المواد النانوية دراسة لطرق انتاجها، خواصها واستخداماتها

Nanomaterials

A study of their production methods, properties and their applications

د. أحمد الصغير المهدي عجينة (*)

هندسة ميكانيكية وعلوم المواد

كلية تقنية المعلومات – جامعة الزاوية

الملخص

هذا العمل هو دراسة نظرية تم تسليط الضوء فيها على أحد أهم المواد الهندسية المستخدمة في العمليات الصناعية المختلفة، الا وهي المواد النانوية. وهي مواد هندسية لها بنية بلورية ذات احجام لا تتعدى 100 نانومتر. والهدف من هذه الدراسة هو اطلاع الباحث العربي

(*) Email: ah.agena@zu.edu.ly

على نوع جديد من المواد الهندسية التي بدء انتاجها واستخدامها بشكل واسع في جميع مجالات الصناعات الهندسية والطبية. حيث تم شرح بعض طرق انتاجها ودراسة بعض من خواصها واستخداماتها ومقارنتها بالمواد الهندسية الاولية التي لها نفس التركيب الكيميائي.

وقد تبين من هذه الدراسة أن الخواص الميكانيكية والفيزيائية والكيميائية للمواد النانو مترية قد تحسنت بشكل ملحوظ وأنها تمتلك قدر كبير من الميزات التي تؤهلها لتكون المواد الهندسية الاكثر استخداما في السنوات القادمة.

وتبين من هذه الدراسة ان خواص المواد النانوية تختلف عن خواص المواد الاصلية حيث تحسنت هذه الخواص وأصبحت أكثر ملائمة للتطبيقات الهندسية والطبية. وتبين ان المواد النانوية لها استخدامات أكثر فاعلية في المجالات الصناعية والطبية مثل صناعة الأغذية ومكافحة الامراض والاورام.

وفي نهاية الدراسة تم وضع مجموعة من التوصيات التي من شأنها الدفع نحو اجراء دراسات علمية في مجال المواد النانوية بأكثر عمق وأكثر تخصص.

الكلمات الدالة: المواد الهندسية، المواد النانوية، الخواص الميكانيكية، الخواص الطبيعية، استخدامات المواد النانوية.

Abstract

This work is a theoretical study in which light is shed on one of the most important engineering materials used in various industrial processes, namely nanomaterials. They are engineering materials that have a crystalline structure with sizes not exceeding 100 nanometers. The aim of this study is to acquaint the Arab researcher with a new type of engineering materials that have begun to be produced and widely used in all fields of the engineering and medical industries. Where some of its production methods were explained and some of its properties and uses

were studied and compared to the primary engineering materials that have the same chemical compositio.

It was found from this study that the mechanical, physical and chemical properties of nanometer materials have improved significantly and that they have a large number of features that qualify them to be the most widely used engineering materials in the coming years.

It was found from this study that the properties of nanomaterials differ from the properties of the original materials, as these properties improved and became more suitable for engineering and medical applications. It was found that nanomaterials have more effective uses in the industrial and medical fields such as the food industry and the fight against diseases and tumors.

At the end of the study, a set of recommendations were developed that would push towards conducting scientific studies in the field of nanomaterials with more depth and more specialization.

Key words: Engineering Materials, Nanomaterials, Mechanical Properties, Physical Properties, Application of Nanomaterials.

1- المقدمة

قبل البدء في أي محاولة لتوليد أو انتاج أي مادة هندسية ذات خصائص جديدة ليست معروفة في وقتنا الحاضر فإنه يتوجب علينا تركيز الاهتمام على ايجاد طريقة جديدة لتوزيع البنية المجهرية للمادة أو تغيير التركيبة الكيميائية لها.

ومن هذا المنطلق اتجه بعض البحَاث [1] العاملين في مجال المواد الهندسية لدراسة علاقة حجم الحبيبات داخل البنية المجهرية للمادة مع الخواص الميكانيكية. وبدء العمل على تغيير حجم الحبيبات داخل البنية البلورية للمادة الهندسية ودراسة خواص وطبيعة هذه المادة الجديدة. وبعد عدة محاولات قام بها العلماء لتقليص حجم الحبيبات، تم الحصول على مواد ذات حبيبات بحجم عدة مئات وعشرات من النانومتر. وسمية هذه المواد بالمواد النانومترية او المواد

النانوية فالمواد النانوية هي مواد هندسية يكون فيها حجم الحبيبات (grain size) في التركيب البلوري لا يتعدى عدة عشرات من النانومتر(النانومتر (nanometers). يساوي (1×10^{-9} متر).).

في السنوات القليلة الماضية أصبحت المواد النانوية من أهم المواد التي يتم استخدامها في المجالات الهندسية والصناعية وذلك لأنها تتمتع بخواص ميكانيكية وطبيعية جيدة تجعلها مناسبة لجميع التطبيقات الهندسية والبيئية وحتى الطبية، فمثلا سبيكة الالومنيوم و السيلكون النانوية والمعروفة بالرمز (Al 6082) مناسبة للدخول في صناعة الطائرات و السفن لخفة وزنها و لأن لها متانة تقترب من متانة الحديد المطاوع [1].كما أن معدن التيتانيوم النانومتري يتمتع بخواص طبية جيدة [2] تجعله في مقدمة المواد المستخدمة في صناعة المواد والأجهزة الطبية. مثل مسامير تثبيت العظام المكسورة داخل الجسم.

2- طرق إنتاج المواد النانوية

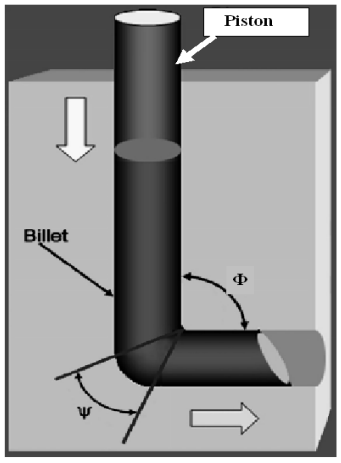
هناك عدة طرق لإنتاج المواد النانو مترية تختلف باختلاف طريقة حصول الانفعالات ذات الشدة العالية التي تنتج من تسليط القوى الخارجية على بلورات المادة. هذه العملية تسمى " تقنية التشوه اللدن الشديد"(Sever plastic deformation techniques (SPD) وفيها يتم تسليط مقدار كبير من الاجهادات المختلفة (معظمها اجهادات قص) على بلورات المادة الهندسية مما يتسبب في حدوث انفعالات قصية شديدة تؤدي في النهاية الى تكسير حبيبات المادة الهندسية الى أجزاء صغيرة تصل في بعض الاحيان الى حجم ما بين 10 الى 100 نانومتر (10 – 100 نانو متر)، تجرى هذه العملية في درجات حرارة أقل من درجة إعادة التبلور (عادتاً عتد درجة حرارة تساوي نصف درجة حرارة الانصهار للمادة الهندسية) [3].

ومن أهم طرق إنتاج المواد النانوية ما يلي:

1.2. طريقة بثق العينة داخل قناتين متساويتين متقابلتين بزاوية (الايكاب).

Equal Channel Angular press (Extrusion) (ECAP)

ظهرت هذه الطريقة في عام 1972 م. في هذه الطريقة يتم ضغط المعدن وبثقه لإجباره على المرور خلال قالب يحوي قناتين أو أكثر بحيث تكونا هذه القنوات ذات قطر متساوي و تتقابل مع بعضها مكونة زاوية بقيمة تتراوح بين (90^0 و 135^0) وقد تصل أحيانا إلى 157^0 [4]. كما هو موضح بالشكل رقم (1).



الشكل رقم .1. قالب الايكاب

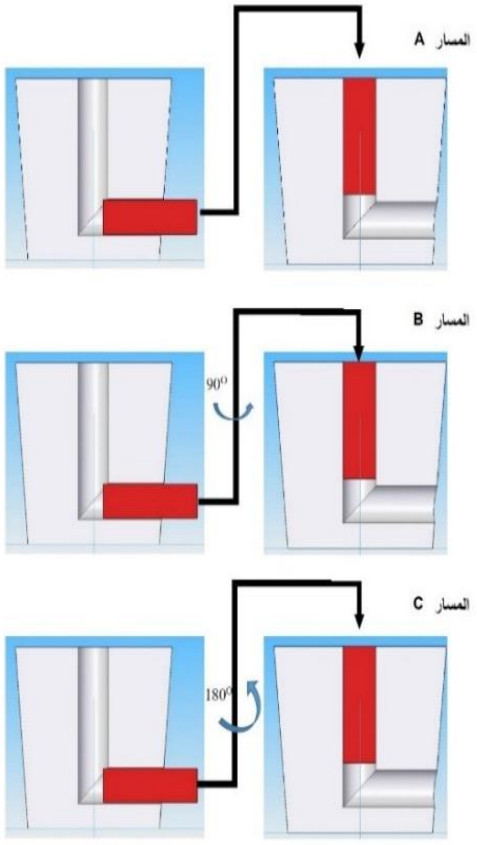
في هذه العملية (عملية الإيكاب) يتم تسليط انفعال قصي لدن عالي الشدة على المعدن فينتج تشوه للمعدن دون أن يحدث تغيير في مساحة مقطع العينة المستخدمة في العملية. ومن خلال هذه الطريقة فإن تكرار العملية (تكرار واعادة بثق وضغط نفس العينة داخل القالب) يكون ممكنا إلى عدد معين، وتعطى كل عملية تكرار رقم معين على حسب عدد مرات تكرار الضغط على العينة، فمثلا إذا تم إجراء العملية على العينة مرة واحدة تسمى العملية باسم مرور1 Pass (1) وهكذا...

وتكون البنية البلورية لمعدن العينة المنتج من عملية التكرار رقم واحد مختلف في البنية البلورية عن المعدن المنتج من عمليات التكرار الأخرى (رغم أن التركيب الكيميائي للمعدن الأصلي لا يتغير) وذلك لحدوث تكسر في الشبكة البلورية بمقادير مختلفة في الاتجاهات الثلاثة (x,y, and z).

1.1.2.أساليب تكرار الكبس في طريقة البثق (ECAP)

اثناء عملية البثق بالإيكاب فإن اتجاه وضع العينة وعدد مرات المرور داخل القالب ( ) No of Passesهي من العوامل المهمة التي تحدد شكل وحجم الحبيبات المتشكلة في المعدن الناتج من هذه العملية وبالتالي فإنها تؤثر على الخواص العامة لهذا المعدن، فالعينة يمكن ان تجرى عليها عدة عمليات بثق متتالية. كما انه يمكن ان يتم تدويرها حول محورها الطولي بين كل عملية بثق واخرى وتسمى عملية التدوير بالمسار (Route). وهناك ثلاث انواع لهذه المسارات، تعتمد على مقدار و اتجاه زاوية دوران العينة حول محورها كالاتي:

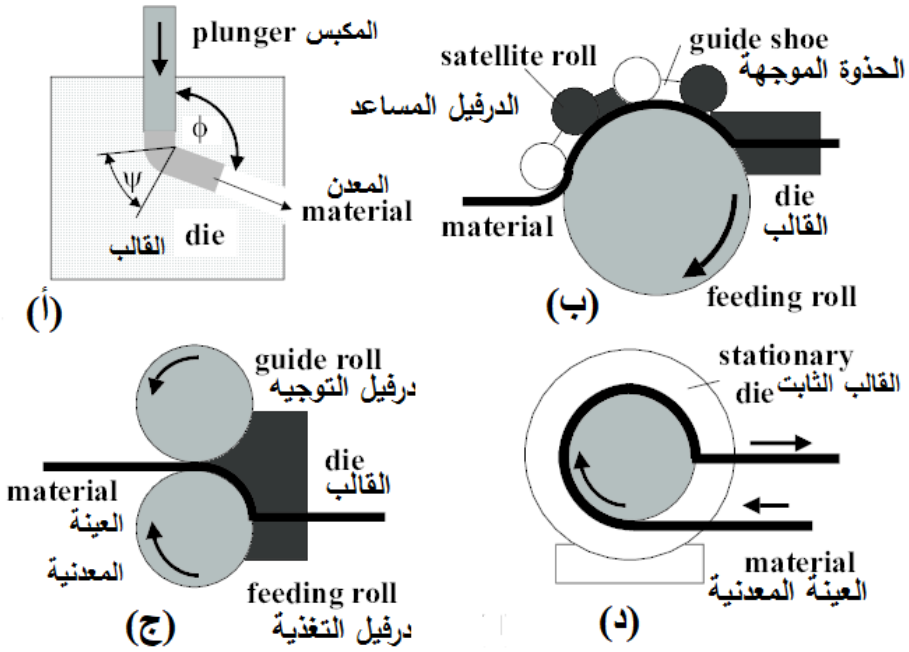
- المسار (A) وفيه لا يتم تدوير العينة حول محورها بين كل عملية بثق، أي انه يتم وضع العينة في القالب بنفس الزاوية التي خرجت به من عملية المرور السابقة.
- المسار (B) وفيه يتم تدوير العينة حول محورها الطولي بزاوية قدرها 90 درجة.
- المسار (C) وفيه يتم تدوير العينة حول محورها الطولي بزاوية قدرها 180 درجة. كما هو موضح بالشكل رقم (2) [5].



الشكل .2. أساليب تكرار الضغط في طريقة الايكاب

2 .1 .2. انواع طريقة البثق خلال قناتين متساويتين متقابلتين بزاوية (الإيكاب)

حديثا ظهرت عدة انواع لعملية الايكاب (ECAP)حيث تم تطوير الطريقة السابقة لجعلها تلائم بعض المتطلبات التقنية والصناعية مثل زيادة طول او حجم المشغولة المنتجة او الحصول على متانة أكبر وغيرها من المتطلبات الصناعية، كل هذه الانواع من الايكاب لها نفس النظرية في احداث التشوه ولكن تختلف في طريقة دفع العينة داخل القالب: فمنها ما يتم دفعها بواسطة المكابس ومنها ما يستخدم الدرافيل لدفع العينة. والشكل رقم (3) يوضح بعض هذه الانواع [6].



الشكل.3. بعض انواع طرق الايكاب المختلفة

(a) البثق خلال قناتين متساويتين متقابلتين بزاوية (الإيكاب) -(b) ,عملية التشوه القصي المستمربواسطة قالب على شكل دفة

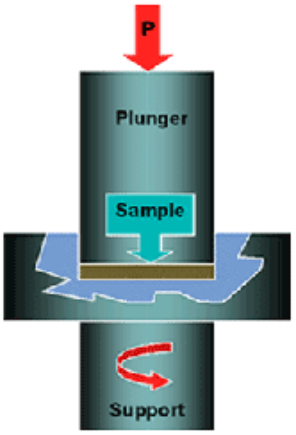
-(c)قص الشريط المحصور المستمر **-(d)** عملية الايكاب بواسطة درفيل ثابت واخر متحرك.

2.2. طريقة التشوه الدوراني تحت تأثير ضغط عالي (Torsion straining under SPTS high pressure)

في عملية التشوه الدوراني يتم تسليط قوة ضغط عالية وتشوه التوائي على العينة في نفس الوقت باستخدام ضغط هيدرواستاتيكي يكون عادة أكبر من 2 جيجا باسكال (2×10^9 باسكال) كما هو موضح بالشكل رقم (4). ويتم وضع العينة داخل قالب يتكون من جزئيين احدهما علوي (سندان علوي) وهو ثابت ويتم بواسطته تسليط قوة الضغط و الاخر سفلي (سندان سفلي) و هو الجزء الدوراني الذي بواسطته يتم التشوه الالتوائي [7].

في هذه العملية ونتيجة لقوة الاحتكاك الكبيرة المتولدة بين القالب و العينة يحدث ما يعرف بالتشوه القصي الشديد الذي يؤدي الى تكسر الحبيبات و تحويلها الى حبيبات ذات حجم صغير جدا يقدر بعدة نانو مترات (100 نانومتر) ، وفي بعض المعادن والسبائك التي درجة حرارة انصهارها عالية يصل حجم الحبيبات الى 50 نانومتر.

في هذه الطريقة يتم إعداد العينات على شكل قرص بقطر يصل إلى 20 ملم وسمك حوالي 0.2 ملم، والتي تكون جيدة لإجراء الدراسات الأساسية للبنية البلورية للمواد النانو مترية.

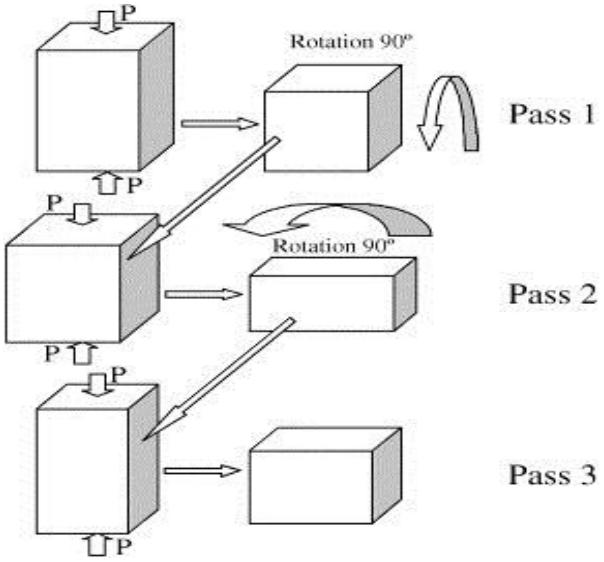


شكل رقم .4. قالب التشكيل في عملية التشوه الدوراني تحت تأثير ضغط عالي

3.2. الحدادة المتعددة

تعتبر عملية الحدادة المتعددة من اهم العمليات التي يتم بواسطتها انتاج المواد النانوية في المشغولات ذات الكتلة المتوسطة والتي تم تطويرها بواسطة ساليشكيف واخرون (Salishchev et.al). [8 – 9]. وهي عملية مرتبطة عادةً مع اسلوب اعادة التبلور الديناميكية.

وفي عملية الحدادة المتعددة يتم اجراء عمليات الحدادة الحرة (بالقالب المسطح المفتوح) واعادة تكرارها على المشغولة مع تدوير العينة حول محاورها المختلفة لتغيير اتجاه الانفعال فيها. كما هو موضح بالشكل رقم (5):



الشكل رقم .5. عملية الحدادة المتعددة

عند اجراء الحدادة المتعددة (الشكل 6) على العينة فإنها تتعرض لعملية تشوه متغيرة الاتجاه تتسبب في حدوث تكسر في الحبيبات الداخلية الموجودة في التركيب البلوري للمعدن مما يقلل من حجمها. ومع تكرار عملية الحدادة وتدوير العينة حول محاورها فإن حجم هذه الحبيبات يصبح صغيرا جدا حيث يصبح بمقياس حوالي (100–300 نانومتر).

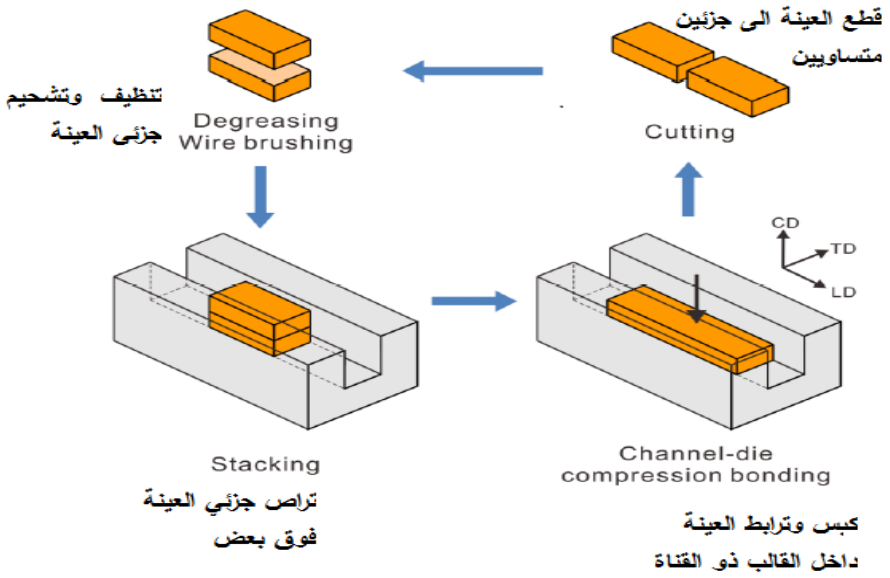
ومن عيوب هذه العملية إنه يحدث فيها ضعف التجانس في مقدار الانفعال و الالتواء وبالتالي عدم التجانس في حجم الحبيبات وهو أقل مما هو عليه في حالة الايكاب ECAP) ومع ذلك ، تسمح الطريقة بالحصول على حالة بنية نانوية في المواد الهشة إلى حد ما لأن العملية تبدأ في درجات حرارة مرتفعة وتكون الأحمال المسلطة على القالب منخفضة.

4.2. طريقة الترابط التراكمي وضغط العينة داخل القالب ذو القناة (ACCB)

Accumulative channel-die compression bonding (ACCB):

هذه الطريقة يمكن اجرائها وتطبيقها على العينات التي لها كتل سميكة، حيث يتم تشكيل العينة على هيئة متوازي مستطيلات طويلة ومن ثم قطعها الى نصفين. يتم تنظيف الاسطح

ووضع الجزئيين فوق بعضهما داخل قالب به مجرى بنفس عرض العينة ثم يضغط النصفين الى ان يصبحا بسمك العينة الاصلي (سمك العينة قبل القطع) فيلتحم النصفين ويشكلان قطعة واحدة كما هو موضح بالشكل رقم (6). ويتم تكرار عملية القطع والتكديس والضغط الرابط للعينة في قناة القالب لإنتاج انفعال لدن عالي الشدة. [10].



الشكل رقم .6. طريقة الترابط التراكمي وضغط العينة داخل القالب ذو القناة (ACCB) [10]

5.2. طريقة التكرير التدريجي Stepping refining (STR) processing

قام بض البحاث [11] بإجراء طريقة جديدة، تسمى التكرير التدريجي (STR)، لإنتاج كتلة نانومتريه ثلاثية الأبعاد من معدن الحديد ذو النسبة العالية من الماغنيسيوم. حيث أنه عند اجراء هذه العملية (عملية STR)على العينة، ينخفض متوسط حجم الحبيبات المكونة للبنية البلورية للمعدن إلى حوالي 20 نانومتر – وهو أصغر من أي حجم حبيبات تم الوصول اليه لمعدن الحديد.

ويوضح الشكل رقم (7) الخطوات التي تتم بها عملية الصقل (التكرير) المتدرجة (STR)، حيث يتم تكرار عملية التشوه على البارد (عملية الدرفلة والكبس) وعملية المعالجة الحرارية بالتتابع وبشكل دوري وذلك حسب الخطوات التالية:

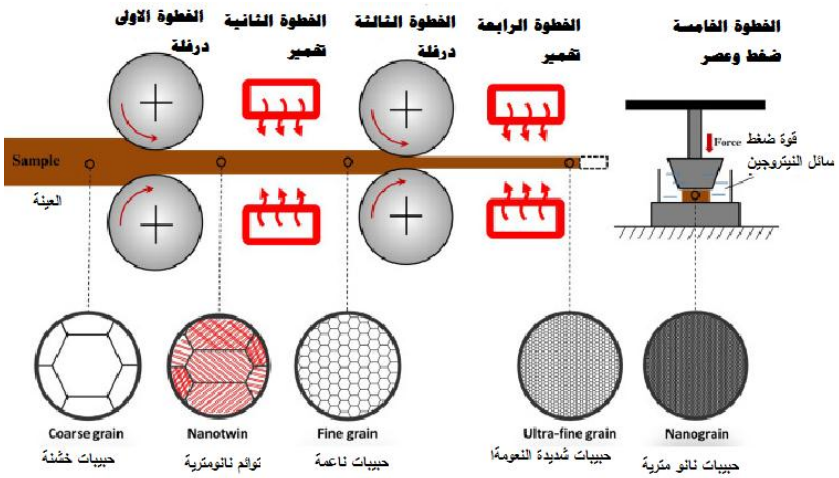
الخطوة الاولى– يتم أولاً اجراء عملية درفلة على البارد للمعدن الخام المستلم لتقديم وإعطاء القوة الدافعة (أي الطاقة اللازمة للتشوه) للحبيبات

الخطوة الثانية: تتم عملية المعالجة الحرارية واعادة التبلر (التلدين أو التخمير) عند درجة حرارة منخفضة لفترة قصيرة (عادةً عدة دقائق) للحصول على بنية بلورية ذات حبيبات ناعمة.

الخطوة الثالثة: –يتم تكرار عملية الدرفلة على البارد

الخطوة الرابعة: تجرى عملية المعالجة الحرارية (اعادة التبلر) مرة أخرى للحصول على بنية بلورية ذات حبيبات فائقة النعومة (UFG)، مع الإشارة إلى أن ظروف تكرار عمليتي الدرفلة والمعالجة الحرارية تختلف إلى حد ما عن تلك الموجودة في الخطوتين الاولى والثانية بسبب الاختلاف في خواص المعدن الناتج منها.

الخطوة الخامسة: – يتم ضغط الصفيحة الملدنة ذات الحبيبات فائقة النعومة (الناتجة من الخطوة الرابعة) برفق عند درجة حرارة النيتروجين السائل، وهكذا يتم انتاج كتلة من المعدن ذات حبيبات نانومترية.

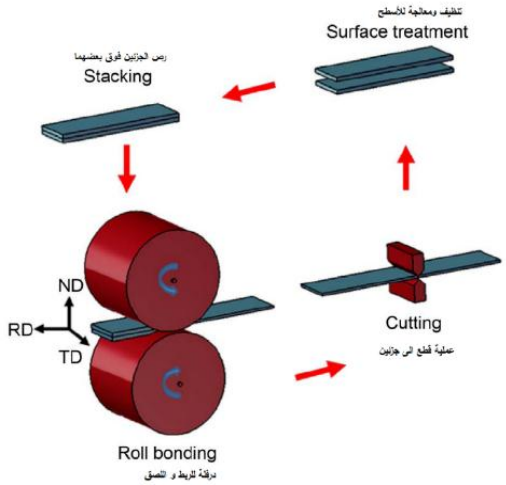


الشكل رقم.7. خطوات اجراء عملية الصقل (التكرير) المتدرجة [11]

ومن مميزات هذه الطريقة انها يمكن بواسطتها انتاج مواد هندسية نانومتريه ذات احجام طويلة نسبيا كما انه يمكن الحصول على معادن ذات صلادة عالية تصل الى 5.8 جيجا باسكال (5.8 GPa) حسب طريقة فيكر (Vickers)[11].

6.2. عملية الدرفلة والربط التراكمي Accumulative Roll Bonding Process

في هذه الطريقة يتم وضع صفيحتين من المعدن متساويتين في الابعاد فوق بعضهما بعد تنظيف الاسطح المتلاصقة بشكل جيد ثم امرارهما خلال درافيل دوارة، بحيث تكون الفتحة بين الدرفلين بسمك يساوي سمك صفيحة واحدة. فينتج من ذلك التحام الصفيحتين ليصبحا صفيحة واحدة بطول مضاعف لطول الصفيحة الواحدة. ومن ثم تقطع الصفيحة الناتجة من الدرفلة الى جزئيين متساويين وتنظف اسطحها، ثم توضع الصفيحتين فوق بعضهما بشكل تام ثم تعاد لهما عملية الدرفلة (انظر الشكل رقم (7)). ويمكن اعادة هذه العملية عدة مرات [12]. وهكذا فيحدث تشوه شديد للحبيبات داخل البنية البلورية للمعدن وتتكسر لحبيبات أصغر مما ينتج حبيبات ناعمة جدا يصل حجمها الى عدة نانومترات.



الشكل رقم.8. عملية الدرفلة والربط التراكمي

وتعتبر هذه الطريقة تقليدية لمعالجة المواد الهندسية ذات التركيب البلوري شديد النعومة Ultra-fine grains (UFG). وتستخدم هذه الطريقة على نطاق واسع لتصنيع المركبات النانوية نظرًا لانخفاض تكلفتها وكفاءتها. حيث انها تمتاز بآليتين قويتين مهمتين:

الأولى: هي تشكيل بنية بلورية نانو مترية للمادة الهندسية بواسطة التشوه اللدن العالي والشديد Several Plastic Deformation (SPD)،

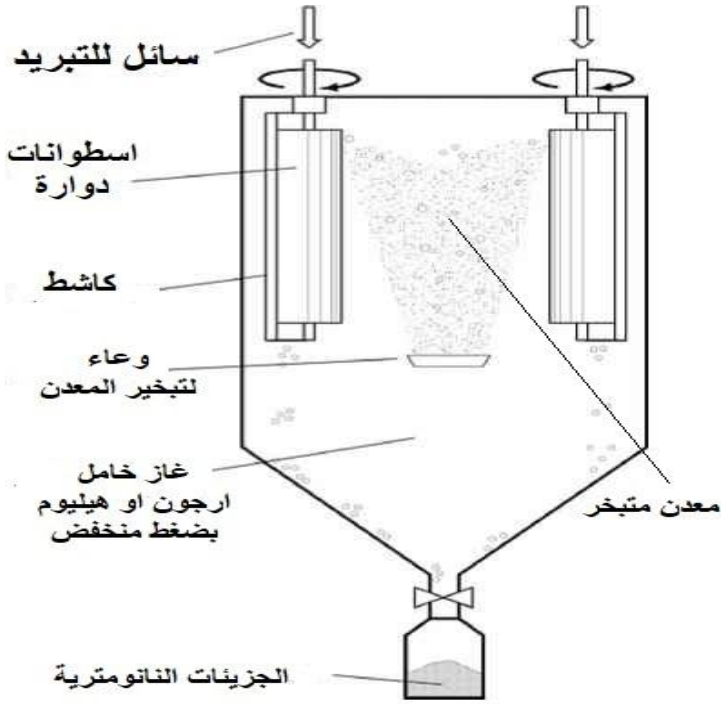
والثانية: هي تقوية المصفوفة المعدنية بواسطة انتاج الجزيئات الصلدة التي تشبه السيراميك [13].

7.2. إنتاج الجسيمات النانوية بطريق تكثيف الغاز الخامل Inert-gas condensation

في هذه الطريقة نجد أن مفاعل تكثيف الغاز الخامل يتكون من ثلاثة مكونات رئيسية: بوتقة، وغرفة مفرغة، وركيزة باردة. كما في الشكل رقم (9). [13]. حيث يتم تسخين البوتقة بشكل مقاوم لتبخر الجسيمات داخل المفاعل وينتج عن ذلك أن غرفة التفريغ تمتلئ بغاز خامل، عادةً الهيليوم أو الأرجون، ويتم تعبئتها مرة أخرى عند ضغوط منخفضة، عادةً بين 1 –20 بار. والغرض من الركيزة الباردة هو جمع الجسيمات النانوية بمجرد تشكيلها في النظام.

تسخن البوتقة لتبخير المواد الخام، فتبدأ الجسيمات النانوية ذات الأساس المعدني عادةً بالتشكل في المنطقة فوق البوتقة بسبب التفاعل بين الجسيمات المتبخرة والغاز الخامل للغرفة هو ما يسبب حدوث تكون حبيبا المعدن النانوية.

يمكن إتمام عملية تبخر المعدن الخام بواسطة أحد الطرق التالية: طريقة رش باستخدام المجال المغناطيسي الشديد (sputtering magnetron) أو تسليط شعاع الإلكترون أو الليزر أو تسخين المباشر لبوتقة المعدن.



الشكل رقم.9. مفاعل إنتاج الجسيمات النانوية بطريق تكثيف الغاز الخامل [13]

الامر الذي يؤدي الى انتقال الجسيمات من المنطقة المفرطة التشبع أعلى البوتقة إلى الركيزة الباردة الدوارة عن طريق التدفق الحراري داخل المفاعل. تتشبث الجسيمات بالركيزة الباردة وينتهي نمو الجسيمات. ثم يتم كشط هذه الجسيمات من الركيزة الباردة وتجميعها في اوعية خاصة. يوضح الشكل (9) مخططًا أساسيًا لمفاعل تكثيف الغاز الخامل. مع ملاحظة أنه يمكن

التحكم في حجم الجسيمات النانوية المتكونة عن طريق تغيير في نوع وقيمة المتغيرات المختلفة لعملية الإنتاج، ومن أهمها تغيير نوع الغاز الخامل المستخدم في العملية.

3- الخواص العامة للمواد النانو مترية

1.3. الخواص الميكانيكية

وجد أن السلوك الميكانيكي للمواد ذات البنية النانوية يعتمد على حجم الحبيبات. وقد وجد أن الخواص الميكانيكية مثل المتانة والصلادة قد تحسنت مع تقليل حجم الحبيبات ضمن نطاقات معينة [3]. من ناحية أخرى، يؤدي انخفاض حجم الحبوب إلى زيادة اللدونة. ففي معظم المعادن التي يقل حجم حبيباتها عن 25 نانومتر، تكون اللدونة صغيرة. هناك ثلاثة عوامل رئيسية تتحكم في لدونة المواد ذات البنية النانوية، وهي: (1) المخلفات الناتجة من عملية انتاج المواد النانوية؛ (2) عدم استقرار وثبوت قوة الشد. (3) تكون نوايا للتشققات داخل المعادن المنتجة. وقد تم دراسة العلاقة بين إجهاد الخضوع وحجم الحبيبات في بعض المعادن والسبائك ووجد انها تخضع للمعادلة التالية [1].

$$\sigma_y = \sigma_0 + kD^{-0.5} \qquad (1)$$

حيث

σ_y اجهاد الخضوع

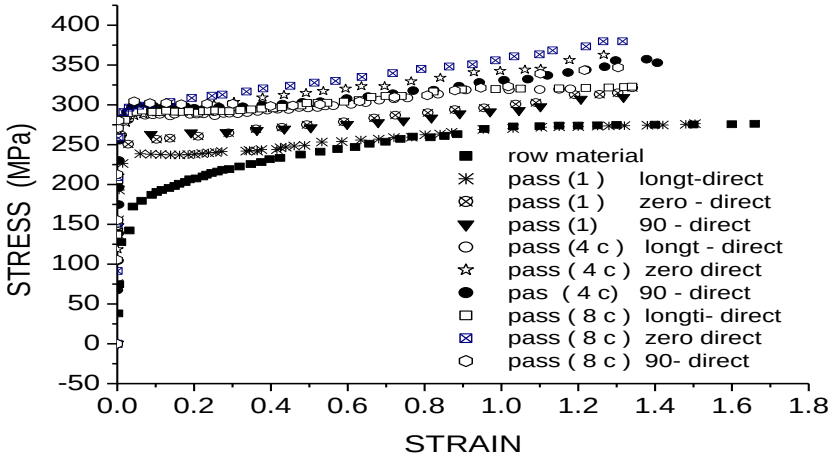
σ_0 هو الاجهاد المبدئي و الاجهاد اللازم لتغير شكل البنية البلورية للمعدن

k ثابت

D هو قطر الحبيبات داخل البنية البلورية للمعدن.

ووقد اثبتت بعض الدراسات الحديثة ان الخواص الميكانيكية للمعادن النانو مترية تتحسن بعض الشيء [15]، وترتفع قيمة اجهاد الخضوع كلما زاد عدد مرات اجراء عملية التشوه التي

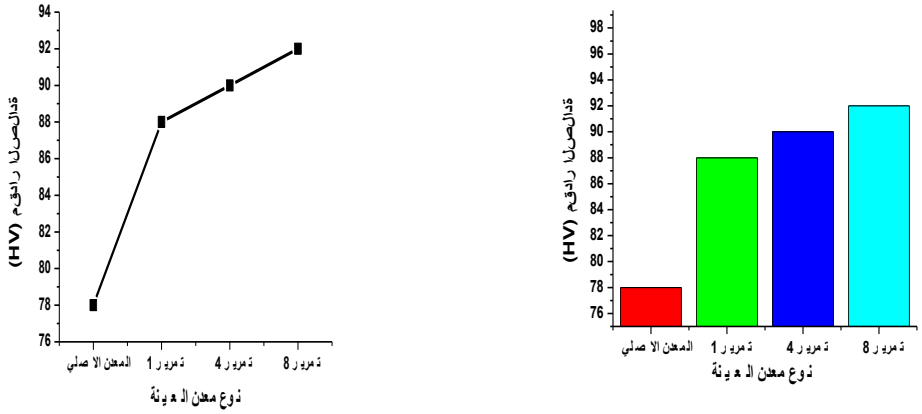
تجرى للمعدن اثناء تكرار أحد العمليات السابقة لإنتاج المواد النانوية (عدد مرات التمرير (Number of Passes)) كما هو موضح بالشكل رقم (10). [16].



الشكل.10. منحنيات اجهاد الانسياب لسبيكة الالومينيوم (AL-6082) منتجة بواسطة عملية الايكاب

يتضح من الشكل رقم (10)، انه كلما زادت عدد مرات اجراء عملية التشوه بواسطة التمرير في عملية الايكاب (Number of Passes) زادت قيمة اجهاد الخضوع و الاجهاد الأقصى ، حيث وصلت نسبة الزيادة الى حوالي 16% من قيمة الاجهاد للمعدن الأصلي. وهذا ينطبق على كل أنواع عمليات التشوه التي تنتج المواد النانوية.

كما تبين من نتائج بعض الدراسات العلمية [17]، أن مقدار صلادة سطح المعدن المنتج بواسطة الايكاب قد زادت زيادة طردية مع عدد تكرار تمرير المعدن .Pass numbers حيث وصلت نسبة زيادة الصلادة الى حوالي 20% من صلاة المعدن الأصلي. كما هو موضح بالشكل رقم (11).

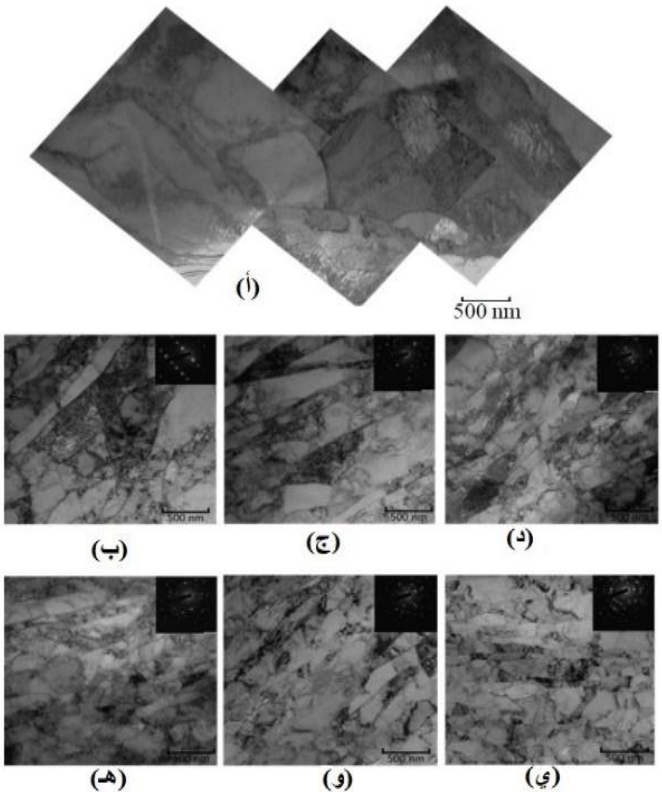


الشكل رقم.11. يوضح مقدار الصلادة لمعدن الالومينيوم 6082 قبل وبعد عملية الايكاب[17].

كما تم دراسة معدلات نمو شقوق التعب (The fatigue crack growth rates) في المعادن ذات الحبيبات متناهية الصغر (النانوية) لبعض السبائك المعدنية ومقارنتها مع نمو شقوق التعب في مسحوق نفس المعادن فتبين ان معدلات نمو تشققات التعب في المواد النانوية أعلى بكثير من تلك الموجودة في المواد العادية.

قد يُعزى ارتفاع معدلات نمو الشقوق الناتجة عن الإجهاد وانخفاض العتبات في UFG Al-7.5Mg إلى التشكل الأكثر سلاسة لسطح الكسر وانخفاض إغلاق الشقوق الناتج عن الخشونة وانحراف الشقوق.

وتبين من التصوير المحوسب بواسطة المجهر الالكتروني التي أجري على العينات أن البنية المجهرية للتركيب البلوري لمعدن الصلب الكربوني المنخفض St37 بعد إجراء عملية ضغط المعدن داخل اخاديد متموجة، (GROOVE PRESSING) أن الحبيبات أصبحت أصغر في الحجم حتى أنها بلغت بحجم حوالي 200 نانو متر[18]. وفي دراسة أخرى تبين ان الحبيبات أصبحت أصغر كلما زاد عدد التمريرات داخل قالب الايكاب كما هو موضح بالشكل رقم (12)[19].



الشكل رقم .12. يوضح البنية المجهرية لمعدن لسبيكة الحديد كروم (CN Fe-20%Cr) بعد إجراء عملية الايكاب –[19]

(أ): بعد تمريرة واحدة (one pass) ، (ب): بعد اجراء تمريرتين بطريقة المسار A (two passes) ، (ج): تمريرتين بطريقة المسار Bc، (د): تمريرتين بطريقة المسار C، (هـ): بعد اجراء اربع تمريرات بطريقة المسار A ، (و): بعد اجراء اربع تمريرات بطريقة المسار Bc، (ي): بعد اجراء اربع تمريرات بطريقة المسار C.

2.3. الخواص الفيزيائية للمواد النانوية

من الناحية العلمية فإن الخصائص الفيزيائية للمواد النانوية تختلف اختلافًا كبيرًا عن المواد ذات البلورات الكبيرة (المادة الاصلية) من نفس التركيب الكيميائي (الجدول 1). ففي

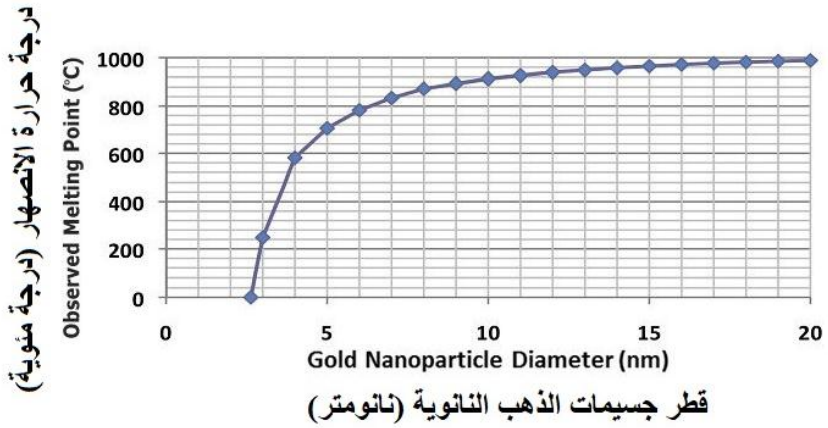
بعض الحالات، تكون هذه الاختلافات قليلة من حيث الحجم. ولكن في بعضها الاخر يكون هناك اختلافًا كبيرًا في قيم ومقادير بعض الخواص الفيزيائية مثل: نقطة الانصهار، والتغيير في التركيب البلوري للمعدن، والتغيير في الخصائص المغناطيسية والبصرية، وموصلية المادة، وما إلى ذلك. علاوة على ذلك نجد ان نسبة السطح إلى الحجم هي خاصية مهمة لها تأثير على الخصائص الجديدة مقارنة بخصائص المواد الاصلية. يزداد عدد الذرات الموجودة على السطح (فيما يتعلق بالعدد الإجمالي للذرات) كلما أصبح حجم الجسيم أصغر. عندما تصبح الجزيئات أصغر، تزداد نسبة السطح إلى الحجم ويصبح تأثير الغلاف على الخصائص المغناطيسية أكثر وضوح. على سبيل المثال، تحتوي جسيمات الحديد بحجم 3 نانومتر على 50٪ بينما تحتوي جزيئات الحديد بحجم 30 نانومتر على 5٪ فقط من الذرات على سطحها والتي لها تأثير كبير على خصائصها الفيزيائية [20].

الجدول (1) الخصائص الشائعة للمواد النانوية التي تختلف اختلافًا كبيرًا عن خصائص المواد الاصلية التي لها نفس التركيب الكيميائي[20]

الخاصية	مثال على ذلك
عامل محفز	زيادة النشاط السطحي للجزيئات
الكهربائية	زيادة التوصيل الكهربائي لمواد السيراميك والمركبات النانوية المغناطيسية زيادة المقاومة الكهربائية في المعادن
المغناطيسية	تغيير نقطة انتقال المرحلة المغناطيسية زيادة القسر ظهور المغناطيسية الفائقة
الخواص البصرية	تحول في الامتصاص البصري وتغير في خصائص الفلورسنت زيادة الكفاءة الكمية لبلورات أشباه الموصلات

و بالرجوع لزيادة نسبة السطح إلى الحجم في الجسيمات وجد أن زيادة تلك النسبة تؤدي إلى انخفاض درجات حرارة الانصهار، وانخفاض المغنطة، والتغيرات في النشاط التحفيزي، وما إلى ذلك. كذلك، يؤدي وجود عدد كبير من الذرات على السطح إلى زيادة كبيرة فيما يعرف ب "نشاط السطح" (surface activity) وهو أمر مناسب جدًا للتفاعلات الكيميائية. ومع ذلك، ونظرًا لزيادة النشاط، تميل الجسيمات النانوية إلى تكوين التجمعات (متراكمة مع بعضها) وتكوين الكتل المتماسكة التي يمكن أن تسبب فقدان الخصائص المفضلة. لذلك، من الضروري تثبيت الجسيمات ببعض العمليات الإضافية: على سبيل المثال، من الممكن وضع الجسيمات في مصفوفة مناسبة أو تغليفها بمادة مختلفة حتى وان كانت خصائصها متغيرة مع هذا النوع من تعديل السطح. عدد الذرات على السطح أقل من عدد الذرات الموجودة داخل الجسيم، مما قد يتسبب في زيادة طاقة السطح.

إن عدد الذرات على السطح في المواد النانوية هي أقل من عدد الذرات الموجودة داخل الجسيم ككل، مما قد يتسبب في زيادة ما يعرف بطاقة السطح. لذلك، يمكن أن يحدث انتشار وتوزع الذرات حتى في درجات حرارة المنخفضة. على سبيل المثال، تبلغ درجة انصهار الذهب 1063 درجة مئوية، في حين أن الجسيمات النانوية من الذهب بأقطار جسيمية أقل من 5 نانومتر لها نقطة انصهار تبلغ 300 درجة مئوية. يوضح الشكل 13 العلاقة بين درجة حرارة الانصهار وحجم جسيمات الذهب النانوية [21].



الشكل. 13. العلاقة بين درجة حرارة الانصهار وحجم جسيمات الذهب النانوية [21].

1.2.3.الخواص الضوئية للمواد النانومترية

"لون" المادة هو دالة للتفاعل بين الضوء والشيء. إذا كانت مادة ما تمتص ضوءً لأطوال موجية معينة، فلن يرى المراقب هذه الألوان في الضوء المنعكس. فقط الأطوال الموجية المنعكسة تصل إلى أعيننا وهذا يجعل الجسم يظهر بلون معين. على سبيل المثال، تظهر الأوراق باللون الأخضر لأن الكلوروفيل، وهو صبغة، يمتص اللونين الأزرق والأحمر من الطيف ويعكس اللون الأخضر.

والضوء العادي الواقع على مادة يمكن أن ينتقل او يمتص أو ينعكس، ومن هذا يمكن حساب كمية الضوء الكلية (I) من المعادلة التالية:

$$I = T + A + R \quad (2$$

حيث

(T) كمية الضوء المنتقلة خلال الجسم

(A) كمية الضوء الممتصة في الجسم

(R) كمية الضوء المنعكسة من الجسم

يمكن أن يساهم تشتت الضوء (S) أيضًا في إظهار لونه (أو شفافيته) بألوان مختلفة، نظرًا لتقليل حجم الحبيبات المواد.

تعرض بعض المواد النانوية خصائص بصرية مختلفة جدًا، مثل اللون والشفافية، مقارنةً بالمواد الاصلية. في الواقع، ان هذا يعتمد على الحصر الكمي لما يعرف بالحوامل الكهربائية (Electrical Carriers) داخل الجسيمات النانوية، هذا السلوك يمكن توضيحه من خلال ما يعرف بظاهرة البلازامون (Plasmons)

عندما يتعرض جسيم معدني للضوء، فإن المجال الكهرومغناطيسي المتذبذب للضوء يؤدي إلى تذبذب جماعي ومتماسك للإلكترونات الحرة (إلكترونات نطاق التوصيل) للمعدن. يتسبب هذا التذبذب الإلكتروني حول سطح الجسيم في فصل الشحنة فيما يتعلق بالشبكة الأيونية، مما يؤدي إلى تذبذب ثنائي القطب على طول اتجاه المجال الكهربائي للضوء. تصل سعة التذبذب إلى الحد الأقصى عند تردد معين، يسمى رنين البلازمون السطحي (SPR). يحث SPR على امتصاص قوي للضوء الساقط وبالتالي يمكن قياسه باستخدام مطياف الامتصاص حيث يعتبر شريط رنين البلازمون السطحي أقوى بكثير للجسيمات النانوية البلازمية في المعادن الثمينة مثل الذهب والفضة من المعادن الأخرى.

تعتمد شدة نطاق البلازمون السطحي وطول موجة الضوء المنعكس من سطح المعدن على العوامل المؤثرة على كثافة شحنة الإلكترون الموجود على سطح الجسيمات مثل : - نوع المعدن ، حجم الجسيمات , و الحبيبات، شكل بنية التركيب الداخلي وثابت العزل للوسط المحيط.

من هذا السبب، نرى لونًا مختلفًا من معدن الذهب (على سبيل المثال) عندما تصبح جزيئات الذهب في المقياس النانوي. كما هو موضح بالشكل رقم (14) [22].

لون عنصر الذهب ذو حجم حبيبات عادي

لون عنصر الذهب بأحجام حبيبات نانومتري

الشكل.14. اختلاف لون عنصر الذهب بسبب اختلاف حجم جسيماته

2.2.3. الموصلية الحرارية في المواد النانوية- :

من المعلوم ان الفونون (phonon) هو عبارة عن حالة اهتزاز كمومية تحدث في الشبكات البلورية الصلبة، مثل شبكات الذرات في بلورات المواد الصلبة، مما يجعلها تلعب دورًا كبيرًا في فيزياء المادة الصلبة حيث تسهم في تحديد بعض خواص الجسم الصلب مثل الناقلية الحرارية والناقلية الكهربائية. بشكل عام، ستؤدي زيادة عدد حدود الحبوب إلى تعزيز تشتت الفونون عند الحدود المضطربة، مما يؤدي إلى انخفاض الموصلية الحرارية. وبالتالي، من المتوقع أن يكون للمواد النانوية المتناهية الصغر موصلية حرارية أقل مقارنة بالمواد التقليدية. ومع ذلك، نظرًا لأن أحجام الحبوب تفترض أبعادًا نانوية، فإن حجمها يصبح مشابهًا لمتوسط المسارات الحرة للفونونات التي تنقل الطاقة الحرارية. وبالتالي، يمكن أن تظهر المواد النانوية خصائص مختلفة مقارنة بالمواد ذات الحبيبات الخشنة، بسبب حبس الفوتون وتأثيرات تكميم نقل الفوتون [23].

وفي هذا السياق، اثبتت بعض التجارب ان الموصلية الحرارية تتناقص مع انخفاض حجم حبيبات المواد النانوية. وفي بعض الأبحاث [24]، تم حساب التباين في التوصيل الحراري

مع الحجم للأسلاك النانوية، والجسيمات النانوية، والجسيمات الكروية المنتظمة رباعية السطوح، والجسيمات العادية ثماني السطوح، وأشكال الجسيمات العادية عشرونية الوجوه.

3.3. الخواص الكهربائية للمواد النانوية

تتأثر الخصائص الكهربائية وخاصة التيارات الكهربائية بشكل كبير بتأثيرات الحبس الكمومي (الحبس الكمي) أو ما يعرف بتقييد الكم (Quantum confinement) ويمكن تعريفه بصورة مبسطة على انه حبس الإلكترون داخل موضع يشبه الصندوق وإبقاءه ضمن حجم محدود في البنى النانوية، ما ينتج خواص وميزات جديدة تمامًا في المعدن، ومن أهم هذه الميزات هي ما يعرف تكميم الموصلية بحيث في ظل الظروف المثالية، تصبح الموصلية عددًا صحيحًا مضاعفًا من كمومية التوصيل الأساسية، والتي يُشار إليها بالرمز G0، والتي تعتبر الوحدة الكمية للتوصيل الكهربائي، يتم تعريفه بواسطة الشحنة الأولية e وثابت بلانك h على النحو التالي:

$$G_0 = 2\frac{e^2}{h} \qquad (3)$$

كما تبين في دراسة أخرى أجريت لتقدير الموصلية الكهربائية للبطاريات ان الأقطاب الكهربائية المغطاة بالجسيمات النانوية لها خصائص مغايرة لخصائص الأقطاب الكهربائية التقليدية التي لها نفس التركيب الكيميائي، حيث تنشأ هذه التغييرات بسبب مساحة السطح الكبيرة والتوصيل المعزز [25]. فكلما كان أحجام حبيبات المواد إلى أقل من 100 نانومتر زادت قدرتها على توصيل التيار الكهربي.

4- بعض استخدامات المواد النانوية

1.4. استخدام المواد النانوية في الصناعة

هناك عدة استخدامات للمواد الهندسية ذات البنية النانومترية في المجالات الصناعية المختلفة، فقد تم استخدامها في المجالات الغذائية، بما في ذلك معالجة الأغذية، وتغليف الأغذية، وتطوير الأغذية الوظيفية، وسلامة الأغذية، والكشف عن مسببات الأمراض التي تنتقل عن طريق الأغذية، وإطالة العمر الافتراضي للأغذية ومنتجات الطعام الاخرى. وقد تم تحقيق نتائج واعدة في حفظ الطعام باستخدام المواد النانوية حيث انها تعمل على حماية الطعام من الرطوبة والدهون والغازات والنكهات غير المرغوب فيها والروائح [26].

وفي مجالات الطاقة، تستخدم المواد النانوية في مجالات حفظ وتخزين الطاقة بشكل أكثر كفاءة، وهذ يعزز استخدام الطاقة المتجددة من خلال تقنية النانو الخضراء من خلال توليد الطاقة وتخزينها واستخدامها دون انبعاث غازات دفيئة ضارة مثل ثاني أكسيد الكربون.

وفي الخلايا الشمسية، تزيد الجسيمات النانوية المستخدمة في صناعة هذه الخلايا من كمية الطاقة الممتصة من ضوء الشمس، حيث يتم صناعة الخلايا الشمسية حاليًا من طبقات من السيليكون تمتص أشعة الشمس وتحولها إلى كهرباء قابلة للاستخدام. باستخدام المعادن الثمينة مثل الذهب المطلي بالسيليكون، وقد وجد ان تحويل الطاقة إلى تيار كهربائي بهذه الطريقة أصبح أكثر كفاءة، وباستخدام الجسيمات النانوية، تنبعث حرارة أقل مما قلل كمية الفاقد من الطاقة ويزيد من الكهرباء[27].

2.4. استخدامات المواد النانوية في المجالات الانشائية و المدنية

بدأت الشركات الصناعية المتخصصة في المجالات الهندسية المدنية والانشائية مؤخرًا في استخدام المواد النانوية في صناعة مواد البناء والتشييد. ففي هذا المجال، تُستخدم هذه المواد

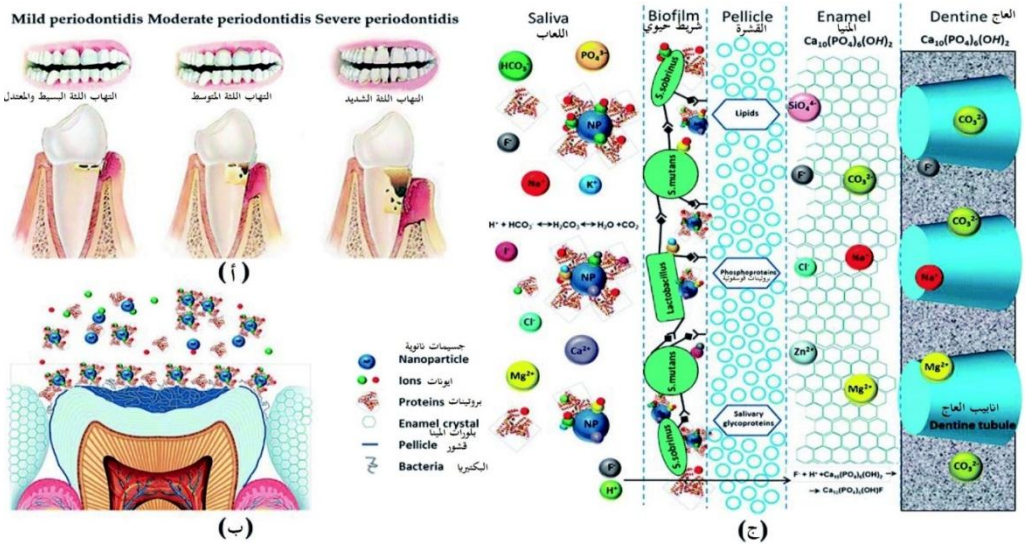
بشكل أساسي لإنتاج هياكل انشائية للمباني و الجسور تكون ذات خواص ميكانيكية أقوى، و وفي نفس الوقت تكون أخف وزنا، كذلك تم استخدام المواد النانوية لإنتاج مواد اسمنتية ذات خصائص محسنة، وفي مجال صناعة مواد الطلاء والصيانة تم انتاج مواد منخفض التكاليف ومقاومة للظروف الطبيعية، وتم استخدام المواد النانوية في صناعة مواد ربط ولحام الأنابيب، ومواد عزل الحرارة والصوت، وفي صناعة الزجاج، وفي المواد العازلة للماء، والمواد الواقية من الأشعة فوق البنفسجية، وأجهزة استشعار نانوية لمراقبة سلامة البناء، وفي صناعة الخلايا الشمسية. وغيرها من المجالات الهندسية المدنية [28].

3.4. استخدامات المواد النانومترية في المجالات الطبية

الخصائص الفريدة للمواد النانوية مثل عوامل التباين لتصوير الخلية وعلاجات السرطان جعلها محل اهتمام الكثير من البحاث والعلماء في المجال الطبي. فقد بدأ استخدام التقنية النانوية في المجال الطبي والعلوم الصيدلانية بشكل واسع من خلال تواصلها وتفاعلها مع غالبية الجزيئات والتركيبات الحيوية وإمكانية توصيل الدواء إلى خلايا محددةٍ في الجسم مما بعد مفيدا جدا في مكافحة الأورام السرطانية. ويعد حجم المواد النانوية متماثل مع حجم غالبية الجزيئات والتركيبات الحيوية؛ وبهذا يمكن تقليص عملية استهلاك الدواء بالإضافة إلى منع حدوث الأعراض الجانبية من خلال إيداع العامل النشط في المنطقة المريضة فقط وبدون أية جرعاتٍ أعلى مما هو مطلوب.

وقد حظي تطبيق المواد النانوية في هندسة أنسجة الأسنان باهتمام متزايد، بسبب تزايد حدوث الإصابة بأمراض اللثة أو الأمراض ذات الصلة (مثل أمراض القلب والأوعية الدموية، مرض السكري والتهاب المفاصل الروماتيزم) مع تقدم العمر، وضعف الأنسجة اللثوية وفقدان القدرة على الإصلاح الذاتي (الشكل 15 –أ)، لذا أصبحت هناك حاجة إلى علاجات فعالة

لإصلاح الأنسجة التالفة واستعادة الهيكل والوظيفة الأصليين في المرضى الذين يعانون من أمراض اللثة. لحسن الحظ، فإن تطوير العديد من المواد النانوية المعدنية والبوليميرية قد قدم دعمًا قويًا لعلاج الأمراض المتعلقة بالأسنان (الشكل. 15– ب و ج) [29].



الشكل .15. (أ) **درجات مختلفة من التهاب دواعم السن. (ب و ج) الخصائص التشريحية والكيميائية للتفاعلات المحتملة مع الجسيمات النانوية (NPs) [28].**

كما يتم استخدام جسيمات أكسيد الحديديك النانوية في التصوير بالرنين المغناطيسي لما لها من خواص مغناطيسية مميزة يجعل منها عوامل ذات تباين عالي في التصوير بالرنين المغناطيسي وقد استخدمت في العديد من تطبيقات التصوير الطبي الحيوي، مثل التصوير الجزيئي [30].

كما تم استخدام المواد النانوية في عدة مجالات هندسية وعلمية تطبيقية أخرى.

5- الاستنتاجات

في هذا البحث تم استعراض المواد النانومترية (او المواد النانوية). وتم دراسة الطرق التي يتم تصنيعها بها وتم التعرض لبعض الخواص الميكانيكية والطبيعية لهذه المواد. ومن ثم شرح بعض الاستخدامات الهندسية والتطبيقية والطبية لها. وقد تبين من هذه الدراسة أن:

1. المواد النانوية هي مواد هندسية يكون فيها حجم الحبيبات (Grain Size) في التركيب البلوري لا يتعدى عدة عشرات من النانومتر (Nanometers).
2. المواد النانوية يتم استخدامها في المجالات الهندسية والصناعية وذلك لأنها تتمتع بخواص ميكانيكية وطبيعية جيدة تجعلها مناسبة لجميع التطبيقات الهندسية والبيئية والطبية.
3. هناك عدة طرق لإنتاج المواد النانومترية تختلف باختلاف طريقة حصول الانفعالات الشديدة والعالية ولكل طريقة ميزات وعيوب وحدود لتطبيقها.
4. السلوك الميكانيكي للمواد ذات البنية النانوية يعتمد على حجم الحبيبات. وقد وجد أن الخواص الميكانيكية مثل المتانة والصلادة قد تحسنت مع تقليل حجم الحبيبات ضمن نطاقات معينة.
5. كلما زادت عدد مرات اجراء عملية التشوه بواسطة التمرير في عملية الايكاب (Number of Passes) زادت قيمة اجهاد الخضوع والاجهاد الأقصى، حيث وصلت نسبة الزيادة الى حوالي 16% من قيمة الاجهاد للمعدن الأصلي.
6. مقدار صلادة سطح المعدن المنتج بواسطة الايكاب قد زادت زيادة طردية مع عدد تكرار تمرير المعدن Pass numbers. حيث وصلت نسبة زيادة الصلادة الى حوالي 20% من صلاة المعدن الأصلي.
7. كلما أصبح حجم الحبيبات أصغر، تصبح الجزيئات المكونة للمعدن أصغر وبذلك تزداد نسبة السطح إلى الحجم مما يؤدي إلى انخفاض درجات حرارة الانصهار، وانخفاض

المغنطة، والتغيرات في النشاط التحفيزي. كذلك، يؤدي وجود عدد كبير من الذرات على السطح إلى زيادة كبيرة فيما يعرف ب "نشاط السطح" (surface activity) وهو أمر مناسب جدًا للتفاعلات الكيميائية.

8. بعض المواد النانوية لها خصائص بصرية مختلفة جدًا، مثل اللون والشفافية، مقارنةً بالمواد الاصلية. و هذا يعتمد على الحصر الكمي لما يعرف بالحوامل الكهربائية (Electrical Carriers) داخل الجسيمات النانوية، والذي يمكن توضيحه من خلال ما يعرف بظاهرة البلازامون (Plasmons).
9. الموصلية الحرارية تتناقص مع انخفاض حجم حبيبات المواد النانوية.
10. كلما قلت أحجام حبيبات المواد إلى أقل من 100 نانومتر زادت قدرتها على توصيل التيار الكهربي.
11. المواد الهندسية ذات البنية النانومترية تستخدم في المجالات الصناعية المختلفة، مثل الصناعات الغذائية، والمجالات الهندسية والطبية وكانت لها نتائج وميزات واعدة جدا.

6- التوصيات

نظرا لافتقار المكتبات العلمية ببعض الجامعات الليبية الى وجود اشتراكات علمية بالمجلات العالمية المتخصصة في بعض المجالات العلمية الدقيقة والحديثة ومنها مجال تقنيات النانو فإننا نوصي بالتالي:

1. على الجهات المختصة العمل على ربط الجامعات الليبية بمكتبات الجامعات العالمية المتقدمة لتمكين الباحث الليبي من الاطلاع على اخر البحوث العلمية في مجال تخصصه

2. العمل على انشاء مركز متخصص بتقنيات النانو وامداده بالكوادر البشرية المتخصصة والأجهزة والمعدات الحديثة.

3. العمل على ايفاد ذوي التخصصات الدقيقة الحديثة الى بلدان عالمية متطورة في مجال تخصصهم للاطلاع واجراء البحوث العلمية، ولتوطين هذه التخصصات داخلياً.

4. اجراء المزيد من الدراسات والبحوث التي من شأنها تسليط الضوء على جانب من جوانب استخدامات المواد النانوية مثل استخدامها في مجال الاتصالات وتقنية المعلومات.

المراجع

[1] M.A.Meyers, A.Mishra, D.J.Benson, "Mechanical properties of nanocrystalline materials", Progress in Materials Science, Volume 51, Issue 4, May 2006, Pages 427-556.

[2] A.Yu. Vinogradov, V.V. Stolyarov b, S. Hashimoto, R.Z. Valiev, "Cyclic behaviour of ultrafine-grain titanium produced by severe plastic deformation", J. Materials Science and Engineering A, Vol.318, pp.163–173, 2001.

[3] Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation R.Z. Valiev*, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov Institute of Physics of Advanced Materials, Ufa State Aviation Technical University, 12 K. Marx Street, 450000 Ufa, Russian Federation Received 4 January 1999; received in revised form 10 June 1999; accepted 25 August 1999 .

[4] M.A.Meyers , A.Mishra , D.J.Benson ,Mechanical properties of nanocrystallinematerials, Progress in materials science (2005), www.sciencedirect.com

[5] Equal Channel Angular Extrusion Progress Report for March 1998-May 1999 ((Idaho National Engineering and Environmental Laboratory Idaho Falls, Idaho 83415 "Prepared for the U.S. Department of Energy Assistant Secretary for Environmental Management :Under DOE Idaho Operations Office Contract DE-AC07-99ID13 Dissertation.

[6] Leijun Li and Jouko Virta," Ultra-high Strength Steel Wires Processed by Severe Plastic Deformation for Ultrafine Grained Microstructure", Article in Materials Science and Technology · May 2011.

[7] Zhilyaev, A.P. & Langdon, T.G. (2008). Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. Progress in Materials Science, 53(6), 893–979

[8] . Cao, Y., Wang, Y., Liao, X. Kawasaki, M., Ringer, S., Langdon, T.G. and Zhu. Y.T. "Concurrent Microstructural Evolution of Ferrite and Austenite in a Duplex Stainless Steel Processed by High-Pressure Torsion". Acta Materialia, 2014. 63, 16-29.http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2013.09.030 [Citation Time(s):1]

[9] Valiev, R., Korznikov, A. and Mulyukov, R. (1993) Structure and Properties of Ultrafine-Grained Materials Produced by Severe Plastic Deformation, Materials Science and Engineering A, 186, 141-148. http://dx.doi.org/10.1016/0921-5093(93)90717-S [Citation Time(s):2]

[10] Naoya Kamikawa, Tadashi Furuhara, "Accumulative channel-die compression bonding (ACCB): a new severe plastic deformation process to produce bulk nanostructured metals" Journal of Materials Processing Technology, Volume 213, Issue 8, August 2013, Pages 1412-1418

[11] Shao.C.W, Zhang.P, TianY.Z, Wang.Q, Zhang.Z.F, " A novel top-down approach to make bulk nanostructured metal with low stacking fault energy", Materialia Journal, Volume 5, March 2019, 100201.

[12] Erell BONNOT, François BRISSET, Anne-Laure HELBERT, and Thierry BAUDIN," Microstructure evolution during the Accumulative Roll Bonding process" Materials Science Forum Vols. 706-709 (2012) pp 1757-1762.

[13] Jalal Kahani Khabushan, Soheila Bazzaz Bonabi, " Investigating of the Microstructure and Mechanical Properties of Al-Based Composite Reinforced with Nano-Trioxide Tungsten via Accumulative Roll Bonding Process", Open Journal of Metal, 2017, 7, 9-23.

[14] https://www.beyonddiscovery.org/powder-metallurgy/inert-gas-condensation.html.

[15] Ahmed.S.M.Agena, "Finite Element Simulation of a Forward Extrusion of Copper produced by Equal Channel Angular Pressing", international Science and Technology Journal (ISTJ), Vol:27, pp:450-469, 2021.

[16] Ahmed S.M.Agena, A study of flow characteristics of nanostructured Al-6082 alloy produced by ECAP under upsetting test, Journal of Materials Processing Technology, Volume 209, Issue 2, 19, pp: 856-863, January 2009.

[17] احمد الصغير المهدي جاب الله عجينة، " السلوك الغير منتظم في الخواص الميكانيكية للمواد الهندسية المنتجة بواسطة عملية البثق داخل قالب به قناتين متساويتان ومتعامدتان "، مجلة العلوم الهندسية، تصدر عن كلية التقنية الصناعية النجيلة ليبيا. ص 15. ECAP مجلد 1. 2016.

[18] Hamdi Abdulhamid Raghs, "IMPROVEMENT OF STRENGTH OF LOW CARBONST 37 STEEL BY GROOVE PRESSING", International Science and Technology Journal, Vol.30, 2022.

[19] Muhammad Rifai, Hiroyuki Miyamoto, Hiroshi Fujiwara, "The Effect of ECAP Deformation Route on Microstructure, Mechanical and Electrochemical Properties of Low CN Fe-20%Cr Alloy", Materials Sciences and Applications, 2014, 5, 568-578.

[20] Nada M. Čitaković, "PHYSICAL PROPERTIES OF NANOMATERIAL", SVOJNOTEHNIČKI GLASNIK / MILITARY TECHNICAL COURIER, 2019, Vol. 67, Issue 1.

[21] Daniel J. C. Herr," What's so Unusual About Nanomaterial Melting Points?", https://www.carolina.com/teacher-resources/Interactive/what%27s-so-unusual-about-nanomaterial-melting-points%3F/tr23010.tr. 11-2022.

[22] https://www.phornano.com/4ngold, 11-2022.

[23] Xingzhe Wang, Yumei Yang, and Linli Zhu, "Effect of grain sizes and shapes on phonon thermal conductivity of bulk thermoelectric materials", Journal of Applied Physics. 110, 024312 (2011).

[24] Rohit S. KHEDKAR 1, Shriram S. SONAWANE 2, Kailas L. WASEWAR, "Effect of nanomaterial properties on thermal conductivity of heat transfer fluids and nanomaterial suspension" 4th Micro and Nano Flows Conference, UCL, London, UK, 7-10 September 2014

[25] Johanna Löberg, Jenny Perez Holmberg, Ingela Mattisson, Anna Arvidsson, and Elisabet Ahlberg, "Electronic Properties of TiO2 Nanoparticles Films and the Effect on Apatite-Forming Ability", Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Dentistry, Volume 2013, Article ID 139615, 14 pages.

[26] Trepti Singh, Shruti Shukla, Pradeep Kumar, Verinder Wahla, Vivek K. Bajpai and Irfan A. Rather, "Application of Nanotechnology in Food Science: Perception and Overview", Front. Microbiol., 07 August 2017, https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01501.

[27] احمد الصغير المهدي عجينة، " تقنيات النانو والتقنيات الحديثة، دراسة لاستخدامات المواد النانومترية وتقنية النانو في مجالات الاتصالات وتقنية المعلومات"، المجلة الدولية للعلوم والتقنية، عدد خاص بالمؤتمر العلمي الاول لتقنية المعلومات وعلوم الحاسوب. ، كلية تقنية المعلومات – جامعة الزاوية، ص:57–73 ، فبراير 2022م.

[28] Md Daniyal, Ameer Azam and Sabih Akhtar, "Chapter 6 :Application of Nanomaterials in Civil Engineering", Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018, Z.H. Khan (ed.), Nanomaterials and Their Applications, Advanced Structured Materials 84, https://doi.org/10.1007/978-981-10-6214-8_6.

[29] Xinmin Zheng, Pan Zhang, Zhenxiang Fu, Siyu Meng, Liangliang Dai, and Hui Yang, " Applications of nanomaterials in tissue engineering", RSC Adv., 2021, 11, 19041.

[30] احمد الصغير المهدي عجينة، " تطبيقات واستخدامات المواد النانومترية في المجالات الطبية والصيدلانية "، المجلة الدولية للعلوم والتقنية، العدد 30. ص 1–28. 2022م.