G., & Sohraby, N. (1996). Density calculation of compressed liquid mixtures using LIR along with mixing and combining rules. The Journal of Physical Chemistry, 100(30), 12644-12648.

[3] Lewis, H. D., & Goldman, A. (1966). Theorems for calculation of weight ratios to produce maximum packing density of powder mixtures. Journal of the American Ceramic Society, 49(6), 323-327.

[4] Ternero, F., Rosa, L. G., Urban, P., Montes, J. M., & Cuevas, F. G. (2021). Influence of the total porosity on the properties of sintered materials—a review. Metals, 11(5), 730.

[15] Niinomi, M. (1998). Mechanical properties of biomedical titanium alloys. Materials Science and Engineering A, 243(1–2), 231–236.

[16] Zhang, L. C., & Chen, L. Y. (2019). A review on biomedical titanium alloys: recent progress and prospect. Advanced Engineering Materials, 21(4), 1801215.

[17] Ternero, F., et al. (2021). Influence of the total porosity on the properties of sintered materials—a review. Metals, 11(5), 730.