



القسم: التصميم الميكانيكي

الشعبة: علم المواد

السنة: الخامسة





منشورات جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

ميتالورجيا المساحيق

الدكتور المهندس

عبد الله يوسف مجيد

أستاذ مساعد في قسم هندسة التصميم الميكانيكي

١٤٣٣ - ١٤٣٤ هـ

٢٠١٢ - ٢٠١٣ م

جامعة دمشق



الفهرس INDEX

رقم الصفحة	الموضوع
١٣	مقدمة:
١٧	الفصل الأول: صناعة المساحيق
٢٠	١-١ الطرق الميكانيكية للحصول على المساحيق
٢٠	١-١-١ سحق
٢٥	١-١-١-١ الطواحين ذات الكرات
٣٢	١-١-١-٢ الطواحين الدوامة
٣٤	١-١-١-٣ الطواحين الهزازة
٣٥	١-١-١-٤ الطواحين المخروطية
٣٦	١-١-١-٥ الطواحين ذات المطارق
٣٧	١-١-٢ طريقة تجميد المصهور بالتبريد البارد
٣٨	١-١-٣ طريقة تحبيب المعادن المنصهرة بواسطة المبرور
	الدوارة
٤٠	١-١-٤ التذير
٤٣	١-١-٤-١ العوامل المؤثرة في عملية التذير
٤٧	١-١-٤-٢ آلية التذير
٥١	١-١-٤-٣ التذير بالماء
٦٠	١-١-٤-٤ التذير بالغاز
٦٥	١-١-٤-٥ التذير بالزيت
٦٥	١-١-٤-٦ التذير بقوة الطرد المركزي
٦٧	٢-١ الطرق الفيزيا-كيميائية للحصول على المساحيق
٦٧	٢-١-١ التحليل والترسيب الكهربائي
٧١	٢-٢-١ طريقة تكثيف بخار المعدن

٧٢	٣-٢-١ الاختزال في حالة الصلابة
٧٥	٣-١ طريقة التفكك الحراري للحصول على المساحيق
٧٥	١-٣-١ طريقة تفكك الكربونيل
٧٨	٤-١ المساحيق المعدنية شديدة النعومة والنانوية
٧٨	١-٤-١ المساحيق المعدنية شديدة النعومة
٨٠	٢-٤-١ المساحيق المعدنية النانوية
٨١	٣-٤-١ طرائق إنتاج المساحيق النانوية
٨٥	الفصل الثاني: خصائص المساحيق المعدنية و طرق مراقبتها
٨٩	١-٢ الخواص الكيميائية
٨٩	٢-٢ الخواص الفيزيائية
٨٩	١-٢-٢ شكل الحبيبات
٩٠	٢-٢-٢ الكثافة
٩٣	٣-٢-٢ حجم الحبيبات وتوزيع الحجم
٩٧	٤-٢-٢ التحجيم لما دون مقياس المنخل
٩٨	٥-٢-٢ السطح النوعي
١٠٠	٣-٢ الخواص التكنولوجية
١٠٠	١-٣-٢ الوزن النوعي والمسامية
١٠٣	٢-٣-٢ السيوية
١٠٤	٣-٣-٢ الانضغاطية
١٠٥	٤-٣-٢ التشاكلية
١٠٦	٥-٣-٢ المتانة الخضراء
١٠٩	الفصل الثالث: المزج والخلط
١١٢	١-٣ تحضير المزيج المسحوق لعملية التدميج
١١٣	٢-٣ الخلاطات

١١٥	٣-٣ آلية الخلط
١١٧	٣-٤ المناولة والتخزين
١١٨	٣-٥ منع الفصل
١١٨	٣-٦ المعايير الحجمية والمعايير الوزنية للشحنة
١٢١	الفصل الرابع: التشكيل و التدميج
١٢٣	٤-١ مقدمة
١٢٤	٤-٢ التدميج على البارد
١٢٨	٤-٢-١ الكبس أحادي الاتجاه والكبس ثنائي الاتجاه
١٣٠	٤-٢-٢ كبس القطع ذات الأشكال المعقدة
١٣١	٤-٢-٣ الكبس الهيدروليكي
١٣٢	٤-٢-٤ الكبس الإيزوستاتيكي
١٣٥	٤-٢-٥ التشكيل بالدفلة
١٣٨	٤-٢-٦ التشكيل بالبتق
١٤١	٤-٢-٧ التشكيل بالحقن
١٤٥	٤-٢-٨ التشكيل بالاهتزاز
١٤٧	٤-٢-٩ التشكيل النبضي
١٤٩	٤-٣ التدميج على الساخن
١٥٢	٤-٣-١ الكبس الإيزوستاتيكي على الساخن
١٥٥	٤-٣-٢ التشكيل بالرش
١٥٦	٤-٤ نظرية التدميج
١٥٦	٤-٤-١ العلاقة بين كثافة المدمجات وضغط التدميج
١٦١	٤-٤-٢ الضغط الجانبي
١٦٣	٤-٤-٣ تأثير الاحتكاك
١٦٧	٤-٤-٤ تأثير التزييت في عملية التدميج
١٦٨	٤-٤-٥ ضغط اللفظ والارتداد المرن

١٧٠	٥-٤ تصميم قالب التشكيل
١٧٣	٥-٤-١ الحسابات التصميمية
١٨٠	٥-٤-٢ التغلب على قيود التصميم
١٨٣	الفصل الخامس : التلييد
١٨٥	٥-١ مقدمة
١٨٧	٥-٢ تلييد الطور الصلب
١٩٣	٥-٢-١ الانتقال الكتلي
١٩٦	٥-٢-٢ آلية التلييد
٢٠١	٥-٢-٣ إعادة التبلور
٢٠٢	٥-٢-٤ التغيرات التي تحدث أثناء عملية التلييد
٢٠٨	٥-٣ نظام التلييد للخلات متعددة التراكيب
٢١٠	٥-٤ تلييد الطور السائل
٢١٥	٥-٥ التطبيق العملي للتلييد
٢١٥	٥-٥-١ أفران التلييد
٢١٧	٥-٥-٢ تصميم أفران التلييد
٢٢٣	٥-٥-٣ أجواء التلييد والحماية
٢٢٧	٥-٥-٤ تأثير العوامل التكنولوجية في عملية التلييد
٢٣٠	٥-٦ التلييد المنشط
٢٣١	٥-٧ تلييد المسحوق السائب
٢٣١	٥-٨ التلييد تحت الضغط والحرارة
٢٣٢	٥-٩ التشكيل والتطريق بالتلييد
٢٣٣	٥-١٠ التلييد والتشكيل بالتطريق
٢٣٤	٥-١١ عيوب عملية التلييد
٢٣٧	الفصل السادس: عمليات ما بعد التلييد
٢٣٩	٦-١ العمليات الخاصة بمينالورجيا المساحيق

٢٣٩	١-١-٦ إعادة الكبس وإعادة التليد
٢٣٩	٢-١-٦ إعادة الكبس على الساخن
٢٣٩	٣-١-٦ التطريق على الساخن في قالب مغلق
٢٤١	٤-١-٦ المعالجة وضبط الأبعاد
٢٤٢	٥-١-٦ المعالجة بالبخار
٢٤٢	٦-١-٦ التخلخل والتشريب
٢٤٣	٧-١-٦ النقش
٢٤٣	٢-٦ العمليات الميكانيكية
٢٤٣	١-٢-٦ إزالة الزوائد
٢٤٣	٢-٢-٦ التشغيل
٢٤٦	٣-٢-٦ الربط
٢٤٦	٤-٢-٦ التخویش
٢٤٧	٣-٦ المعالجة الحرارية
٢٤٧	١-٣-٦ التفسية والإرجاع
٢٥٤	٢-٣-٦ التفسية السطحية
٢٥٥	٣-٣-٦ عيوب المعالجة الحرارية
٢٥٧	٤-٦ المعالجة الكيما- حرارية
٢٦٠	٥-٦ الطلاء الكيماي والطلاء الكهروكيماي
٢٦٣	الفصل السابع: خواص منتجات ميتالورجيا المساحيق و طرق اختبارها
٢٦٥	١-٧ خواص منتجات ميتالورجيا المساحيق
٢٦٨	١-١-٧ التركيب الكيماي والبنية المجهرية
٢٧٣	٢-١-٧ الفحص الماكروي
٢٧٤	٣-١-٧ الفحص الميكروي
٢٧٩	٤-١-٧ دراسة البنية باستخدام الأشعة السينية

٢٨١	٢-٧ الاختبارات الميكانيكية
٢٨٢	١-٢-٧ اختبار الشد و الضغط
٢٨٣	٢-٢-٧ اختبار المطيلية
٢٨٣	٢-٢-٧ اختبار الانحناء
٢٨٤	٢-٢-٧ اختبار الصدم
٢٨٦	٥-٢-٧ اختبار المثانة الإنشائية
٢٨٩	٦-٢-٧ اختبار القساوة
٢٩٠	٧-٢-٧ اختبار التمزق
٢٩١	٣-٢-٧ الاختبارات الفيزيائية
٢٩١	١-٣-٧ اختبار الكثافة والمسامية
٢٩٤	٢-٣-٧ اختبار الخواص الكهربائية والحرارية والمغناطيسية
٢٩٧	الفصل الثامن: منتجات ميتالورجيا المساحيق
٣٩٩	١-٨ مقدمة
٣٠٠	٢-٨ المواد الإنشائية ومنتجاتها
٣٠٣	١-٢-٨ خصائص المواد الإنشائية
٣٠٥	٢-٢-٨ مواد عناصر الآلات
٣٠٥	٣-٢-٨ المواد المركبة المقواة بالألياف
٣٠٨	٤-٢-٨ مواد التقوية بنسخت الأكسيد
٣١٣	٥-٢-٨ الفولاذ الذي لا يصدأ
٣١٥	٣-٨ مواد العدد القاطعة
٣١٨	٤-٨ المواد التريبولوجية
٣١٨	١-٤-٨ المواد المقاومة للاحتكاك
٣٢١	١-١-٤-٨ المحامل المسامية
٣٣٠	٢-١-٤-٨ المرشحات
٣٣٧	٣-١-٤-٨ الزرعات الطبية

٣٣٨	٨-٤-٢ المواد الاحتكاكية
٣٣٩	٨-٤-٢-١ المواد الاحتكاكية الجافة
٣٤١	٨-٤-٢-٢ المواد الاحتكاكية المزيتة
٣٤٢	٨-٤-٢-٣ المواد الحاضنة
٣٤٣	٨-٤-٢-٤ خصائص العناصر الداخلة في صناعة المسود الاحتكاكية
٣٤٤	٨-٤-٢-٥ تدميج المواد الاحتكاكية
٣٤٧	٨-٥ المواد الكهربائية
٣٤٧	٨-٥-١ المغنطيسات اللينة
٣٥٠	٨-٥-٢ المغنطيسات الدائمة
٣٥٦	٨-٥-٣ المواد المغناطيسية العازلة للكهرباء
٣٥٧	٨-٥-٤ مواد التلامس الكهربائي
٣٥٩	٨-٦ المواد الحرارية
٣٦٢	٨-٦-١ خصائص المواد الأساسية الداخلة في صناعة المواد الحرارية
٣٦٣	٨-٦-٢ السبائك الفاتقة
٣٦٤	٨-٧ المواد والسبائك ذات الاستعمالات الخاصة
٣٦٤	٨-٧-١ المواد المستخدمة في المفاعلات الذرية
٣٦٦	٨-٧-٢ مواد الإمتصاص في المفاعلات الذرية
٣٦٩	المصطلحات
٣٨٣	المراجع العلمية



مقدمة

تطلق عبارة ميتالورجيا المساحيق Powder Metallurgy أو PM اختصاراً على مجمل العمليات التقنية، التي يتم بموجبها الحصول على مساحيق معدنية، ثم الاستفادة من هذه المساحيق أو خلطها، أو خلط المساحيق المعدنية مع مساحيق أو مواد غير معدنية، أو شبه معدنية، وذلك بتشكيلها ومعالجتها للحصول منها مباشرة على منتجات جاهزة أو نصف جاهزة للاستعمال من دون اللجوء إلى تقنيات التعدين المألوفة مثل الصهر، والسكب وما يعقبها من عمليات التشكيل و التشغيل.

يعود تاريخ تعدين المساحيق إلى نحو 3000 سنة قبل الميلاد في بلاد ما بين النهرين ومصر، حين ابتكروا طرائق من هذا القبيل لتصنيع الأدوات والأسلحة التي كانوا يستعملونها. غير أن التطور الفعلي في هذا المجال لم يتحقق إلا في مطلع القرن التاسع عشر باتجاهين منفصلين في كل من إنكلترا وروسيا، حين أدت تجارب وليام هايد ولاستون William Hyde Wollaston في عام 1828م إلى الحصول على البلاتين الصلب، فكان ذلك بداية استخدام طرائق جديدة للحصول على قطع معدنية صلبة من المساحيق المعدنية. أما في روسيا فقد قام العالم P.G. Sabalevsky في عام 1827م بعرض ميداليات وقطع نقدية وكؤوس من البلاتين وشرح لطريقة تحضير وتصنيع المساحيق.

وكان التطور التالي بواسطة معدن آخر ذي نقطة انصهار أعلى - وهو التنجستين tungsten. وكان هذا المعدن ولا يزال ذا أهمية للاستخدام كقذيفة متوهجة لمصابيح الإنارة الكهربائية التي كانت حتى ذلك الحين تصنع من الكربون، الذي كان بطبيعة الحال بالغ القسافة. وعلى خلاف الأمثلة المقتبسة آنفاً والمتعلقة بمنتجات ميتالورجيا المساحيق، فإن التنجستين المطاوع ما زال يصنع من المساحيق. وهناك منتج هام ثانٍ لا نزال نستخدمه كثيراً، ألا وهو المحمل الانزلاقي المسامي Porous bearing. فبخلاف المنتجات السابقة التي كانت تصنع من المساحيق؛ لأن المعدن المعني لا يمكن تطويره ومعالجته فوراً بواسطة الصهر، فإن المحامل المسامية تصنع بواسطة ميتالورجيا المساحيق بفضل المزايا الخاصة التي تنجم عن هذا الأسلوب، بحيث إذا

استخرج الغاز وتم سحبه من المسام وغمرت الأجزاء في زيت التزليق "التشحيم" فإن المسام تصبح مملوءة بالزيت. وتستخدم مثل هذه الأجزاء كمحامل في الآلات الترددية و الدورانية. متى قمت آخر مرة بتزيت مكثتك الكهربائية؟.

ازدادت سرعة تطور ميتالورجيا المساحيق في منتصف القرن العشرين مع زيادة متطلبات الصناعة الحديثة، حتى غدت الآن من التقنيات المهمة في صناعة الكثير من القطع التي يستحيل أحياناً، أو يكون من الصعب وغير الاقتصادي أحياناً أخرى، الحصول عليها بطرائق التعدين المعروفة، كإنتاج كربيد التنتستن السماسك بواسطة "إسمنت" مؤلف من الكوبالت المعدني في ألمانيا، وهو يستخدم قوالب بديلة عن قوالب السحب القياسية ويسمى "تنبية الماس" German Wic Diamante وفي أدوات القطع، أو صناعة المواد المركبة المؤلفة من معدنين أو أكثر من المعادن أو أشباه المعادن غير قابلة للامتزاج وتشكيل محاليل صلبة، مثل الفضة والتنتستن، كما أن المهندسين على تمام المعرفة بمصطلح عدد القطع الكربيدية Carbide tools. كما أنه لا بد من الإشارة إلى بعض القطع لأهميتها وفائدتها ولا غنى عن هذه الأسلوب في تصنيع بعض القطع اللازمة في صناعة العففات وبعض تجهيزات المفاعلات الذرية وغيرها.

شهدت ميتالورجيا المساحيق على امتداد السنوات الأخيرة تطوراً هاماً ومؤثراً، يتوضح هذا التطور بشكل كبير من خلال التصنيف المتصاعد للتطبيقات الحالية لميتالورجيا المساحيق. ومن العوامل المسببة لهذا التطور هو:

❖ الإمكانية العالية لإنتاج المواد الهندسية المتطورة والجديدة.

❖ الحصول على خواص متميزة.

❖ التأثيرات المحدودة لمصانع ميتالورجيا المساحيق في النظام البيئي.

وقد أصبح ضرورياً وبصورة واسعة الآن ربط المقررات التدريبية في الهندسة وعلم المواد في الكليات والمعاهد التقنية والجامعات مع الصناعة. وما يزال هناك حاجة إلى البحث والتدريس في الأسس الفيزيائية والكيميائية للمواد، إذ تكمن ثغرة حقيقية عند الأخذ بعين الاعتبار تصميم المواد الهندسية. ويهدف هذا الكتاب إلى تقديم ما توصل

إليه العلم في هذا المجال و إلى توضيح العلاقة البينية بين تصنيع المواد وهندسة التصميم، ولما كانت ميتالورجيا المساحيق تغطي مجالات مختلفة ومتباينة جداً من مجالات الصناعات الحديثة، استدعى تطويرها بذل الجهد المستمر والبحث والدراسة من أجل مواكبة التقدم العلمي والصناعي.

يعالج هذا الكتاب بصورة علمية وعملية علم ميتالورجيا المساحيق واستخدامه في الصناعة، فقد احتوى أحدث المعلومات، وقد ركز هذا الكتاب على الطرائق والأساليب المستخدمة في تصنيع المساحيق ومنتجاتها بطريقة منطقية مبيناً المزايا الاقتصادية لهذه الصناعة.

أمل أن يجد الطالب الفائدة المرجوة من مادة هذا الكتاب، وأن تكون اللغة العربية عوناً له. وأتمنى أن أكون قد وضعت لبنة في بناء بلدنا سورية الحبيبة ووطننا العربي الكبير، وأن أكون قد أديت بهذا العمل المتواضع واجبي نحو الدارسين والفنيين والباحثين والقراء. والله ولي التوفيق.

المؤلف

د.م. عيد الله يوسف مجيد



الفصل الأول

صناعة المساحيق Powder Manufacture

- الطرق الميكانيكية للحصول على المساحيق
- الطرق الفيزيا-كيميائية للحصول على المساحيق
- طريقة التفكك الحراري للحصول على المساحيق
- طرق الحصول على المساحيق شديدة النعومة والنانوية



صناعة المساحيق Powder Manufacture

من المناسب في هذا المقام طرح السؤال القائل "ماذا نعني بكلمة مسحوق؟" وقد يكون الجواب وللوهلة الأولى: بكل تأكيد، إن كل فرد يعرف ما هو المسحوق. ولكن الأمر ليس على هذا الحد من البساطة. فهل نعتبر مجموعة من الكريات ذات قطر مقداره 5mm و مستخدمة في المحامل الدحرجية ball bearings مسحوقاً؟ والجواب سيكون بكل تأكيد لا، وعلى هذا فأين نضع الخط الفاصل والحد الحاسم؟ وقد اتفق دولياً بصورة تحكمية على تعريف يحدد أقصى بعد على أنه 1mm، وذلك حسب مواصفة هيئة المعاييس الدولية ISO 3252. ومنه يطلق على فن تشكيل مساحيق المعادن اسم "ميتالورجيا المساحيق"، وتصنع منتجات علم ميتالورجيا المساحيق بضغط مساحيق المعادن وكبسها على شكل بعد مسبقاً ضمن قوالب معدنية، ومن ثم تعالج حرارياً لتحسين موائمتها وكثافتها. وقد تُجمع عمليتا الكبس والمعالجة الحرارية في عملية واحدة تدعى الكبس على الساخن. ويجب إبقاء درجة حرارة المسحوق أقل من نقطة انصهاره، ويطلق على عمليتي استخدام الحرارة سواء كانت في أثناء عملية التشكيل أم بعده اسم التلبيد.

يمكن لأي مادة أن تجزأ إلى قطع أصغر، ولقد طورت تقنيات متعددة للحصول على المساحيق ذات إنتاجية عالية يمكن بواسطتها إنتاج المعادن على شكل مساحيق، كما أنه يمكن كتابة العديد من الكتب حول هذا الموضوع، حتى ولو كان يحتوي على طرق أو أساليب الحصول عليها فحسب. وفي الحقيقة ثمة كتاب مخصص لأسلوب إنتاج بمفرده وهو أسلوب التذير atomization. وسوف يكون لدينا متمع في هذا الكتاب لمراجعة الموضوع ومحاولة إبراز العوامل ذات الأهمية الخاصة للاستخدامات اللاحقة للمساحيق في صناعة الأجزاء الهندسية.

إن حجم حبيبات المساحيق المعدنية المستخدمة في ميتالورجيا المساحيق يتوقف على طريقة تحضيرها، إذ تتراوح أحجامها من أجزاء من الميكرون على أجزاء من

المليمتر، وتتوقف أيضاً طبيعة المسحوق وخواصه على تركيب المادة وطريقة الحصول على المسحوق. كما أنه يمكن أن نلاحظ أن المساحيق المصنعة من نفس المعدن، ولكن بطرائق حصول مختلفة لها خواص تكنولوجية وميكانيكية مختلفة تماماً بعضها عن بعض، لذلك يمكن أن تستخدم في مجالات مختلفة. وتصنف طرائق الحصول على المساحيق المعدنية إلى طرق ميكانيكية وطرق كيميائية وطرق فيزيائية.

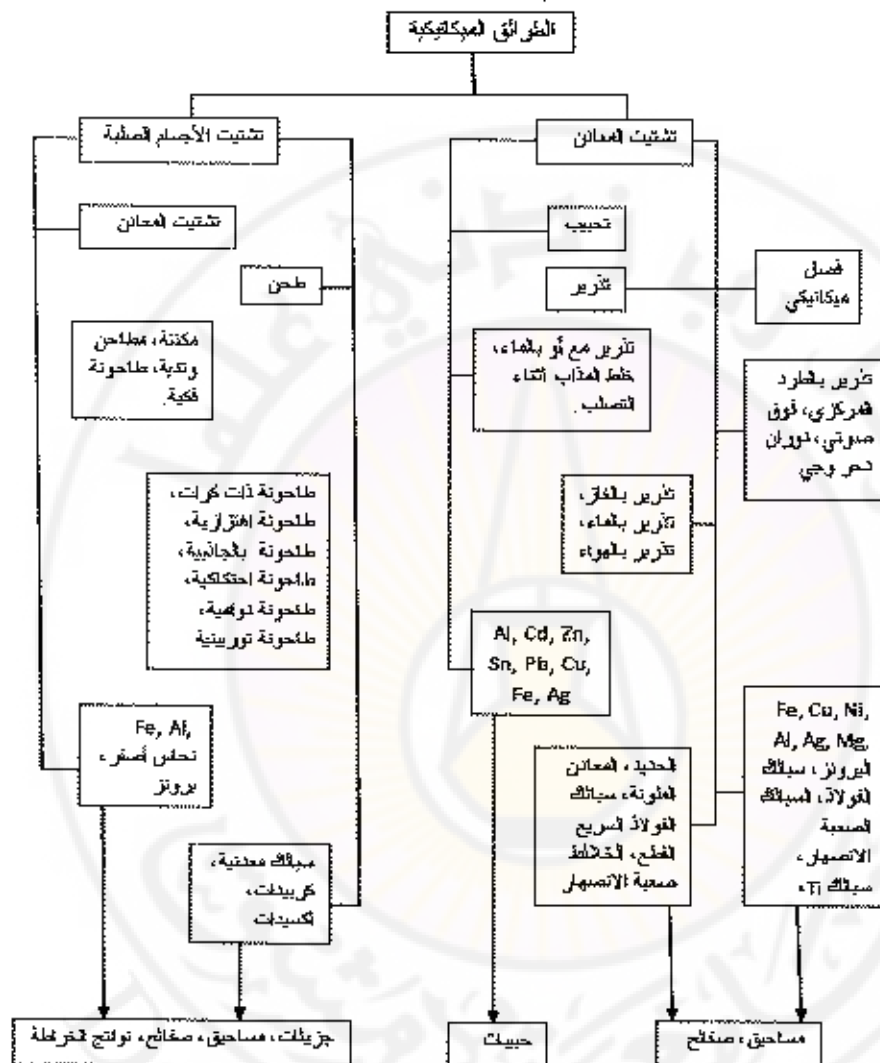
١-١ الطرق الميكانيكية للحصول على المساحيق المعدنية:

وتشمل الطرق الميكانيكية المستعملة في إنتاج المساحيق عموماً على عمليات السحق، والطحن، والقذف، والرش، و التذير...إلخ. وتصنف حسب المخطط الصندوقي الموضح في الشكل (١-١).

١-١-١ السحق Comminution:

إن عملية التفطيت الميكانيكي disintegration للمعادن الصلبة وتحويلها إلى قطع صغيرة هو بصورة واضحة وجلية أسلوب عمل المساحيق، وتعد برادة الحديد مثلاً جيداً لهذا الأسلوب. و كانت سبائك الملعغ amalgam المصنعة من الفضة/ القصدير Cr - Sn والمستخدمة في حشوة الأسنان، حتى الآونة الأخيرة، تصنع كلية بهذه الطريقة، أولاً بواسطة البرد، ومن ثم عن طريق الخراطة المقننة لقضيب على المخرطة. ولم يكن السحق ذا أهمية كبيرة بالنسبة إلى إنتاج المساحيق الأساسية لصنع الأجزاء الملبدة sintered، إلا أن محاولات متكررة قد جرت لاستخدام الخراطة المعدنية swarf إما مباشرة و إما بعد مزيد من السحق لتتحول إلى مسحوق. وفي عام ١٩٨٠ كتب لينيل Lenel يقول: "إن هذا الأسلوب لم يستخدم تجارياً على نطاق واسع إلا أنه في وقت لاحق تم الإبلاغ عن الاستخدام الناجح لهذه المادة الرخيصة نسبياً، الفولاذ وحديد الزهر على حد سواء، على نطاق صناعي، ويمكن أن يكون من المتوقع أن تزيد شعبية هذا الأسلوب وانتشاره، إلا أن هناك حدوداً لذلك. فمن أجل الحصول على خصائص قابلة للتكرار reproducible يعتمد عليها نجاح أسلوب ميتالورجيا

المساحيق، فإن من الأمور الجوهرية أن يكون لدينا إمدادات أكيدة ومضمونة من الخرطة المعدنية من تركيب منتظم معروف وغير ملوث بمادة صلبة دخيلة.



الشغل (١-١) الطرق الميكانيكية المختلفة لإنتاج المساحيق المعدنية

الكروى ball milling هو الأسلوب القياسي لإنتاج مساحيق المواد الهشة مثل السبائك

الحديدية (حديد الكروم، وحديد المنغنيز، وحديد السيلكون) التي تستخدم الآن كإضافات لمخلوط مسحوق الحديد. وعلى هذا فإن الطحن الكروي جزء أساسي في أسلوب إنتاج مساحيق دقيقة من كبريتات التتغستين والمعادن الأخرى المقاومة للعصر وكربيداتها أثناء صنع المعادن الصلبة.

تعريف الطرق الميكانيكية للسحق بأنها عملية تكسير و تقطيت الأجسام الصلبة تحت تأثير حملات ميكانيكية. ويمكن تصنيف أنواع السحق حسب حجم (أبعاد) الحبيبات كما هو موضح في الجدول (١-١)، أما نسبة السحق أو التقطيت فتحسب بالعلاقة التالية:

$$i = d_{start} / d_{fin} \quad (1-1)$$

حيث إن: d_{start} و d_{fin} هو أكبر بعد قبل التقطيت وبعده.

و تتراوح عادة نسبة السحق ما بين 3 إلى 100 أو أكثر، وذلك حسب نوع عملية السحق، و تصنف عمليات السحق إلى عدة مجموعات وذلك حسب تصنيف العالم Sedenko:

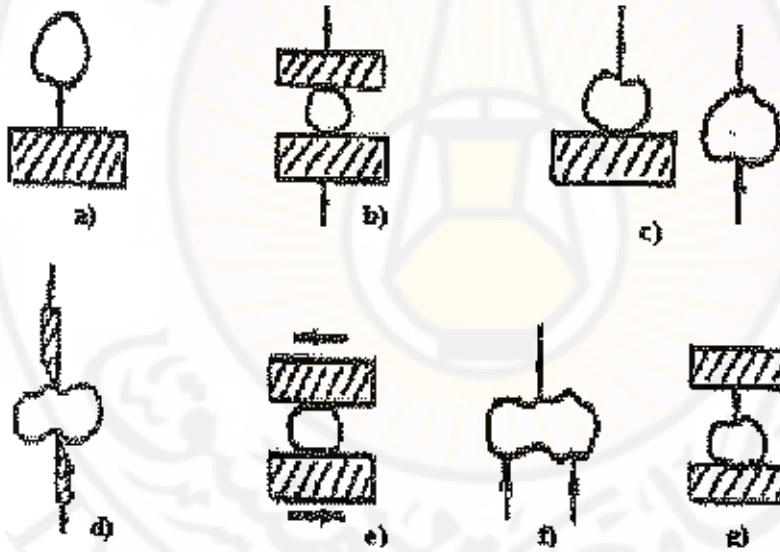
١. السقوط الحر: يتحطم الجسم و ينفقت إلى جزيئات أصغر نتيجة لسقوطه الحر و اصطدامه بالجسم المستقبل، وتتعلق عملية التحطم بسرعة السقوط الحر.
٢. الضغط: يحدث الانفعال على كامل الجسم عند وصول الإجهاد الداخلي إلى حد أقل بقليل من حد المتانة على الضغط، و أي زيادة للإجهاد الداخلي يحدث بعدها عملية التحطم و التقطيت.
٣. الانشقاق: تحدث عملية الانشقاق نتيجة تأثير الجسم السالحق في الجسم المراد سحقه في أماكن تركيز الإجهاد.
٤. الهصر: تحدث هذه العملية نتيجة تأثير قوى الضغط و الشد و القص، مما تؤدي للحصول على حبيبات ناعمة.
٥. القص: تعتبر عملية القص من أكثر العمليات التي يمكن التحكم فيها وتوجيهها وتحديد حجم الحبيبات المراد تقطيتها.

٦. الانكسار: تحدث نتيجة لاستناد الجسم إلى مساند ثابتة و انضغاطه بواسطة القوى الضاغطة.

٧. السحق المشترك: يحدث نتيجة الضغط والصدم عند السقوط الحر.

جدول (١-١) أنواع عمليات السحق

نوع عملية السحق	حجم الجزيئات قبل عملية السحق، mm	حجم الجزيئات بعد عملية السحق، mm
تكسير	20	1 - 5
تفتيت خشن	1 - 5	0.1 - 0.4
تفتيت وسط	0.4 - 0.1	0.015 - 0.05
تفتيت ناعم	0.1 - 0.04	0.001 - 0.005
تفتيت دقيق (رغوي)	0.1	0.0001



الشكل (١-٢) الأساليب المختلفة لعملية السحق:

(a) السقوط الحر (b) الضغط (c) الانشقاق (d) الفص
(e) السحق العرضي أو الحك (f) الانكسار (g) السحق المشترك.

ومن ميزات وخصائص معدات عملية السحق أنها تتمتع بقلّة التكلفة و بمدى وثوقية الآلات و ببساطة استخدامها و بحفاظها على خواص مادة المساحيق المراد الحصول عليها، وتنقسم معدات السحق إلى عدة مجموعات:

١. آلات التفطيت الخشنة (الكسارات): تجري عملية التفطيت هنا نتيجة لتأثير قوى الضغط و الحك، فلذلك تكون سرعات هذه الآلات قليلة واستطاعتها كبيرة من ١ - ٤٠ طن/ساعة وحجم الجزيئات التي يمكن الحصول عليها يتراوح ما بين 5 - 2 mm، ومن هذه الآلات الكسارات ذات الرحي - الكسارات ذات الدلافين - الكسارات الفكّية.

٢. آلات التفطيت الوسط والناعمة: ويكون مبدأ عملها نتيجة لقوى الصدم والحك، وتتراوح استطاعتها ما بين ٠,١ - ٤ طن/ساعة، أما حجم الحبيبات فيكون 30 - 500 μm و من هذه الآلات: الطواحين ذات الكرات - الطواحين التوربينية و الطواحين التجاذبية التي تعتمد على قوة الجاذبية.

٣. آلات التفطيت المستخدمة في المعادن متوسطة اللدونة: وهي تستخدم للتفطيت الخش والوسط والناعم، ويحدث الطحن نتيجة تأثير القوى الصادمة والضاغطة، تكون ذات سرعات عالية. منها الكسارة المطرقية - كسارات التفطيت الحثي - الطواحين ذات الكرات - الطواحين ذات الدلافين.

٤. آلات التفطيت المستخدمة في المعادن القاسية والهشة: تستخدم للتفطيت الناعم و الدقيق، وتعتمد هذه المعدات على قوى الضغط والشد والقص، حجم الحبيبات التي يمكن الحصول عليها يتراوح ما بين 60 - 0.5 μm والاستطاعة $10^{-3} - 10^{-2}$ t/h، من هذه الآلات الطواحين الاهتزازية - الطواحين ذات المسننات الدودية.

٥. آلات التفطيت المستخدمة في المعادن اللدنة: تستخدم للتفطيت أو الطحن الناعم، ومبدأ عملها يكون نتيجة للسقوط الحر للجزيئات و اصطدامها بجسم (عائق) ثابت، إذ تصل سرعة السقوط إلى 250 - 200 m/sec ومن هذه المعدات: الطواحين ذات الهواء المضغوط - الطواحين ذات الفقاعات.

٦. آلات التفتيت ذات الصدم المشترك: يكون التفتيت أو الطحن هنا على حساب الصدم المشترك للجزيئات عند سرعات عالية للتطيران الحر داخل أسطوانة الطاحونة. حجم الجزيئات التي يمكن الحصول عليها أقل من $60 \mu m$ ، من هذه المعدات الطواحين الدوامية - الطواحين ذات الهواء المضغوط.

٧. آلات التفتيت الاهتزازية و الفقاعية: تجري عملية التفتيت تحت تأثير الاهتزاز والصدم الفقاعي على الجزيئات الواقعة داخل السائل، ويتراوح التردد ما بين $10^3 - 1$ Hz و يحصل الصدم الهيدروليكي نتيجة لدوران القرص. من هذه الآلات: الطواحين الاهتزازية - الطواحين الفقاعية - الطواحين الكهرو هيدرو ليكية.

٨. آلات التفتيت فوق الصوتية.

٩. آلات التفتيت الكهرو حثية.

١٠. آلات التفتيت الليزرية.

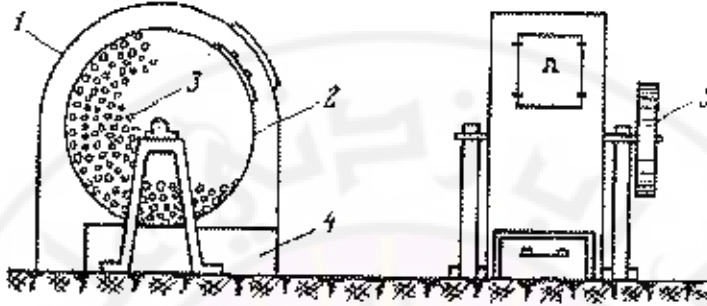
ولكن من الضروري إلى الإشارة إلى أن لكثير الآلات شيوعاً هي الطواحين ذات الكرات - الطواحين الاهتزازية - الطواحين الدوامية و الطواحين التي تعمل بالهواء المضغوط.

١-١-١-١ الطواحين ذات الكرات Ball Mill :

يصنع جسم الطاحونة عادة على هيئة أسطوانة من الفولاذ أو من الألواح المبطنة من الداخل بفولاذ سبائكي، و يتراوح قطر الأسطوانة بين $1500 - 250$ mm. وفيها توضع المادة المراد تفتيتها مع الكرات الطاحنة الثقيلة المصنوعة من الفولاذ أو حديد الزهر أو السبائك القاسية ثم يصار إلى تدويرها. تستخدم هذه الطواحين لتفتيت المعادن المتوسطة اللدونة والسبائك الهشة مثل الفولاذ السبائكي و حديد الزهر الأبيض و بعض السبائك الخاصة والمعادن اللدنة بعد تحويلها صناعياً إلى الحالة القصيفة، وذلك بعد إشباعها بالهيدروجين.

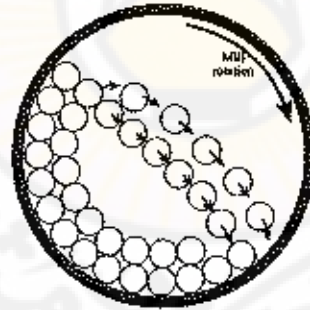
ولزيادة القدرة على التفتيت عند الطحن في الطواحين ذات الكرات يتم التفتيت عادة في وسط سائل لمنع تطاير جزيئات المعدن، كما يساعد على الطحن عن طريق تسرب جزيئات السائل في المسامات الدقيقة و الشروخ الميكروية الموجودة في الجزيئات.

من عيوب طريقة تفتيت المعادن في الطواحين ذات الكرات وفي الأليات المماثلة وجود شوائب في المسحوق نتيجة اهتراء الكرات وتفتت بطانة الطاحونة من جراء الاستخدام.



الشكل (١-٣) رسم تخطيطي للطاحونة ذات الكرات مع غطائها
١- الغطاء، ٢- الأسطوانة، ٣- جزيئات المادة المراد طحنها،
٤- مستقبل المساحيق، ٥- ترس نقل الحركة.

يتم اختيار سرعة دوران الأسطوانة عند الطحن في الطواحين ذات الكرات بحيث تكفي لرفع الكرات بالقوة الطاردة المركزية المتولدة عنها إلى أعلى نقطة، ثم تسقط على الشحنة مصطدمة بها ومفتتة إياها كما هو موضح في الشكل (١-٤).



الشكل (١-٤) حركة الكرات الطاحنة أثناء دوران الطاحونة
وتقدر سرعة دوران الطاحونة بعدد دورات الأسطوانة حسب العلاقة الآتية:

$$N_w = (0.6 - 0.8) N_{cr} \quad (2-1)$$

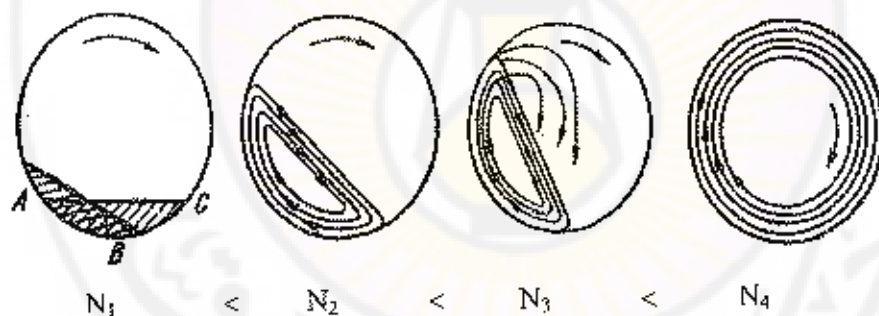
حيث إن:

N_{cr} - عدد دورات أسطوانة الطاحونة الحرج r.p.m التي عندها ينفث الجسم المراد طحنه نتيجة لقوة الطرد المركزي الملتصقة بجدار الأسطوانة.

N_w - عدد دورات الأسطوانة r.p.m

تدور هذه المطحنة حول محورها، وتكون مملوءة جزئياً بوسيط الطحن، الذي يكون على شكل كرات أو ذا شكل أسطواني أو بأشكال أخرى، والشكل التالي يظهر مقطعاً عرضياً في مطحنة ذات الكرات، إن كمية الكرات تتعلق بسرعة الدوران بحيث نحصل على ما يشبه الشلال من الكرات المتحركة ضمن المطحنة، وهذه الحركة للكرات تسبب طحن الجزيئات، نتيجة الاحتكاك والصدم بين هذه الكرات والحبيبات المعدنية. يجب أن تتمتع هذه الكرات بكثافة عالية لتحقيق شرط الصدم كما أن اختيار هذه الكرات يعتمد بشكل أساسي على تكلفة هذه الكرات ومقاومتها للاهتراء وعدم تلويثها للمساحيق المنتجة.

وبين الشكل (٥-١) مخطط حركة الكرات الطاحونة لأنظمة الطحن عند سرعات دوران مختلفة بحيث يكون:



الشكل (٥-١) مخطط حركة الكرات الطاحونة عند سرعات دوران مختلفة

١. نظام الطحن الانزلاقي نتيجة تأثير الاحتكاك عندما تكون:

$$N_1 \leq 0.2 N_{cr}$$

٢. نظام الطحن التصادفي نتيجة تأثير الاحتكاك و الصدم عندما تكون:

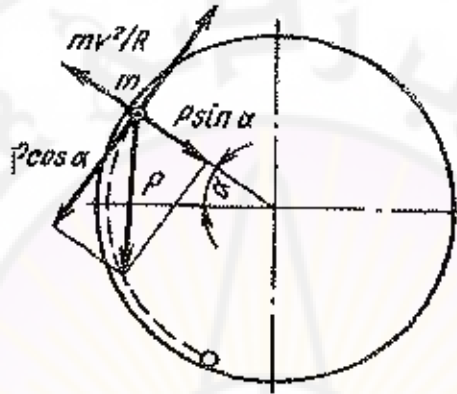
$$N_2 = (0.4 - 0.6) N_{cr}$$

٣. نظام السقوط الحر ينتج تحت تأثير الصدم و نظام الطحن الشديد عندما

$$N_3 = (0.75 - 0.85) N_{cr} \quad \text{تكون:}$$

٤. نظام الطحن الحرج عندما تكون: $N_4 = N_{cr}$

ولتحديد سرعة الدوران الحرج للأسطوانة ندرس حالة الكرة الواقعة تحت تأثير قوة الطرد المركزي و قوة الثقل كما هو موضح في الشكل (٦-١):



الشكل (٦-١) مخطط حساب السرعة الحرجة

وبفرض أن: R نصف قطر الأسطوانة، و P وزن الكرة الطاحنة، F القوة الطاردة المركزية، m كتلة الكرة الطاحنة، g تسارع الجاذبية الأرضية، v السرعة الخطية للأسطوانة، α زاوية ميل الكرة، نحصل على:

$$P = m \cdot g \quad (3-1)$$

$$F = mv^2 / R \quad (1-4)$$

نعوض (3) في (4) <

$$F = P/g \times v^2/R \quad (5-1)$$

و يمكن تحليل القوة P إلى مركبتين إحداها مماسية $P \cdot \cos \alpha$ والآخر $P \cdot \sin \alpha$ (قطرية) كما هو موضح في الشكل (٦-١)، وبإهماله $P \cdot \sin \alpha$ ، لذلك بين

الكرات الطاحنة وجدار الأسطوانة فإن الكرات تلتصق بجدار الأسطوانة، وتدور معه عندما يكون $\sin \alpha = 1$ أي:

$$F = P.v^2 / g . R \geq P . \sin \alpha \quad (6-1) \Rightarrow$$

$$V^2 . P / g . R = P . \sin 90$$

$$v^2 = g . R \quad (7-1)$$

$$\Leftarrow v = \pi . D . N / 60$$

$$\pi^2 . D^2 . N^2 / 60^2 = g . D / 2 \quad (8-1)$$

ومنه يكون عدد الدورات الحرج:

$$N_{cr} = \sqrt{\frac{g}{2\pi^2 D}} \times \frac{60}{\sqrt{2}} = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad (9-1)$$

وفي هذه الحالة فإن الكرات تلتصق بجدار الأسطوانة و تدور معها. لذلك كي نحصل على عملية الطحن فلا بد من ابتعاد الكرات الطاحنة قليلاً عن جدار الأسطوانة أي يجب أن تكون:

$$N < N_{cr} \quad (10-1)$$

يؤثر في عملية الطحن بشكل سلبي كل من حجم الجزيئات المراد طحنها و زيادة كمية الشحنة، وذلك لأن زيادة الشحنة يؤدي إلى استهلاك كبير للطاقة و تآكل واهتراء الكرات الطاحنة، بينما يؤدي نقص كمية الشحن إلى نقص الإنتاجية و اهتراء كبير لجدار الأسطوانة. لذلك نحسب أكبر شحنة في الأسطوانة بالعلاقة التالية:

$$G = \pi . \mu . \phi . \rho . R^2 . L \quad [kg] \quad (11-1)$$

حيث: μ - معامل يتعلق بنوع مادة الكرات ودرجة اهترائها.

ϕ - معامل ملء الأسطوانة و يساوي عادة $(\phi = 0.4 - 0.5)$

ρ - كثافة مادة الطحن Kg / cm^3

R - نصف قطر الأسطوانة cm

L - ارتفاع الأسطوانة cm

ويرتبط قطر الكرات الطاحنة بنسبة الطحن ويقدر الأسطوانة، وعادة يؤخذ قطر الكرات الطاحنة حسب العلاقة التالية:

$$d \leq D/18 \div D/24 \quad (12-1)$$

حيث يكون: d - قطر الكرات [cm]، و D - قطر الأسطوانة [cm]
يحدث أثناء عملية الطحن تغيرات خارجية في الشكل والتركيب وحجم الجزيئات و طريقة توزيعها، مما يؤدي إلى حدوث تغيرات داخلية مثل:

- تغير في تركيب البنية وتغير في التركيب الكتلي.
 - حدوث قدرة كامنة ناتجة عن التشغيل على البارد.
 - تركيز عالٍ للانخلاع.
 - تحسين التجانس الخلطي.
 - تصفيح البنية أي زيادة مقاومتها.
 - تدقيق البنية أو تنعيمها.
 - تغيير التركيب الكيميائي.
- كما يحدث تغيرات خارجية في الخواص المختلفة مثل:
- تغير الخواص الميكانيكية، ولا سيما مقاومة التشكيل و القساوة.
 - تغير الخواص الفيزيائية، ولا سيما مقاومة الاهتراء.
 - تغير الخواص الكيميائية كمقاومة التآكل.
 - تغير الخواص التكنولوجية للمساحيق مثل الكثافة الظاهرية، السيوية، قابلية التليد و قابلية الضغط.

ويمكن إذن تحديد أبعاد الكرات اعتماداً على الكمية المراد طحنها وعلى قطر المطحنة وعلى الأبعاد النهائية المطلوبة للحبيبات، ومن ثم فإن أقطار كرات الطحن تتراوح ما بين 0.6 cm ويمكن أن تصل إلى 8 cm ، وتستخدم الكرات الصغيرة في عمليات الطحن الناعم جداً، وتقوم كرات الطحن بإزالة التكتلات أو

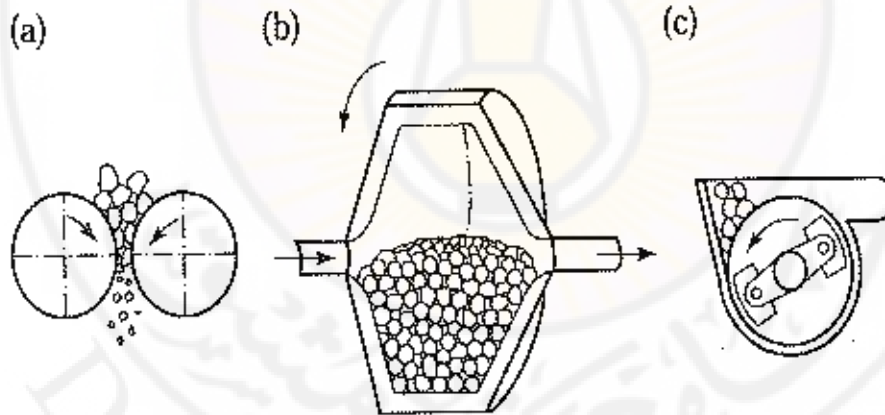
التصاق الجزيئات بعضها ببعض، ويمكن أن تصل أبعاد الحبيبات بعد عملية الطحن إلى $1 \mu m$.

مميزات عملية الطحن في الطواحين ذات الكرات:

- عملية بسيطة - على الرغم من وجود بعض الدراسات النظرية المعقدة حول هذا الموضوع تبقى العملية نفسها بسيطة وغير معقدة -.
- قلة التكلفة.

عيوب عملية الطحن في الطواحين ذات الكرات:

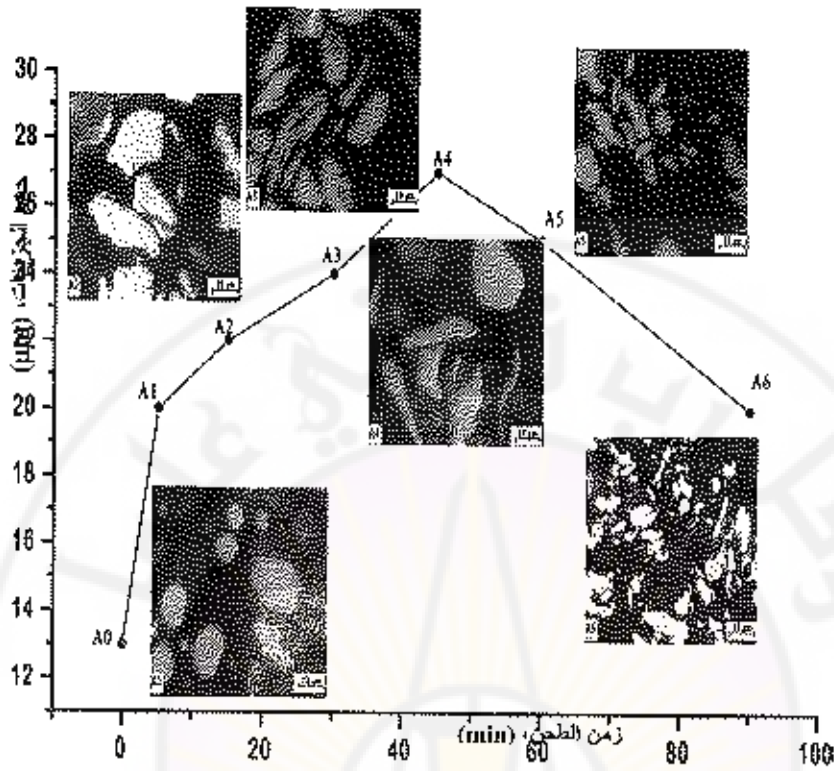
- ... عدم إمكانية الحصول على حبيبات عالية الدقة مع إضافة بعض الشوائب للمسحوق ناتجة عن اهتراء جدران المطحنة.
- عملية غير فعالة حيث إن 2% فقط من الطاقة المقدمة تصرف على عملية التفكيك وإنتاج سطوح جديدة للحبيبات .
- وجود شوائب في المسحوق بسبب اهتراء الكرات و بطانة المطحنة. و يبين الشكل (٧-١) الطرق المختلفة لعملية سحق الميكانيكي و الطحن.



الشكل (٧-١) السحق الميكانيكي والتنعيم

a- سحق بالدلافين، b- طحن بطاحونة ذات الكرات، c- طحن بطاحونة ذات المطارق

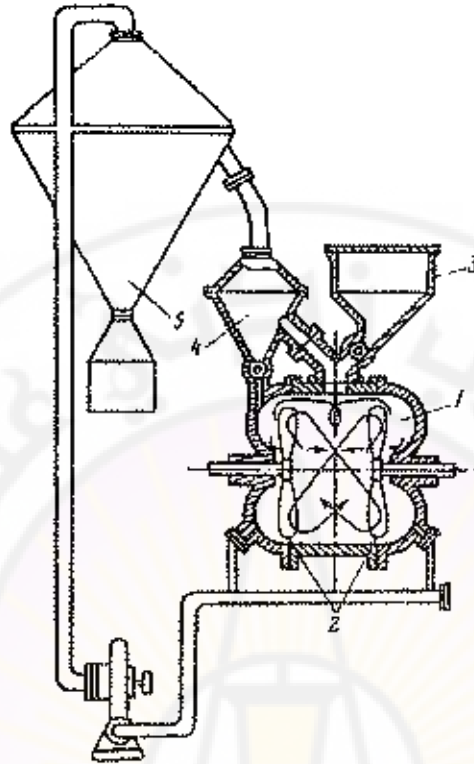
بينما يوضح الشكل (٨-١) علاقة حجم الحبيبات وشكلها بوزن الطحن.



الشكل (A-1) علاقة شكل وحجم الحبيبات بزمان الطحن

٢-١-١-١ الطواحين الدوامية Eddy Mill:

تتكون الطواحين الدوامية من علبة مبطنة بفلاد مقاوم للتآكل وتندور بداخلها مروحتان (٢) في اتجاهين متضادين بسرعة تبلغ نحو 3000 r.p.m. تتكون نتيجة الحركة المتعاكسة للمراوح داخل الطاحونة تيارات هوائية دوامية، وحين تبعاً قطع المعدن المراد نقيتها * أسلاكاً مقصوفة أو برادة معادن أو قطعاً صغيرة... إلخ " في القمع (٣) كما هو موضح في الشكل (١-٩)، تقوم تيارات الهواء الدوامية بجذبها لدى نزولها من القمع وقسرها على الحركة. ونتيجة لتصادمها المتواصل بعضها مع بعض من جهة وبالمراوح وجدران العلبة من جهة أخرى، فإنها تجرش إلى حبيبات صغيرة تتراوح أبعادها بين 50 و 200 ميكرونًا.



الشكل (١-٩) رسم تخطيطي لطاحونة دوامية:

١- الوعاء الأساسي، ٢- مروحة، ٣- قمع، ٤- وعاء الاستقبال، ٥- وعاء التجميع
إن الهواء المتدفق بواسطة المروحة ينقل حبيبات المعدن إلى وعاء الاستقبال (٤) حيث
تترسب الحبيبات الكبيرة في القاع ومنه تعاد للتفتيت ثانية، وتنتج الحبيبات الدقيقة إلى
وعاء التجميع (٥).

ولحفظ الحبيبات من التأكسد وتجاوز التسخين أثناء التفتيت نتيجة ارتفاع درجة
الحرارة أثناء التفتيت يمرر تيار من ماء التبريد أو الغاز الخامل حول جسم المطحنة.
تستعمل الطواحين الدوامية لمسحق المعادن القصيفة والقاسية مثل الحديد و سبائك
والنحاس وسبائك و الألمنيوم والفضة.... إلخ.

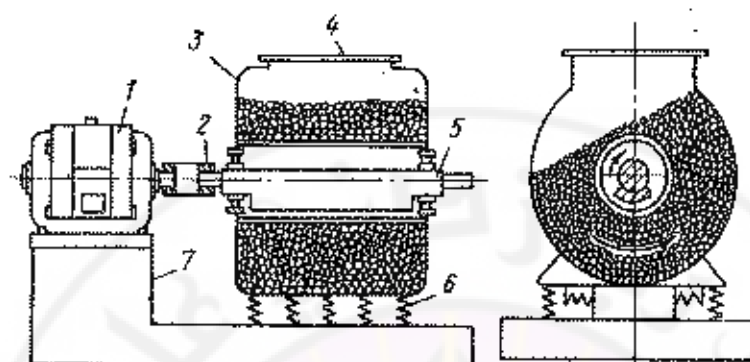
ومن ميزات مساحيق المعادن المنتجة في الطواحين ذات الكرات والطواحين الدوامية:

١. عدم إثابة الحبيبات بمواد أخرى و لا سيما في الطواحين الدوامية، لأن الأجسام الطاحنة هي نفس المعادن المراد نقيتها.
٢. رخص الخامات وذلك لإمكانية استخدام بقايا تشغيل المعادن.
٣. بساطة الآلات ورخصها.
٤. قلة الجهد والطاقة المبذولين للحصول على المساحيق.
٥. قابلية المساحيق المنتجة الجيدة لعملية التدميج والتليد.

١-١-٣ الطواحين الهزازة Vibration mill:

تشتمل الطواحين الهزازة في الوقت الحاضر وبصورة خاصة في صناعة السبائك القاسية والمعادن الفريضة و الخزفية مثل الكريديات. وتبلغ سعة أسطوانة الطاحونة الهزازة نحو 200 ليتر، وهي تعتبر من الآلات العالية الإنتاجية، فمثلاً عند الحصول على مساحيق فريضة تتراوح أبعاد دقائقها بين $20 - 60 \mu m$ تعطي الطواحين الهزازة التي تبلغ سعتها 20 ليترًا نحو 15 kg/h منها كما تعطي الطواحين التي تبلغ سعتها 200 ليترًا نحو 100 kg/h . ويعادل تردد أسطوانة الطاحونة عدد دورات عمود المحرك البالغة $1400 - 1450 \text{ r.p.m}$ وتتراوح سعة الاهتزاز فيها بين 2 و 3 مم. ويتم التفقيت في الطواحين الهزازة بواسطة كرات من الفولاذ المقسى تتراوح أقطارها بين 10 و 20 مم. ويبلغ مجموع حجم الكرات الطاحنة والشحنة المراد تفقيتها 70% تقريباً من سعة الأسطوانة، كما يعادل حجم الكرات 8 أو 10 مرات حجم المادة الخاضعة للتفقيت. تغلق فتحة الشحن بعد وضع الشحنة في الأسطوانة ثم يبدأ في تشغيل المحرك الهزاز إلى حين الانتهاء من التفقيت. والحركة تتم عن طريق تآرجح حوض الطاحونة بشكل نشيط رأساً على عقب عدة آلاف من المرات في الدقيقة الواحدة ذهاباً وإياباً بالإضافة لحركة اهتزاز أخرى تندمج مع الحركة الجانبية، مما يؤدي إلى زيادة تأثير الكرات في المسحوق.. تفرغ شحنة المساحيق بعدها في صناديق خاصة ثم تتخلل وتنقل إلى المكابس ليصار إلى عملية تدميجها. يبرد الجسم الأسطواناني للطاحونة في أثناء التشغيل بتيار مستمر من الماء يسايط على شكل نافورات من فتحات صغيرة في ماسورة موجودة فوق قاعدة الطاحونة.

تستعمل الطواحين الهزازة لتفتيت المواد القصفة مثل الفولاذ الفريشي وأكاسيد وكربيدات المعادن وغيرها... إلخ.

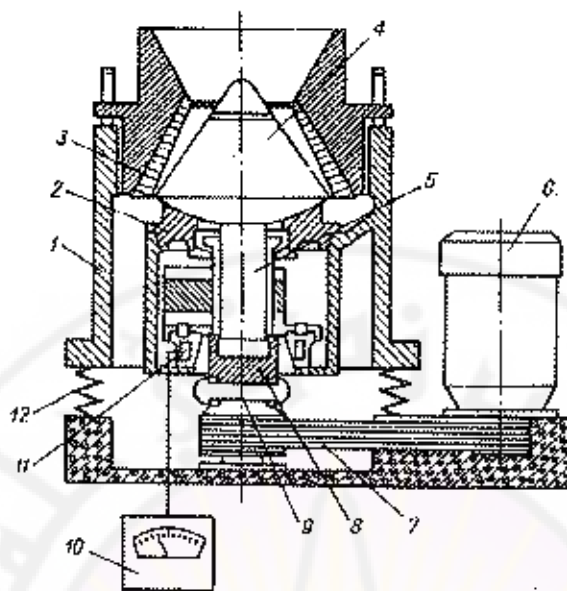


الشكل (١٠-١) الطواحين الهزازة

١- محرك كهربائي، ٢- قارنه مرنة، ٣- حوض الطاحونة من الفولاذ مبطن من الداخل بالكاوتشوك، ٤- فتحة التعبئة، ٥- عمود هزاز، ٦- نوابض حلزونية، ٧- قاعدة تثبيت

١-١-١-٤ الطواحين المخروطية الهزازة:

استخدم هذا النوع من الطواحين في السنوات الأخيرة للحصول على المساحيق من نحاعة الفولاذ والمعادن الملونة ونفايات الخلائط القاسية والخلائط الحديدية. تألف هذه المفتتات من جسم المطحنة ١ ذي شكل مخروطي من الخارج ٣ ومسند كروي ٢ للمخروط الداخلي ٤ الذي يتوضع على عمود نقل الحركة ٥، بينما يتصل هزاز ٦، توازن ٨ بقباض تعديل ٩ و سير ناقل للحركة ٧، الذي يتصل بالمحرك الكهربائي ١٠. كما يتصل بجسم المطحنة المخروطي على المسند عبر نوابض مرنة ١٢. كما يتصل



الشكل (١١-١) الطاحونة المخروطية الهزازة

تتشكل قوة طرد مركزية أثناء دوران هزاز عدم التوازن تجبر مخروط التفطيت الداخلي المستند إلى المسند (المحمل) الكروي القيام بحركة اهتزازية تؤدي إلى الدوران البطيء حول محوره عبر السطح الداخلي للمخروط الخارجي. تتقدم المادة المفتتة تحت ضغط وزنها إلى حجرة الطحن. والتحطم يتم تحت تأثير القوى المتولدة عن التكسير. تختلف هذه الطواحين عن غيرها باستطاعتها الكبيرة تصل إلى 300 kg/h وأقل مصروفاً للطاقة، وأكثر توجيهاً للحبيبات المنتجة.

١-١-١-٥ الطواحين ذات المطارق:

تستخدم هذه الطواحين لتفتيت الكتل الأسفنجية للمواد المختلفة، مثل مساحيق الحديد الملبدة التي حصل عليها بالاختزال أو الترسيب. تتحقق عملية الطحن في مثل هذه الطواحين عن طريق صدم المطارق المثبتة على عمود نقل الحركة، الذي يدور داخل حوض المطحنة بسرعة عالية تصل إلى 1500 r.p.m. تحدد الطاقة الحركية للمطارق الدوارة بالعلاقة التالية:

$$E = Gv^2/2g \quad (13-1)$$

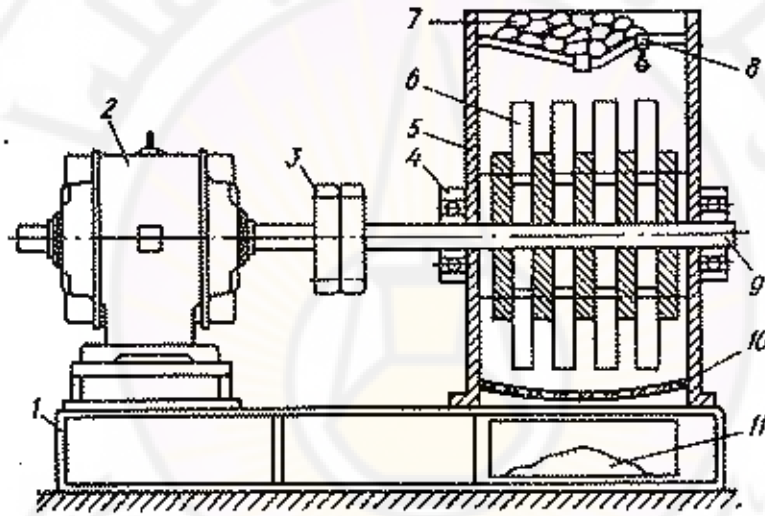
حيث إن:

v - السرعة المماسية للمطارق، m/sec

G - وزن المطرقة، kg

g - تسارع قوى الجاذبية، m/sec²

تتشحن قطع المواد المراد طحنها بواسطة قمع الاستقبال، ومنه إلى حجرة الطاحونة التي تحتوي في الأسفل على فوهة ذات شبكة للتفريغ. يصل زمن الطحن في مثل هذه الطواحين إلى بضع دقائق، والمسحوق الناتج ليس فيه تصليد تقريباً، لذلك لا داعي لعملية تدلين لاحقة. وتصل الإنتاجية إلى 6 t/h.



الشكل (١-١٢) الطاحونة ذات المطارق

1- قاعدة، 2- محرك كهربائي، 3- قابض، 4- محمل، 5- جسم المطحنة، 6- مطارق،

7- أجزاء المادة المراد طحنها، 8- مزلاج، 9- عمود نقل الحركة،

10- منخل، 11- المسحوق الجاهز

١-٢ طريقة تجميد المصهور بالتيار البارد Cold stream :

وهناك أسلوب سحق آخر هو أسلوب التيار البارد، ويستخدم بصورة خاصة في صناعة المساحيق البالغة النعومة، إذ يتم استقبال المادة الحبيبية في تيار من الغاز تحت

ضغط عالٍ يتمدد فيما بعد بصورة أدياباتية *adiabatically* عبر فتحة فنتوري *venture nozzle*، مما يؤدي إلى تبريد الغاز وتحويل ذرات المعدن إلى ذرات هشة. ولدى خروج هذه الذرات الدقيقة على سرعة عالية نتيجة تمدد الغاز فإنها ترتطم بهدف مناسب، وقد يكون من المادة نفسها، وبذلك يتم تجنب أي مخاطرة بالتلوث، وهنا تتفتت الذرات الهشة إلى قطع أصغر. وقد يكون الغاز إما هواء وإما غازاً خاملاً يتم إنتاج حبيبات معادن مختزلة من الأكسدة. ويتم فصل فئات *fractions* المسحوق الناعم المطلوب عن تيار الغاز الأخذ في الظهور، ويتم إعادة معالجة ودوران الذرات ذات الحجم الزائد بحيث يكون المحصول النهائي بصورة عملية 100%. ومن الشائع أن الترات التي حجمها $10\ \mu\text{m}$ أو أقل يمكن إنتاجها بهذا الأسلوب. وكان هذا الأسلوب قد استخدم أصلاً بصورة رئيسية لاستعادة نفايات *scrap* المعدن الصلب (الكريبد المسمنت)، ولكن أسلوب القوالب بالحقن الذي تطور في الآونة الأخيرة يحتاج إلى مساحيق بالغة النعومة من أجل نجاحه، من المحتمل أن يوسع نطاق استخدام هذا الأسلوب بصورة كبيرة لا يستهان بها.

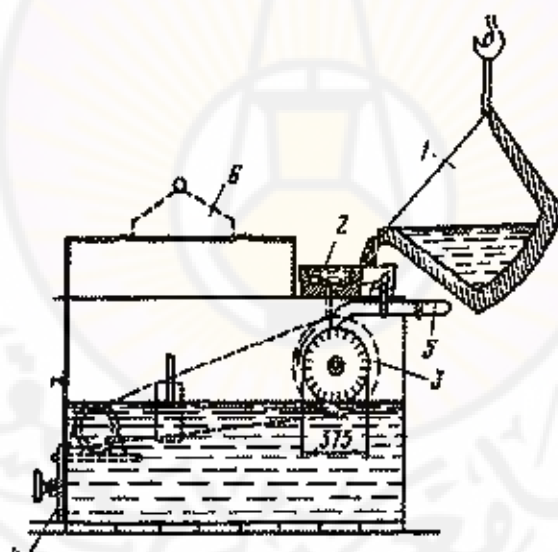
تسمح طريقة تجمد المصهور العالية السرعة بالحصول على ألياف متواصلة أو منفصلة، وكذلك على مساحيق بأشكال أبرية و حرشفية بسرعات تبريد عالية $10^5 - 10^6\ \text{K}^\circ/\text{sec}$ ، لذلك يعتبر إنتاج حبيبات مسحوقية مشتملة بأشكال متنوعة بطريقة تجمد المصهور عالية السرعة شائع وعام. زد على ذلك سرعة التبريد العالية جداً تسمح بتثبيت حالة لا بلورية صلبة في الجسيمات المشتملة لسلسلة سبائك معدنية مختلفة، أو زيادة قابلية الانحلال بشكل كبير (بعشرات أو مئات المرات) لعناصر الخلط السبائكي مغارئة مع القيم المتوازنة.

١-٣-٣ طريقة تحبيب المعادن المنصهرة بواسطة السيور الدوارة:

وهي وسيلة ممتازة لإنتاج كثير من المساحيق المعدنية، وفيها يسخن المعدن أعلى قليلاً من درجة حرارة انصهاره، ويصب المعدن من البودقة (١) إلى المجرى (٢) ومنه يندفع التيار المعدني على سير متصل (٣) بجره محرك كهربائي. ينقطع نيار المعدن

الرفيع نتيجة دوران السير، ويسقط على هيئة قطرات في خزان فيه ماء، فتتجمد مكونة مسحوق المعدن. يجفف المسحوق المتكون ثم ينفخ، وأحياناً يستمر في بعض الحالات معالجة المسحوق، وذلك باختزاله وطحنه. وأهم المساحيق الحديدية المصنوعة بهذه الطريقة تتم باستخدام حديد الزهر كمادة خام، وفي هذه الحالة تعرض الشحنة بعد تحبيبها إلى عمليات التلدين ثم إزالة الكربون، وبذلك نحصل على مسحوق يحتوي على نسبة معينة من الكربون، وبعد ذلك تعرض المساحيق الملدنة إلى التفتيت في الطواحين ذات الكرات إلى الحجم المعين. وعند رش المعدن المنصهرة التي لها توتر سطحي عالٍ تأخذ حبيبات المسحوق شكلاً كروياً. أما عند رش المعدن المنصهرة التي لها توتر سطحي منخفض فيكون شكل حبيبات المسحوق على شكل قطع أو شظايا.

ومن أهم عيوب هذه الطريقة أكسدة المساحيق، لذلك يستلزم إجراء عملية تلدين خاصة للمساحيق المنتجة.



الشكل (١٣-١) رسم تخطيطي لوحدة تحبيب

- 1- بؤقة فيها معدن منصهر، 2- مجرى، 3- سير متصل،
- 4- فتحة التفريغ، 5- موصل الماء، 6- غطاء

١-١-٤: التذخير Atomization:

تعتبر عملية التذخير من أكثر الطرق انتشاراً في مجال إنتاج المساحيق المعدنية من المعادن النقية أو حتى من الخلطات المختلفة، ومن هذه المعادن الألمنيوم والنحاس والحديد والفولاذ وخلطات الفولاذ المقاوم للصدأ وفولاذ العدد وخلطات التيتانيوم... إلخ. يطلق هذا الأسلوب على إنتاج مساحيق من قطرات مصهورة بواسطة تفتيت *disintegration* المعدن المتصهر وتذخيره بواسطة نيار من السائل سواء كان من الغاز أم من الماء، أم بمسائل أخرى تتيح لهذه القطرات أن تتصلب قبل أن ترتطم على سطح صلب. وهناك مجموعة كبيرة لا يربطها سوى أنها واقعة ضمن التعريف الأنف الذكر، وتختلف هذه الأساليب بالطريقة التي يتم فيها إنتاج المعدن المصهور، وبالطريقة التي يتم فيها حدوث التفتت، وكيف يتم تبريد وتجميد القطرات المصهورة، فمن المعروف بصورة جيدة أن قطرات السائل إذا تركت راكدة دون اضطراب فإنها تميل إلى اتخاذ الشكل الكروي تحت تأثير قوى التوتر السطحي، كذلك قطرات المعدن المصهور إذا أُتيح لها أن تبرد ببطء دون أن تلمس بسطح صلب أو بقطرات أخرى، فإنها تتجمد على شكل كرات. أما من الناحية الأخرى، إذا تشكلت هذه القطرات نتيجة طاقة صدم عالية لسائل ما، فإنها تنشوه بصورة كبيرة، ونظراً لكونها قد بردت بسرعة فائقة من قبل السائل، فإنها تعطي ذرات صلبة ذات شكل غير منتظم إلى حد بعيد جداً. وهكذا فإن التذخير يكون من الممكن إنتاج مجموعة كبيرة من الذرات الدقيقة الصلبة، ذات بنية أساسية مورفولوجية *morphology* مختلفة تتراوح بين هاتين النهايتين من الأشكال.

ومن الملاحظ التي تميز عملية التذخير من الأساليب البديلة هو أنه بالإمكان استخدامه في إنتاج مساحيق السبائك المتجانسة. ولذلك يطلق عليها تعبير مساحيق السبائك المسبقة *pre-alloyed powders*. وهذا أحد الأسباب التي جعلت عملية التذخير نشق طريقها إلى حقل إنتاج مسحوق الحديد، كما أن أسلوب المساحيق الأسفنجية يعطي عادة حديداً نقياً. ومن المسبوق التي تعيق استخدام المساحيق المسبقة السبك أو الخلط أنها أصلاب من المعادن النقية، وتبعاً لذلك فهي أقل قابلية للكبس أو التشكيل.

وتعتبر عملية التذخير واحدة من العمليات الأساسية في تكنولوجيا تصنيع المساحيق المعدنية سواء كانت مساحيق الحديد وسبائكه أم مساحيق المعادن الملونة مثل النحاس وسبائكه أم القصدير أم الرصاص ...إلخ.

و خضعت طريقة التذخير لدراسات معمقة و لا سيما بعد الحرب العالمية الثانية، إذ انتشر استخدام طريقة التذخير في الولايات المتحدة لإنتاج مسحوق الحديد، وفي الثمانينات صارت طريقة التذخير تشكل 60% من كمية إنتاج المساحيق المعدنية. ومن مميزات هذه الطريقة:

١. الإنتاجية العالية مقارنة بالطرق الأخرى ، و من ثم انخفاض التكلفة.
 ٢. إمكانية أتمة عمليات الإنتاج.
 ٣. الحصول على نوعية جيدة للمساحيق.
 ٤. بساطة هذه العملية، فأى مادة يمكن أن تكون في الطور السائل يمكن إجراء عملية التذخير لها من خلال تحويل مصهورها إلى قطرات.
 ٥. بعض الخلطات المعدنية الهامة لا يمكن إنتاج مساحيقها إلا بهذه الطريقة.
- إن طرق التذخير وأنواعها تنقسم بين طرق مسوقة تجارياً وأخرى نظرية لأغراض البحث العلمي، ويمكن شمل هذه الطرق بأربع طرق رئيسة وهي :
- أ- التذخير عن طريق مزج سائلين: يتحول المعدن المصهور إلى قطرات تحت تأثير الضغط العالي الناتج عن ضخ الماء أو الزيت أو الغاز (الهواء). كما هو مبين في الشكل التالي:



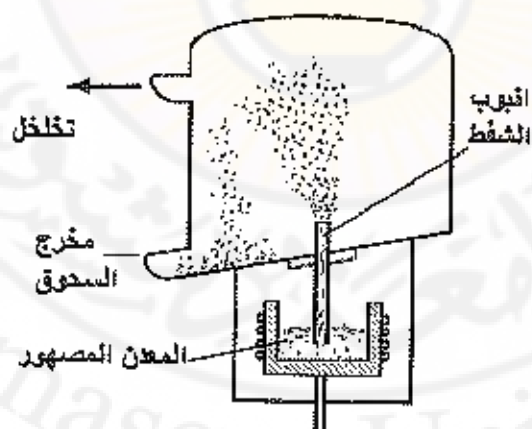
الشكل (١-١٤) التذخير بواسطة مزج سائلين

ب- التنذير بقوة الطرد المركزي: يتحول مصهور المعدن إلى ذرات تحت تأثير دوران قرص أو وعاء أو الكترود بسرعة معينة كما هو مبين في الشكل الآتي:



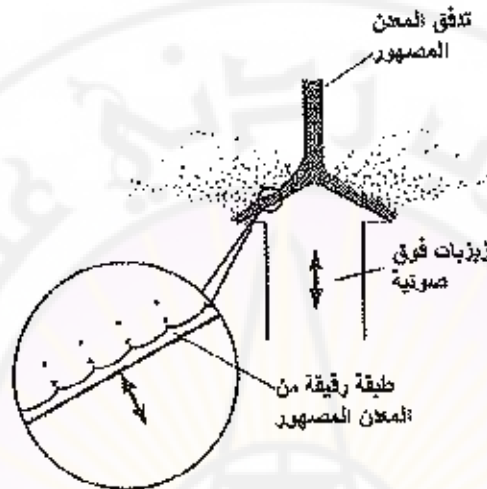
الشكل (١٥-١) التنذير بقوة الطرد المركزي

ج- التنذير بالتخلخل: تؤدي هذه العملية إلى إحداث خلخلة و شفق المعدن المنصهر، الذي يتطاير على شكل قطرات ما تلبث أن تتجمد مشكلة المسحوق المعدني المطلوب، كما هو موضح في الشكل الآتي:



الشكل (١٦-١) التنذير بالتخلخل

بث- التنذير بالأمواج فوق الصوتية: يسكب المعدن المنصهر على غشاء مصنوع من مادة خاصة، ويهتز هذا الغشاء تحت تأثير الأمواج فوق الصوتية التي تصدر عن منبع خاص، ونتيجة لهذه الاهتزازات العالية يتطاير المعدن على شكل قطرات ناعمة جداً كما هو موضح في الشكل الآتي:



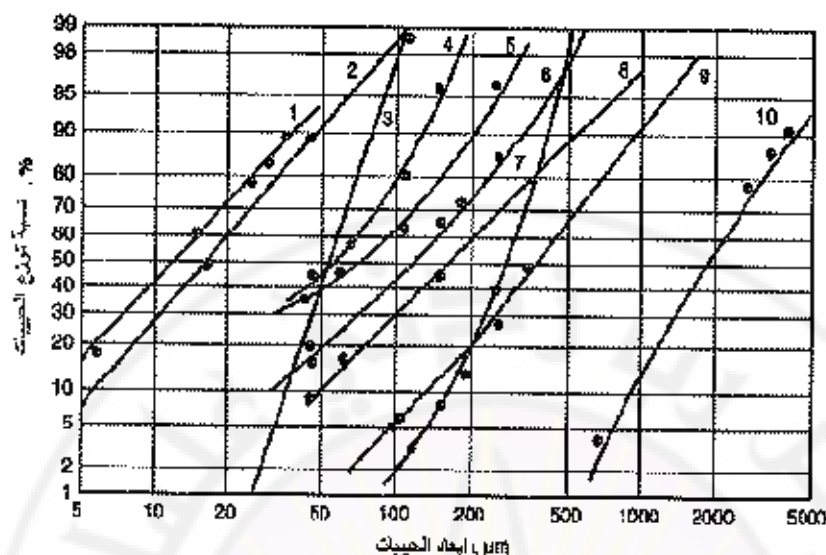
الشكل (١٧-١) التنذير بالأمواج فوق الصوتية

إن معظم الطرق السابقة مستخدم ومسوق تجارياً إلا أن طريقة المزج بين سائلين هي الأكثر انتشاراً على الإطلاق، حيث تصل نسبة المساحيق المنتجة بهذا النوع إلى ٩٥% مقارنةً مع طرق التنذير الأخرى.

١-٤-١-١ العوامل المؤثرة في عملية التنذير

أ- أبعاد الحبيبات وتوزعها :

لوحظ من خلال القياسات المجهرية والإحصاءات لأبعاد الحبيبات وتوزعها مثوياً أن هذا التوزيع يتبع علاقة لوغاريتمية مع أبعاد الحبيبات، أي بمعنى آخر (العلاقة بين بعد الحبيبة - نسبة وجود الحبيبة) هي علاقة لوغاريتمية، وبالطبع فإن هذه العلاقة اللوغاريتمية سوف تختلف بحسب نوع التنذير المتبع وحسب نوع المعدن المذرر. ويظهر الشكل (١٨-١) التالي بعض هذه المنحنيات، بينما الجدول (٢-١) أبعاد الحبيبات المختلفة ومدى انحرافها عن القيمة الوسطية.



الشكل (١-١٨) المنحنيات اللوغاريتمية لأبعاد الحبيبات للمواد المختلفة ونسبة توزيعها.

الجدول (١-٢) أبعاد الحبيبات الوسطية للمنحنيات السابقة ودرجة انحرافها.

الرقم المنحني	نوع البودرة	القيمة الوسطية للبعد (d_m) (μm)	الانحراف عن القيمة الوسطية
1	Copper, water atomized at 540 bar (by sedigraph)	12.5	2.4
2	Zinc, gas atomized at 20 bar	16	2.1
3	67Pb-37Sn ultrasonically atomized	64	1.31
4	M2 tool steel, water atomized at 140 bar	54	2.13
5	60Pb-40Sn solder, gas atomized at 8 bar	70	2.5
6	Bronze, air atomized at 5 bar	120	2.33
7	Zinc, centrifugally atomized	270	1.4
8	Zinc, water atomized at 55 bar	170	2.58
9	Copper shot, water atomized at 20 bar	280	2.1
10	Phosphor-copper shot, water atomized at 0.5 bar	1950	1.9

ب- شكل الحبيبات :

إن ما يميز أسلوب التنوير من الطرق الأخرى لإنتاج المساحيق المعدنية، هي الخصائص الرئيسية لهذه الطريقة من حيث الشكل والكثافة، ويمكن القول: إن المساحيق المنورة خالية من المسامية الدقيقة و من ثم فهي عالية الاندماجية، وتكون

ذات كثافة عالية وذات سطح نوعي مرتفع نسبياً مقارنةً بالطرق الأخرى لإنتاج المساحيق المعدنية. وهذا يعني أن هذه المساحيق سوف تمتلك تدفقاً جيداً (سيوية) وقابلية عالية للانضغاط (التكاسية) وقابلية أقل للتكلس من الأنواع الأخرى. وتتوزع نسب الكثافة بين ٦٥% (للأشكال الكروية) ويمكن للكثافة أن تنخفض بشكل حاد حتى ٢٠% عند تذخير بعض الخلطات التي تميل إلى التأكسد أو التي تتجمد بسرعة عالية.

مسحوق النحاس المنزرة باستخدام الماء،

يلاحظ شكلها الزاوي الحاد.

مسحوق الحديد المنزرة بالماء، ويلاحظ حصول بعض

التكلس لهذه الحبيبات بعضها مع بعض.



a)



b)

الشكل (١-١٩) أشكال بعض المساحيق المعدنية المنتجة بعملية التذخير بالماء

(a) مسحوق النحاس، (b) مسحوق الحديد يظهر عليه بعض التكلسات والالتصاق

ت- درجة نقاء المساحيق:

تختلف طرق التذخير بعضها عن بعض من خلال درجة النقاوة ونسبة الشوائب الضارة في البنية الداخلية أو على السطح، وهذه الميزة موجودة في الطرق الأخرى لإنتاج المساحيق، فمثلاً (تحتوي البودرة المنتجة بالتحليل الكهربائي على نسبة عالية من شاردة الكبريتات خاصة على سطح الحبيبة).

- وقد لوحظ ضمن طرق التذخير المختلفة وجود كل من الأكسجين والكبريت والكربون ضمن الخلطات، وتعزى هذه الشوائب إلى عدم نقاء السبيكة قبل التذخير.

- أما فيما يتعلق بوجود الهيدروجين وبخار الماء فإنه غالباً ما يكون بسبب الوسائط المستخدمة في عملية التذخير.

- يعتبر أيضاً تأكسد المسحوق بعد عملية التذخير من العيوب فيه، ولكن هذه الأكاسيد السطحية تساعد في بعض الأحيان على التخفيف من ظاهرة تكلس المسحوق قبل الاستخدام. والشكل (١-٢٠) يبين أشكال المساحيق المذرة في وسائط تذخير مختلفة لبعض المعادن.

ث- نسبة المسامات في البنية :

وتعتبر هذه المسامات من العيوب في حبيبات المسحوق، إذ تسيء إلى البنية النهائية للقطع المنتجة، وهي غالباً ما تكون هذه المسامات بسبب الرطوبة في الجو المحيط أو من وسيط التذخير (في حال استخدام الماء مع خللاط غير مناسبة)، لذلك لا بد من مراقبة عملية التذخير وبارامتراتها بدقة .

ج- نوع الخليطة :

يمكن بواسطة التذخير إنتاج العديد من أصناف المساحيق المعدنية، و تركيب المعدن لا يؤثر كثيراً على مراحل عملية التذخير، ولكن يجب أن نكون على علم بأن السبائك ذات نقطة الانصهار المرتفعة جداً (السبائك صعبة الانصهار) لا يمكن إنتاج البودرة لهذه الخللاط بأي طريقة من طرق التذخير بسبب الصعوبات التقنية الحاصلة، وكمثال على ذلك (إنتاج التتغنستين - فضة، أو حديد - نحاس). وبعض الخللاط يمكن تذخيرها بصعوبة باستخدام بعض أنواع التذخير وليس جميعها مثل خليطة (تيتانيوم - زنك)، أما بقية الخللاط العادية من حيث درجة حرارة الانصهار، فيمكن تذخيرها بسهولة مثل النحاس الأصفر والفولاذ المقاوم للصدأ و بعض أنواع الخللاط الفائقة و خللاط (النيكل - ألمنيوم).

ح- نسبة المسامات في البنية :

تعتبر المسامات الموجودة في بنية حبيبات المسحوق من العيوب، إذ تسيء إلى البنية النهائية للقطع المنتجة، و غالباً ما يكون سبب ظهورها من الرطوبة الموجودة في الجو المحيط أو من وسيط التذخير (في حال استخدام الماء مثلاً مع خللاط غير مناسبة)، لذلك لا بد من مراقبة عملية التذخير وبارامتراتها بدقة .

تذريق الألمنيوم
بالهواء، (تذريسي
الشكل).



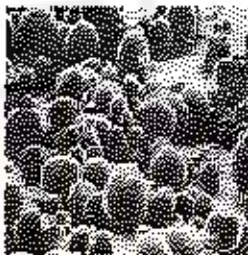
تذريق الألمنيوم
بالماء، (تذريسي
الشكل).



تذريق الفولاذ سريع
التمدد بالتذريق،
(تذريسي الشكل).



تذريق بالفلتريوم
نسيكة



إنتاج الألمنيوم باستخدام
وعاء مقلّب، (تذريسي الشكل).



الشكل (٢٠-١) شكل الحبيبات المنفردة لبعض المعادن في أوساط تذريق مختلفة

٢-٤-١-١ آلية التذريق Mechanism of atomization:

إن جميع عمليات التذريق تقوم على مبدأ تحويل الطاقة الحركية لعناصر التذريق إلى طاقة سطحية حرة لتشكيل المساحيق، إذ إنه كلما كانت الطاقة أكبر، زادت إمكانية تشكيل الحبيبات، لأنه في حالة الحبيبات الصغيرة تكون نسبة السطح على الحجم أكبر من حالة الحبيبات الكبيرة، ومن ثم فإن الحجم المتوسط للجزيئات سينخفض، ومن المعروف أيضاً أن عملية التذريق عادة تكون غير فعالة في تحويل الطاقة، ففي عملية التذريق بالماء فإن الفعالية تكون نحو 5%، أما التذريق بالغاز فهو أقل فعالية إذ إن

تحول الطاقة هو أقل من 1% من الطاقة السطحية الحرة، ولإنتاج مساحيق ناعمة يجب تقديم طاقة أكبر لتذخير المواد المختلفة، والتي تتعلق بأربعة عوامل هي:

- كتلة التذخير.

- معدل تدفق سائل التبريد.

- معدل تدفق المعدن المنصهر.

- تصميم نفثة التذخير.

فالطاقة الحركية تساوي $E = \frac{1}{2}mv^2$ وهي تتناسب مع الكتلة ومربع السرعة الوسطية، أما معدل تدفق الماء أو الغاز فيتطلب نظام ضخ ذو ضغط عالٍ لإيصال سائل التبريد لتيار المعدن المنصهر، أما الصهر فيجب أن يتم عند درجة حرارة معينة ولفترة زمنية محددة لضمان استمرار عملية التذخير.

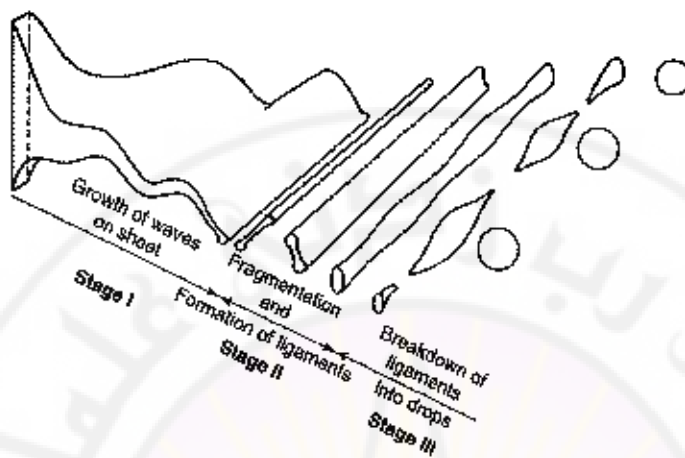
إن مبدأ العمل بهذا الأسلوب هو الحصول على مساحيق معدنية من المصهور وذلك نتيجة لانتهاء أو تشتت تيار المصهور إلى قطرات بواسطة تيار من الغاز أو السائل مثل الماء أو الزيت. ويتم إدخال الغاز إلى تيار المعدن المنصهر لحظة مغادرته الفوهة، ويتم تأمين اضطراب الغاز، وذلك من أجل انتشار الغاز (بسبب التسخين) والخروج إلى مجمع كبير الحجم. يملأ المجمع بالغاز لتوليد سرعة أو اضطراب إضافي لمولد المعدن المنصهر، ثم ينفصل الهواء أو السائل عن تيار المسحوق باستخدام فرازة مخروطية أو نتيجة جاذبية الأرض، ثم يلدن المسحوق وتكون جزيئات المعدن أو المسحوق الناتج بعملية التذخير صغيرة الأبعاد، نظيفة، ذات سطح نوعي كبير، و تسمح بعملية تدميج أفضل. تنقسم عملية التذخير هذه إلى ثلاث مراحل:

المرحلة الأولى - تشتت المصهور: و هي عبارة عن عملية تأثير ميكانيكي في تيار المعدن يؤدي إلى نمو تموج تيار المعدن المنصهر.

المرحلة الثانية - تحطيم موجات المصهور: وتشكيل الشرائح و الشظايا.

المرحلة الثالثة - التذخير: يتم فيها تكسير الشرائح وتشكيل القطرات أو الحبيبات الصلبة، و تتعلق هذه المرحلة بفوهة التذخير وبضغط وسرعة تيار الغاز أو السائل،

وبمخروط ويزاوية التذرية. والشكل (٢١-١) يبين المراحل الثلاث لعملية تشتيت المصهور وتذريده.



الشكل (٢١-١) مراحل تشكيل الحبيبات أثناء عملية التذرية

يتراوح ضغط الغاز بين 0.2 - 2 MPa و يتراوح ضغط السائل بين 2 - 10 MPa. ويتعلق تشتت أو تذرية المصهور بسرعة تيار الغاز، فكلما زادت السرعة زادت إمكانية الحصول على تذرية جيدة، و يستدل على فعالية الأداء العادية لعملية التذرية بواسطة عدد رينولدز:

$$Re = \rho \cdot v \cdot d / \mu \quad (14-1)$$

حيث يكون: ρ - كثافة السائل

v - سرعة خروج التيار

d - قطر الفوهة

μ - اللزوجة المطلقة

ولكن الكثافة الحركية تعطى بالعلاقة التالية:

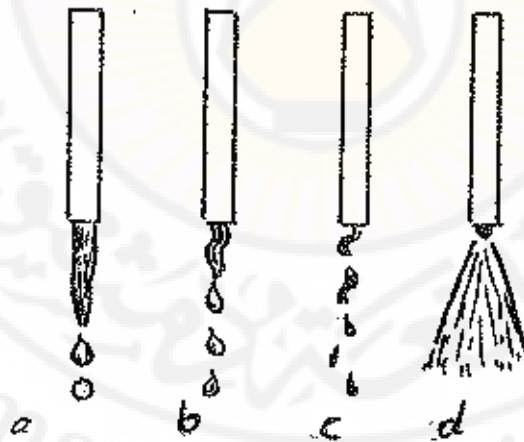
$$v = \mu / \rho \quad (15-1)$$

ومنه تصبح علاقة عدد رينولدز:

$$Re = v \cdot d / \nu \quad (16-1)$$

فإذا كان $Re < Re_c$ ، أي الرقم الناتج أصغر من عدد رينولدز يتذبذب مولد السائل، وعندما يكون $Re > Re_c$ يصبح تيار المعدن المصهور مضطرباً، ويجزأ إلى قطرات. ولكن لسوء الحظ لا يمكن حقن المعدن إلى داخل فتحة قطرها أقل من بضعة ملليمترات، إذ يكون أقل حد مسموح به هو حوالي 10mm، وعملية التذير غالباً ما تعطي نطاقاً واسعاً من حجم الجزيئات، وهذا يستلزم تقسيم مجرى التيار بواسطة القرشيع وإعادة الصهر للجزيئات الكبيرة.

ويوضح الشكل (٢٢-١) مخطط تذير المعدن المنصهر عند سرعات مختلفة لتيار غاز التذير، فحين تكون سرعة تيار الغاز صغيرة 5 m/sec ينفصل تيار المعدن إلى قطرات (الحالة - a)، أما عندما تزداد السرعة لتصل إلى 25 m/sec فينقص طول خيط المعدن المنتثر و من ثم نحصل على قطرات أصغر (الحالة - b)، وإذا كانت سرعة تيار الغاز 100 m/sec حصلنا على تموجات قطرات المعدن، وهي أصغر من سابقتها (الحالة - c)، وإذا ازدادت سرعة تيار الغاز لتصل إلى 150 m/sec حصلنا على زيادة شدة تذير تيار المعدن المنصهر، ويتشكل بالنتيجة تيار غازي يحتوي على المعدن المنصهر و الغاز، أي نحصل على حبيبات ناعمة (الحالة - d).



الشكل (٢٢-١) مخطط تذير المعدن المصهور المعدني عند سرعات مختلفة للغاز

$v = 150 \text{ m/sec}$ (d) $v = 100 \text{ m/sec}$ (c) $v = 25 \text{ m/sec}$ (b) $v = 5 \text{ m/sec}$ (a)

١-٤-٣ التذير بالماء Water Atomization :

إن هذا الأسلوب هو أكثر أساليب التذير انتشاراً في إنتاج مساحيق ميتالورجيا المساحيق، لأنه ينتج مساحيق غير منتظمة الشكل إلى حد كبير والمطلوبة لأسلوب التذير على البارد cold compaction في قوالب التشكيل الصلبة، كما أنه هو الأسلوب الذي بواسطته يتم إنتاج معظم أجزاء وقطع ميتالورجيا المساحيق. والأكثر شهرة من حيث التطبيقات التجارية للتذير بالماء هو تذير مسحوق الحديد، إذ إن نحو 60-70% من الإنتاج العالمي لمسحوق الحديد يتم إنتاجها بواسطة التذير بالماء، كما أن هذا الأسلوب يستخدم في إنتاج مساحيق كثير من المعادن و الخلائط المعدنية.

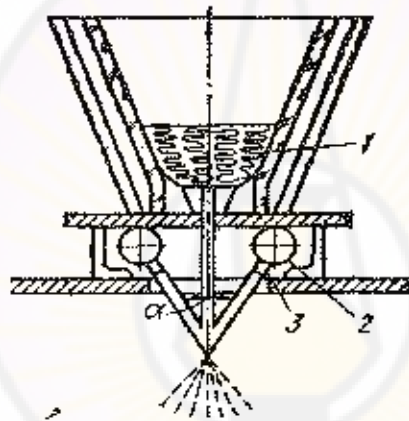
إن المعيار العام لاستخدام هذه الطريقة هو أن أي معدن أو خليطة لا تتفاعل مع الماء بقوة يمكن تذيرها بالماء، على أن يتم صهرها بسهولة. إلا أنه وجد في الممارسة العملية أن المعادن التي تنصهر بدرجات حرارة أقل من 500°C تعطي مساحيق غير منتظمة، وذلك بسبب التجمد السريع الحاصل، الذي غالباً ما يكون غير مرغوب فيه. لذلك فإن الزنك هو أقل المعادن إنتاجاً بهذه الطريقة.

وبشكل عام، فإن التذير بالماء أقل تكلفة من الطرق الأخرى بسبب التكلفة المنخفضة للوسيط المائي (الماء)، وانخفاض الطاقة اللازمة لضغطه مقارنة مع الغاز أو الهواء، كما أنه يمتاز بالإنتاجية العالية جداً، التي قد تصل إلى 30 ton/h، أما العيوب الرئيسية للتذير بالماء فهي: درجة النقاء وشكل الحبيبات غير النظامي إضافة لنسبة الأكسجين العالية في البودرة.

وعادة يسكب المعدن المنصهر، إما مباشرة و إما بواسطة وعاء للسكب، و هو عبارة عن خزان يزود وحدة التذير بالمعدن المنصهر. وفق معدل محدد متبقاً ثم تقوم وحدة التذير برش المعدن المنصهر عبر فوهة مصنوعة من معدن ذي درجة انصهار عالية، وغير قابلة للانسداد و تتحكم بخروج الرذاذ المعدني عبره. وبذلك نحصل على قطرات من المعدن عالية النعومة تبعاً لسرعة خروج المعدن المنصهر. وعند خروج المعدن المنصهر من الفوهة يتلاقى مع التيار المائي ذي الضغط العالي

كما هو مبين في الشكل (٢٣-١)، ثم تسقط القطرات المعدنية بعد أن تكون قد تجمدت، لتبدأ بعدها عملية إزالة الماء منها في وحدة مختصة بذلك، كما يتم إعادة استخدام هذا الماء بعد أن تتم عملية تنقيته.

وهناك ما لا يحصى من الأنواع في تفصيلات المعدات المستخدمة، ولكن بصورة أساسية، فإن هذا الأسلوب - أي أسلوب التذخير بالماء - يتيح وجود سيل من المعدن المصهور يتدفق رأسياً من خزان استقبال المعدن المصهور tan dish إلى حجرة التذخير، حيث يتم تنقيته بفعل صدم نفثات من المياه ذات ضغط عالٍ. وهذه الضغوط تتراوح بين 5-20 MPa، ومن الملاحظ أنه كلما كان الضغط أعلى كان المسحوق أنعم وأبقى.

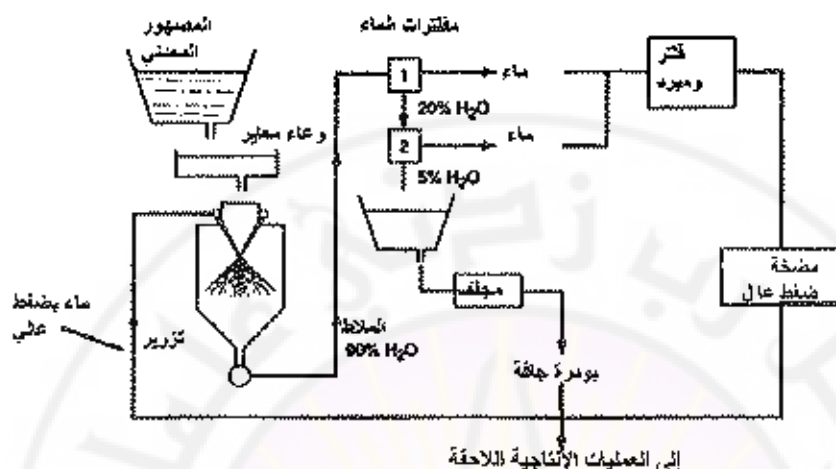


الشكل (٢٣-١) وحدة تذخير المعدن المنصهر بالماء

(1) خزان المعدن المصهور، (2) مضخة حقن الماء، (3) تيار الماء ذو الضغط العالي

وقد أخذت شركة Pacific Metals في اليابان في الآونة الأخيرة بإنتاج مساحيق في غاية النعومة والدقة بواسطة التذخير بالماء باستخدام ضغوط تصل إلى 1000 kg/cm²، مما أدى إلى إنتاج مساحيق غاية في النعومة، إذ يصل متوسط حجم الحبيبات فيها إلى $d = 10 \mu m$. وهي مثالية للتشكيل بالحقن. ويبين الشكل (٢٤-١)

رسمًا تخطيطيًا للدائرة المغلقة لإنتاج المساحيق بالتفريز بواسطة الماء وعملية التجفيف وتنقية الماء وإعادة تدويره.

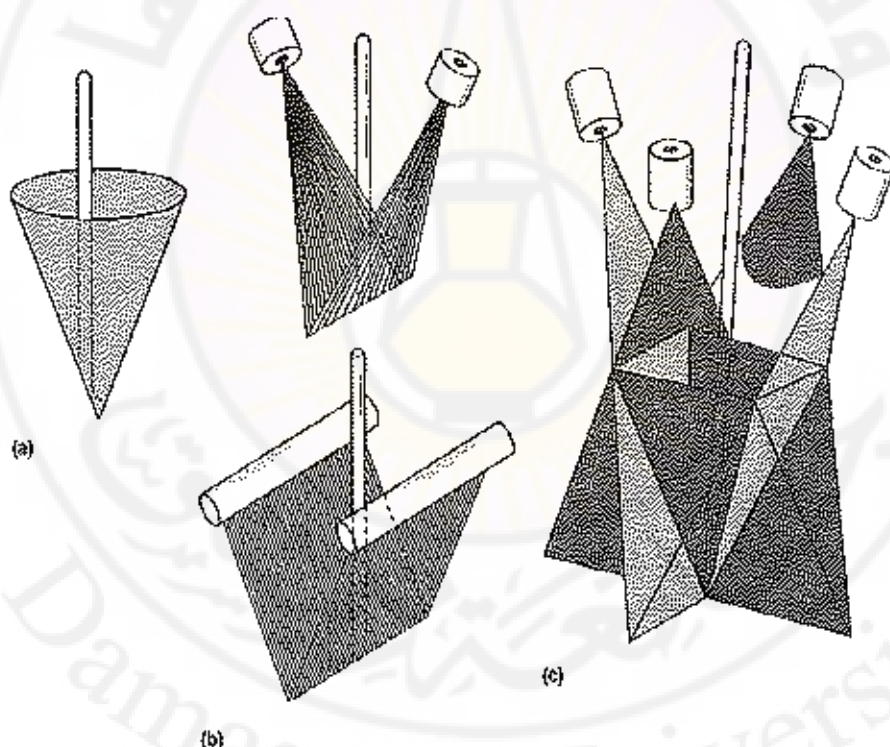


الشكل (١-٢٤) الدواة المغلقة لإنتاج المساحيق بالتذير بالماء

١-٢-٣-٤-٥ قوة خروج الماء المضغوط:

إن الفوهات المستخدمة في التحكم بإخراج الوسيط المائي تكون ذات تأثير كبير في كفاءة عملية التنزير. كما أن للعديد من منطجي المساحيق تصاميمهم المناسبة الخاصة بهم، ولكن أبسط هذه الأساليب ومن المحتمل أن تكون أكثرها انتشاراً هو ذلك الأسلوب الذي يستخدم نفثتين مستويتين متواضعتين بصورة متعاقبة على الجانبين المتقابلين لمحور تيار السائل المعدني المتدفق، كما هو مبين في الرسم التخطيطي للشكل رقم (١-٢٢). وتعتبر العوامل التالية: زاوية النفثة α مع المحور الرأسي، وحجم وضغط الماء، وسماكة مجرى المعدن، ودرجة حرارة تجميعه $super\text{-}heat$ ، كلها من العوامل التي تؤثر في النتيجة النهائية للحصول على الحبيبات، و يجب إيصالها إلى المستوى الأمثل في كل تصميم بحيث يتمكن من الحصول على إنتاج مساحيق ذات نعومة مطلوبة تكون عادة أقل من $150\text{ }\mu\text{m}$ في أحسن الأحوال، وبنسبة تصل إلى 90% من المعدن المصهور. وهناك العديد من التصاميم وبراءات

الاختراعات للنفاثات منها: أربع نفاثات على شكل حرف V، أي زوجين من النفاثات المتقابلة على زوايا قائمة؛ وتصميم آخر يعتمد على عدد كبير من النفاثات الأسطوانية مرتبة على شكل دائرة وفوهة nozzle نفث دائرية تعطي مخروطاً كاملاً من المياه كما هو موضحاً في الشكل (١-٢٥)، ومن الشكل نلاحظ أن الفوهات الحلقية تستخدم في الإنتاج الكمي مثل إنتاج مساحيق الحديد، ولكنها نادراً ما تستخدم في طرق الإنتاج الأخرى، لأنها قليلة المرونة وصعبة التصنيع، وذلك بالمقارنة مع الفوهات من النوع V سواء كانت وحيدة الفوهة أم ثنائية أم متعددة الفوهات. والهدف من زيادة عدد النفاثات هو زيادة معدل التبريد من أجل الحصول على مسحوق غير منتظم بصورة أكثر.



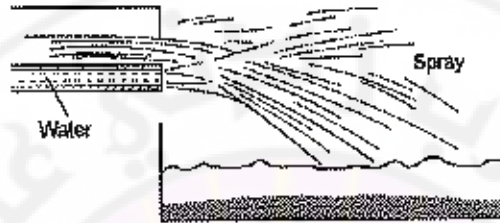
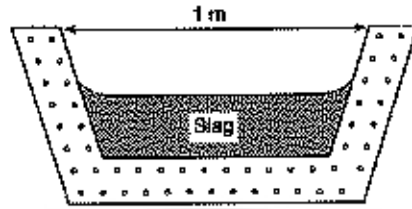
الشكل (١-٢٥) أشكال فوهات تنفيث الماء

١- الفوهة الحلقية، ١- الفوهة المفتوحة من النوع V، ٢- الفوهة المغلقة من النوع V

يتدفق المعدن المصهور لمسافة محددة 15-25 cm قبل أن يتلاقى مع المعدن المصهور، وغالباً ما يضاف جهاز سحب فوق نقطة التصادم بين التيار المعدني والتيار المائي، إذ يقوم الشفط بسحب الغازات التي تترافق مع التيار المائي، وهي (إن لم يتم سحبها تؤدي لحدوث اضطرابات في جريان المعدن المصهور)، إذ نلاحظ أن التيار المائي الذي يتلاقى مع المعدن المصهور يكون 2% منه فقط قطرات من الماء والنسبة المتبقية 98% من الغاز. ويتم فصل المسحوق عن المياه بواسطة جهاز ترشيح، أو عن طريق الترسيب. وعملية سحب المياه هذه تكون متبوعة بعملية تجفيف تتم بصورة عامة بواسطة صوان في أفران تعمل بالشفط القصري أو بواسطة مجفف فنشوري - حراري ومضني. والمسايق المنتجة بهذه الطريقة تحصل في نهاية الأمر على غشاء من الأكسيد على سطح الذرات الدقيقة. وهكذا فإن المسحوق في بعض الحالات يخضع لعملية اختزال.

١-٤-٣-٢ التذير بالماء غير المتمثل:

هناك طريقة أخرى للتذير بالماء هي طريقة الإنتاج الكمي التي تسمى بالتذير غير المتمثل، إذ تستخدم تدفقاً عالياً وضغطاً منخفضاً للماء. ويتم في هذا النوع من التذير تدفق المعدن المصهور إلى حوض كبير، ومن ثم يتم ضخ الماء عبر فوهة أفقية كما هو موضح في الشكل (١-٢٦)، تستخدم هذه الطريقة لكميات الضخمة من إنتاج الفولاذ أو الحديد ($\sim 500 \text{ kg/min}$) وكميات كبيرة من الحبيبات ممزوجة مع الشوائب ($\sim 5000 \text{ kg/min}$) أو الخبث.



الشكل (١-٢٦) التذير غير المتماثل

١-٤-٣-٣ آلية التذير بالماء:

إن آلية التذير بالماء تعتمد على نقل كمية الحركة من الماء إلى المعدن المصهور، مما يؤدي إلى تشتت تيار المعدن المصهور نتيجة التأثير الصدمي لقطرات الماء كما هو موضح في الشكل (١-٢٧). ومن الملاحظ أن الافتراض الأولي لعملية تشكل القطرات نتيجة الصدم بدلاً من القص كان من قبل العالمين (غراندزول - تولمادج)، وهذا التفسير يعكس الانتثار الطبيعي لقطرات الماء، و يمكننا الحصول على متوسط حجم الحبيبات من علاقة Grandzol التالية :

$$d_m = A/V_w = (14900/V_w) \cdot (1/N)^{1/3} \quad (17-1)$$

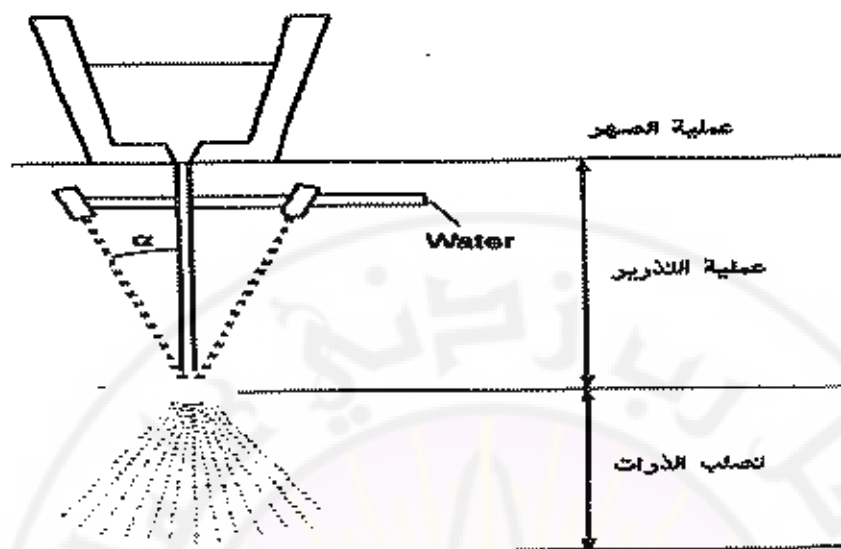
حيث إن:

A- ثابت يتعلق بنوع المعدن المراد تذييره.

V_w - سرعة جريان الماء.

d_m - القطر الوسطي للحبيبات.

N- عدد القطرات المعدنية التي تتشكل نتيجة اصطدام قطرة واحدة من الماء.



الشكل (٢٧-١) مراحل آلية التثقيب بالماء

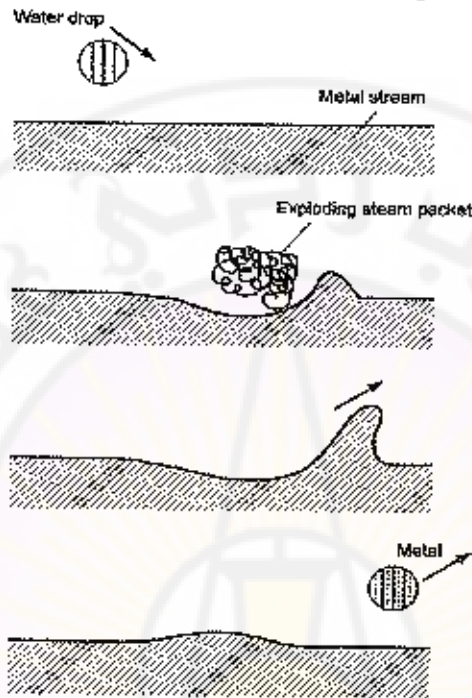
ومن الملاحظ أن معدل التدفق المائي و ضغط الماء و كمية الطاقة الحركية و طول فوهة التنقيث ومعدل التدفق كلها قيم لا تؤثر في قطر الحبيبات d_m ، ولكنها تؤثر تأثيراً كبيراً في حجم الحبيبات نتيجة التأثير المباشر في سرعة التيار المائي وعلى عدد القطرات المعدنية المتشكلة من اصطدامها بقطرة ماء واحدة. كما أن التصادمات الحادثة تقلل من كفاءة عملية التثقيب، وهي تزداد مع زيادة معدل تدفق المعدن المصهور، وهكذا فإن الحجم الأعظم للحبيبات يكون في مركز تيار تدفق المعدن المصهور، ونموذج الصدم بواسطة قطرات الماء وألية اقتلاع وتشكيل الحبيبات موضحة في الشكل (٢٨-١). كما تؤثر زاوية انحراف فتحة التنقيث α في حجم الحبيبات الوسطي و سرعة جريان الماء، وهي تتراوح ما بين $40^\circ - 50^\circ$ ، وتحسب زاوية الانحراف بالعلاقة التالية:

$$d_m \approx \frac{1}{V \sin \alpha} \quad (18-1)$$

حيث إن: V - سرعة التيار المائي.

d_m - القطر الوسطي للحبيبات.

α - زاوية الانحراف.



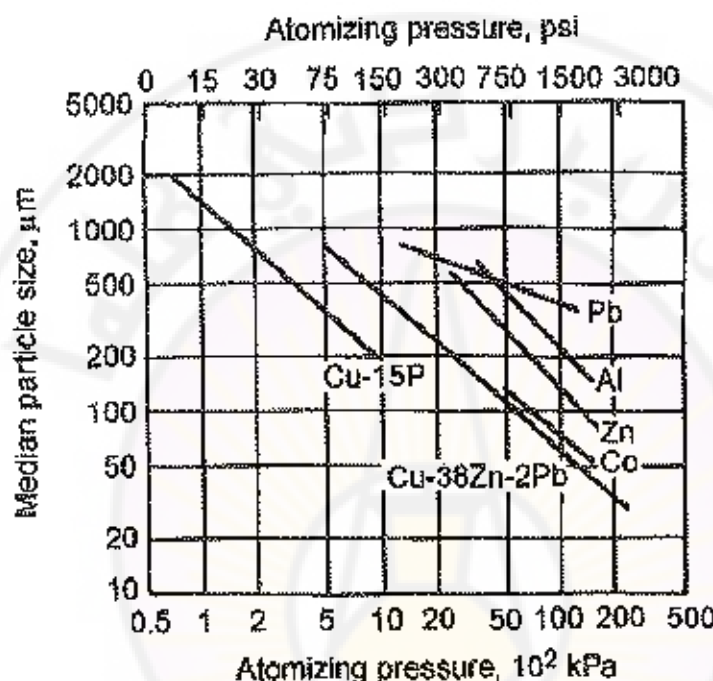
الشكل (٢٨-١) الرسم التمثيلي لنموذج صدم تيار الماء وتشكيل الحبيبات في عملية التذخير بالماء

١-١-٤-٣-٤ حجم الحبيبات:

يتعلق حجم الحبيبات الوسطي بشكل مباشر بضغط التذخير أي بضغط التيار المائي، حيث إن زيادة ضغط التيار المائي يؤدي إلى زيادة سرعة التيار المائي و من ثم إلى تغير حجم الحبيبات الناتجة، ويمكن حساب الحجم الوسطي للحبيبات d_m بالعلاقة التالية:

$$d_m = K.P^{-m} \quad (19-1)$$

حيث إن: K و m هي عبارة عن ثوابت تتعلق بالمعدن المذرو و بفوهة التذير. أما P هو عبارة عن ضغط التيار المائي MPa. و تعتبر هذه العلاقة تقريبية ومعقدة، والوسائل الحديثة للبحث العلمي لم تستطع تحديدها بدقة، ولكن بتقريب مقبول، ومن الممكن القول: إنها قريبة من الحقيقة...



الشكل (١-٢٩) علاقة حجم الحبيبات الوسطي بضغط التذير بالماء لبعض الخلطات المعدنية

١-٤-٣-٥ العوامل المؤثرة على عملية التذير بالماء

إن عملية التذير بالماء تتعلق بعدد من العوامل خلال كامل مرحلة التذير، والكثير من هذه العوامل تتداخل بعضها مع بعض ويختلف بعضها عن بعض بحسب المعدن الذي يتم تذيره، والقيم الوسطية لهذه العوامل هي:

- تدفق المعدن المصهور لقوامة واحدة تكون ما بين 1 - 500 Kg/min
- معدل الجريان المائي يتراوح ما بين 20 - 2000 Liter/min
- سرعة خروج الماء 10 - 500 m/sec

- ضغط الماء عند الخروج يتراوح ما بين $5 - 150 \text{ MPa}$
 - درجة حرارة تحميص المعدن المنصهر تكون أعلى من درجة حرارة الانصهار بـ $75 - 150^\circ\text{C}$
 - نسبة تدفق الماء على تدفق المعدن المنصهر تتراوح ما بين $1/2 - 1/10$
- جدول (١-٢) خصائص عملية التذير بالماء لبعض المعادن وخلاتها

نوع الخليطة	القطر للوسطي μm	الكثافة الظاهرية g/cm^3	نسبة O_2 ppm	تدفق المعدن $M, \text{Kg/min}$	تدفق الماء $W, \text{L/min}$	النسبة W/M	ضغط الماء MPa
Fe-0,1%C	55	3,2	10000	150	950	6,3	11
Ag	21	3,4	.....	18	100	5,5	50
Fe-0,1%Si	175	3,5	3400	155	850	5,5	5,8
Fe-15%Si	35	3,6	900	110	250	2,27	25
Cu-5%Cr	24	3,18	.....	27	180	6,7	20
316L	50	2,69	1200	19	120	6,3	8,5
Co	29	3,28	.....	27	180	6,7	20
Al-2%Cu	88	.....	.....	7	40	5,7	13,7
Ag-22Cu-3Zn	72	3,95	110	9	42	4,7	17,2
M2 tool steel	53	2,65	2100	72	410	5,7	13,8
304L	67	2,63	1600	65	370	5,7	10,2

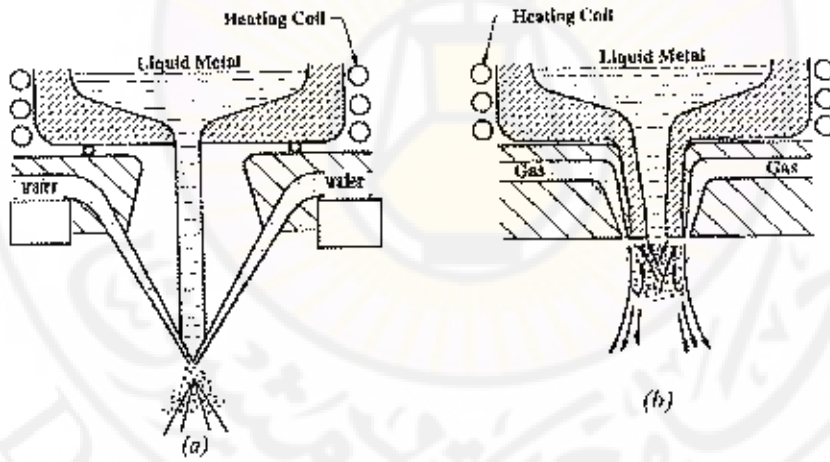
١-٤-٤-١ التذير بالغاز Gas Atomization

بالرغم من أن التذير بالماء يهيئ الأسباب المؤدية إلى وجود معظم المساحيق المذرة المنتجة من أجل الكبس أو التدميج، فإن هناك عدة استخدامات يكون فيها المسحوق غير المنتظم إما ضرورياً وإما غير مرغوب فيه عملياً. ويمكن للتذير بالغاز أن يكون مستخدماً. أما المبادئ والقواعد فهي مماثلة لتلك المتعلقة بالتذير بالماء إلا أن نفايات الغاز هي المستخدمة. ولا تكاد تكون هناك حاجة إلى القول: إن المعدلات الحاصلة هي أدنى بكثير، كما أن لدى القطرات وقتاً كافياً لاتخاذ الشكل الكروي تقريباً. كذلك فإن فترة التبريد الأطول تحتم استخدام غرف تبريد أكبر من أجل تأمين مسار طيران حر أطول للقطرات. ويتم عادة القيام بهذا التبريد بالاتجاه

إلى الأسفل بصورة رأسية، إلا أنه بالإمكان القيام به أفقياً، بل حتى رأسياً إلى الأعلى، و يكون هذا الأسلوب الأخير هو الأسلوب الطبيعي بالنسبة إلى تذخير الألمنيوم. ومن الناحية النظرية فإن أي غاز يمكن أن يستخدم، فلهواء يستخدم لتذخير الألمنيوم و كذلك يستخدم النتروجين. أما إذا كان التخلص من النترات مطلباً جوهرياً وأساسياً كما هو الأمر في حالة تذخير النيكل والسبائك ذات الأساس الكوبالت الخاصة بتطبيقات الفضاء والطيران، فإن الأرجون هو المستخدم وحتى الهيليوم، مع أنه باهظ الثمن، فقد تم استخدامه بسبب التبريد الأسرع الذي يوفره. تدعى سرعة تيار الغاز التي يبدأ عندها التذخير الشديد لتيار المعدن المنصهر بالسرعة الحرجة، و تحسب من العلاقة التالية:

$$V_{cr} = 2. \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho \cdot d}} \quad (20-1)$$

حيث إن: σ - قوة التوتر السطحي للمصهور، ρ - كثافة الغاز، d - قطر قطرة المصهور.

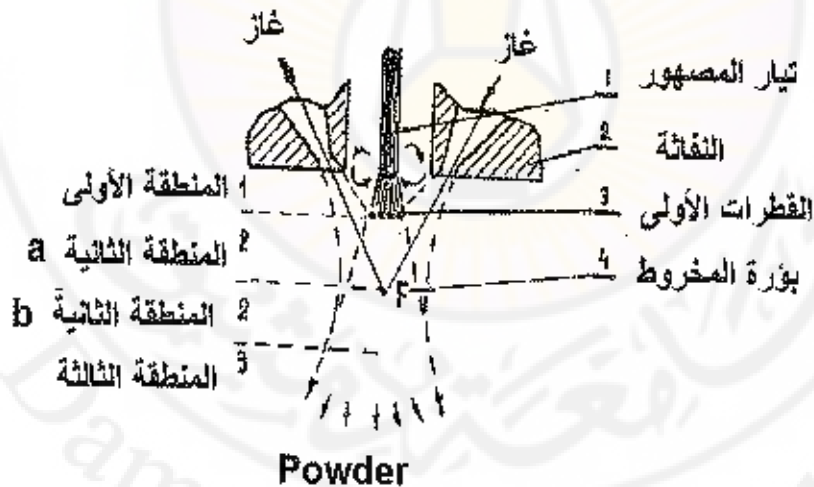


الشكل (١-٣٠) وحدة تذخير المعدن مع فرن الصهر

a - تذخير بالماء، b - تذخير بالغاز

ومن الملاحظ أنه يتحدد ثلاث مناطق في المخروط المتشكل من تيار الغاز كما هو مبين في الشكل (٣١-١):

١. المنطقة الأولى: وهي المنطقة البعيدة عن المخروط، وهي منطقة القطرات الكبيرة تكون أبعاد القطرات المتشكلة بحدود $0.5 - 2 \text{ mm}$ وهي إما على شكل صفائح وإما شرائح، وتسمى منطقة التكسير الأولى.
٢. المنطقة الثانية a&b: وهي المنطقة القريبة من المخروط التي تلي المنطقة الأولى، إذ تكون فيها قطرات المعدن أصغر فيحصل تنعيم القطرات الكبيرة المتساقطة، بينما تكون القطرات الصغيرة قد بردت، ويحصل فيها تكسير آخر للقطرات التي لم تبرد بعد (b)، وتصل أقصى سرعة عند بؤرة التذير F.
٣. المنطقة الثالثة: منطقة مخروط التذير تكون فيها السرعة كبيرة و كثافة تيار الغاز أكبر، ويحصل رذاذ المعدن المخلوط مع الغاز حيث يتجمع الرذاذ في وعاء التجميع، بعد أن يكون قد برد وتجمد، و من ثم نحصل على المسحوق الدقيق، أما الغاز فيعاد استخدامه في دورة تكرير وضغط كما هو مبين في الشكل (٣١-١).



الشكل (٣١-١) رسم تخطيطي لعملية تذير المصهور بالغاز

١-٤-٤-١-١ العوامل المؤثرة في عملية التذرية بواسطة الغاز:

١. لزوجة المعدن المنصهر: تنصف اللزوجة بانتقال السائل من الحالة الأولى المستقرة إلى حالة أخرى غير مستقرة تحت تأثير قوى القص. إذ للزوجة أثر مهم في عملية سكب المعدن و تذرية تيار المعدن و تشكيل حبيبات المسحوق، وهي تتعلق بدرجة الحرارة ويمكن حسابها بالعلاقة التالية:

$$\mu = (2 \tau_0 k T / r^3) \cdot e^{E/kT} \quad (21-1)$$

حيث إن:

τ_0 - الزمن الذي تكون عنده الجزيئات في حالة استقرار و يتراوح بين:

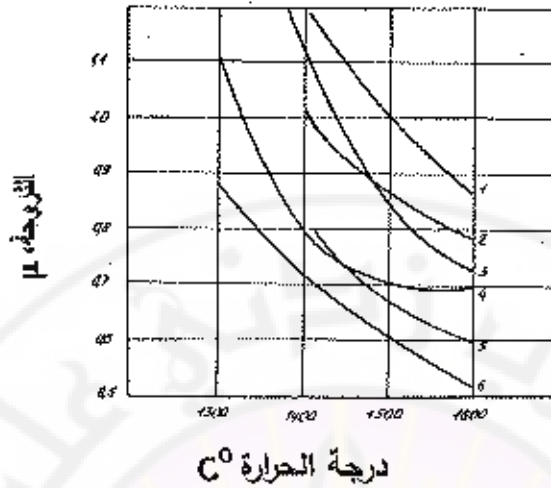
$$\tau_0 \cong 10^{-6} - 10^{-10}$$

K - ثابت بولتزمان، و T - درجة حرارة انصهار المعدن.

r - نصف قطر الذرة، و E - طاقة الانتشار في الطور السائل.

٢. قوى التوتر السطحي: تؤثر في تشكيل جزيئات المصهور التي تتحول إلى حبيبات، كلما قوى التوتر السطحي أكبر كان شكل الحبيبات أكثر تكويراً و أكثر دقة.

٣. درجة حرارة المصهور و السعة الحرارية: و تشكيل لأولى القطرات، ولكن نتيجة التبادل الحراري مع الوسط الغازي وفقدان الإشعاع الحراري حتى الوصول إلى درجة حرارة التجمد، مما يؤدي إلى توقف عملية التذرية، لذلك من الضروري معرفة سرعة تبريد المصهور و درجة الحرارة في منطقة التذرية.



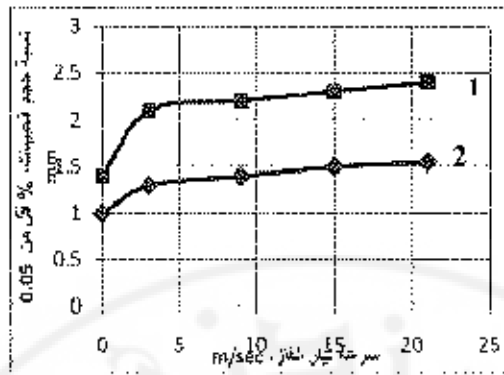
الشكل (١-٣٢) علاقة لزوجة مصهور المساحيق ذات الأساس حديد بدرجة الحرارة:

1- 100% Fe، 2- فولاذ كرومي 12% Cr، 3- خليط Fe + 4.25% C.

4- فولاذ العدد القاطعة، 5- Fe + 24% Si، 6- Fe + 43.2% Si.

و تؤثر السعة الحرارية بشكل كبير في كل من سرعة التبريد و في خواص المصهور. لذلك ترفع درجة حرارة المصهور و الغاز (درجة حرارة تيار الرذاذ) لتأمين لزوجة دائمة و تؤثر سطحي في جميع مراحل التذخير، كما أن رفع درجة الحرارة يؤدي إلى زيادة نسبة التذخير وزيادة كمية الحبيبات الدقيقة.

٤. سرعة تيار الغاز: إن زيادة سرعة تيار الغاز يؤدي إلى زيادة القدرة على الحصول على مساحيق أكثر دقة، ولكن زيادة سرعة الغاز تؤدي من ناحية أخرى إلى زيادة معامل التبادل الحراري مما يؤدي إلى نقص فعالية عملية التذخير. لذلك لا بد من اختيار سرعة مثالية لتيار الغاز.

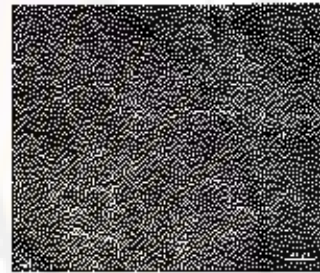


الشكل (٣٣-١) تأثير سرعة تيار الغاز في حجم الحبيبات

1- تذير بواسطة الغاز، 2- تذير بواسطة الهواء



a)



b)

الشكل (٣٤-١) قطاع مجهرى يبين شكل الحبيبات الناتجة عن:

a- تذير بالهواء، b- تذير بالغاز

١-٤-٥ التذير بالزيت Oil Atomization

تستخدم هذه الطريقة من أجل التغلب على أكسدة السطوح في المواد و السبائك الفولاذية، فقد تم في الآونة الأخيرة في اليابان تطوير أسلوب يتم فيه إحلال البارافين والكبروسين محل الماء، وبهذه الطريقة أصبحت هذه المصاحيق الآن متوافرة في الأسواق.

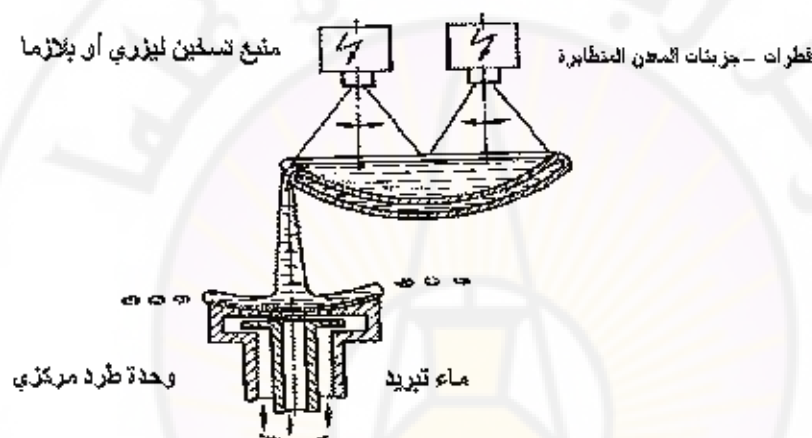
١-٤-٦ التذير بقوة الطرد المركزي:

وهناك ظروف وحالات عديدة لا يمكن فيها للتذير بالغاز الخامل أن يوفر حلاً مثالياً. فعلى سبيل المثال إن المعدن المصهور الذي تم صهره في بوتقة، وتم إمراره عبر

قوهة أو فتحة خزان استقبال المعدن المنصهر فهو معرض - بل من المؤكد - القيام بالتقاط ذرات غير قابلة للانصهار إلى حد ما، وهذه الأشياء تظهر بصورة لا مناص منها كشوائب غير معدنية في المسحوق النهائي. مما تؤثر بصورة سلبية في الخصائص الميكانيكية حتى في المعدن الذي تم في النهاية تدميجه، وخاصة وجود ظاهرة التعب fatigue في المنتجات المشكلة من هذه الحبيبات. وتوجد أساليب مختلفة لتنظيف مثل هذه المساحيق، أي إزالة الذرات الدقيقة غير القابلة للانصهار والتصليد، إلا أن عملية الفصل لا تكون دقيقة، لأن ذرات المعدن الشديدة التماسك والمقاومة للحرارة من الواضح أنها قد تشكل صعوبة في عملية الفصل. وهناك عامل آخر يتعلق بالمساحيق المذرة بغاز الأرجون، التي يكثر الغاز بصورة دائمة في بعض النرات الدقيقة الجوفاء. ولما كان غاز الأرجون لا يتفاعل مع المعدن ولا يمكن انتشاره، كان هناك تقطع في المدمجات، مما يؤدي إلى تدن في الخواص.

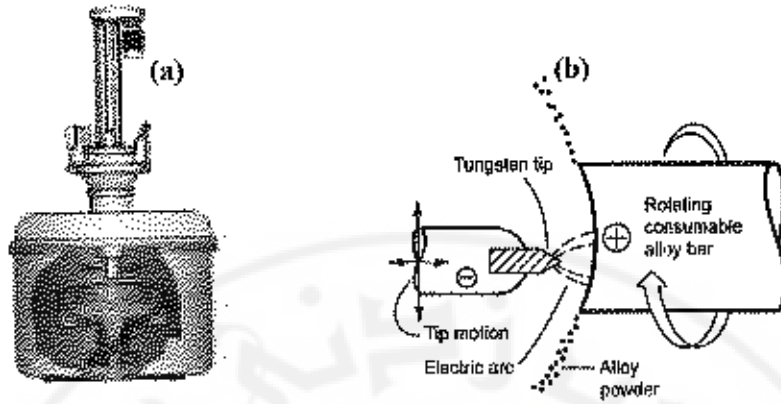
وعلى أي حال فإن المشكلتين الأنفتي الذكر قد تم التخلص منهما إلى حد بعيد جداً بواسطة التذيرير بالطرد المركزي. وكما يعنيه الاسم ضمناً، فإن قطرات المعدن المنصهر يتم القذف بها بواسطة قوة الطرد عن المركز من خزان المعدن المنصهر والذي يمكن استخلاصه عن طريق التلامس مع أي مادة مقاومة للانصهار، مثلاً بواسطة الصهر بالقوس الكهربائي في فرن معدني يبرد بالماء يدور أفقياً وغير ذلك. وقد تم تطوير العديد من الأنظمة المختلفة بما فيها ذلك النظام الذي يتم فيه صهر المعدن بواسطة الأشعة الإلكترونية electron beam أو قوس البلازما plasma arc أو التذيرير بالإلكترونات النوار، وهكذا يكون بالإمكان إجراء العملية في جو شبه مفرغ من الهواء Vacuum. وفي مثل هذا الأسلوب تستخدم كريات دوارة متصوغة أفقياً من المعدن يقوم قوس البلازما بصهر الطرف الطليق من هذه الكريات. وتعتبر هذه الأساليب لإنتاج المساحيق المعدنية غالبية الثمن نسبياً، وتستخدم فقط للمساحيق الخاصة التي تتطلب أقصى غايات البراعة والعناية الفائقة أو مساحيق المعادن ذات التفاعل العالي والنقاوة العالية.

أما مبدأ عملية التذخير بالطرد المركزي للجزيئات المصهورة، فيتم عن طريق تحويل المعدن المنصهر إلى ذرات تحت تأثير قوة الطرد المركزي الناتجة عن دوران قرص أو وعاء أو إلكتروود بسرعة معينة مما يؤدي إلى تشتيت المصهور وتذخير، إذ تصب قطرات المعدن المنصهر فوق قرص يدور بسرعة كبيرة، ويوجد أسفله حوض به ماء بارد لتبريده، وعند ملاصقة القطرات لسطح القرص البارد الدوار تتناثر بفعل القوة الطاردة المركزية، وتتجمد على شكل شرائح رقيقة تجمع بعدها وتجفف وتسخن في طواحين خاصة تحولها إلى مسحوق مناسب، كما هو موضح في الشكل (١-٣٥).



الشكل (١-٣٥) وحدة التذخير بالطرد المركزي

تستخدم طريقة التذخير بالطرد المركزي في إنتاج مساحيق الألمنيوم بصورة خاصة.



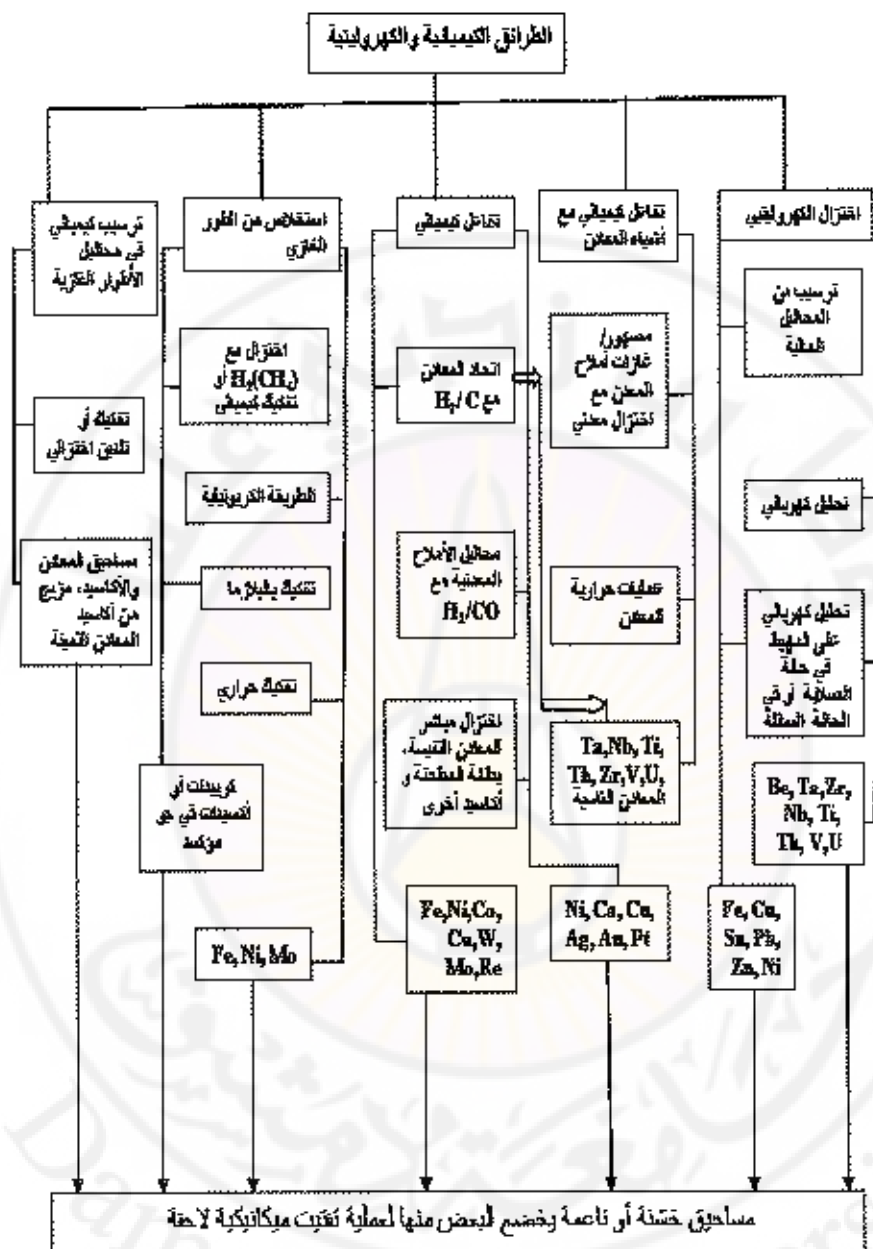
الشكل (١-٣٦) وحدة صهر بالبلازما (a)، ووحدة التذرية بالإنكروتود الدوار (b)

٢-١ الطرق الفيزيائية - كيميائية للحصول على المساحيق:

تتضمن الطرق الفيزيائية والطرق الكيميائية للحصول على مساحيق المعادن أساليب عدة أهمها: التحليل الكهربائي وتكثيف بخار المعدن والاختزال من الأكاسيد والترسيب الكيميائي وغيرها:

١-٢-١ التحليل والترسيب الكهربائي: **Electrolysis**:

كان هذا الأسلوب في أحد الأوقات الأسلوب القياسي لإنتاج مسحوق النحاس، كما كان مستخدماً في الحديد قبل أن يتطور أسلوب الحديد الأسفنجي. وتنتشر طريقة ترسيب المعادن على هيئة مساحيق في أحواض محاليل ملحية مائية وكذلك التحليل الكهربائي لأوساط منصهرة بشكل واسع. وتحتل هذه الطريقة من ناحية إنتاجيتها مرتبة متقدمة في الصناعة، ومن الناحية العملية يمكن بواسطة التحليل أو الترسيب الكهربائي الحصول على مساحيق معظم المعادن. ويمكن بطريقة الترسيب الكهربائي مثلاً الحصول على مساحيق القصدير والفضة والنحاس والحديد وغيرها في أحواض من محاليل مائية للأملاح هذه المعادن. على حين يمكن بالتحليل الكهربائي للأوساط المنصهرة الحصول على مساحيق بعض المعادن النادرة كالنتاليوم والنيوبيوم والثوريوم والزركونيوم واليورانيوم.



الشكل (٣٧-١) الطرق الكيميائية و الكهروكيميائية للحصول على المساحيق المعدنية

وتتميز طريقة التحليل الكهربائي بالحصول على مساحيق معدنية على درجة عالية من النقاء، وذلك نتيجة لتنقية المعدن من الشوائب أثناء التحليل الكهربائي. ومن عيوب هذه الطريقة ارتفاع الكلفة نتيجة لقلّة إنتاجيتها وصرف الكثير من الطاقة الكهربائية. ونتيجة لذلك فإن المساحيق الكهروليئية تستعمل في صناعة الأجزاء المهمة فقط أو عند صعوبة الحصول على مساحيق المعدن المعين بطريقة أخرى.

يتم ترسيب معدن الحديد على الأقطاب الموجبة anodes المصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ مستخدمين أقطاباً سالبة cathodes من الحديد المنخفض الكربون، بينما يكون الكهروليت electrolyte إما من كبريتات الحديد و إماً من كلوريد الحديد. أما المعدن المترسب فيكون عبارة عن حديد نقي هـس يحتوي على الهيدروجين، ويمكن تحويله إلى مسحوق عن طريق الطحن الكروي ثم يعرض لعملية التلدين لتقليل الهشاشة.

وفي حالة النحاس فإن أسلوب الكهروليت كان أسلوباً قياسيًّا إلى أن تم تطوير أسلوب التذخير الأرخص. ومع هذا فإن هذا الأسلوب مازال نشطاً جداً لأن بإمكانه إنتاج أنواع أو فئات من المساحيق الضرورية لبعض منتجات ميتالورجيا المساحيق التي لا يمكن إنتاجها عن طريق عملية التذخير.

تتعلق هذه الطرق بعدة عوامل مثل كثافة التيار ومكونات ودرجة حرارة الكهروليت ولزوجة المحلول، التي يؤدي تغييرها إلى تنظيم عملية التحليل الكهربائي، وإلى الحصول على ترسبات معدنية مختلفة الخواص، كأن تكون قاسية أو أسفنجية أو طرية. ولكثافة التيار المكانة الأولى في تحديد حالة الترسيب وحجم دقائقها. فكلما زادت كثافة التيار صغر حجم حبيبات المسحوق المترسب وزادت رخاوته. وتفسر هذه الظاهرة بأنه عند ارتفاع كثافة التيار يزداد عدد نويات البلورات المنفصلة على الكاثود في وحدة الزمن. هذه البلورات المشحونة لا يسعها الوقت للترسب على هيئة بلورات كبيرة وبذلك تكون على هيئة مسحوق رخوا. كما يزداد تشتت دقائق المسحوق كلما قلت المسافة بين الأقطاب الكهربائية، وبإزالة المسحوق المترسب على المهبط باستمرار تزداد درجة تشتت دقائق المسحوق.

١-٢-١-١ العوامل المؤثرة في عملية التحليل الكهربائي:

١. شدة التيار: ولشدة التيار المكانية الأولى في تحديد حالة الترسيب وحجم دقائقها. فكلما زادت شدة التيار صغر حجم جسيمات المسحوق المترسب وزادت رخواسته. وتفسر هذه الظاهرة بأنه عند زيادة شدة التيار يزداد عدد نويات البلورات المنفصلة على الكاثود في وحدة الزمن، و من ثم الحصول على كمية أكبر من ترسيب المسحوق المعدني المشتت. وهذه البلورات المشحونة لا يسعها الوقت للترسيب على هيئة بلورات كبيرة، وبذلك تكون على هيئة مسحوق ناعم. ولكن إذا كانت شدة التيار كبيرة و تركيز المحلول الكهروليتي قليلاً على سطح القطب السالب (الكاثود)، زادت سرعة نمو و تشكل مراكز طور جديد، فهذا يعني وسطاً جيداً لظهور الرواسب المشتتة.

يحدد مخرج التيار في المحلول الكهروليتي بالعلاقة التالية:

$$\eta = (G_p / G_r) \cdot 100 \% \quad (22-1)$$

حيث إن: G_p - مخرج تيار المعدن التطبيقي في الكهروليتي

G_r - مخرج التيار النظري الذي يحسب من قانون فراادي:

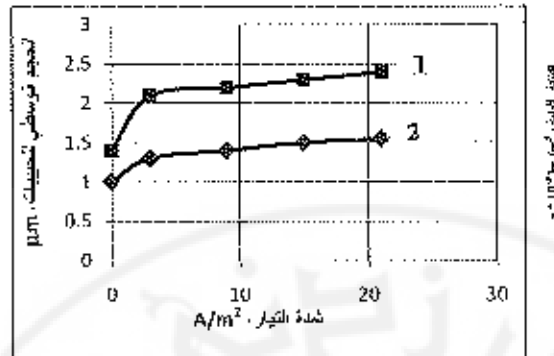
$$G_r = E \cdot K / n \cdot F \quad (23-1)$$

E - المكافئ الكهروكيميائي للمعدن، K - كمية الكهرباء

n - تكافؤ المعدن، F - عدد فراادي

كما تؤثر شدة التيار في خواص المسحوق و لا سيما في أبعاده.

٢. تركيز الكهروليتي: إذا كان تركيز أيونات المعدن و الكهروليتي ضعيفة بين البلورات المتنامية في الاتجاه العرضي فإنها تتكسر ويتشكل ترسيب مبعثر للجسيمات، أي لا يلتصق بعضها ببعض، ولكن عند تركيز قليل للكهروليتي تنشأ ظروف جيدة لنمو بلورات دندريتيّة دقيقة. كما ينفصل الهيدروجين على المهبط عند التركيز الضعيف للكهروليتي مما يؤدي لعدم تماسك المعدن المترسب و نحصل على جسيمات.



الشكل (١-٣٨) علاقة الحجم الوسطي للحبيبات و الكثافة الأولية بشدة التيار

I - حجم الحبيبات، 2 - الكثافة الأولية

٣. حموضة الوسط الكهروليتي: تؤثر حموضة الوسط الكهروليتي في مخرج تيار المعدن وفي حجم الجزيئات الحاصل، إذ يتناقص مخرج تيار المعدن مع زيادة الحموضة، كما أن زيادة الحموضة في الوسط يؤدي إلى زيادة مقدار التثبيات و الحصول على معدن مترسب و مبعثر نتيجة انفصال الهيدروجين.

٤. درجة حرارة الكهروليت: إن ارتفاع درجة الحرارة يؤدي إلى ارتفاع مخرج تيار المعدن مما يؤدي إلى تسريع انتشار أيونات المعدن إلى المهبط و من ثم زيادة نمو جزيئات المسحوق، ولكن ارتفاع درجة الحرارة أعلى من $60^\circ C$ غير مرغوب به، كي لا ينحل المعدن المترسب في الكهروليت.

٥. الشوائب في الكهروليت: يؤدي وجود الشوائب في الكهروليت يحد من نمو الجزيئات، وتحصل على بنية ناعمة مما يؤدي للحصول على معدن مترسب متماسك.

٢-٢-١ طريقة تكثيف بخار المعدن:

تتصف طريقة تكثيف بخار المعدن للحصول على مساحيق المعادن بالسهولة، وهي تستعمل للحصول على مساحيق الكثير من المعادن كالزنك والكاديوم والمغنيزيوم. ولهذه المعادن درجة انصهار منخفضة وتبخر تبخراً ملحوظاً في درجات حرارة فوق درجة حرارة الانصهار. فعند تكثيف بخار هذه المعادن على سطح بارد يتكون مسحوق دقيق كروي الشكل. ولكن استعمال هذه الطريقة محدود نظراً إلى ارتفاع نسبة

الأكاسيد الموجودة وصغر جسيمات المسحوق. ولهذه الطريقة عيوب عدة منها رداءة قابلية الانضغاط نتيجة للقصفة العالية وقلة لدونة المسحوق، وكذلك إن هذه المساحيق تستخدم فقط في حالة إنتاج الأشكال البسيطة والأشكال التي لا تتطلب دقة عالية في الأبعاد نتيجة لكبر معدل الانكماش أثناء عملية التلييد.

١-٢-٣ الاختزال في حالة الصلبة Solid State Reduction:

تعد طريقة الحصول على المساحيق المعدنية باختزال الأكاسيد من أكثر الطرق شيوعاً إلى جانب اقتصاديتها وغازارة إنتاجها. ويمكن القول إن معظم المساحيق المعدنية المنتجة عن طريق اختزال الأكاسيد رخيصة الثمن، وذلك لإمكانية استعمال خامات المعادن بشكل مباشر والاستفادة من نفايات الصناعة المعدنية كالفخسور الناتجة عن درفلة الصفائح المعدنية وغير ذلك. وقد أدى هذا إلى انتشار استعمال هذه الطريقة في تحضير الكثير من مساحيق المعادن مثل الحديد والنحاس والتنجس والمولبدنيوم وغيرها.

ويتم اختزال المعادن من الأكاسيد باستخدام نوعين من المختزلات: المختزلات الصلبة والمختزلات الغازية. ويعد الهيدروجين وأول أكسيد الكربون وغازات أخرى كالنشايد المتفكك (نيتروجين وهيدروجين بنسبة 1-3 حجماً) من الغازات المختزلة النشطة. أما المختزلات الصلبة فأهمها الكربون والمعادن ذات التحالف الكيسيائي الكبير مع الأكسجين كالصوديوم والكالسيوم والمغنزيوم.... إلخ.

وتسمى عملية الاختزال عن طريق إحلال معدن له اتحاد كبير مع الأكسجين محل آخر بعملية (الاختزال بالمعدن). ومثال على ذلك مسحوق الحديد، إذ يتم سحق الخام إلى حجم صغير يقرب من حجم ذلك المسحوق الحديدي النهائي، ثم يخلط بفحم الكوك Coke أو بالفحم الحجري ومن بعدها يمر في أنبوب مقاوم للحرارة عبر فرن عند درجة حرارة تؤدي لحدوث مثل هذا التفاعل مطلقاً أكاسيد الكربون وتاركاً حديدًا نقياً تقريباً على شكل كتل أسفنجية والتي يتم سحقها إلى مسحوق.

تشتمل عملية الاختزال هذه عادة على استعمال مصدر مائي يستخدم الهيدروجين، إذ يتفاعل الأيون المعدني مثل النيكل أو النحاس أو الكوبالت مع الهيدروجين وفق التفاعل التالي:



أما إذا كان المحلول مثاليًا فيتم وفق التفاعل التالي:

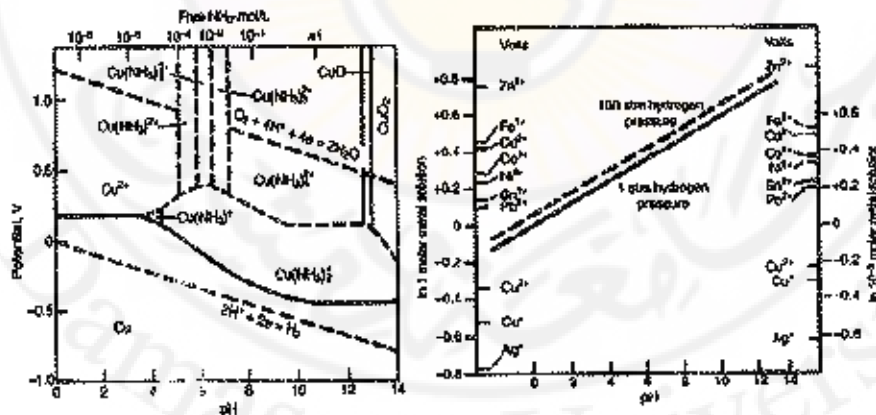


يجب أن يكون الجهد الكهروكيميائي للهيدروجين أكبر من الجهد الكهروكيميائي للمعدن كي يحدث الاختزال، أما تركيز المحلول المعدني فيكون تأثيره في الجهد الكهروكيميائي قليلاً، كما هو موضح في الشكل (١-٣٩). تتم عادة إضافة حجر الجير للمادة الخام الأولية من أجل أخذ الحذر من الكبريت والشوائب الأخرى الموجودة في الفحم الحجري، ويتم تنفيذ هذا التفاعل بصورة بطيئة بحيث تستغرق دورة فرن الصهر الكاملة 24 ساعة. وفي أثناء هذه العملية يحدث النقل بحيث لا تكون هناك أي صعوبة في استخلاص الفضيبي الأسفنجي من الحاويات. وبعد ذلك يتم سحق الكتلة الأسفنجية ويتم فصل ذرات الحديد الدقيقة مغناطيسياً عن الشوائب، الأمر الذي يستوجب إمراره على شريط فولاذي عبر فرن ثان في جو مشبع بالهيدروجين الذي يقوم بإتمام عملية الاختزال والتلدين annealing. وعلى أي حال فإنه يتم القيام بنوع من عملية التلبد للحبيبات إذ تخرج المادة المختزلة على شكل كعكة يتم سحقها ثانية لتتحول إلى مسحوق، وأخيراً يتم نخلها على مقياس ذي قيمة اسمية مقدارها ناقص أو أقل من 150 µm.

ويتم إنتاج كميات أصغر من مسحوق الحديد بواسطة الاختزال الهيدروجيني لقشرة الصدا scale التي تنتجها الطاحونة mill. ويتم سحن هذه القشرة لتتحول إلى مسحوق وبعد ذلك يحمص في الهواء للتأكد من أنه قد تأكسد بصورة تامة وتحول إلى أكسيد الحديد Fe₂O₃ بحيث إن الاختزال الناتج سيكون ثابتاً ومتماسكاً. ويتم اختزال المادة في فرن ذي أنسطة ناقلة band furnace، ولكن باستعمال هيدروجين نقي. وبعد ذلك

يتم سحق الكعكة الناتجة ويتم تصنيفها، ويكون هذا الأسلوب قابلاً للتطبيق فقط حين يكون بالإمكان تأمين إمدادات يعتمد عليها من قشرة الطاحونة ذات تركيب ثابت تقريباً وحيث يتوفر وجود إمدادات هيدروجين رخيصة.

وهناك أساليب اختزال أخرى يمثلها نمطياً أسلوب "شيريت جوردون" Sherritt Gordon Process لمسحق النيكل، الذي بموجبه يتم معالجة محلول كبريتات الأمونيا والنيكل في أوتوكلاف autoclave (وعاء تسخين موصد) بواسطة الهيدروجين تحت ضغط يبلغ 1400 kPa تقريباً. وهكذا يتم إنتاج حبيبات النيكل الناعمة وبواسطة الخطوات المتكررة تتحول إلى الحجم المطلوب، وقد تم وصف أسلوب مماثل للنحاس، وقد كان مسحوق النحاس ينتج على نطاق ضيق بأسلوب اختزال كيميائي آخر يتم فيه استخدام الحديد القذف بالنحاس إلى خارج المحلول، والذي عادة ما يكون من كبريتات النحاس، ولأسباب غير واضحة، فإن هذا الأسلوب يعرف بأسلوب السمنتة cementation ومن هنا جاء مصطلح "نحاس السمنتة" cement copper. أما المنتج الذي يكون على شكل مسحوق، فينطلب المزيد من التطوير قبل أن يكون بالإمكان استخدامه لميتالورجيا المساحيق، ومن ثم فإن هذا الأسلوب محصور بصورة عامة في استخلاص المعادن من الفضلات residues ذات المستوى المتدني، كنفائات المناجم وما شابهها.



الشكل (٣٩-١) الجهد الكهروكيميائي لغاز الهيدروجين وغاز النشادر عند درجة الحرارة

25°C

وقد يتم إنتاج مسحوق الفضة بأسلوب مماثل، إلا أنه قد يتم إعداده بصورة أكثر شيوعاً عن طريق الترسيب من محلول نترات الفضة بإضافة عامل اختزال عضوي أو هيدروجيني hydrogen. ويحدد استخدام المختزل جملة من العوامل، أهمها ما يلي:

١. يجب ألا يتكون نتيجة الاختزال اتحاد كيميائي أو محلول صلب، وذلك حتى نحصل على المعدن المختزل بدرجة نقاوة عالية.

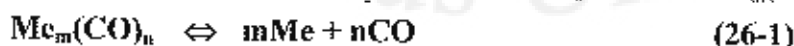
٢. يجب أن تكون عملية الاختزال اقتصادية وإنتاجيتها عالية، لذلك يجب عند اختيار عامل الاختزال، أن تؤخذ مجموعة المؤشرات التالية بالحسبان مثل: ثمن عامل الاختزال - والمعدن المختزل - ودرجة الاستخراج - وجودة المسحوق المستخرج.

يحتل الكربون بين المختزلات الصلبة مكانة خاصة، وذلك لخص ثمنه وسهولة عملية الاختزال به. ومن عيوبه استحالة أو صعوبة إزالته من بعض المعادن مما يجد من استعماله واستعمال المختزلات المحتوية عليه في صناعة المساحيق المعدنية. وهو يستعمل كعامل مختزل للحصول على مساحيق الحديد والتنجستين والنيوبيوم. بينما يستعمل الهيدروجين كعامل مختزل في المختزلات الغازية للحصول على مساحيق خالية من شوائب الكربون كمساحيق الكوبالت والتنجستين والموليبدنيوم. ولكنه يعتبر غالي الثمن وقابلاً للانفجار.

٣-١ طرق التفكك الحراري Thermal Decomposition:

٣-١-١ طريقة تفكك الكربونيل:

تتحد كثير من المعادن الانتقالية V - VIII group من الجدول الدوري للعناصر الكيميائية مثل الحديد و النيكل و الكوبالت و التنجستين و غيرها تحت ظروف معينة للحرارة والضغط، مع أول أكسيد الكربون لتكون مركباً كيميائياً يسمى الكربونيل. وهذه المركبات غير متماسكة نسبياً وسرعان ما تتفكك مكونة مساحيق دقيقة للمعدن أسفنجية الشكل، و أول أكسيد الكربون. تعتمد هذه الطريقة على تفكك الكربونيل $Me_m(CO)_n$ عند التسخين حسب التفاعل التالي:



إن بنية جزيئات الكربونيل لا تتناسب مع تكافؤ المعادن، وتتصف بوجود رابطة بين ذرات المعدن و ذرات الكربون في مجموعة الكربونيل CO- group ، ومجموعة الكربونيل تتحد مع ذرات المعدن بواسطة زوج من إلكترونات التكافؤ الخارجية للكربون 2s، وعند تشكيل الكربونيل فإنه يمتلئ مدار المعدن بالإلكترونات حتى التوازن كما في حالة الغاز الخامل، ويمكن لجزيء الكربونيل أن يحتوي ذرة معدن واحدة أو أكثر، وتكون الرابطة بين ذرات المعدن هي رابطة مشتركة Me-Me، فهذا يعني أن الكربونيل يتكون من ذرات معدن خامل و المجموعة CO. و منه فإن الكربونيل المؤلف من ذرة واحدة يتصف بوجود ذرات المعدن والكربون والأكسجين متوضعة على خط واحد، و من ميزاتها درجة انصهار منخفضة. يتحقق الاندماج وفق التفاعلات التالية:



ويؤدي توليد الحرارة إلى تسريع التفاعل، أما الضغط العالي فيؤدي إلى تشكيل الكربونيل.

ويتعلق حجم حبيبات المسحوق المستحضر بالطريقة الكربونيلية بما يلي:

١. درجة الحرارة: فقد لوحظ أنه كلما ارتفعت درجة الحرارة زادت سرعة تفكك الكربونيل، و من ثم نحصل على حبيبات أدق.
٢. الضغط: كلما زاد الضغط ازدادت إمكانية تشكل الكربونيل أي يجري التفاعل بالعكس.

٣. سرعة إمرار خامس كربونيل الحديد في فراغ المفاعل، إذ يتميز مسحوق الحديد المستحضر بهذه الطريقة ببقاؤه العالية و القابلية العالية للتليد، كما يعتبر مادة جيدة لصناعة المواد المغناطيسية.

إن إنتاج مسحوق النيكل بواسطة التفكك الحراري لكاربونيل النيكل كان الشغل الشاغل للعلماء، وكان هذا الأسلوب قد طوره أصلاً العالم موند ورفاقه Mond et al قبل نحو مئة عام كوسيلة لتنقية النيكل، إذ يعرض المعدن الخام إلى غاز CO عند درجة حرارة وضغط عاليتين، ويتم تحويل النيكل بصورة انتقائية إلى كاربونيل Ni(CO)_4 ، الذي هو نفسه غازي عند درجة حرارة التفاعل إذ يغلي عند 43°C . وبتقليل الضغط وزيادة درجة الحرارة فإن الكاربونيل يتفكك ويترسب النيكل على شكل مسحوق أو كريات بحسب ظروف العملية. وهكذا يكون المعدن الذي تم إنتاجه على درجة عالية جداً من النقاء، تصل درجة النقاء إلى 99.99% ويمكن أن يكون في غاية الدقة والنعمية. لذلك تعتبر هذه الطريقة في إنتاج المساحيق ذات أهمية كبيرة بالنسبة لصناعة ميتالورجيا المساحيق. كذلك فإن غاز أول أكسيد الكربون، يعاد دورانه واستخدامه.

ويتم إنتاج حديد الكاربونيل Fe(CO)_5 بأسلوب مماثل، وهو سائل عند درجة حرارة الغرفة، ويغلي عند 103°C ، وقد حصل على بعض الأهمية كنتيجة للطلب المتزايد على المساحيق البالغة النعمية، وبصورة خاصة لأسلوب التشكيل بالحقن. ينتج المسحوق المطلوب بغلي الكاربونيل في وعاء تسخين تحت شروط الضغط، التي تسمح للأبخرة بالتحلل، ثم يجمع المسحوق الحاصل وينخل وقد يعرض لعملية طحن، أما الشوائب الرئيسية الناتجة في هذه العملية فهي الكربون والنيتروجين والأكسجين. ويمكن تقسيم كاربونيل المعادن إلى أربع مجموعات وذلك حسب البنية:

١. المجموعة الأولى تسمى وحيدة النواة - إذ تتكون من ذرة واحدة من المعدن في الجزيء، مثل Fe(CO)_5 ، Ni(CO)_4 ... إلخ.
٢. المجموعة الثانية تسمى متعددة النوى أحادية المعدن - ذات ذرتين أو أكثر من نفس المعدن في الجزيء، مثل $\text{Co}_2(\text{CO})_8$ ، $\text{Fe}_2(\text{CO})_9$ ، $\text{Fe}_3(\text{CO})_{12}$ ، $\text{Mn}_2(\text{CO})_{10}$.
٣. المجموعة الثالثة تسمى متعددة المعادن Polymetalls - تتكون من ذرتين أو أكثر للمعادن المختلفة في الجزيء مثل $\text{Mn}_2\text{Fe(CO)}_{14}$ ، MnReFe(CO)_{14} ... إلخ.

٤. المجموعة الرابعة تسمى المجموعة المختلطة - وهي تتكون من ذرات المعادن وذرات أشباه المعادن في الجزيء مثل $CFe_5(CO)_{15}$ ، و $SCo(CO)_9$ ، $CRu_6(CO)_{17}$ إلخ.

كما يمكن تقسيم الكربونيل إلى أربعة أقسام أيضاً، وذلك بحسب نوع الروابط:

أ. رابطة ثوابقية مشتركة من نوع $Me - CO$: و عندها تعطي ذرة الكربون C زوجاً من إلكترونات الارتباط، وتتحد بشكل عكسي مع المعدن.

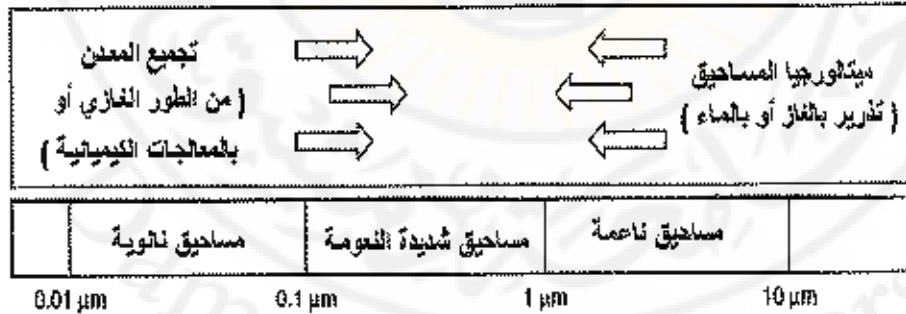
ب. رابطة مشتركة تساهمية من نوع $Me - Me$: و عندها يكون الكربونيل ثنائي المعدن، إذ تفقد كل ذرة من المعدن إلكتروناتها من أجل الرابطة المشتركة.

ث. رابطة مشتركة بين المعدن وجذر الكربونيل CO : و تكون عندها CO عبارة حلقة اتصال بين ذرتي المعدن لتشكل الرابطة فيما بينها.

ث. رابطة مشتركة من نوع $Me_6(CO)_6$: و تكون CO عبارة عن حلقة اتصال بين ثلاث ذرات للمعدن.

٤-١ المساحيق شديدة النعومة والنانوية:

تصنف عادة المساحيق عالية النعومة بناءً على حجم الجزيئات الذي يعبر عن قطر الحبيبات الذي قد يتراوح من ١٠ إلى ١٠٠ نانومتر، كما هو موضح في الشكل (٤٠-١):



الشكل (٤٠-١) تصنيف المساحيق تبعاً لحجم الحبيبات

إن المساحيق المعدنية الناعمة صارت متوافرة تجارياً منذ عدة سنوات، فالمساحيق الناعمة ذات الحجم $3\mu\text{m}$ تنتج بطرق التذيرر باقتصادية عالية. كما يمكن الوصول إلى حجم حبيبي نحو $1\mu\text{m}$ باستخدام التذيرر أيضاً. ولكن طريقة الترسيب والطريقة الكربونيلية تصبح أكثر اقتصادية كلما اقتربنا من الوصول للمساحيق شديدة النعومة التي يكون حجمها من رتبة الميكرون، والتي لا يمكن الحصول عليها بطرق السحق الميكانيكية ولا حتى طرق التذيرر التقليدية بالغاز أو بالماء.

١-٤-١ المساحيق المعدنية شديدة النعومة:

إن المساحيق شديدة النعومة متوافرة تجارياً منذ عدة سنوات بطرق مختلفة، إذ كانت إحدى الطرق البدائية لإنتاجها هي ترسيب عناصر مساحيق المعادن الثمينة، كما تم إنتاج المساحيق الناعمة للعناصر المقاومة للحرارة بالسحق، كما أن مساحيق الحديد والنيكل الناعمة تنتج بالطريقة الكربونيلية إذ يمكن الحصول على مساحيق حديد يتراوح حجمها ما بين $3-8\mu\text{m}$ كما هو موضح بالجدول (١-٣) للاستخدامات المختلفة مع مواصفاتها الميكانيكية والفيزيائية، إذ يعبر الرمز الأول:

L: يعبر عن الخواص الميكانيكية فهو قاس ذو حجم حبيبات من $3-8\mu\text{m}$ ،

H: فيعبر عن القساوة أيضاً ولكن حجم الحبيبات أنعم يتراوح بين $1.6-3.5\mu\text{m}$ ،

S: فيعبر عن الحبيبات الطرية ذات حجم يتراوح بين $3-8\mu\text{m}$.

أما الرمز الثاني الذي يلي الرمز الأول فيعبر عن شكل وصفات المسحوق فمثلاً:

L- تعني حجم كبير للحبيبات،

S- حجم صغير للحبيبات،

Q- يعني نوعية عالية للمسحوق،

M- تعني نوعية متوسطة،

P- تعني مسحوقاً جيد النفاذية،

W- يعني أن المسحوق عالي المقاومة.

الجدول (١-٣) مساحيق كربونيل الحديد

NASSF grade	Mean size, μm	Iron, wt%	Carbon ^(a) , wt%	Nitrogen ^(a) , wt%	Oxygen ^(a) , wt%	Other	Particle size distribution		
							10%	50%	90%
							less than	less than	less than
Reduced standard powders									
CL	7-8	>99.5	0.05	0.01	0.2		5.0 μm	10.0 μm	25.0 μm
CLT	5-6	>99.5	0.05	0.01	0.2		4.0 μm	9.0 μm	22.0 μm
CS	4-5	>99.5	0.05	0.01	0.2		4.0 μm	8.0 μm	18.0 μm
CN	5-6	>99.5	0.04	0.01	0.2		3.5 μm	8.0 μm	18.0 μm
CC	4-6	>99.5	0.05	0.01	0.3	0.1 wt% coating	SiO ₂ 3.0 μm	6.0 μm	11.0 μm
OU	1-1.5	99.4	0.1	0.01	0.5		0.70 μm	1.07 μm	3.43 μm
SM	1-1.6	99.4	0.1	0.01	0.5		0.81 μm	1.91 μm	3.05 μm
Iron	3-5	98	0.3-0.7	0.1	8-40.6	9-10 wt% P	1.5 μm	4.0 μm	10.0 μm

(a) Maximum wt% unless a range is specified

NASSF grade	Mean size, μm	Iron, wt%	Carbon (max), wt%	Nitrogen (max), wt%	Oxygen (max), wt%	Characteristic properties
Reduced standard powders						
CL	7.8	>99.5	≤ 0.05	≤ 0.01	≤ 0.2	Soft, spherical powder
CLT	5-6	>99.5	≤ 0.05	≤ 0.01	≤ 0.2	Soft, spherical powder
CS	4-5	>99.5	≤ 0.05	≤ 0.01	≤ 0.2	Soft, spherical powder
CN	5-6	>99.5	≤ 0.04	≤ 0.01	≤ 0.2	Soft, spherical powder
Unreduced standard powders for injection molding						
OM	4-5	>97.8	≤ 0.9	≤ 0.9	≤ 0.4	Unreduced, hard powder, agglomerates broken up by grinding
ON	6-5	>97.5	≤ 1.2	≤ 0.1	≤ 1.2	Unreduced, hard powder with low N content and higher O content
OS	4-5	>97.3	≤ 0.9	≤ 0.9	0.7% SiO_2	Unreduced, hard powder; SiO_2 coated
OX	1-4	>96.2	≤ 0.9	≤ 0.9	5% Al_2O_3 - Fe_2O_3	More stable form in debinding with improved sinter properties
OK	3-4	>94.7	≤ 0.9	≤ 0.9	10% Al_2O_3 - Fe_2O_3	With low or higher Al_2O_3 content as required

(h)

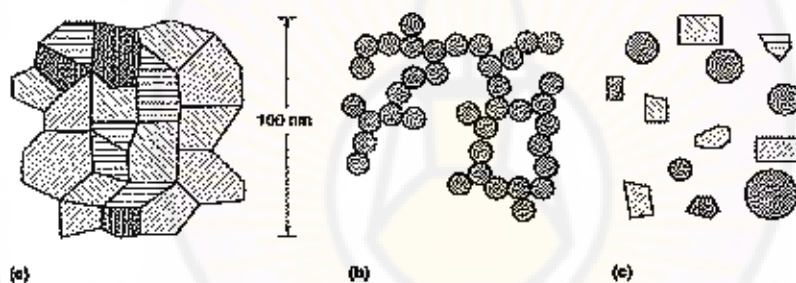
NASSF grade ^(a)	Mean size, μm	Iron, max, wt%	Carbon max, wt%	Nitrogen max, wt%	Oxygen max, wt%	Bulk density, g/cm^3	Characteristic properties
For electronic gases							
EW	4-5	>97.5	<1.0	<1.0	<0.4	2.6	General-purpose product
EW	4-5	>97.5	<1.0	<1.0	<0.3	2.7	High ohmic resistance and high Q factor at 5-10 MHz
EQ	1-5	>97.2	<1.0	<1.0	<0.4	2.7	High Q factor at 5-10 MHz
FR	3-4	>97.4	<1.1	<1.1	<0.4	2.7	High Q factor at 10-100 MHz
SP	4-6	>99.5	<0.03	<0.01	<0.2	2.7	Quartz-stainable material $\mu\text{m} = 77^\circ\text{K}$
SO	1-6	>99.3	<0.06	<0.01	<0.4	1.9	Specialty insulated; high Q factor at 100-200 MHz
SL	7-8	>99.3	<0.05	<0.01	<0.2	2.8	stainable material $\mu\text{m} = 60^\circ\text{K}$
SN	3-6	>99.5	<0.06	<0.01	<0.2	2.4	stainable material $\mu\text{m} = 60^\circ\text{K}$
SR	5-6	>99.3	<0.1	<0.01	<0.2	2.6	stainable material $\mu\text{m} = 35^\circ\text{K}$
MAX	2.6-4.5	>96.0	<7.0	<2.0	<4.5	2.9	High permeability; high Q factor; wide particle size distribution
HL	2.4-3.5	>97.0	<1.0	<1.0	<0.5	2.7	General purpose II product
HS	2.4-3.5	>97.0	<1.0	<1.0	<0.5	2.2	High Q factor, particularly at 10 MHz
HF	2.0-2.5	>97.0	<1.0	<1.0	<0.7	2.0	High Q factor, 30 to 100 MHz
HQ	1.6-2.0	>97.0	<1.0	<1.0	<1.0	2.9	High Q factor, 10 to 100 MHz
For microwave absorption							
KA	3-4	>97.5	<1.2	<1.2	<0.4		Narrow particle size distribution
KB	3-4	>97.3	<1.0	<1.0	<0.4		Somewhat wider particle size distribution

(v)

٢-٤-١ المساحيق المعدنية النانوية:

الآن هناك العديد من التطبيقات للمساحيق الناعمة جداً والمواد ذات البنى النانوية ومن التطبيقات في هذا المجال التي هي قيد الدراسة والبحث: مثلاً اللصاقات الموصلة للتيار الكهربائي، والمحفزات (الكاتالست) ، ومسرعات للتآيد، وأجهزة التسجيل المغناطيسية، والمواد ذات المقاومة العالية، والمواد المركبة النانوية، وطلاءات امتصاص أشعة الرادار والطلاءات المقاومة للاحتكاك، وبالمقارنة مع المواد السيراميكية فإن المساحيق المعدنية النانوية صعبة المعالجة والصناعة كما أن إنتاجها أصعب من المساحيق المكروية، وعلى الرغم من هذا فإن العديد من التطبيقات تتطلب المساحيق المعدنية النانوية.

إن مصطلح المساحيق النانوية يستعمل عادة للتعبير عن المساحيق التي يكون فيها قطر الجزيئة أقل من $1 \mu m$ أي 1000 nm ، ويمكن تصنيف المواد ذات الهياكل النانوية إلى ثلاثة أنواع مختلفة كما هو مبين في الشكل (١-٤١) التالي:



الشكل (١-٤١) أشكال المساحيق النانوية

البلورات النانوية للمادة ذات حجم حبيبات من رتبة النانومتر. b - المساحيق النانوية ذات جزيئات متكتلة. c - المساحيق غير المنحلة ضمن الهياكل الشبكية للسائل أو الصلب.

١-٤-٣ طرق إنتاج المساحيق النانوية:

إن تقنيات الإنتاج المستخدمة في المساحيق المكروية لا يمكن استخدامها للمساحيق النانوية، فطرق التذيرير بالغاز أو بالماء يمكن أن تعطي حجماً جزيئياً أصغرياً يتراوح ما بين 1 إلى $5 \mu m$ ، أما الطحن فيستعمل لتخفيض حجم الجزيئة للمواد

الهيئة مثل كربيد التتغستن أو المواد السيراميكية، لكن الطحن يفضل عند استخدامه مع المواد اللينة مثل المعادن الثمينة.

وهناك طرق مختلفة لإنتاج المساحيق شديدة النعومة ذات الحجم الجزيئي من رتبة الميكرون، فالتأثير بالغاز وطرق الترسيب وتجفيف الرذاذ كلها مستعملة بكثرة، فأحد المبادئ الأساسية هو تكثيف الغاز الخامل IGC حيث يتم الحصول على مساحيق عالية النعومة مع نسبة منخفضة من الشوائب الكيميائية وكميات قليلة من الأكاسيد أو النتريدات، ومن الطرق الأخرى المستخدمة هي طريقة تخفيض اللهب أو تخفيض الأملاح المعدنية في لهب الغاز أو البلازما.

والجدول (٤-١) يعطي مقارنة بين الطرق الأربع الرئيسية التي تستخدم الغاز لإنتاج المساحيق المعدنية النانوية.

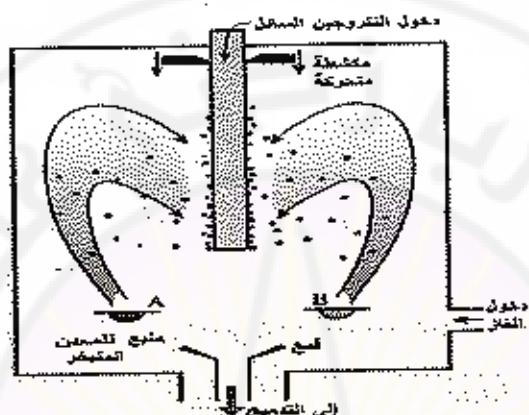
الجدول (٤-١) مقارنة بين طرق إنتاج المساحيق المعدنية النانوية

Method	Advantage	Disadvantage	Typical capacity
Flame reaction	Large output	Broad distribution of particle size, ionic impurities	>1 tonne/day
Plasma reaction	Large output	Broad distribution of particle size, ionic impurities	>1 tonne/day
Chemical vapor reaction	Narrow distribution of particle size	Ionic impurities	200 kg/day
Inert gas condensation	No impurities	Small output	<10 kg/day

أما إنتاج المساحيق النانومترية باستخدام التفاعلات الحاصلة في الطور الغازي فتكون ذات تكلفة عالية نسبياً، ولكن هنالك مجموعة من المزايا لهذه العملية هي:

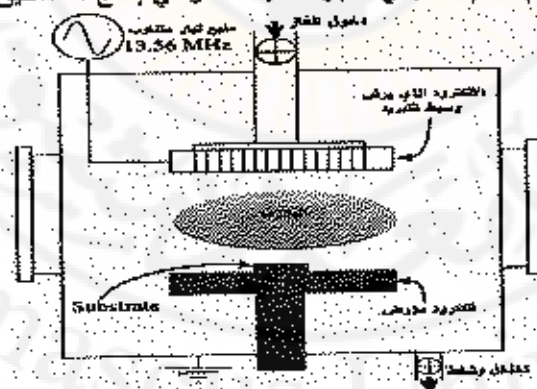
- النقاوة العالية.
 - حبيبات منفصلة وغير متكتلة مع بعضها البعض.
 - حبيبات نانومترية مع توزيع بعدي متقارب.
- يتم عادة تبخير المادة المعدنية من خلال منبعين مختلفين، ثم تجري عملية التكثيف في الطور الغازي من خلال انتقال الحرارة إلى النتروجين السائل، وذلك عندما يلامس البخار الإصبع السيراميكي البارد (الذي يحوي النتروجين السائل بداخله) يتكاثف على شكل مسحوق، ويتم بعد ذلك كشط الحبيبات المتجمعة على الإصبع البارد وتجمع هذه

الحبيبات بواسطة قمع في أسفل الحجرة، ويمكن أن تنتقل المساحيق مباشرة إلى مكبس التدميج على البارد مباشرة بعد الانتهاء من عملية جمع المسحوق، انظر الشكل (١-٤٢) ولقد أمكن إنتاج مساحيق بهذه الطريقة ناعمة جداً تتراوح بين 10 - 15 nm. أما مبدأ عمل المفاعل البلازمي الذي يستخدم أيضاً في صناعة حبيبات مساحيق



المعدن النانومترية، فيدخل الغاز إلى البلازما الناتجة عن تفكك الأرجون مما يؤدي إلى تشكيل ذرات حرة وأيونات حرة وإلكترونات حرة (البلازما)، إذ تؤدي سقاية هذا المزيج المتفجج من البلازما و الغاز المفاعل إلى تشكيل حبيبات عالية النعومة بقياس يصل إلى أقل من 20 nm، انظر الشكل (١-٣٦).

الشكل (١-٣٥) رسم تخطيطي لحجرة تكثيف الغاز في إنتاج المساحيق النانومترية



الشكل (١-٤٢) مفاعل البلازما لإنتاج المساحيق النانومترية

الفصل الثاني

خواص المساحيق

Powder properties

الخواص الكيميائية	☞
الخواص الفيزيائية	☞
الخواص التكنولوجية	☞



خواص المساحيق

Powder properties

تتقسم خواص المساحيق المعدنية إلى خواص كيميائية وخواص فيزيائية وخواص تكنولوجية، وتسمح معرفة هذه الخواص بإعطاء تصور عام عن طبيعة مادة المساحيق ضروري للعمليات التكنولوجية اللاحقة. ويمكن فهم الملامح ذات العلاقة على أفضل وجه عن طريق بحث ومناقشة الاختبارات التي يتم تنفيذها بصورة روتينية.

١-٢ الخواص الكيميائية Chemical properties:

تتعلق الخواص الكيميائية للمساحيق بـ:

١. بنسبة وجود المعدن الأساسي و العناصر الأخرى الداخلة في تركيب السبيكة.
٢. كمية ما يحتويه المسحوق من الشوائب المختلفة و الغازات الناتجة عن عملية التصنيع.

إن للتركيب الكيميائي الأساسي composition للجزء ذي القاعدة المسحوقية الدور نفسه في تحديد الخصائص الميكانيكية والفيزيائية، ومقاومة التآكل...إلخ، تماماً كما تفعل في الأجزاء والقطع التي يتم عملها بأساليب تشكيل أخرى، ومع ذلك فإن هناك عاملاً كيميائياً إضافياً، ألا وهو طبيعة سطوح الذرات الصغيرة وخاصة مدى تأكسدها. وهذا العامل الأخير، بالنسبة لبعض المعادن يمكن أن يعبر عنه "قيمة فقد الهيدروجين" hydrogen loss value أي الفقد في الوزن الذي يحدث عندما يتم تسخين العينة الموزونة عند درجة حرارة دون نقطة الانصهار تحت ظروف قياسية في تيار من الهيدروجين، ويتم التعبير عن هذه القيمة عادة على أنها نسبة مئوية. وهذا الاختبار لاختزل الأكاسيد المستقرة مثل أكاسيد الألمنيوم والكروم وما شابهها، وإزالة الأكسجين الموجود على هيئة محتويات أكاسيد شائبة في الذرات. ولذلك فإن هذا الاختبار غير قابل للتطبيق على مسحوق لا يمكن إختزاله في هيدروجين نقي، وهذا

يتعلق بصورة رئيسية بالحديد والفولاذ والنحاس وسبيكة البرونز. وكذلك لا يمكن استخدامه للنحاس الأصفر بسبب التقييد الناجم عن تبخر وتطاير الزنك، كما أن النتائج تكون غير صحيحة إذا كان المسحوق الأصلي قد تلوث بالماء أو بمادة عضوية متطايرة. وهناك تجارب كيميائية أكثر تفصيلاً من تلك، إلا أن اختبار فقد الهيدروجين، هو عامل أكثر فائدة لعدة أسباب، كما أنه زيادة على ذلك هو أسهل وسريع الإنجاز.

أما فيما يتعلق بالمساحيق الحديدية فإن اختباراً كيميائياً آخر يتم تحديده أحياناً، ألا وهو تحديد النسبة المئوية لـ "المواد غير القابلة للذوبان في الحمض" acid - insoluble's بحيث يتم القيام بوزن كمية من المسحوق من أجل إذابته في حمض معدني، ويتم بعد ذلك وزن المخلفات، وتتكون هذه بصورة رئيسية من ذرات غير قابلة للانصهار، مثل السيليكات على سبيل المثال، وهي لها علاقة مباشرة بالتآكل في أدوات التتميع والشوائب الدخيلة inclusion التي ستكون موجودة في المنتج النهائي. وهذا الأخير على جانب من الأهمية فقط عندما نكون مهتمين بالمنتجات المكثفة تماماً وبصورة كاملة، كما في حال الأجزاء الملبدة بواسطة الطاحونة mill، فإن المسام الموجودة فيها تكون على جانب أكثر أهمية في التأثير في الصدم وخصائص التعب، التي هي خصائص تتأثر بصورة رئيسية بالشوائب الدخيلة غير المعدنية.

تتصف المساحيق المعدنية بما يلي:

١. خاصية الاشتعال: inflammation وهي أقل درجة حرارة التي عندها المسحوق يشتعل عند تلامسه مع الهواء بسبب عملية إكزوترمية exothermic أي رافعة للحرارة.

٢. خاصية الانفجار: explosion وهي أعلى سرعة لتأثير كيميائي متبادل بين المسحوق و الأكسجين تؤدي لإطلاق الحرارة المترافقة بموجة انفجار.

٣. خاصية السمية: Toxic وهي عبارة استنشاق المساحيق المعدنية الدقيقة مما يؤدي إلى إصابة بالأمراض المهنية، وخاصة غبار المعدن (أبعاد الجزيئات $4 \mu m <$). لذلك عند العمل بالمساحيق المعدنية من الضروري اتباع نظام السلامة المهنية.

٢-٢ الخواص الفيزيائية:

٢-٢-١ شكل الحبيبات Particle Shape:

بالرغم من أن شكل الحبيبات على جانب كبير من الأهمية، لا يتم عادةً تحديده مباشرة. فهو ليس بالعامل السهل بالنسبة للقياس، بل يكاد يكون مستحيلًا من الناحية الكمية. وعلى هذا فقد قامت هيئة المقاييس الدولية ISO في المواصفة رقم 3252 بتوضيح عدد من الأشكال التي تظهر بصورة شائعة تحت أسماء إيربي، وشوكي، وحبيبي، وغير منتظم، وقشري وكروي... الخ. وهي إما أن تكون أحادية البعد و إما ثنائية الأبعاد و إما ثلاثية الأبعاد. ومع هذا فإن شكل الحبيبة له تأثير كبير في كثافة السرص packing density للمساحيق، وهذا عامل يمكن قياسه، فالمساحيق الكروية الشكل تمثل أكبر كثافة في الرص، وتتناقص الكثافة كلما ازداد عدم انتظام شكل الحبيبات. يبين الشكل (١-٢) لبعض أشكال الحبيبات التي يمكن الحصول عليها بالطرائق المختلفة.

ويؤثر في شكل الحبيبات معاملان أساسيان:

١. معامل عدم تساوي الأبعاد:

$$\Phi_n = L_{max} / L_{min} \quad (1-2)$$

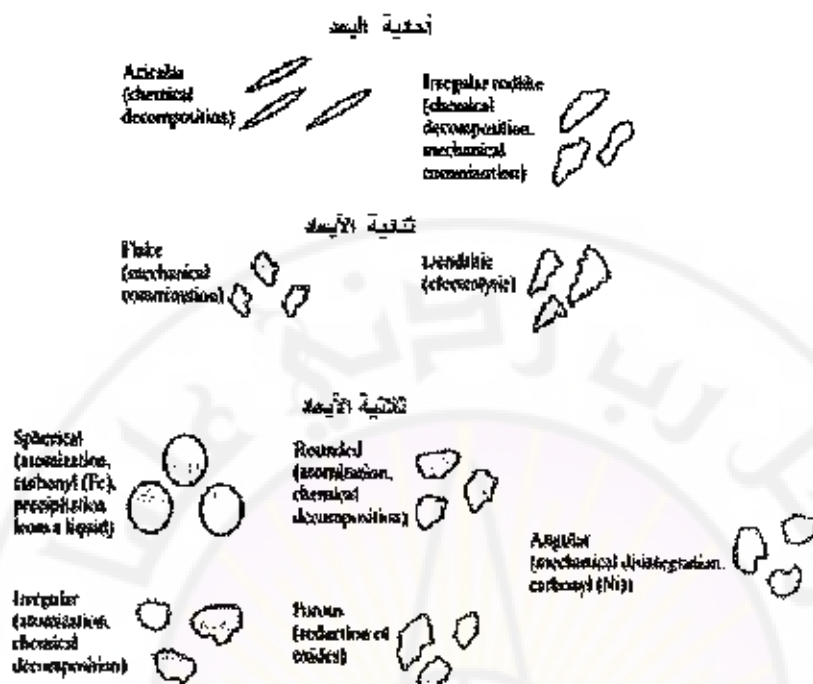
٢. معامل نمو سطح الحبيبات:

$$\Phi_g = C^2 / S \quad (2-2)$$

حيث أن: L_{min} & L_{max} - أكبر بعد وأصغر بعد للحبيبة.

C - هي محيط الحبيبة و S - مساحتها.

يحدد عادةً شكل الحبيبات بمساعدة المجهر الضوئي أو المجهر الإلكتروني. يوضع عند الفحص المجهر الضوئي، المسحوق المراد اختياره على صفيحة زجاجية مسع بإضافة الغليسرين إليه، ثم توزع العينة على الصفيحة الزجاجية، وتقويم نتيجة الاختبار يمكن أن يكون كمياً بأخذ الوسطي لكل نوع. ويبين الجدول (١-٢) شكل الحبيبات حسب طريقة الحصول عليها:



الشكل (١-٢) الأشكال المختلفة للحبيبات بحسب طريقة الحصول عليها

الجدول (١-٢) شكل الحبيبات بحسب طريقة الحصول عليها

طريقة الحصول عليها	شكل الحبيبات
الكربوبيلية، تدوير	كروي
الغتر الية	إسفنجي
طحن في الطواحين ذات الكرات	متشظ
الطحن في الطواحين التوربينية	صحن
كهروليتية	عصني (دندريت)
طحن في الطواحين الرحوية	مستوية أو حرقفية

٢-٢-٢ الكثافة Density:

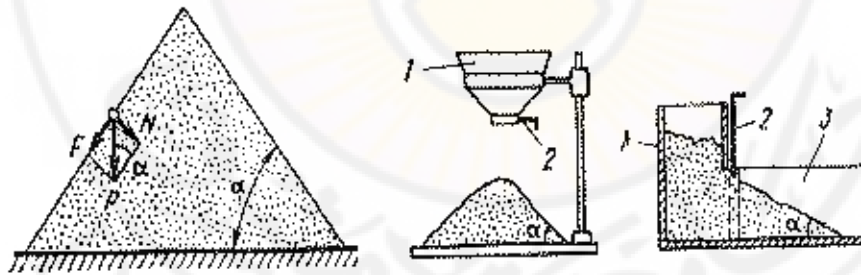
وهناك طريقتان للتعبير عن الكثافة الإجمالية bulk density التي هي شائعة الاستخدام في ميتالورجيا المساحيق، وأكثر الكثافات انتشاراً في الاستخدام هي الكثافة

الظاهرية apparent density (AD). وهي عبارة عن كثافة كتلة المسحوق معبراً عنها بالغرامات لكل سنتيمتر مكعب، لحجم قياسي من المسحوق تم تعيينه برفق تحت ظروف محددة في وعاء أسطواني ذي حجم محدد. وبعبارة أخرى، هي وزن حجم كمية من المسحوق الحر وغير المتماسك الذي يكفي لملء فراغ قالب معين معلوم الحجم، وذلك حسب العلاقة التالية:

$$\gamma_1 = (G_2 - G_1) / V \quad (3-2)$$

حيث يكون: G_1 - وزن الوعاء فارغاً ، G_2 - وزن الوعاء مع المسحوق gr ،
 V - حجم الوعاء الداخلي cm^3 .

وتتعلق الكثافة الظاهرية بزاوية ميل أو انحدار المسحوق التي تكون في حدود $\alpha = (25 - 70^\circ)$ لمعظم مساحيق المعادن، ويعبر عنها بسكب المسحوق سكباً حراً من قبل جهاز خاص. وكلما كانت الزاوية أكبر كان حجم الحبيبات أكبر. وإذا شكل أكثر انتظاماً، و من ثم تكون الكثافة أكبر. وبفحصان حجم الحبيبات يزداد السطح النوعي مما يؤدي إلى زيادة الاحتكاك بين الجزيئات مما يؤدي لصعوبة انتقالها بنسبة بعضها إلى بعض مما يؤدي إلى نقصان الكثافة الظاهرية أو ما تسمى بالوزن النوعي للمسكوب الحر.



الشكل (٢-٢) مخطط (a) تشكيل زاوية الانحدار الطبيعية وجهاز تحديدها (b & c)
 1- جسم الجهاز، 2- حاجز متحرك، 3- حاجز شفاف مع مقياس للزاوية

وفي الاختبار الآخر يتم وضع عينة موزونة في أسطوانة مدرجة يتم نقرها برفق أو هزها بطريقة معيارية إلى أن يصبح الحجم ثابتاً. وتؤدي هذه العملية إلى كثافة النقر tapped density وتسمى أيضاً بكثافة الهز vibrated density، وهي بطبيعة الحال أعلى من الكثافة الظاهرية، التي تعطى بالعلاقة التالية:

$$\gamma_2 = G / V \quad (4-2)$$

حيث إن: G - وزن المسحوق بعد النقر أو الهز G_T .
و يتعلق ثبات الكثافة بتعبئة قالب التشكيل، ولذلك فإن من الأمور الجوهرية أن يكون لكل مدمج أو ملبد بصورة حقيقية وزن المسحوق نفسه، والجدول (٢-١) يبين الكثافة الظاهرية لعدد من المساحيق المعدنية مقارنة مع الوزن النوعي لكل معدن.
أما الكثافة الحقيقية:

فتمتد في جهاز قياس الكثافة Pycnometer للمسحوق، (انظر الشكل ٢-٥)، إذ يوزن وعاء البيكنومتر G دون السائل أي فارغاً، ثم يُمَلأ بالماء المقطر حتى المؤشر المطلوب، و يوزن فنحصل على G_1 ، وبمعرفة كثافة الماء عند درجة حرارة التجربة ρ_w يمكننا حساب حجم البيكنومتر V_p حسب العلاقة التالية:

$$V_p = (G_1 - G) / \rho_w \quad (5-2)$$

ويعتبر حجم السائل هذا ثابتاً، ويسمى سائل البيكنومتر، ثم يملأ وعاء البيكنومتر الجاف حتى (0,7 - 0,5) من حجمه بالمسحوق ويوزن فنحصل على G_2 ، وبعد وزنه نقوم بسكب السائل حتى (0,8 - 0,75) من الحجم. ثم نرج الوعاء الحاروي على المسحوق والسائل كي يتجانس تماماً، أو نضعه في جهاز تخلية الهواء حتى ضغط معين قبيل التبخير، ثم نقوم بوزن البيكنومتر مع المسحوق والسائل فنحصل على G_3 ، ونحسب حجم السائل في البيكنومتر:

$$V_{liq} = (G_3 - G_2) / \rho_{liq} \quad (6-2)$$

والآن يمكننا تحديد الكثافة الحقيقية (البيكنومترية) لجزيئات المسحوق γ_p بالعلاقة التالية:

$$\gamma_p = (G_2 - G) / (V_p - V_{liq}) \text{ , [g/cm}^3] \quad (7-2)$$

حيث إن:

G- وزن الوعاء الفارغ للجهاز. G_1 - وزن الوعاء مملوء بالماء المقطر
 G_2 - وزن المسحوق بمقدار 0.5 - 0.7 من حجم الوعاء، ثم يضاف سائل مقياس
الكثافة حتى 0.75 - 0.8 ويرج الوعاء، ومن الأفضل تقريغ الوعاء وتخليته من
الهواء ثم يضاف سائل مقياس الكثافة إلى الحجم المطلوب على الوعاء، ويوزن الوعاء
مع السائل والمسحوق فنحصل على G_3 .

V_p - حجم الوعاء الحقيقي، V_{liq} - حجم السائل

ρ_w - كثافة الماء، ρ_{liq} - كثافة سائل مقياس الكثافة

الجدول (١-٢) الكثافة الظاهرية لعدد من المساحيق المعدنية

نوع المسحوق	الوزن النوعي، gm/cm^3	الكثافة الظاهرية، gm/cm^3
الألمنيوم	2.70	0.7 - 1.0
الأنتيمون	6.68	2.0 - 2.5
الكاديوم	8.65	3.0
الكروم	7.10	2.5 - 3.5
الكوبالت	8.90	1.5 - 3.0
النحاس	8.93	0.7 - 4.0
الرصاص	11.30	4.0 - 6.0
المغنزيوم	1.74	0.3 - 0.7
الموليبدوم	10.20	3.0 - 6.5
النيكل	8.90	2.5 - 3.5
الفضة	10.50	1.2 - 1.7
القصدير	5.75	1.0 - 3.0
التنجستين	19.30	5.0 - 10.0
الزنك	7.14	2.5 - 3.0
الحديد والفولاذ	7.85	1.0 - 4.0

٢-٢-٣ حجم الحبيبات وتوزيع الحجم :Particle Size and S. Distribution

إن التعبير عن الحجم على أنه قطر، ما عدا حالة المساحيق الكروية، على سبيل
المثال، أمر ذو صحة مشكوك فيها، فكلما كان الشكل غير كروي زادت درجة عدم

تمائل الحبيبات. فهل يجب علينا أن نستخدم رقماً يمثل أكبر بعد خطي أم ينبغي لنا أن نأخذ البعد الوسطي؟ فهل ذرة أبرية أو شوكة بطول 1 mm وقطر 0.05 mm أكبر أم أقل من حبيبة متساوية المحاور بعرض 0.5 mm ؟ وقد تم اقتراح أنظمة مختلفة عديدة وأساليب اختبار مناسبة، وبعضها مستخدم لأغراض خاصة، إلا أنه بالنسبة إلى معظم المساحيق التي نحن مهتمون بها بصورة رئيسية في ميتالورجيا المساحيق، فإننا نترك جانباً النقاط الأكثر صغراً، ونأخذ في الاعتماد على التخليل. ولا ينبغي أن يهملنا ما يتقرر بهذا الأسلوب طويلاً طالما أن باستطاعتنا تأكيد أن النتائج التي نحصل عليها هي ثابتة وقابلة للتكرار. ووثيقة الصلة بالموضوع، ويشير حجم المنخل، بصورة أساسية إلى أكبر كرة يمكن أن تمر من خلال فتحاته، و هي في الحقيقة مربعة تقريباً في حالة المناخل والواسعة الاستخدام المنسوجة من الأسلاك. ولذلك، فإننا عندما نعطي رقماً لحجم حبيبة أو ذرة فإن هذا القطر هو الذي نشير إليه. ويعبر عادة عن الحجم بمصطلح الميكرون μm . والاختبار القياسي هو أن نضع عينة موزونة من المسحوق في أعلى مجموعة المناخل الشبكية السلكية الدائرية التي يتناقص حجم فتحاتها من القمة إلى القاعدة، ثم نهز وننقر المجموعة على آلة قياسية لزم من معروف مقرر بصورة دقيقة للوصول إلى نقطة النهاية. ثم نقوم بوزن كمية الفئات fractions أو القطع cuts كما يطلق عليها في أغلب الأحيان بصورة منفصلة. ويتم التعبير عن النتائج بصورة عددية على أنها النسبة المئوية الإجمالي المتبقي على كل منخل، أو على شكل مخطط توزيع histogram أو في بعض الأحيان كمنحنٍ متواصل. وقد تم إعطاء توزيع أحجام نموذجي في الجدول رقم (٢-٧) لفئات من مسحوق الحديد القابلة للكبس. وتتحصر عملية التحليل بالمناخل في صب 200 gr من مسحوق المعدن في المنخل العلوي وينخل المسحوق في المناخل المتتالية حسب أبعاد فتحة كل شبكة وتوضع المناخل بعضها فوق بعض بترتيب معين بحيث يكون للمنخل العلوي أوسع شبكة، ثم تليه المناخل التالية حسب فتحات الشبكات حتى الوصول إلى أصغر شبكة حجماً هي ما قبل السفلى، أما الطبقة السفلى فهي عبارة عن وعاء كالمنخل، ولكن مغلفة تماماً أي دون شبكة.

وتجهز مجموعة المناخل بواسطة هزاز أو باليد لمدة محدودة تتراوح بين 10 و 15 دقيقة، وبالنتيجة يتوزع المسحوق إلى عدة أقسام يحجز كل منها في شبكة معينة الأبعاد، وبعد العزل يوزن كل قسم على حده وينقسم وزن أحد الأقسام على المجموع الكلي لأوزان الأقسام وضربها بمئة، فإننا نحصل على النسبة المئوية لذلك القسم:

$$P = P_1.100/P_1+P_2+.....P_n \quad [\%] \quad (6-2)$$

حيث: $P_1+P_2+.....P_n$ هي عبارة عن أوزان الأقسام.

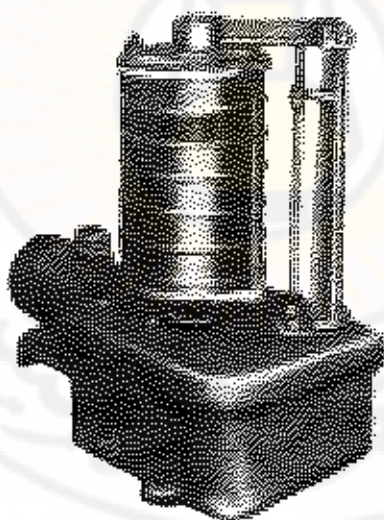
وقد كانت مناخل الشبكات السلكية، في الماضي، تصنف بحسب عدد تقاطعات الأسلاك لكل بوصة طولية، وهكذا كان يشار إلى المساحيق على أنها، على سبيل المثال، منخل ١٠٠ ناقص 100 mesh، الذي يعني أن كل الذرات ستمر بصورة واقعية من خلال منخل رقم 100. وعلى أي حال، فإن التفكير للحظة في هذا الأمر سيبين أن هذا الأسلوب غير مرض، لأن الفتحات الفعلية متنوع، وتختلف تبعاً لقطر السلك المستخدم. ومع ذلك، فإن الإشارة إلى رقم المنخل ستبقى تقابل باستمرار فيما يتعلق بحجم المسحوق.

وهناك كلمة تحذير مناسبة فيما يتعلق بالتخيل. فلا يمكن لمنخلين اثنين أن يكونا متطابقين تماماً ومتماثلين بصورة مطلقة، إذ يصبحان متآكلين ومتمددتين أي إن الفتحات تزداد حجماً، وذلك حسب درجة الاستعمال. وهكذا فإنه في حالة عينة من مسحوق، فإن اثنين من المشغلين المتساويين في الكفاءة، يستخدمان معدات متطابقة اسمياً يمكن أن يبلغا عن وجود نتائج مختلفة بصورة تقريبية أو هامشية. فتقرير توزيع أحجام الذرات للمخاليط يكون محدود القيمة بحيث قد تختلف أحجام ذرات المكونات اختلافاً كبيراً.

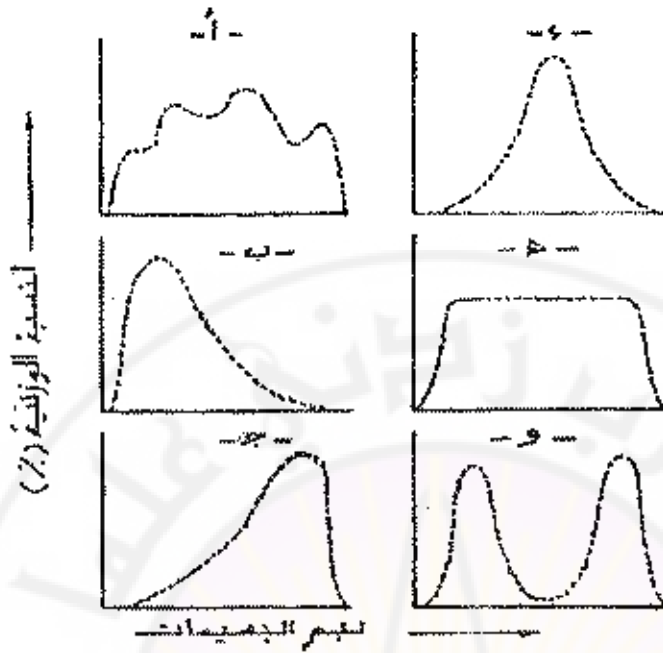
جدول (٢-٢) توزيع أحجام ذرات نموذجي لفئات المساحيق القابلة للكبس

نسبة الوزن %	الفئات μm
آثار قليلة	> 180
0.2	$< 180 > 150$
21.6	$< 150 > 105$
25.9	$< 105 > 75$
11.8	$< 75 > 63$
14.3	$< 63 > 45$
26.2	< 45

ولتصنيف البنية الحبيبية للمسحوق، أي لتحديد النسبة المئوية لاحتواء المسحوق على كل قسم من أقسامه المختلفة بالنسبة لأبعاد الدقائق، تستخدم طرق عديدة منها التحليل المنخلي أو الترسيب أو الطرق المجهرية ثم رسم منحنى توزيع الحبيبات Histogram كما هو موضح في الشكل (٢-٤).



الشكل (٢-٣) منخل فيشر



الشكل (٢-٤) الأشكال المختلفة لعلاقة توزيع حجم الحبيبات بالنسبة الوزنية

٢-٢-٤ التحجيم لما دون مقاس المنخل Sub - sieve sizing

بالنسبة إلى تصنيف المساحيق البالغة النعومة بواسطة التثخيل فهو أمر غير عملي، بل حتى مستحيل، ولذلك لا بد من استخدام أساليب تستخدم مبادئ مختلفة تماماً. وهناك عدة أساليب متاحة، وأحدها مستخدم بصورة شائعة تماماً لكونه يحدد مساحة سطح كمية موزونة من المسحوق. فإذا كان لعينتين من المساحيق بنيتان أساسيتان متشابهتان، أي في شكل ذراتهما متماثلتان، فإنه سيكون للمسحوق الأنعم مساحة السطح الأكبر. وعلى أي حال، فإنه سيكون من الواضح أن حجم الحبيبة كما تم تحديده آنفاً ليس العامل الوحيد، إذ إن أي حبيبة في منتهى عدم الانتظام في الشكل سيكون لها مساحة سطح أكبر بكثير من الحبيبة الكروية التي لها الحجم نفسه، لهذا السبب فإن مقاييس مساحة السطح ذات أهمية حقيقية فقط لدى مقارنة عينات من مساحيق متماثلة

مصنوعة بالأسلوب نفسه. وأحد هذه الأجهزة المعروفة جيداً والذي يعمل على هذا المبدأ هو مُعَايِر فيشر لقياس الحجم لما دون مقاسات المنخل Fisher sub-sieve sizer.

٢-٢-٥ السطح النوعي:

يعرف السطح النوعي أنه مجموع مساحات أسطح الحبيبات بالنسبة لوحدية الحجم أو الوزن. تؤثر طرائق تحضير المساحيق تأثيراً كبيراً على السطح النوعي، فكلما زاد السطح النوعي كانت عمليات التدميج والتلييد أفضل. وأهم الطرق التجريبية لتحسين السطح النوعي هي طريقة امتصاص السوائل الملونة وطريقة امتصاص أو امتزاز الغازات مثل غاز النيتروجين عند درجة حرارة 195°C أو امتزاز بخار غاز الميثانول CH_3OH عند درجة حرارة الغرفة، وقد تم اختراع طريقة أبسط للامتزاز إذ يتم الترشيح المتغير للغاز المخلخل من خلال المسحوق، وتعتبر هذه الطريقة أبسط من الطرق السابقة نسبياً إلا أنها مجهدة وتعطي نتائج دقيقة. و بحسب السطح النوعي للمسحوق بطريقة السريان أو الترشيح المتغير للغاز السشديد الخلطة vacuum بالعلاقة التالية:

$$S = (144/13) \cdot \sqrt{(2RT/\mu\pi)} \cdot (\Pi / 1-\Pi) \cdot (t/x^2) \quad (7-2)$$

حيث إن:

S - السطح النوعي cm^2/cm^3

Π - المصامية، وهي النسبة المئوية بين حجم الفجوات وحجم الجسم ككل.

x - ارتفاع طبقة العينة.

t - زمن التخلف، ويعين تجريبياً.

μ - الوزن الجزيئي للغاز g/mol .

T - درجة الحرارة المطلقة $^{\circ}\text{K}$.

R - ثابت الغازات العام.

ويتم تحديد الثوابت في المعادلة بقياس Π ، T ، X بطريقة مباشرة، بينما يتم حساب السطح النوعي للأجسام المسحوقية الشكل بطريقة الترشيع للغازات، بتسليم المراحل التالية:

- أ- يجفف المسحوق قبل التجربة إلى أن يثبت وزنه، ثم نقوم بتثبيت الوزن.
 - ب- يسكب المسحوق بانتظام على شكل طبقات لا تقل سماكتها عن 5 cm في أنبوبة أسطوانية نظيفة.
 - ث- يدك المسحوق ويقل بإحكام ويخلخل الهواء من الجزء الأسفل للأنبوبة إلى 10^{-3} مم من العمود الزئبقي.
 - ث- يسحب الهواء من خلال العينة ولذلك يكون ضغط الغاز في الجزء العلوي من العينة أعلى من ضغطه في الجزء السفلي.
- ويعتبر السطح النوعي للمساحيق من الخواص المهمة، فالمساحيق المنتجة بواسطة عملية اختزال الأكاسيد لها أسطح خشنة، بينما المساحيق المنتجة بالتذخير لها أسطح أنعم، وهذه الخاصية تؤثر تأثيراً كبيراً في طبيعة قوى الاحتكاك بين الجسيمات أثناء عملية الكيمن والتشكيل، لذا فإن المساحة السطحية لكل جزيئه لها قيمة مهمة.

الجدول (٢-٣) السطح النوعي لبعض مساحيق الحديد حسب طريقة التحضير

السطح النوعي [cm ² /gm]	نوع مسحوق الحديد
5160	اختزال - ناعم
1500	اختزال - عادي
516	اختزال - خشن
80	أسفنجي - عادي
525	تذخير - ناعم
400	تذخير - عادي
5000	كهروليتي - عادي

٢-٢ الخواص التكنولوجية:

٢-٣-١ الوزن النوعي للمسكوب والمسامية:

يعتبر الوزن النوعي من الوحدات المميزة للحجم، ويعرف بأنه وزن واحدة الحجم لمسكوب حر المكب (من دون هز أو نقر). ويبين الوزن النوعي للمسكوب مقدار كثافة وترتيب حبيبات المسكوب، وتتوقف كثافة كمية معينة من الحبيبات في حجم معين على مجموعة الخواص الفيزيائية المختلفة للمسكوب. فكلما زاد حجم حبيبات المسكوب وكذلك مقدار انتظام شكلها ونعومة سطحها، زاد الوزن النوعي للمسكوب. يؤثر الوزن النوعي للمسكوب تأثيراً كبيراً على انكماش المدمجات أثناء عملية التلييد. فكلما قل الوزن النوعي للمسكوب زاد مقدار الانكماش، لذلك من الضروري استخدام مساحيق ذات وزن نوعي ثابت لازم من الناحية العملية، وذلك لأن انكماشها ثابت مما يؤدي للحصول على مدمجات أكثر دقة في الأبعاد بعد عملية التلييد. أما طريقة تعيين الوزن النوعي فهي طريقة قياسية بواسطة جهاز قلو متر، وهو عبارة عن وعاء مستطيل توجد في داخله حواجز زجاجية مائلة بزاوية 30° . ويتم تعيين الوزن النوعي للمسكوب بتفريغ المسكوب في جهاز قلو متر من خلال قمع زاوية رأسه 60° ، وبعد القمع يوجد منخل قطر فتحات شبكته يتراوح بين 2 و 5 مم ومن خلاله يمر المسكوب إلى الحواجز الزجاجية المائلة بزاوية 30° مع الاتجاه الرأسي، وهي أربعة حواجز تتدرج من خلالها الدقائق إلى القمع الموجود في أسفل الجهاز ومنه إلى الوعاء المعياري، إذ يمثل حتى نهايته مع بعض الزيادة يتم قشطها حتى المستوى المطلوب. ثم يحسب الوزن النوعي للمسكوب بالعلاقة التالية:

$$\gamma_1 = (G_2 - G_1) / V \quad (8-2)$$

حيث إن: G_1 - وزن الوعاء فارغاً gr ،

G_2 - وزن الوعاء مع المسكوب gr

V - حجم الوعاء الداخلي cm^3 .

يتكرر تعيين مقياس الوزن النوعي عدد من المرات ثم يحسب الوزن النوعي الوسطي، أما الحجم النوعي للمسحوق المسكوب فهو عبارة عن الحجم الذي تشغله وحدة الوزن لذلك المسحوق عند السكب الحر، ويحسب بالعلاقة التالية:

$$V_1 = I / \gamma_1 \quad (9-2)$$

أما حجم المسحوق بعد الهز فيتم تعيينه عن طريق هز وزن معين من المسحوق (50 gr) بحيث يطرق وعاء الاختبار على المنضدة طرقات خفيفة إلى أن يثبت الحجم، ويحسب حجم المسحوق النوعي بعد الهز بالعلاقة التالية:

$$V_2 = V / G \quad (10-2)$$

أما الوزن النوعي للمسحوق بعد الهز فيعطى بالعلاقة:

$$\gamma_2 = I / V_2 \quad (11-2)$$

و الحجم النوعي للمسحوق بعد الهز مهم جداً عند تصميم أسطح المكبس. ويكون الحجم النوعي للمسحوق دائماً أكبر بعدة مرات من الحجم النوعي للمعدن المصمت، لذلك يمكن اعتبار أن الحجم النوعي للمسكوب هو عبارة عن الحجم النوعي للمعدن المصمت مضافاً إليه حجم الفراغات. و يعبر عن الحجم النسبي بنسبة الحجم النسوي للمسكوب إلى الحجم النوعي للمعدن المصمت، حسب العلاقة التالية:

$$\beta = V_2 / V_c = \gamma_c / \gamma_2 \quad (12-2)$$

حيث يكون: γ_c و V_c - الوزن النوعي والحجم النوعي للمعدن المصمت، أما الكثافة النسبية فهي عبارة عن ناتج قسمة الوزن النوعي للمسحوق المسكوب على الوزن النوعي للمعدن المصمت أي:

$$\theta = \gamma_2 / \gamma_c = I / \beta \quad (13-2)$$

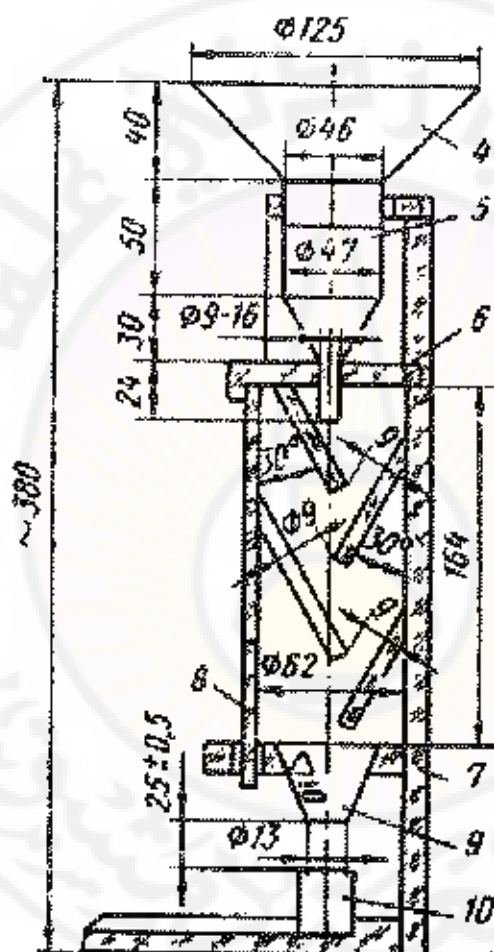
و من ثم يمكن أن تحسب المسامية للمدمج الأخضر بالعلاقة:

$$\Pi = (V_2 - V_c) / V_2 = 1 - V_c / V_2 = 1 - \gamma_2 / \gamma_c \quad (14-2)$$

ويعبر عن المسامية بنسبة مئوية حسب العلاقة التالية:

$$\Pi = (1 - \theta) \cdot 100, [\%] \quad (15-2)$$

وإذا كان المدمج يملك شكلاً هندسياً معقداً، فيمكن تحديد كثافته بوزنه هيدروستاتيكياً حسب نظام التقييس العالمي، بحيث يطلّى المدمج بطبقة رقيقة من اليرافين Paraffin لحمايته من دخول الماء إلى داخل المسامات ثم يوزن في الهواء وبعدها في الماء (حسب قاعدة أرخميدس).



الشكل (٢-٥) جهاز تحديد الوزن النوعي للمسكوب (قلو متر)

١- قمع استقبال كبير، ٢- قمع صغير، ٣- صفائح مائلة.

٤- القمع السفلي، ٥- وعاء قياس حجمه ٢٥ سم^٣

٢-٣-٢ السيوية Flowability:

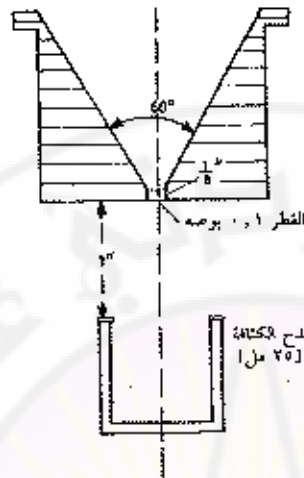
وهناك عامل مهم آخر فيما يتعلق بتعبئة قالب التشكيل، ألا وهو السهولة التي يتدفق فيها المسحوق، كذلك فإن من المفيد، أن المعدات نفسها تستخدم في كل من اختبار التدفق flow وكذلك في اختبار الكثافة الظاهرية.

ويتم قياس عامل التدفق flow factor أو زمن التدفق flow time بقياس زمن تدفق مسحوق وزن بصورة قياسية من قمع قياسي ذي فوهة عيارية. وأكثر المعدات استخداماً في نطاق واسع هو "مقياس تدفق هول" Hall Flowmeter الموضح بالشكل (٢-٥). ويكون وزن المسحوق المستخدم 50 gr كما أنه يفيض من القدر الأسطواني وهذا الفائض الكامن فوق حافة القدر تتم إزالته بسحب طرف مستقيم، مثل طرف مسطرة فولاذية، عبر هذا الفائض، مع تجنب حدوث أي اهتزاز. أما العينة التي حجمها 25 ml، فيتم عندئذ نقرغها خارجاً ووزنها، ونستنتج أن زمن التدفق سيكون مرتبطاً بنسبة عكسية مع الكثافة الظاهرية.

وتعرف سيوية المسحوق المعدني بأنها الخاصية التي تحدد قابلية المسحوق على ملء شكل معين، وهي خاصية معقدة وصعبة تعتمد على عوامل كثيرة أهمها الوزن النوعي وشكل وحجم حبيبات المسحوق وتوزيعها، كما أنها تؤثر في كل من الانضغاطية وسرعة عملية الكبس. ومن المعروف بصورة جيدة أن المساحيق البالغة النعومة والدقة تتدفق بصعوبة كبيرة أو لا تتدفق على الإطلاق. إذ إن حجم الذرة وتوزيع الأحجام لا يؤثر في التدفق فحسب، بل إن ما هو في منتهى الأهمية هو السلوك الذي يتم أثناء عملية التلييد، إذ إن المساحيق الناعمة تتليد بصورة أسرع بكثير من المساحيق الخشنة، وذلك بسبب عظم طاقتها الكامنة المصحوبة بمساحة سطحية أكبر.

ويعتبر الاحتكاك من أهم العوامل التي تؤثر في سيوية المسحوق ونقلها، وكذلك تداخل الحبيبات بعضها مع بعض مما يعرقل إزاحة الدقائق بالنسبة إلى بعضها بعضاً، وكذلك خشونة السطح والرطوبة. ويمكن رفع السيوية للمساحيق بتخميرها في

جو محمي في وسط غازي خامل لمنع الأكسدة. وتحدد السيوية بعدد الثواني لانسياب وزن مقداره 50 gr من المسحوق من خلال قمع قطره 2,5 mm أو (0,1").



الشكل (٢-١) رسم تخطيطي لمقياس تدفق هول وتعيين السيوية

ويتم قياس السيوية أو زمن التدفق flow time بقياس زمن تدفق مسحوق وزن بصورة قياسية من قمع قياسي ذي فوهة معيارية، وذلك بحسب العلاقة التالية:

$$\tau = K \cdot t \quad [\text{Sec}] \quad (16-2)$$

أما مصطلح معدل التدفق المستخدم أحياناً فيعبر عنه بالعلاقة التالية:

$$v = G / t \quad [\text{g/Sec}] \quad (17-2)$$

حيث إن:

- G وزن المسحوق gr، t زمن انسياب المسحوق عبر القمع Sec.
- K معامل تصحيح القمع.

٣-٣-٢ الانضغاطية Compressibility :

إن المرادف لهذا المصطلح هو قابلية التميع، وهو يشير إلى السهولة التي يمكن بهسا لخليط مسحوق أن يتم تدميجه بواسطة الضغط، إلا أن المعنى في ميتالورجيا المساحيق يكون أكثر تحديداً، ويشير إلى كثافة مدمج ذي أبعاد محددة، و يمكن الحصول عليه

بواسطة ضغط تدميج محدد، ويتم عادة قياس الانضغاطية بالكثافة التي يتم تحقيقها عند قوة ضغط محدد تعادل 100 MPa بحيث يملأ قالب التشكيل بالمسحوق ويضغط عند ضغوط مختلفة، والنتائج الحاصلة يعبر عنها على شكل منحنى الانضغاطية، الذي يبين العلاقة بين الكثافة والضغط المستخدم، ويحسب ضغط التشكيل بالعلاقة التالية:

$$p = F/S, \quad [\text{MPa}] \quad (18-2)$$

حيث: F - قوة الضغط N، S - مساحة مقطع السطح العامل لفجوة القالب $[m^2]$. ويمكن حساب معامل الانضغاطية بنسبة حجم المسحوق إلى حجم المدمج المصنوع منه:

$$\Psi = V_p / V_c, \quad [\%] \quad (19-2)$$

أما أهم العوامل المؤثرة في الانضغاطية فهي:

١. شكل وحجم الحبيبات: فكلما قل حجم الحبيبات ازداد سطحه النوعي و من ثم قلت قابليته للانضغاط.
٢. نسبة الانضغاط: نسبة حجم المسحوق على حجم المدمج الذي صنع منه.
٣. صلادة المسحوق: كلما كانت الصلادة كبيرة ازداد ضغط الكبس.
٤. قابلية التفاعل المرن و اللدن اللذان يؤديان إلى التراص الميكانيكي وتلامس الحبيبات.

٢-٣-٤ التشاكلية:

وهي عبارة عن قابلية المدمجات المشكلة بواسطة التدميج بالاحتفاظ بشكلها بعد خروجها من قالب التشكيل، ويحسب معامل التشاكلية بالعلاقة التالية:

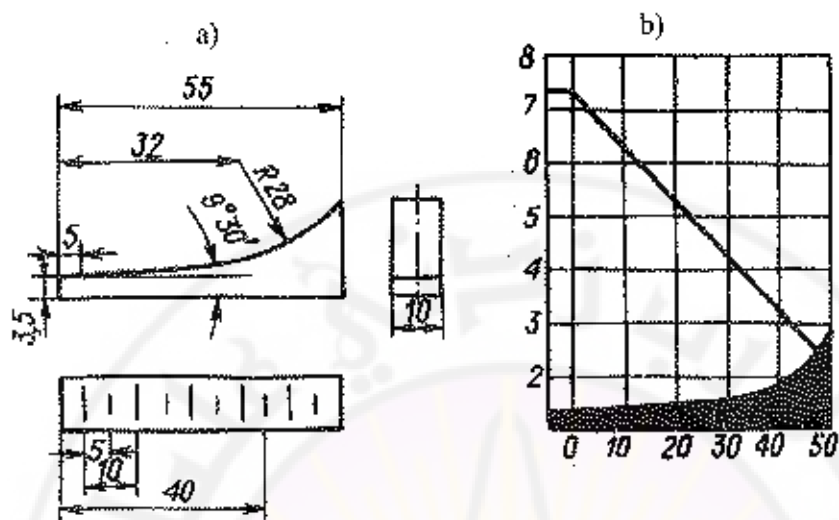
$$\Phi = \sigma / p, \quad [\%] \quad (20-2)$$

حيث إن: Φ - معامل التشاكلية

σ - متانة العينة عند الضغط Kg/mm^2

P - الضغط النوعي المستعمل عند عملية التدميج Kg/mm^2 .

تتصف التشاكلية للمسحوق بمدى الكثافة سواء كان صغيراً أم كان أعظماً، التي عندها لا تتحطم المدمجات بعد لفظها من قالب التشكيل، والتي تؤمن توزيعاً خطياً للكثافة على طول المدمج بعد عملية الكبس، انظر الشكل (٢-٧).



الشكل (٢-٧) شكل عينة اختبار التشاكلية

a- شكل وأبعاد عينة اختبار التشاكلية، b- رسم بياني لتحديد التشاكلية

ومن أجل اختبار التشاكلية تؤخذ كمية من المسحوق وزنها 20 ± 0.02 gr ثم تسكب في قالب الصوغ ويسوى سطح المدمج بدقة. ثم نقوم بعملية الضغط حتى النهاية دون مادة مزينة لقالب الصوغ أو السنيك، ثم يتم لفظ المدمج من قالب الصوغ وحسب الإشارة يمكن تحديد طول المدمج وحدوده الواضحة، بحيث لا يوجد أي تشققات، ويمكن تحديد قيمة الكثافة الصغرى والكثافة العظمى عندما تكون حدود المدمج بلا انحرافات أو تشققات. وتكرر التجربة ثلاث مرات.

٢-٣-٥ المتانة الخضراء Green Strength:

إن الجزء المصنع بواسطة ميتالورجيا المساحيق في الوضع غير الملبد، يشار إليه أنه أخضر green. ومصطلح المدمج الأخضر هو مصطلح لا يزيد المعنى وضوحاً، أما مصطلح المدمج compact فقد تم تحديده على أنه الجزء المصنع بأسلوب ميتالورجيا المساحيق في وضع مشكل أو مدمج. وهكذا فإن مصطلح الكثافة الخضراء green density يفسر نفسه بنفسه تماماً كما هي الحال بالنسبة لمصطلح المتانة الخضراء.

وهذا الأخير على جانب من الأهمية فقط فيما يتعلق بالمناولة الآمنة للمنتجات بين المكبس وفرن التلييد.

تقاس المتانة بعدة طرق، وإحدى هذه الطرق المستخدمة على نطاق واسع للمحامل المسامية هي القيام بتحميل أسطوانة (حلقة) المحمل بضغطها قطرياً. وهذا يعطي متانة الكسر القطرية radial crushing strength المعبر بإجهاد الانحناء حسب العلاقة التالية:

$$\sigma_r = F(D-t) / L.t^2, [N/mm^2] \quad (21-2)$$

حيث إن:

-F الحمل N، -D القطر الخارجي للعيينة mm، -t سماكة الجدار mm، و -L طول العينة mm.

أما فيما يتعلق بالدمجات الحديدية فإن البديل الغالب للاستخدام هو اختبار الانحناء bending test الذي يستخدم عينات ذات مقطع عرضي مستطيل الشكل عرضه b و ارتفاعه a، أما L فهي المسافة بين المسندين، وهذا الاختبار يعطي متانة التخطم على الانحناء أو ما يسمى بمتانة التمزق العرضية transverse rupture strength المعطاة في المعادلة التالية:

$$\sigma_b = 3FL / 2ba^2, [N/mm^2] \quad (22-2)$$

وهناك اختبار آخر هو اختبار السقوط أو التداعي tumbling test كمقياس نقت الأضرار والزوايا في المدمجات نتيجة ضعف تماسكها، وأحد هذه الاختبارات هو اختبار راتلر.

لقد كانت أصول قوة التحمل الخضراء مدار بحث ونقاش طويل بين الباحثين، وأكثر الآراء أو الاقتراحات المقبولة بصورة واسعة، بأن منشأ قوة التحمل الخضراء هو تكوين روابط ميتالورجيا حقيقية، أي لحام على البارد بين الذرات في مناطق التلامس بينها. وعند هذه النقاط يحدث تشوه أو انكسار. والواضح أيضاً أن قوة التحمل الخضراء ستكون متأثرة بحالة سطوح ذرات المسحوق، فإذا كانت الأغشية السطحية من الأكسيد أو الزيت أو خليط زيت التزليق، فإنها ستجعل القوة الخضراء أدنى.

و المتانة الخضراء مرغوب فيها بصورة رئيسية من أجل تأمين المناولة السليمة للمدمجات، وتتراوح المتانة الخضراء في المواصفات العالمية بين 250 N/mm^2 و 1000 N/mm^2 .



الفصل الثالث

المزج والخلط

Blending and Mixing

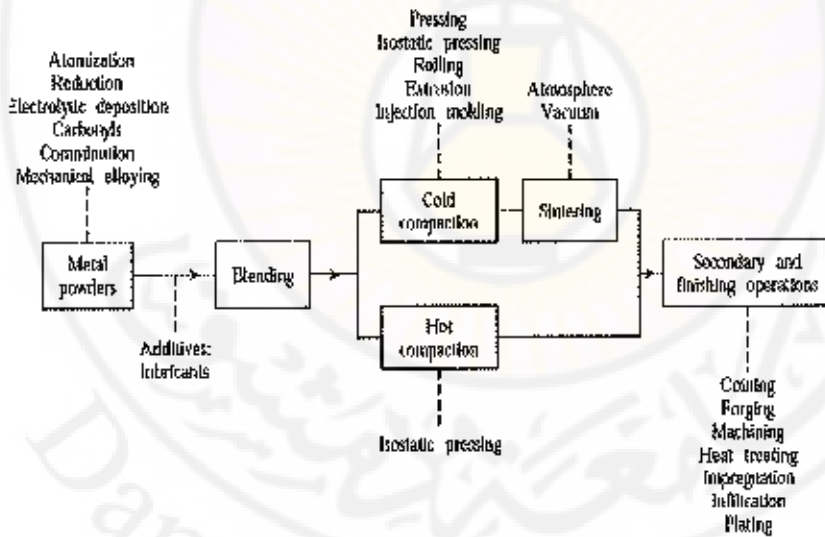
تحضير المزيج المسحوق لعملية التدميج	١٠٩
الخلاطات	١١٠
آلية الخلط	١١١
المناولة والتخزين	١١٢
منع الفصل	١١٣
المعايرة الحجمية والمعايرة الوزنية للشحنة	١١٤



المزج والخلط

Blending and Mixing

يعرف المزج على أنه التداخل الكامل للمساحيق ذات التركيب الأساسي المتشابه. و يتم فعل ذلك من أجل إنتاج وجبة من المسحوق متجانسة تماماً فيما يتعلق بالتركيب وتوزيع أحجام الذرات. بينما يعرف الخلط على أنه التداخل الكامل لمسحوقين أو أكثر من مواد مختلفة. وهكذا فإننا نقوم بمزج عدة وجبات مستقلة من مسحوق النحاس المذرر، على سبيل المثال، ولكننا نعمل خليطاً من مسحوق النحاس مع مسحوق القصدير لصنع البرونز. ومن أجل الاختيار لخاصية الانضغاط و القوة الخضراء، فإنه من الضروري مزج المسحوق بزيوت تزييق. ويبين الشكل (١-٣) رسماً تخطيطياً لتسلسل عمليات تصنيع المنتجات بطريقة ميتالورجيا المساحيق.



الشكل (١-٣) رسماً تخطيطياً لتسلسل عمليات التصنيع

٣-١ تحضير المزيج المسحوق لعملية التدميج:

تعتبر هذه العملية من العمليات الأساسية في صناعة منتجات المساحيق المعدنية، ولها الأثر الكبير في منح المنتج خواصه النهائية، وتختلف طرائق التحضير باختلاف طبيعة المساحيق ونوعية الشوائب الموجودة فيها والطرائق المتبعة في الحصول على المساحيق ومدى التباين في الوزن بين مكونات الخليط المختلفة، وغير ذلك من العوامل المطلوب توافرها لتحديد الخواص بحيث يتم اختيار المسحوق على أساس أن يكون الإنتاج اقتصادياً والسلعة مطابقة للمواصفة العالمية، وأهم الخطوات التي يجب إجراؤها هي:

... تنقية المساحيق المعدنية من الشوائب باستخدام طرائق التنقية المغناطيسية أو الميكانيكية أو الكهروليونية.

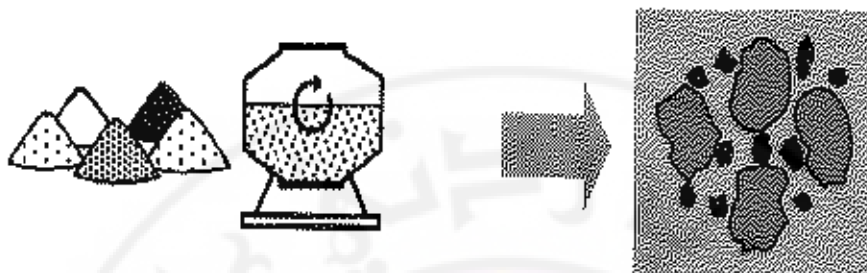
- تخضع المساحيق لعملية معالجة حرارية أولية أو ميكانيكية أو كليهما معاً، وذلك لتحسين قابلية المساحيق للكبس والتشكيل اللدن، مثل الطحن الإضافي لزيادة النعنت أو التلدين للتخلص من التصليد الناتج عن التشغيل على البارد واختزال الأكاسيد والتخلص من نشوء البنية البلورية للمعدن، مثال يختزل مسحوق النحاس عند درجة حرارة ٣٥٠ - ٤٠٠ م°.

- تنسيق وتصنيف المساحيق، وذلك وفق تدرج حجم الحبيبات باستخدام المناخل المعدنية أو باستخدام طريقة الفصل بالهواء على مجموعات بحسب حجمها، ثم خلطها بتركيب حبيبي معين.

... مزج الخليط عن طريق خلط المساحيق بواسطة الخلاطات المختلفة، من توزيع الحبيبات توزيعاً منتظماً فيما بينها، مع مراعاة عدم تأكسد المساحيق والحصول على خليط متجانس، والخلط إما أن يكون جافاً أو رطباً، إلا أن الخلط الرطب يكون أفضل عند تحضير المساحيق المركبة والمتباينة في وزنها النوعي، والوسيط السائل المستخدم في الخلاطات هو الغول الأبيض أو البنزين أو المياه المقطرة... إلخ.

- عملية التوليف وذلك بإضافة مواد الربط لتحسين قابلية التشكيل وزيادة الانسيابية، كإضافة مواد التزيق لتقليل الاحتكاك بين جدران قالب الصوغ وتسهيل لفظ القطعة

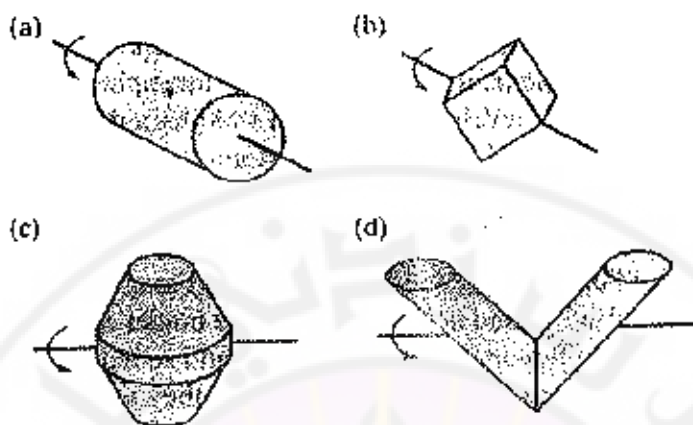
المنمجة، ومن أهم مواد التزليق هي حمض الأميتاريك و مسحوق الغرافيت و سترات الزنك.



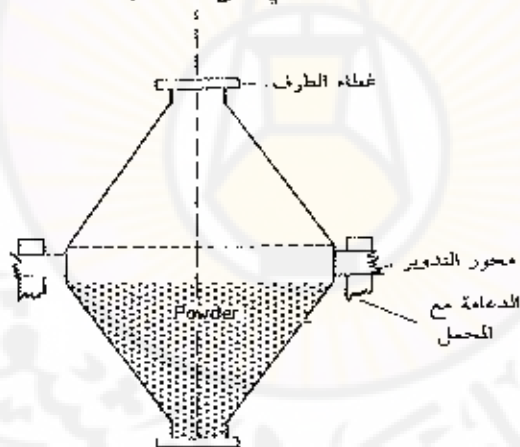
الشكل (٣-٢) عملية الخلط

٢-٣ الخلاطات Mixers:

إن الخلط، بطبيعة الحال، مطلوب في مجموعات كبيرة من العمليات الصناعية، والعديد من تصاميم أجهزة الخلط المختلفة الموجودة في الأسواق التي لا تختلف في التفاصيل فحسب، بل أيضاً من ناحية المبدأ المستخدم والقاعدة المتبعة كما هو موضح في الشكل (٣-٣) الذي يبين عدة أشكال لهذه الخلاطات منها الخلط الأسطواني والخلط المكعب الدوار والخلط المخروطي والخلط الأسطواني على شكل حرف V. أما بالنسبة لمساحيق المعادن فإن أكثر النماذج المستخدمة لتتشاراً هي خلاطات التقلب الدوارة Tumble mixers، التي تتميز بنوع من الشكل المخروطي المزودج الموضح في الشكل (٣-٤)، بحيث يدور وعاء الخلط بسرعة ١٥ و ٣٠ دورة بالدقيقة بينما يتدحرج المسحوق ويتقلب مراراً وتكراراً. وأحد المتطلبات الأساسية هو أن المسحوق يلتف وينثني على ذاته. كما أنه يجب ألا يتساقط بصورة سائبة عبر الهواء في أي مرحلة، إذ بدلاً من حدوث الخلط، يمكن أن يؤدي ذلك لعزل الذرات وفصلها، وخاصة إذا كان المزيج محتوياً على مكونات من وزن نوعي بالغ الاختلاف مثل الغرافيت والحديد.



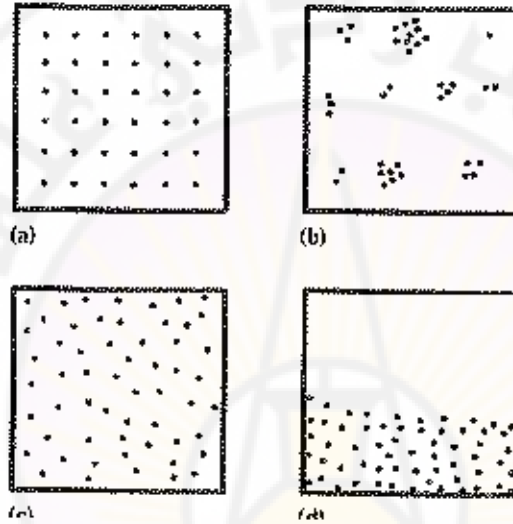
الشكل (٣-١) رسم تخطيطي لأشكال الخلاطات
 a - خلاط أسطواني، b - خلاط مكعب دوار، c - خلاط مخروطي،
 d - خلاط أسطوانتي على شكل حرف V



الشكل (٣-٤) مقطع لخلاط مخروطي الشكل

ويعتبر زمن المزج ذا أهمية كبيرة، إذ من الواضح أن زمناً معيناً مطلوب لإنتاج مزيج متجانس - قد يكون قصيراً إلى حد دقيقتين - ولكن الاستمرار في عملية التقليب بعد بلوغ تلك النقطة ليس مضيعة للوقت فحسب، بل قد يكون مدمراً إلى حد بعيد ومسبباً

للضرب، انظر الشكل (٣-٥) . إذ إن عملية تقليب الوعاء لا محالة يتطلب عملاً ميكانيكياً يؤثر في الذرات، إذ يؤدي إلى فلتحة وتسوية الأطراف الحادة والخشنة، و من ثم زيادة في الكثافة الظاهرية للخليط، مما يؤثر سلباً على المتانة الخضراء. زد على ذلك إن زيادة تغطية سطوح الذرات بزيوت التزليق يثلف خصائص تدفق الخليط كما أنها تسهم في حدوث المزيد من تدني المتانة الخضراء.



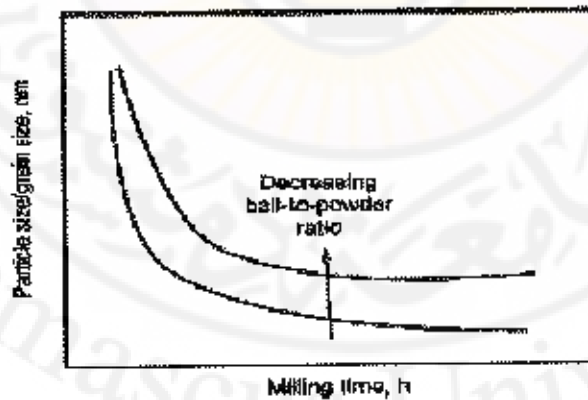
الشكل (٣-٥) رسم تمثيلي وتخطيطي لتوزيع الجزيئات في مزيج من المساحيق (a) توزيع منظم، (b) متكتل، (c) توزيع عشوائي، (d) عملية انفصال.

٣-٣ آلية الخلط: Mechanism of blending

تتعرض جزيئات المسحوق لل سحق مراراً وتكراراً أثناء عملية الطحن، إذ تتكسر و تلتحم الجزيئات مرة ثانية، وهذا يحدث عندما تصطدم كرياتان فولاذيتان ببعضهما مع بعض و تكون بعض كميات المسحوق محصورة بينها تقريباً أثناء كل اصطدام وهذا يؤدي إلى تشوهها تحت تأثير قوة الطحن مما يكسب جزيئات المسحوق المرونة و الطواعية و يخلق سطوحاً جديدة، كما يمكن للجزيئات أن تلتحم معاً مما يؤدي إلى زيادة في حجم الجريئة في المراحل المبكرة للطحن، إذ تكون الجزيئات ناعمة، وتميل

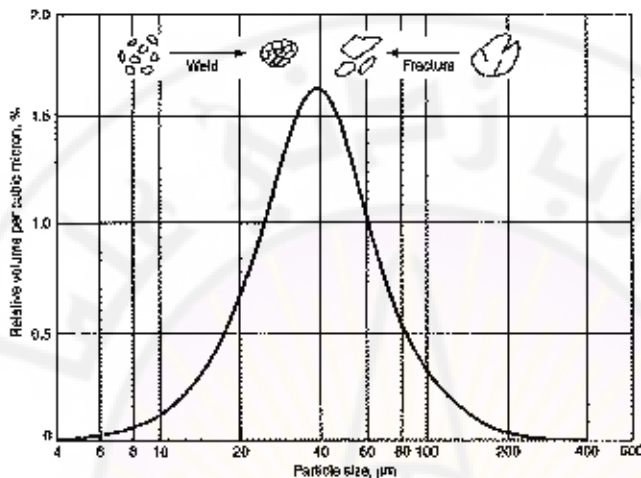
إلى الالتحام بعضها مع بعض وتشكيل جزيئات كبيرة. وقد يزداد حجم الجريئة ثلاث مرات على الأقل عن حجمها الأولي وتكون الجزيئات المركبة في هذه المرحلة لها تركيب ذو طبقات مميزة يشتمل على مجموعات مختلفة من العناصر البدائية، وبالصدوم والتشويه المستمر تصبح الجزيئات فعلياً صلبة و تنكسر من قبل آلية الطحن لتأخذ شكل رقائق هشة.

إن الأجزاء التي تولدت بهذه الآلية يمكنها أن تواصل الانخفاض في الحجم بغياب قوات التكتل القوية. في هذه المرحلة تميل التكتلات لتتكسر قبل الوصول للالتحام على البارد بسبب التأثير المستمر للكريات الطاحنة، وهذا يؤدي إلى تناقص في حجم الجريئة بشكل مستمر إلى أن يثبت الحجم، و من ثم تتناقص فاعلية التلاحم الطبقات. و كما ذكرنا سابقاً إن نسبة نقاء التركيب الداخلي للجزيئات (كحجم الجريئة ، شكل البلورة، تباعد الرقائق، الخ...)، وحجم الجزيئات الأولية غير مهم نسبياً، لأن زمن الطحن قد يصل لبضع دقائق و يصبح التباعد بين الرقائق صغيراً. انظر الشكل (٣-٦). و بعد الطحن لفترة محددة من الوقت تجري عملية موازنة، وذلك باستخدام ميزان يحدد نسبة الالتحام و مقدار زيادة حجم الجريئة المتوسط، و كذلك معرفة نسبة الكسر. و في هذه المرحلة تحتوي كل جزيئة على المكونات الأولية وتصل الجزيئات إلى حالة فرط إشباع في الطاقة الكامنة نتيجة تراكم طاقة الإجهاد .



الشكل (٣-٦) العلاقة بين حجم الحبيبات و زمن الطحن

إن توزيع حجم الجزيئات في هذه المرحلة يكون ضعيفاً، لأن حجمها يكون أكبر من المعدل المتوقع كما هو مبين في الشكل (٧-٣). ويتعلق معدل حجم الجزيئة في هذه المرحلة على السهولة النسبية التي يمكن أن تتشكل عندها عملية الانحام على البارد وقوة الكسر و درجة إعياء الجزيئات المركبة ومقاومة الجزيئات للتشوه.



الشكل (٧-٣) علاقة توزيع أبعاد الجزيئات بنسبة حجمها وبدرجة الانحام والتحطم

٣-٤ المناولة والتخزين Handling and Storing:

بعد التحقق من الحصول على خليط متجانس في الخلاط، فإنه من الضروري التأكد من أن الفصل segregation لا يحدث أثناء النقل بين الخلاط وتجويف قالب التشكيل الذي سيتم فيه تدميج الخليط. وقد يحدث الانفصال عندما يخرج المسحوق من الخلاط مباشرة أثناء نقل الحاويات، وكذلك، وهذا أمر بالغ الأهمية، عندما يخرج المسحوق من قمع المكبس إلى قالب التشكيل. ومن المحتمل بصورة أكبر أن يحدث تفكك الخليط De-mixing عندما يكون الخليط محتوياً على مساحيق بالغة الاختلاف في أحجام حبيباتها وأوزانها النوعية. مثل خلاط الحديد/غرافيت، إلا أن الخطر كامن أيضاً في خلاط الحديد مع النيكل البالغ النعومة أو مسحوق الموليبدنيوم ومع خلاط النحاس

الخشن نسبياً والقصدير الناعم، ويتطلب أن تكون عناصر السبائك المضافة للحديد من درجة ناعمة حتى تسهل عملية السبك أثناء عملية التليد.

٣-٥ منع الفصل Preventing segregation:

يتم عادة فرد خليط المسحوق على شريط فولاذي، ويتم إمراره عبر فرن عند درجة حرارة كافية لتسبب نوعاً من الانتشار التداخلي بين المكونات، ولكنه غير كاف لتليد المسحوق. ثم في الأونة الأخيرة إدخال مكون عضوي في الخليط النهائي يعمل كغراء لجعل ذرات الغرافيت تتماسك تماسكاً شديداً مع الحديد.

٣-٦ المعايير الحجمية والمعايير الوزنية للشحنة:

يتم معايرة الشحنة بطريقتين: إما بالطريقة الحجمية وإما بالطريقة الوزنية، و تختار طريقة حساب الشحنة بحسب نوع المعدات المستخدمة، إذ تستخدم المعايير الحجمية إذا كانت عملية الكبس أو التتميج آلية، وتستخدم المعايير الوزنية إذا كانت عملية التتميج منقطعة أو دورية.

يتطلب حساب الشحنة بالطريقة الحجمية استعمال مساحيق لها وزن نوعي ثابت أي كثافة ثابتة للمسكوب الحر للخليط، و لذلك تعتبر هذه الطريقة أقل دقة من الطريقة الوزنية، ويتوجب تحديد كمية وزن حجم المزيج المسحوق المطلوب W بدقة، وذلك بقسمته على كثافة المسكوب الحر للمزيج المحدد بالطرق المعروفة مسبقاً. ويمكن وزن كمية الحجم بواسطة وعاء خاص أو بمساعدة المعايرة الآلية، وذلك بسكب الخليط المسحوق في أنثى قالب التشكيل المضبوط على حجم معين.

و يبين الشكل (٣-٨) أحد التصميمات الممكنة لتقدير الشحنة (الجرعة) آلياً. وهي تتكون من رافعة ذات ذراعين يحمل أحد أطرافها ثقلاً بينما يحمل الآخر وعاء خاصاً بتقدير الجرعة، وبمجرد سكب الكمية المطلوبة من المسحوق في الوعاء يصبح وزنه أكبر من وزن الثقل، فيرتفع هذا الأخير إلى الأعلى، ويقفل الدارة الكهرومغناطيسية. وفي هذه الحالة يجذب المغناطيس الكهربائي الحافظة المركبة على ذراع الرافعة، الذي يحمل الثقل فينقلب الوعاء حول محوره ساكباً المسحوق في فراغ القالب. وتسهيل سكب المسحوق في قالب الكبس يستعمل قمع خاص بسكب المسحوق، ويجب الاهتمام

بانتظام المكسب في قالب التشكيل وملاحظة استواء سطح المسحوق أفقياً. ولذلك يهز قالب التشكيل بعد السكب بهزاز خاص أو بطريقة يدوية. أما الطريقة الوزنية فتعتبر أكثر طرق تقدير الجرعة دقة، إذ إنها تحقق ثبات الكثافة للمنتجات، لأنها لا تتعلق بكثافة المسكوب الحر أو بالسيولة للمزيج المسحوق. ويستمر حساب وزن الشحنة W باستخدام المعادلات التالية:

$$W = V \gamma_c \theta K_1 K_2 \quad (1-3)$$

حيث إن: γ_c - الوزن النوعي للشحنة في الحالة المصمتة g/cm^3 .

V - حجم القطعة المنتجة، cm^3

θ - الكثافة النسبية لقطعة المنتجة، %

K_1 - معامل فقدان المسحوق عند الكبس حيث $1.01 - 1.005$

K_2 - معامل فقدان المسحوق لحجمه (الانكماش نتيجة اختزال الأكاسيد

واحتراق الشوائب وغير ذلك) عند التليد $1.01 - 1.03$

أما الوزن النوعي للشحنة γ_c فيحسب طبقاً لقوانين الإضافات. فإذا كان الخليط يتألف من مركبين أو أكثر فيمكن حسابه بالعلاقة التالية:

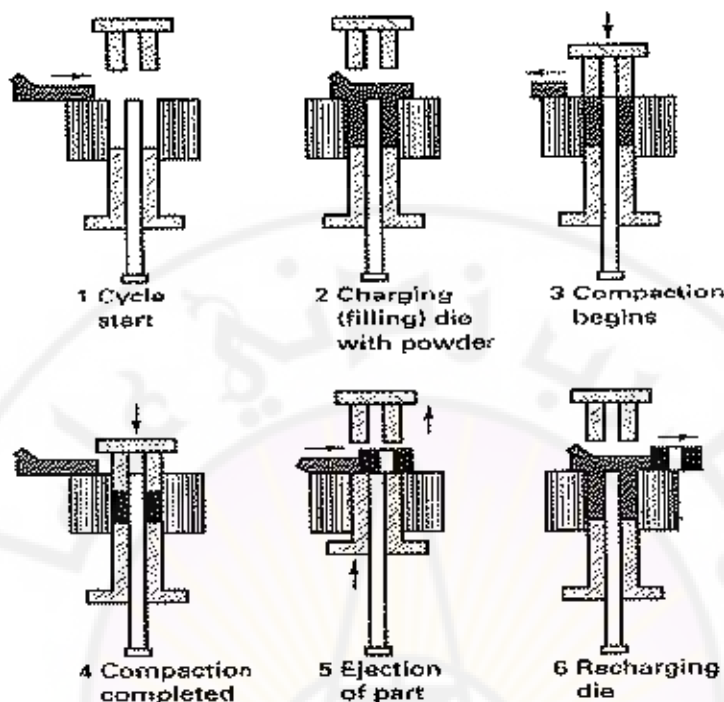
$$\frac{\sum \frac{a_i \gamma_i}{\gamma_i}}{\sum \frac{a_i}{\gamma_i}} \gamma_c = \quad (2-3)$$

حيث إن:

γ_i - الوزن النوعي في الحالة المصمتة لكل مركب من مركبات السميكة g/cm^3

a_i - النسبة المئوية الوزنية لكل عنصر من الخليط %.

وتحسب كثافة المدمج بوضعه النهائي أو وزنه النوعي بالطريقة البيكونومترية.



الشكل (٨-٣) رسم تخطيطي لتقدير حجم الشحنة الآلي

- 1- بداية دورة التحميل، 2- شحن القالب بالمسحوق، 3- بداية عملية التدميج،
- 4- إكمال عملية التدميج، 5- لفظ العينة، 6- إعادة شحن القالب.

الفصل الرابع

التشكيل و التدميج

Forming and Compaction

مقدمة	١
التدميج على البارد	٢
التدميج على الساخن	٣
الأسس النظرية لعملية التدميج	٤
تصميم قالب التشكيل	٥



التشكيل و التدميج

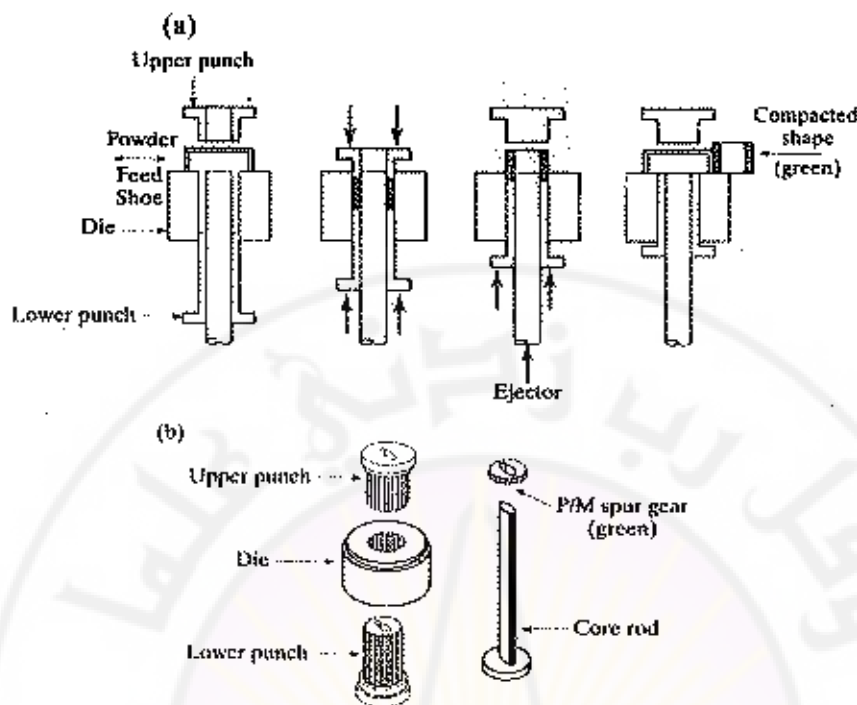
Forming and Compaction

٤-١ مقدمة:

تطلق كلمة التدميج على Compaction أو التشكيل Forming على عمليات ضغط الحبيبات بعضها مع بعض لتكوين كتل صلبة متماسكة، وغالباً ما تترافق هذه العملية مع إعطاء الكتلة الصلبة الشكل النهائي للقطعة التي ستكون فيما بعد جاهزة للاستعمال، فتكون عملية التدميج هذه هي أيضاً عملية تشكيل، وأكثر الطرائق اتباعاً لتحقيق الهدفين معاً هي طرائق الكبس ضمن قوالب يتفق شكل الفراغ الداخلي فيها مع شكل القطعة المراد إنتاجها، حيث تكبس المساحيق بهدف تشكيلها تحت ضغوط كبيرة. وتزداد الكثافة والصلادة بزيادة الضغط، ولكن يوجد في كل حالة حد أقصى للضغط لا يتج عن تجاوزه سوى تحسين بسيط في الخواص، ولما كانت الضغوط العالية تستلزم استخدام قوالب متينة ومكابس ذات ساعات كبيرة ازدادت كلفة الإنتاج بزيادة الضغط المستخدمة، وقد لا يكون هناك أي مسوغ لذلك.

ويمكن كبس الخليط من جهة واحدة أو من عدة جهات، عندئذ يكون في المكبس أكثر من جزء واحد متحرك، كما يتوافر إمكانية تطبيق ضغوط مختلفة على الأجزاء المختلفة للقطعة المراد تشكيلها، ولأسيما في القطع ذات الأشكال المعقدة أو السماكات المتباينة.

تستخدم في تشكيل المساحيق أنواع عدة من المكابس، ولا سيما المكابس الميكانيكية لما لها من معدلات إنتاج عالية، إلا أنه يمكن استخدام المكابس الهيدروليكية أيضاً إذا ما تطلبت القطع المراد إنتاجها ضغوطاً كبيرة.



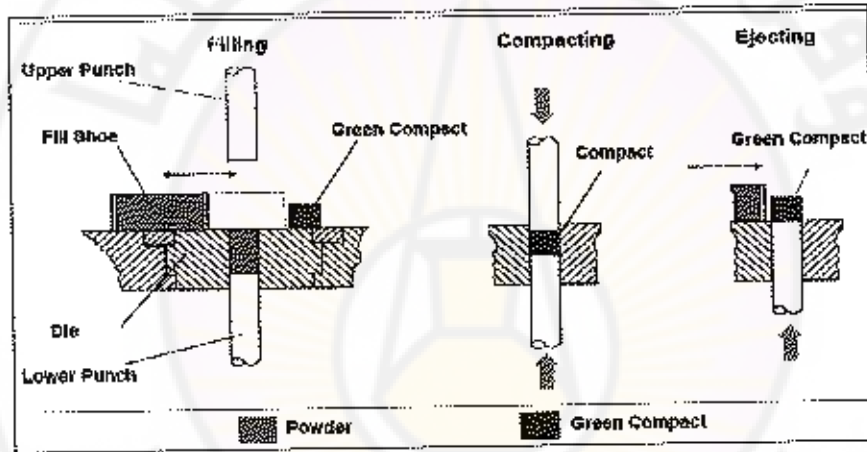
الشكل (١-٤) تدميج المساحيق المعدنية ذات أشكال مختلفة
 a- عملية تدميج أسطوانة مفرغة، b- أجزاء قالب تدميج مسنن عدل

٢-٤ التدميج على البارد : Cold compaction

تعتبر عملية تدميج المساحيق أهم خطوة في أسلوب ميتالورجيا المساحيق بأكمله، ولقد سبق، أن ذكر أن قابلية هذا الأسلوب للبقاء و التطور من الناحية الاقتصادية تعتمد على قدرته بصورة رئيسة على إنتاج مركبات حسب الشكل المطلوب، و بأبعاد تكون قريبة جداً من تلك الأشكال المطلوبة بعد عملية التلييد. وتحقيق هذا المطلب يعتمد إلى حد بعيد جداً على مرحلة التدميج. وبطبيعة الحال فإن الأبعاد الأساسية للأجزاء المصنعة تتحدد بواسطة الشكل الهندسي geometry للعدة ومدى دقة ودورها على المكبس، إلا أن الأبعاد بعد عملية التلييد تعتمد أيضاً على التغيرات التي تحدث في فرن التلييد، وهذه تتعلق بكثافة وتجانس المنتج المدمج. وهذا التجانس بشكل إحدى متطلبات تصميم العدة وحكات المكبس، بالإضافة إلى انتظام أسلوب التغذية المسحوق

في تجويف قالب التشكيل، وتستخدم قوالب التشكيل الصلبة (الجاسنة) rigid لأغلب منتجات المساحيق الملبدة.

تكون هذه الأدوات والعدد عادة في أبسط أشكالها عبارة عن كتلة من المعدن - قالب التشكيل die موجود بها ثقب ذو جوانب عمودية - تجويف قالب التشكيل - السنك (ذكر القالب) The punch، ويكون هناك عادة سنكان في الاستعمال سنك علوي ينزل في تجويف القالب، وسنك سفلي يغلق فعر التجويف، ويساعد على دفع وإخراج المنتج المدمج من القالب. كما هو مبين في الشكل (٤-٢)، واضح أن المساحيق تختلف عن الأجسام المصمتة بحركة جزيئاتها و المحافظة على الشكل بصورة محدودة.



الشكل (٤-٢) عملية تشكيل المدمج

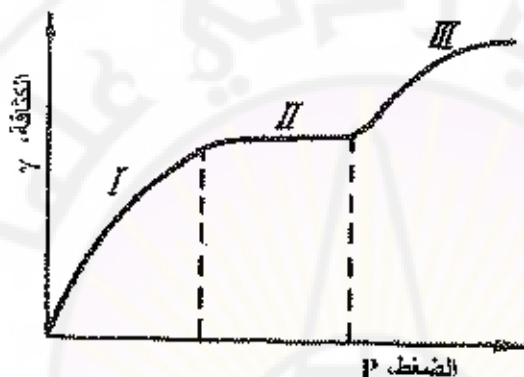
إن عملية تدمج المساحيق يمكن تقسيمها لثلاث مراحل:

I- المرحلة الأولى: يحدث في هذه المرحلة تشوه في البنية و تقوس ناتج عن السكب الحر للمسحوق وملء الفراغات. تترافق هذه العملية بتحريك الجزيئات وتكديسها دون تشوه ملحوظ.

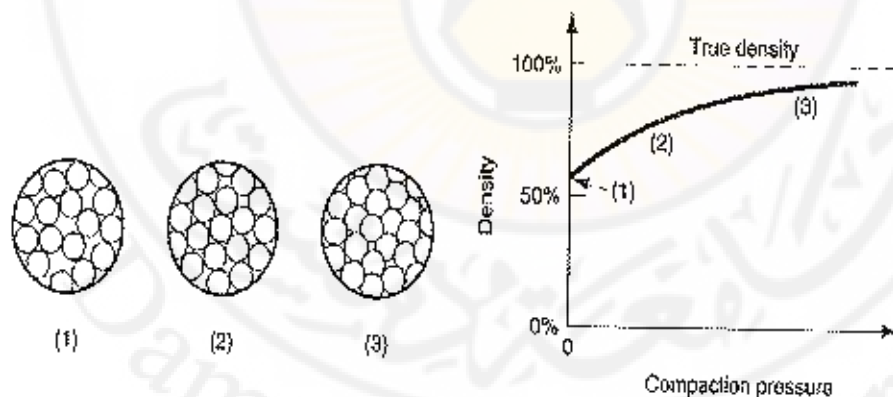
II- المرحلة الثانية: تترافق هذه المرحلة بانفعال مرن وادن أو تحطم هش للجزيئات. II يكون الانفعال في البداية في أماكن التلامس، إذ يسبق الانفعال المرن الانفعال اللدن و

التحطم الهش. يترافق عادة، مع الانفعال اللدن في نهاية المرحلة الثانية كبس وتدميج جزيئات المادة، عندئذ تتحني الجزيئات، ويلتصق بعضها ببعض مما يساعد في رفع المتانة الخضراء.

III- المرحلة الثالثة: يحدث ضغط وتقليص المقطع للمدمجات، وفعالياً في معظم مساحيق المواد لا تحدث المرحلة الثالثة. و يوضح الشكلان (٤-٣) و (٤-٤) علاقة الكثافة بضغط الكبس والمراحل الثلاث لعملية التدميج.



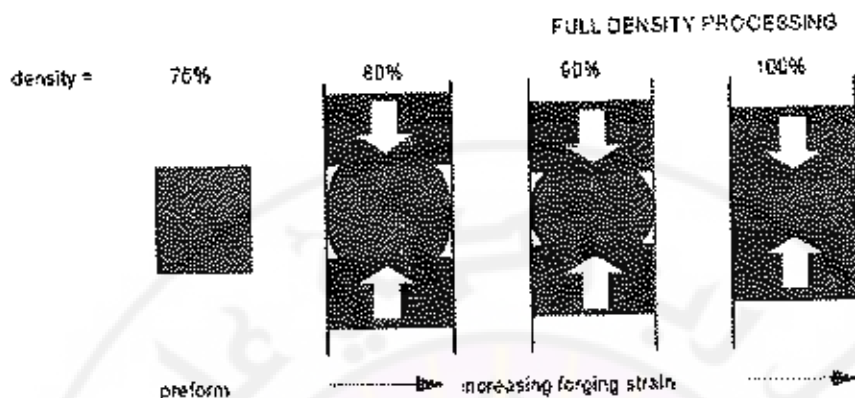
الشكل (٤-٣) علاقة الكثافة بضغط الكبس



الشكل (٤-٤) مراحل عملية التدميج وتزايد الكثافة

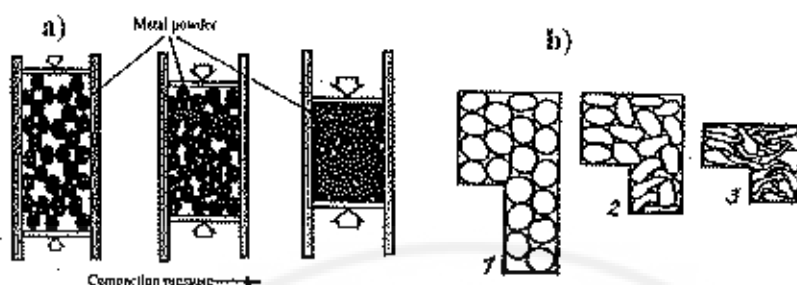
١- التواضع الحر للمساحيق في القالب مباشرة، ٢- ضغط المسحوق، ٣- تشوه الجزيئات

والشكل (٥-٤) يبين تسلسل عملية التدميج و تزايد الكثافة النسبية من $\theta = 75\%$ حتى الوصول إلى $\theta = 100\%$ في عملية التدميج بالحدادة.



الشكل (٥-٤) تسلسل تزايد الكثافة أثناء عملية التدميج بالحدادة

يتم تماسك حبيبات المساحيق بالكبس من جراء تضيق الفراغات بين الحبيبات، وزيادة أسطح التلامس فيما بينها، وتداخلها بعضها مع بعض بسبب التسوؤ اللدن الحاصل، كما هو مبين في الشكل (٥-٤). والتشكيل بالكبس يمكن أن يكون كبساً حتى ضغط محدد أو كبساً حتى حجم محدد، وفي كلتا الحالتين يجب أن يتم تقدير كمية الشحنة بدقة وإلا فسوف يحصل تباين في المقاييس بين قطعة وأخرى في الحالة الأولى أو تباين في كثافة القطعة في الحالة الثانية. تختلف عملية تدميج مساحيق المواد الهشة عن مساحيق المواد اللدنة، إذ يحدث في المساحيق الهشة بعد مرحلة التدميج الأعظم تسوؤ في البنية تصل إلى أماكن تلامس الإجهادات التي تكون أكبر من حد المتانة، فيحدث تحطم وتفتت للجزئيات السطحية مما يؤدي إلى عملية التدميج اللاحقة. تتعلق عملية تدميج خليط المساحيق سواء كانت هشة أم لدنة بنسبة المواد الداخلة في المزيج و شكل وحجم الجزئيات.



الشكل (٦-٤) تتابع مراحل عملية التدميج للمساحيق المعدنية (a)

b - شكل حبيبات المدمجات اللدنة خلال عملية التدميج

الجدول (٦-٤) ضغط التدميج المطبق على بعض أنواع المساحيق المعدنية

نوع مادة المساحيق	ضغط التدميج، MPa
Al	75 - 275
Al ₂ O ₃	100 - 150
Brass	400 - 700
Carbon	140 - 170
Fe	400 - 800
W	75 - 150
WC	150 - 400

٤-٢-١ الكبس أحادي الاتجاه و الكبس ثنائي الاتجاه:

تستخدم هذه الطريقة عند تحضير مدمجات ذات شكل بسيط وعندما لا تزيد النسبة بين طول (ارتفاع) وقطر المدمج (عرض) على مرتين. وهذه الطريقة تتم بأن تسكب الشحنة في قالب الصوغ الموضوع في المكان الخاص به على فرش المكبس، بعد ذلك يتم كبس المسحوق بالضغط عليه وتحويله إلى مدمج أو منتج جاهز لعملية تشغيل لاحقة (تلييد) بعد رفع الثقل والضغط على المكبوسة لإخراجها من القالب.

تتعرض المدمجات بعد خروجها من قالب الكبس لتمدد مرين من جميع الاتجاهات، وهذا التمدد مرتبط بقوة المرونة الداخلية، وتحسب نسبة التمدد المرين من المعادلة التالية:

$$\delta = (\Delta L / L_0) \cdot 100 = 100 \cdot (L_1 - L_0) / L_0 \quad (1-4)$$

حيث إن: δ - التمدد المرن النسبي

ΔL - للتمدد المطلق

L_{11} - طول المدمج قبل إزالة قوى الضغط الخارجية

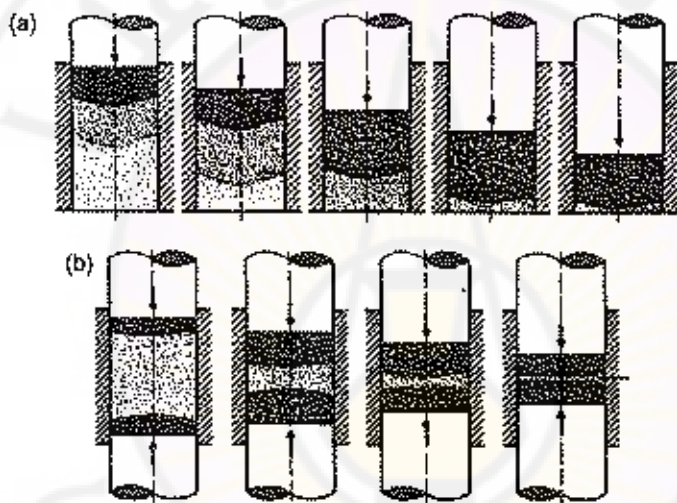
L_1 - طول المدمج بعد إخراجها من قالب الصوغ.

يستخدم الكبس من طرف واحد عند إعداد مدمجات ذات شكل بسيط، وعندما لا تزيد النسبة بين ارتفاع (طولها) العينة وقطرها (سمكها أو عرضها) على $1.5 - 1$ ، حيث $H/D \leq 1$ ، حيث H هو ارتفاع العينة و D قطرها كما هو موضح في الشكل (٤-٧). ومن أهم عيوب الكبس من طرف واحد، عدم تجانس كثافة المدمجات طولياً مما يؤدي إلى عدم إمكانية استعمال هذه الطريقة عند كبس القطع الطويلة.

تصمم المكابس بسنك واحد، أو بسنك متعددة، ويجب أن يكون لهذه المكابس أو تلك سرعات عالية، كما يجب أن يكون تشغيلها ابتداءً من ملء فجوة القالب بالمسحوق حتى لفظ المدمج النهائي تشغيلاً متواصلاً أو في دورة واحدة، وقد تصمم المكابس بصينية دوارة تجهز بمجموعة من فجوات القوالب يزود كل منها بسنك من أعلى وسنك من الأسفل. وفي أثناء التشغيل تدور صينية المكبس وتتم عملية الملء والكبس واللفظ في آن واحد عند مواقع مختلفة، وتصمم هذه المكابس بمواقع تتراوح بين 6 و 35 موقفاً تصل معدلات الإنتاج فيها إلى 1000 قطعة بالدقيقة.

أما إذا كان تحضير العينات بنسبة ارتفاع العينة إلى قطرها $H/D > 1.5$ ، فيتطلب استخدام الكبس من الطرفين كما هو مبين في الشكل (٤-٧b) أو عندما يكون للقطعة شكل يتعذر معه الحصول على كثافة متجانسة علة امتداد طولها بالكبس من طرف واحد. إذ يتقدم ضاغط المكبس العلوي إلى الأسفل ضاغطاً طبقة المسحوق مما يؤدي لنشوء قوى احتكاك كبيرة بين جدار القالب و المدمج أكبر من القوى المتشكلة في القسم السفلي، لذلك يبدأ الضاغط السفلي بالحركة عندما لا تتجاوز قوى الاحتكاك في القسم السفلي قوى الاحتكاك في القسم العلوي.

يجب أن تكون فجوة القالب شديدة الملاسة للتقليل من الاحتكاك كما يجب أن تكون مزودة بخلوص يسهل إخراج المدمج المشكل. فالاحتكاك بالجدران يمنع انتقال جزء كبير من الضغط إلى المسحوق. وإذا كان الضغط يسلط من جانب واحد فسينتج تفاوت ملحوظ في كثافة القطعة المنتجة. لذلك يفضل في معظم القوالب استعمال سنبيين أحدهما يشغل من أعلى والثاني من أسفل. وتتوقف سرعة تحريك السنبيك على نسبة الانضغاط للمسحوق، أي النسبة بين حجمه قبل ضغطه وحجمه بعد تشكيله. وتبلغ هذه النسبة للحديد والنحاس من 3 إلى 1. ومعنى ذلك أن تملأ فجوة القالب إلى عمق يساوي ثلاثة أمثال القطعة المنتجة.

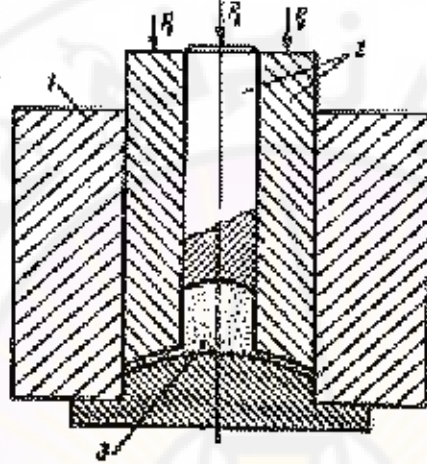


الشكل (٧-٤) يبين عملية الكبس أحادي الاتجاه بسنبيك واحد (a) وثلاثي الاتجاه بسنبيين (b)

٧-٢-٤ كبس القطع ذات الأشكال المعقدة:

لكبس قطع ذات أشكال معقدة وأخرى بأبعاد غير متساوية في اتجاه محور الكبس، تعد القوالب متعددة الكباسات قادرة بحركتها الذاتية تأمين إمكانية الكبس المتجانس للمساحيق في المقاطع المختلفة للمدمج.

يوضح الشكل (٨-٤) مبادئ هذه الطريقة التي تحقق الضغط بقيم متفاوتة على أجزاء المسحوق المختلفة. وعلى العموم فإن استعمال أسلوب ميتالورجيا المساحيق للحصول على مدمجات معقدة الشكل وكبيرة الأبعاد يكون محدوداً بسبب صعوبة تصميم قالب الكبس وارتفاع ثمنه وضرورة استعمال مكابس عالية الاستطاعة وبسبب قلة انسيابية المساحيق.

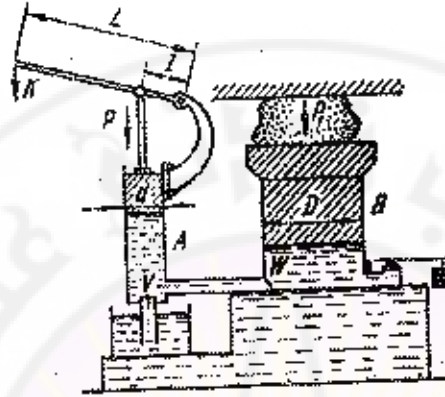


الشكل (٨-٤) كبس المدمجات المعقدة باستعمال عدة كباسات
1- أنثى القالب، 2- الكباسات، 3- المسحوق المراد تشكيله

٤-٢-٣ الكبس الهيدروستاتيكي:

تمتاز هذه الطريقة من الكبس بتحقيق كثافة عالية ومتجانسة للمدمجات وبعدم ظهور الشروخ الطبقيّة أو الشقوق والعيوب الأخرى التي تلازم طرق الكبس العادية. ومن مميزات أيضاً أنها تتطلب ضغوط قليلة نسبياً (أي لا تتطلب قوالب كبس غالية)، وبطريقة الكبس الهيدروستاتيكي يمكن تدميغ قطع يصل وزنها إلى مئات الكيلوغرامات. وفي الوقت الحاضر توجد معدات كبس هيدروستاتيكية نحصل عن طريقها على قطع يصل قطرها إلى 600 mm وارتفاعها إلى 1200 mm ووزنها إلى 500 kg.

ومن عيوب هذه الطريقة هو صعوبة الحصول على أبعاد قريبة من الأبعاد المطلوبة في المدمجات، و ضرورة القيام بمعالجات ميكانيكية للحصول على منتجات جاهزة بشكل معين.

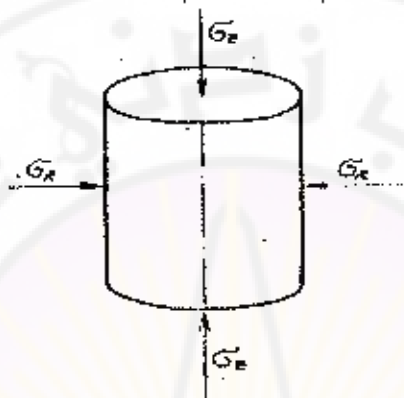


الشكل (٨-٤) الضاغط الهيدروليكي

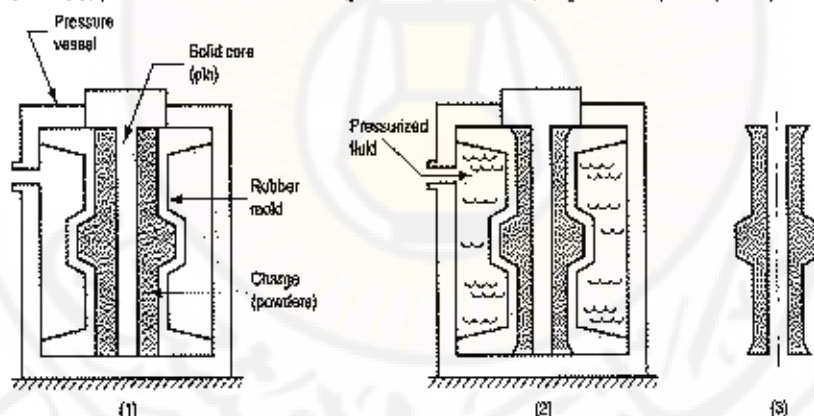
٤-٢-٤ الكبس الإيزوستاتيكية:

وهو عبارة عن ضغط متماثل من كل الاتجاهات، إذ يتم إدخال المسحوق في قالب تشكيل مصنوع من مادة مرنة مثل البولي يوريثين، ويغمس المسحوق والقالب في سائل معين - عادة الماء - ثم يضغط بصورة متساوية من كل الاتجاهات بواسطة الضغط العالي للغاز أو السائل. ونتيجة لذلك هذا الكبس نحصل على مدمجات متجانسة تتميز بانتظام في كل جسم المدمج. ومن صفات المسائل المستخدم يجب أن يتمتع بانضغاطية قليلة، وإذا لم يكن هناك احتكاك في جدران القالب فلا داعي لاستخدام مادة التزليق، وبذلك يمكن الحصول على كثافة عالية تقترب من الكثافة النظرية، ثم يخرج المدمج من القالب بعد عملية الكبس، وبما أن نسبة الكبس تكون عالية جداً فإن المدمج يكون أصغر بكثير من القالب الأصلي، الذي بعد إزالة الضغط يرتد المدمج إلى حجمه الأصلي، وعندئذ يمكن القيام بتليده، يكون الكبس بهذه الطريقة إما على البارد وإما على الساخن، و يسمى أحياناً "بالضغط الغازي الإيزوستاتيكي" إذ يعرض

المسحوق للتسخين إلى درجة حرارة ما بين $500 - 2200^{\circ}\text{C}$ في حجرة عالية الضغط يصل ضغط الغاز فيها إلى 200 MPa .
و من عيوب هذه الطريقة أنها لا تنتج مدمجات ذات دقة عالية، وهي تستخدم في صناعة المدمجات ذات المساحيق المعدنية المقاومة للانصهار أو في مساحيق العدد القاطعة أو في مسحوق التيتانيوم ذات الأحجام الصغيرة.



الشكل (٩-٤) رسم توضيحي للإجهادات المؤثرة في المدمجات عند الضغط الإيزوستاتيكي



الشكل (١٠-٤) مخطط مراحل عملية الضغط الإيزوستاتيكي على البارد

- 1- توضع المسحوق داخل القالب المرين، 2- تطبيق الضغط الهيدروستاتيكي على القالب، 3- شكل المدمج (العينة) بعد إخراجها من القالب.

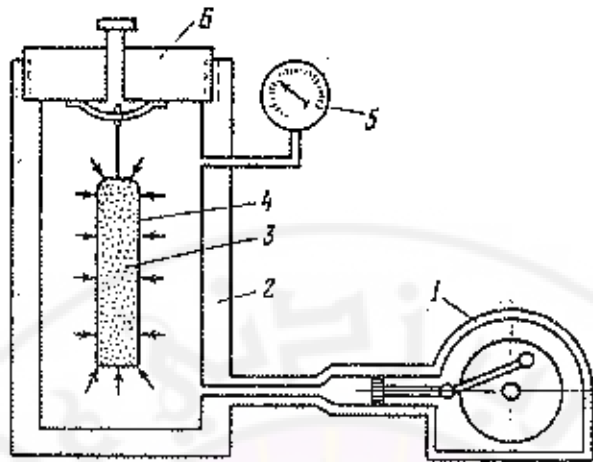
يستخدم بشكل عام السوائل لتطبيق الضغط على القالب عند الكبس على البارد، إذ يغمس القالب بالماء، ونوجه إليه ضغطاً متماثلاً من جميع الاتجاهات، ثم يضغط السائل على القالب المرين من كل الاتجاهات حتى الحصول على المنتج المطلوب كما هو مبين في الشكل (٤-١١)، وبعد إخراج القطعة نقوم بعملية تليدها. ومن مميزات وعيوب طريقة الضغط الإيزوستاتيكي المتماثل من جميع الاتجاهات:

- ... الطاقة الضرورية لدمج المساحيق بهذه الطريقة تكون أقل مقارنة بالطاقة المصروفة في حالة التدميج العادية.
- الإنتاجية العالية نظراً لقلة الزمن المصروف على المنتج، إذ تكون أكثر فاعلية بمرتين إلى ثلاث مرات مقارنة مع التدميج بالطريقة العادية. ويمكن حساب الزمن لعملية التدميج الإيزوستاتيكي حسب العلاقة التالية:

$$\text{Time}_{\text{total}} = F + C + D + O + E + S \quad (2-4)$$

- حيث: F- زمن الملء، C- زمن التدميج، D- زمن إزالة الضغط، O- زمن الفتح، E- زمن اللفظ، S- زمن التليد.
- ... عوامل الأمان التي يجب مراعاتها، وهي: الانفجار - الحريق - التسمم - الأعطال الميكانيكية للألة.

- لا حاجة لتزييت.
 - صغر حجم المنتجات.
- وتعد صعوبة الحصول على أبعاد قريبة من الأبعاد المطلوبة في المدمجات من العيوب الرئيسية لهذه الطريقة، أضف إلى ذلك ضرورة القيام بمعالجات ميكانيكية للحصول على مدمجات جاهزة بشكل معين.



الشكل (٤-١١) رسم توضيحي لجهاز الكبس الإيزوستاتيكي على البارد للمساحيق
 1- مضخة ضغط عال، 2- حجرة الضغط، 3- مسحوق التدميج، 4- غلاف مرن،
 5- مقياس الضغط (مانومتر)، 6- غطاء محكم.

٤-٢-٥ التشكيل بالدرفلة Rolling:

هذه الطريقة ليست إلا كبساً للمدمج من جميع جوانبها، وهي تتلخص بوضع الشحنة في وعاء قابل للتشكيل ومحكم القفل وتسخينها إلى درجة حرارة أعلى من درجة حرارة التليد ثم درفلتها على مراحل وتدميجها تحت تأثير قوى الجاذبية أو القوى القسرية للمسحوق المتساقط من وعاء التخزين بين الدافين الدائرة باتجاه التلاقي، مما يؤدي لتغيير خواص المسحوق المتحول إلى مدمج ذي متانة معينة. هذه العملية هي عملية تدميج مستمرة غير متقطعة تتبع قانون ثبات الحجم:

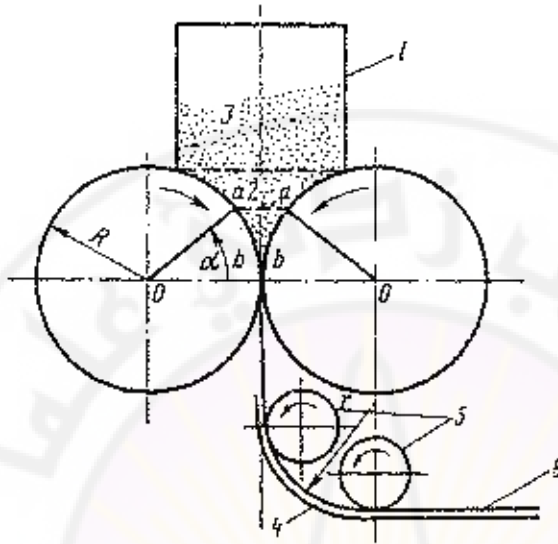
$$V_1 = V_2 \Rightarrow$$

$$\gamma_1 \cdot h_1 \cdot b_1 \cdot l_1 = \gamma_2 \cdot h_2 \cdot b_2 \cdot l_2 \quad (3-4)$$

حيث إن: h_1, h_2 الارتفاع (السماكة) قبل وبعد الدرفلة،
 b_1, b_2 العرض قبل و بعد الدرفلة،

l_1, l_2 الطول قبل وبعد.

γ_1 كثافة النقر للمسحوق ، γ_2 كثافة المدمج بعد الدرفلة.



يوضح الشكل (١٢-٤) رسماً تخطيطياً لعملية الدرفلة إلى شرائح، ١- خزان، ٢- درافيل، ٣- المسحوق، ٤- صفيحة توجيه، ٥- دهاريج توجيه، ٦- الشريط المدمج.

وتحسب نسبة التدميج Z_c في عملية الدرفلة بالعلاقة التالية:

$$Z_c = \gamma_2 / \gamma_1 \quad (4-4)$$

و حسب نظرية الدرفلة من الضروري حساب معامل الانضغاطية β و معامل الاستطالة λ :

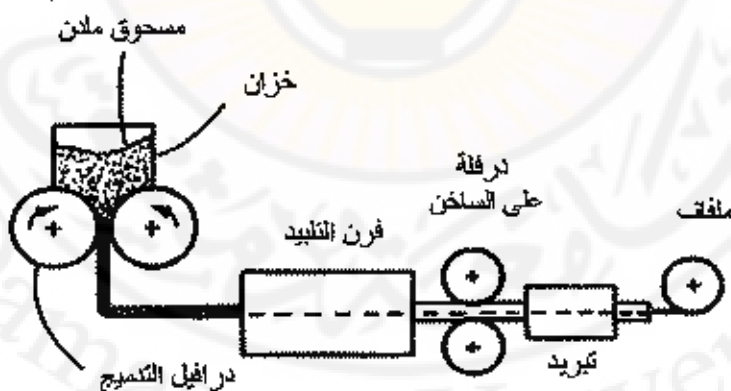
$$\beta = h_2 / h_1 \quad (5-4)$$

$$\lambda = l_2 / l_1 \quad (6-4)$$

و يمكن تقسيم عملية الدرفلة إلى مرحلتين أساسيتين، و ذلك بسبب اختلاف ظروف الانفعال على امتداد طول الشريحة الجاري تشكيلها:

١. المرحلة الأولى: و هي مرحلة غير مستقرة يمكن أن تؤدي إلى انعطاف الدرافيل إلى $120...180^\circ$. وفي هذه المرحلة يزداد الضغط المعدن على الدرافيل، مما يؤدي إلى الانفعالات المرنة و تغيير الفراغ ما بين الدرفيلين، وهنا يحدث دائما زيادة في السماكة و كثافة المسحوق المدرفل، كما تتغير ظروف تشكيل المسحوق مع امتلاء الحيز بين الدرفيلين بشكل مستمر لهذا تدعى هذه المرحلة بالمرحلة غير المستقرة.

٢. المرحلة الثانية: وهي تقسم لثلاث مراحل. أما الأولى فيحدث فيها عملية نقل المسحوق وخطفه أو إدخاله قسراً في الفراغ (الحيز) الموجود بين الدرفيلين، مع ملء منطقة التشكيل حتى لحظة ظهور طرف أمامي للشريحة ذي طول معين، والعامل المهم هنا هو انسيابية المسحوق و سرعته الخطية التي تتعلق بسرعة دوران الدرافيل، وذلك لضمان عملية الدرفلة المستمرة. أما الثانية فيحدث فيها الانفعال البنيوي للمسحوق، أي زيادة تكثيف أو تكديس الحبيبات بدون تشوهها، وهنا تؤثر خواص المساحيق (وخاصة شكل الحبيبات وحجمها ومدى تنويرها) في الكثافة. و أما الثالثة فيحدث فيها تشكيل المسحوق المشكل، وهنا يحدث الانفعال المرن و اللدن لجزيئات المسحوق، وفي النتيجة تلتصق الحبيبات بعضها مع بعض مما يحدد خواص المسحوق المشكل مثل الكثافة الخضراء أو المتانة الخضراء أو سماكة الشريحة...إلخ.



الشكل (٤-١٣) مخطط كنهاتيكي لعملية تصنيع الشرائح من المساحيق بالدرفلة

وتحسب الزاوية الحرجة للدرفلة بالعلاقة التالية:

$$\varphi = \sqrt{h_1 \cdot ((\gamma_2 \lambda / \gamma_1) - 1))} / R \quad (7-4)$$

حيث يكون: R - نصف قطر الدرفيل.

و تؤثر في سماكة شريحة الدرفلة وكثافتها العوامل التالية:

- أ- العوامل الهندسية: مثل قطر الدرفيل D ، و السماكة قبل الدرفلة h_1 ، والعرض الأولي وكذلك مدى انحراف الدرفيل.
 - ب- العوامل الفيزيائية والميكانيكية: مثل الوزن النوعي للمسحوق قبل الهز ووزنه النوعي بعد الهز، السيوية، وشكل الحبيبات، والسرعة الخطية للدرفلة، و لزوجة الدرفلة، سطح الدرفيل، واتجاه الدرفلة والخواص الكيميائية للمسحوق.
- تساعد هذه الطريقة على عدم إصابات المعدن بالأكسجين أو الآزوت أو الغازات الأخرى، وهي تستعمل بكثرة لكبس مساحيق المعادن النادرة كالنتغستين والتيتانيوم والموليبدينوم والزركونيوم....إلخ.

٤-٢-٦ التشكيل بالبتق Extrusion:

تستعمل هذه الطريقة في صناعة منتجات تتميز بنسب كبيرة بين طولها وعرضها مثل الأسلاك، الأنابيب، والقضبان...إلخ. تتلخص فكرة التشكيل بالبتق بإمرار شحنة المسحوق المعدني المعدة للكبس مضافاً إليها مادة تساعد على زيادة اللدونة، و تملك نسبة قليلة من الانسيابية، وهي إما أن تكون عضوية وإما غير عضوية بنسبة تصل من 6% إلى 10%. إن مزج هذين المركبين المسحوق والمادة المساعدة (الملدنة) يؤدي إلى نشوء مادة مشتركة ذات لزوجة ولدونة معينة، وتحت تأثير قوة ضغط كبيرة خلال مخروط قالب الكبس يتم تكثيف المسحوق نتيجة للاحتكاك المتولد بين المخروط وقالب الكبس. و يتميز الكبس بالبتق بإمكانية الحصول على منتجات ذات كثافة متجانسة و نقة الأبعاد ومنتجات كبيرة الطول وإنتاجية عالية لمختلف أنواع المساحيق مثل المساحيق القاسية والمساحيق صعبة الانصهار ومساحيق المواد ذات الأساس أكاسيد المعادن. ويجب أثناء عملية البثق مراعاة عملية تحضير المزيج وخلطه مع

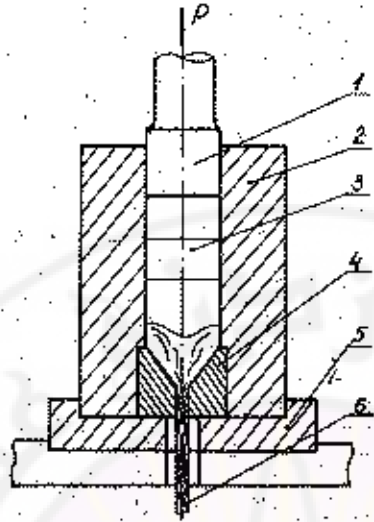
المادة الملدنة. ويستخدم الصمغ النشوي (نسبة الماء إلى النشاء ١/٤) أو محلول الغول البوليفينيل في الماء (١/٤)، أو محلول الكاوتشوك في البنزين (١/٢)، أو محلول الباكليت في الغول (١/١٠). أما الملدنات غير العضوية فهي الصلصال (الطين) والزجاج السائل بنسبة (١/٦).

تتقسم عمليات البثق إلى مرحلتين: تتضمن المرحلة الأولى مزج المسحوق مع مواد رابطة أو ملدنة عند درجة حرارة الغرفة، أما المرحلة الثانية فتتضمن بثق المسحوق عند درجة حرارة درجة حرارة منخفضة (حتى 600°C) أو مرتفعة حسب نوع المادة؛ إذ يسخن المسحوق مع قالب البثق، ويجب تعريض المزيج للتسخين في الهواء إلى درجة حرارة 400 - 500°C قليل عملية البثق كي لا تحترق المادة الملدنة. تستعمل في عمليات البثق المكابس الهيدروليكية فقط. وبسرعة ضغط المواد المسحوقة عبر قالب البثق يجب ألا تزيد على 5 - 10 mm/sec كي لا يظهر عدم تجانس في المسامية. و تحسب نسبة البثق K بالعلاقة التالية:

$$K = ((S - s) / s) \cdot 100 \quad (8-4)$$

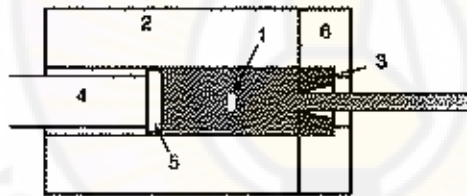
حيث إن:

S - مساحة مقطع أنثى القالب، s - مساحة فتحة البثق. ويجب أن تكون نسبة البثق أكبر أو تساوي 90%، $K \geq 90\%$ كما هو موضح في الشكل (٤-١٤). ويمكن أن تكون عملية البثق مباشرة أو غير مباشرة (عكسية)، كما هو موضح في الشكل (٤-١٥). وبعد عملية البثق تعرض المنتجات إلى عملية تجفيف للتخلص من الرطوبة الزائدة، إذا كانت المنتجات تتطلب عملية تلييد.

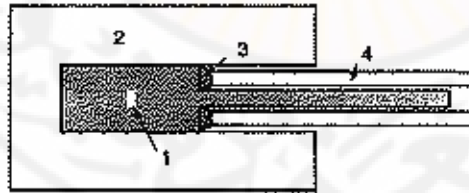


الشكل (١٤-٤) رسم تخطيطي لطريقة الكبس بالبتق

- 1- دافعة المكبس، 2- القالب، 3- خليط مسحوق مضاف إليه مادة ملدنة،
4- قوامة البثق، 5- قاعدة تثبيت، 6- المنتج



(a)



(b)

الشكل (١٥-٤) عملية البثق المباشر (a) وغير المباشر (b)

- 1- خليط مسحوق، 2- حاوية أو صندوق معدني، 3- قالب البثق، 4- ساق مكبس البثق،
5- دافعة مكبس البثق، 6- قاعدة تثبيت القالب

٤-٢-٧ التشكيل بالحقن (PIM) Powder Injection materials :

لا يختلف مبدأ عمل طريقة التشكيل بالحقن PIM كثيراً عن طريقة التشكيل بالبتق، ولكن الاختلاف فقط بدقة التصنيع وتشكيل مدمجات غاية في التعقيد من مختلف المساحيق، إذ يتم خلط المسحوق المعدني برابط عضوي من أجل تشكيل كتلة مرنة يتم تسخينها وحقنها تحت الضغط في قالب التشكيل المناسب، ثم يخرج المدمج ويسخن لإزالة مادة الربط، ثم ينقل لعملية التلييد. ومن مميزات عملية التشكيل بالحقن:

- الحصول على مدمجات أو قطع ذات كثافة نسبية عالية تصل إلى 95% وجاهزة للاستخدام، أي ليست بحاجة إلى أي عملية تشغيل لاحقة.
- تسمح السرعة في عملية التشكيل (10 - 90) Sec بالإنتاج الكمي.
- تسمح هذه العملية بتشكيل قطع أو مدمجات معقدة الشكل.
- شمولية هذه الطريقة، أي صالحة لتشكيل مختلف المساحيق المعدنية.
- إمكانية الحصول على مدمجات ذات نقية كبيرة ونعومة عالية للسطح.
- إمكانية أتمتة عمليات الإنتاج. انظر المخطط الصندوقي (شكل (٤-١٦)).

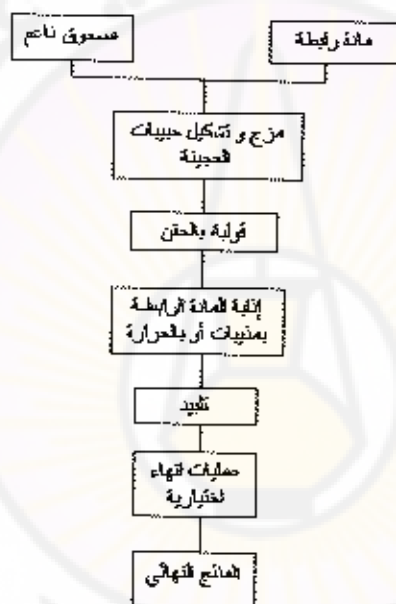
تستخدم عدة أنواع لمادة الربط مثل حبيبات البوليستر، البولي إيثيلين، البارافين، ديتيل فتالات، والأثير، وتكون عادة مكونة من مركبين أو ثلاثة مثل: (65% البارافين - 30% بولي بروبلين - 5% حمض الميثريك)، إذ ينصهر هذا المركب عند درجة حرارة 150°C. ومن الشروط الأساسية في عملية القولية بالحقن ألا يزيد حجم مادة الربط على 40% من الحجم الكلي للمزيج. أما مادة التزييت فهي سترات الزنك أو الزيت المعدني وغيرها.

ويمكن إضافة مواد أخرى إلى الخليط مثل القطران أو النفثالين... إلخ. ومن الضروري هنا أن يكون الخليط متجانساً كي تملأ المادة الرابطة كل الفراغات بين الحبيبات، وتؤمن انزلاق الحبيبات أثناء عملية التدميج (القولبة)، لأن لزوجة المزيج تتعلق بالعوامل التالية:

(١) عندما تكون نسبة المسحوق كبيرة بالنسبة للمادة الرابطة، فهذا يعني أن كمية المادة الرابطة غير كافية لملء الفراغات بين الحبيبات، ومن ثم تكون عملية القولبة صعبة.

(٢) زيادة نسبة المادة الرابطة أمر غير مرغوب فيه، لأن المنتج يفقد شكله أثناء عملية نزع المادة الرابطة، مما يتطلب قوة إضافية أثناء عملية المزج لإحكام المادة الرابطة بين الحبيبات.

(٣) يجب أن تحضر عجينة القولبة بحيث تتناسب بسهولة في قالب الحقن.



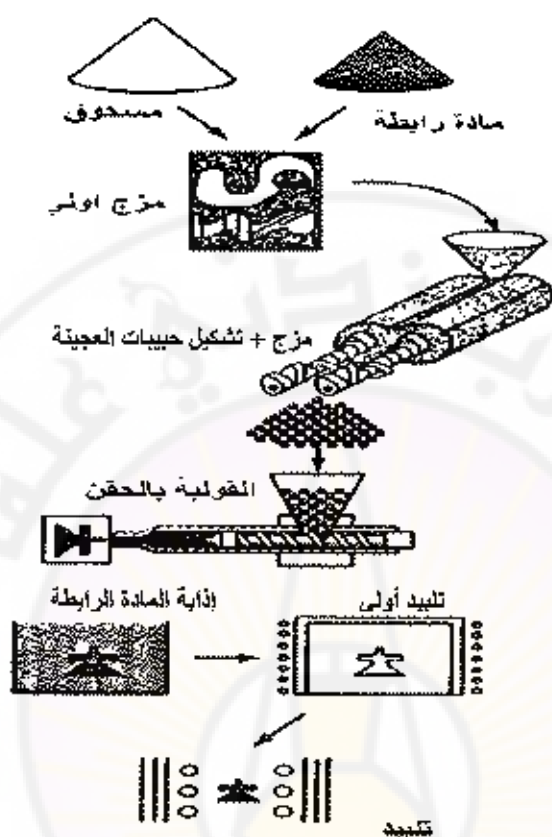
الشكل (٤-١٦) المخطط الصندوقي لعملية التشكيل بالحقن PIM

ولا بد من الإشارة هنا إلى أن عملية التشكيل بالحقن تتألف من ثلاث مراحل وهي: مرحلة الحقن: وظيفتها نظرية خلط التشكيل (العجينة) بسخينه حتى درجة حرارة معينة لتسهيل حركة انتقاله، ثم حقنه تحت تأثير الضغط المتردد في الأسطوانة الهيدروليكية. ثم مرحلة الضغط: وفي هذه المرحلة تتناسب العجينة إلى فجوة القالب

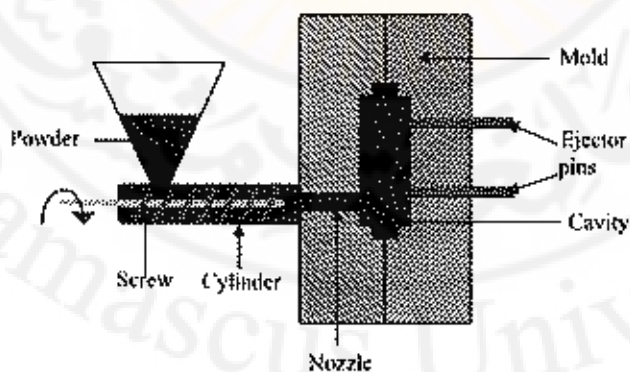
تحت تأثير الضغط، ومن ثم نصل إلى المرحلة الثالثة وهي التوصيل والملاوة: التي يتم فيها التبريد للتخلص من الحرارة الزائدة، ويبقى البوليمير متجمداً كي يحافظ على الشكل المدمج المقولب، ثم ينقل المدمج إلى مرحلة التلييد وإذابة المادة الرابطة، انظر الشكل (٤-١٧).

يمكن التشكيل بالحقن لقطع تتراوح كتلتها ما بين 0.1 - 150 gr. ويكون الانكماش في هذه الطريقة من التشكيل كبيراً، ويمكن التحكم به بحيث يكون ثابتاً ويمكن توقعه، وتستغرق عملية القولبة نحو 10sec وهي فترة قصيرة جداً بالمقارنة مع الطرق الأخرى. أما عيوب هذه الطريقة فهي استخدام مساحيق بالغة النعومة، يصل حجمها إلى أقل من 20 μm ويأشكال متقاربة. ولقد كان النيكل من أول المعادن المستخدمة في التشكيل بالحقن، وربما يرجع ذلك إلى سبب إنتاج مسحوق النيكل الناعم والمنتظم. كما تنتج المساحيق الخاصة بصناعة الكرييد المسمنت بصورة ناعمة أيضاً، وهي تقع ضمن الحجم المناسب لعملية التشكيل بالحقن.

إن طريقة القولبة بحقن المسحوق (PIM) تجمع بين تكنولوجيا حقن البوليمرات مع ميتالورجيا المساحيق، فيمكن تصنيع أي شكل عن طريق حقن المزيج في فجوة القالب، وقد تم إجراء العديد من الدراسات والأبحاث في الآونة الأخيرة للحصول على مساحيق ذات حبيبات كروية وذات أحجام دقيقة جداً، وذلك لزيادة تدفقها (انسيابها) خلال تجاويف القالب، وقد تركزت هذه الأبحاث على تحسين خواص المواد الرابطة وتحسين السلوك الريولوجي لمزيج (المسحوق/ مادة الربط) من أجل ملء أفضل للقالب، وتحسين الترابط عند عملية التلييد والخواص الميكانيكية والتحكم بالأبعاد، والجدول (٤-٢) يبين بعض خواص لأنواع الخلائط المستخدمة في عملية التشكيل بالحقن. والعجينة المؤلفة منها، كما أن الشكل (٤-١٨) يبين رسماً تخطيطياً لعملية الحقن في قالب الصوغ.



الشكل (١٧-٤) المخطط التكنولوجي لعملية التدميج بالحقن



الشكل (١٨-٤) رسم تخطيطي لعملية حقن المساحيق PIM في قالب التشكيل

الجدول (٤-٢) خواص بعض أنواع المساحيق وحجم الحبيبات المستخدمة في PIM

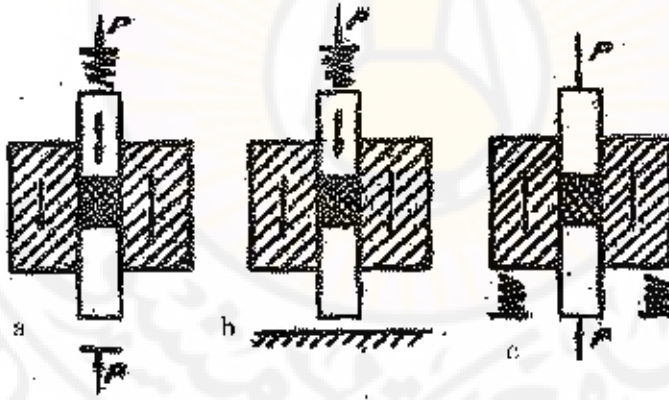
نوع المسحوق وحجم الحبيبات	المادة الرابطة، wt%	النسبة الحجمية للمسحوق، vol%	الكثافة g/cm ³	T _{injection} °C	اللزوجة Pa.s	المتانة MPa
4µm Fe	60PW-40PE	58	4.90	120	35	5
4µm Fe	55PW-45PP- 5SA	61	5.12	150	19	22
4µm Fe-2Ni	90PA-10PE	58	4.52	180	190	20
2.5µm Mo	60PW-35PP- 5SA	58	5.97	113	200	7
10µm stainless	55PW-45PP- 5SA	67	5.60	130	100	15
15µm stainless	90PA-10PE	62	5.33	190	80	20
12µm tool steel	90PA-10PE	62	5.33	190	180	20
8µm W	65PW-30PP- 5SA	56	11.22	142	--	5
1µm W- 10Cu	60PW-35PP- 5SA	64	11.44	135	55	6

حيث إن: SA- حمض الستريك ، PA- بولي أسيتال ، PW - شمع البارافين،
PP بولي بروبيلين، PE بولي إيثيلين.

٤-٢-٨ التشكيل بالاهتزاز:

بدأت عملية التشكيل بالاهتزاز في نهاية أربعينيات القرن الماضي، حين لوحظ أن استخدام الاهتزاز ونقر المسحوق في قالب الصوغ أو أثناء عملية التكثيف يؤدي إلى انخفاض ضغط التدميج بشكل كبير وزيادة تجانس الكثافة للمدمجات المعقدة الشكل. ومبدأ عمل هذه الطريقة أنه يؤثر في القطعة المراد تشكيلها ضغط ستاتيكي و اهتزازات، بحيث يتناقص ضغط الكبس بشكل كبير، ويزداد تجانس توزيع الكثافة في المدمج. ومن ميزات تأثير الاهتزاز على عملية التدميج هو اختلال التماسك الأولي بين جزيئات المسحوق، مما يؤدي إلى تسهيل عملية الانفعال نتيجة لانخفاض معامل الاحتكاك الداخلي والخارجي، يوجد ثلاثة مخططات للتدميج الاهتزازي مختلفة فيما بينها مبينة في الشكل (٤-١٩) وهي:

- أ- تدميج بمساعدة الاهتزاز الضاغط، والتكثيف يتم تحت تأثير الاهتزاز للسنبك سواء كان سنبكاً علوياً أم سنبكاً سفلياً لم كليهما معاً. الشكل (١٩-٤) (a).
- ب- تدميج بمساعدة اهتزاز كل من الضاغط والقالب، الشكل (١٩-٤) (b).
- ج- تدميج بمساعدة اهتزاز القالب، الشكل (١٩-٤) (c).
- تؤثر في عملية التشكيل بالاهتزاز و في خواص المدمج كل من الضغط المطبق، و حجم الحبيبات، و زمن التشكيل، و أبعاد المنتج، و وجود مادة الترابط والتزييت. إلا أن تأثير شدة الاهتزاز و سعته يكتد يكون كبيراً في كثافة المدمج، فكلما ازداد الاهتزاز زادت الكثافة، ولكن تؤثر أيضاً بشكل مباشر شكل الحبيبات ودرجة تكويرها. أثناء التشكيل الاهتزازي من الضروري جداً أن تطبق ضغطاً استاتيكيّاً يتراوح بين (0.5 - 5 MPa)، وذلك لتلافي الارتخاء ولمنع نشوء لتقال أو زحزحة للجزيئات، وتتراوح عادة الكثافة النسبية في هذه الطريقة ما بين 85 % - 65. ويمكن الوصول إلى الكثافة المتوقعة الأعظم خلال 10 - 12 Sec في بداية تطبيق الاهتزاز. والشكل (٢٠-٤) يبين علاقة كثافة المدمج بزمان الاهتزاز لبعض أنواع مساحيق المواد.



يوضح الشكل (١٩-٤) رسماً تخطيطياً لتسلسل عملية التشكيل بالاهتزاز

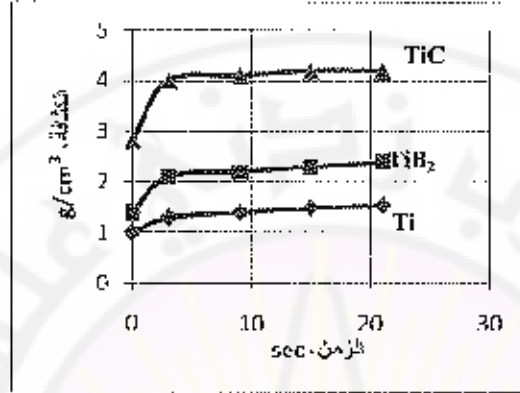
تحتسب سعة الاهتزاز A بالعلاقة التالية:

$$\Lambda = a / (\pi \omega / 30)^2 \quad (9-4)$$

حيث إن: A- سعة الاهتزاز cm.

a- التسارع cm/sec^2 .

v- الاهتزاز Hz خلال زمن 1min.



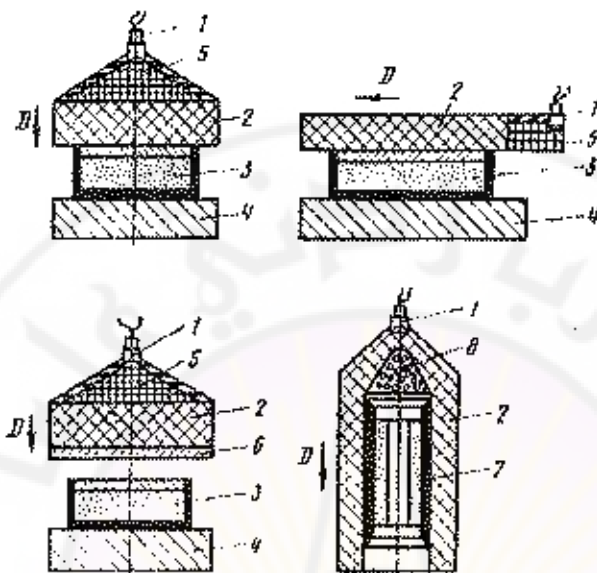
الشكل (٤-٢٠) علاقة كثافة التدمج بزمن الاهتزاز، $v = 14000 \text{ Hz}$

و تستخدم لتقليل قوى الاحتكاك بين الجزيئات مواد التزييت، التي يجب أن لا تزيد كميتها على 0.5 – 1.5%.

٤-٢-٤ التدمج النبضي:

هي عملية تشكيل المساحيق المعدنية وتدميجها بطريقة ديناميكية مثل طريقة التدمج بالانفجار، أو التدمج المقاد بالاحتراق CDC الذي يستعمل الطاقة الصادرة عن عملية احتراق الغاز الطبيعي، أو أن يستخدم نبضات كالتدمج بالسرعات العالية HVC التي تتضمن نبضات أو موجات صدمية مكثفة ومتكررة مولدة بواسطة مطرقة ذات تشغيل هيدروليكي خلال زمن معين لا يزيد على 1sec للحصول على الكثافة المطلوبة. لقد وجدت عملية التدمج هذه في الزمن الحاضر رواجاً كبيراً للسرعة العالية باستخدام الحمولات النبضية، وذلك لحل إحدى مشاكل تكنولوجيا تشكيل المساحيق. ومن مميزات هذه الطريقة القدرة على تحقيق قوى أعلى من تلك المستخدمة بالطرق الأخرى وسرعة التحميل العالية $v = 5 - 10 \text{ m/sec}$ ، أما زمن التدمج فيكون صغيراً جداً لا

يتجاوز أجزاء من عشرة آلاف جزء من الثانية، و من ثم نحصل على كثافة أعلى،
فمن أجل الحديد نحصل على كثافة تصل إلى $7.2 - 7.4 \text{ g/cm}^3$.

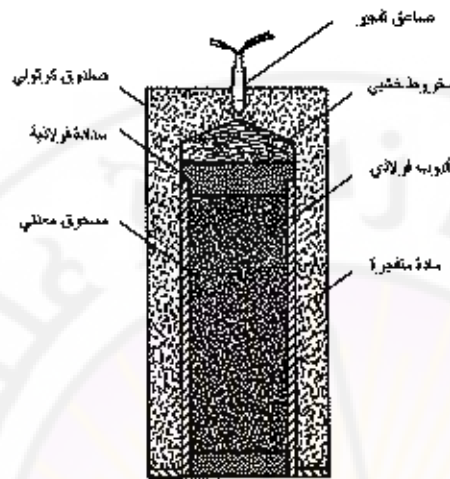


الشكل (٤-٢١) رسماً تخطيطياً لأنواع التشكيل النبضي بواسطة التفجير

١- موجة متولدة بالصعق، ٢- موجة عرضية، ٣- موجة صدمية، ٤- موجة حلقة
انزلاقية. ٥- صاعق كهربائي، ٦- مادة التفجير، ٧- حاوية فيها المسحوق، ٨- قاعدة
قوالبية، ٩- مولد موجات، ١٠- صفيحة صدم، ١١- مضغوطة أو قالب فيها المسحوق مع
دليل، ١٢- مخروط

إن السرعة العالية للتشكيل تؤدي إلى توليد الحرارة نتيجة الانفعال الحادث في
الجزئيات و الاحتكاك الداخلي المتولد بين الجزئيات والاحتكاك الخارجي ما بين
الجزئيات و قالب التشكيل. أما ضغط التشكيل فيمكن توليده إما بوضع مادة متفجرة
تؤدي لتوليد الحمولات على الجسم المسحوق، و إما بواسطة التشكيل
الكهروهيدروليكي إذ تتحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية في وسط سائل، أو
التشكيل الكهرومغناطيسي، وهذه الطريقة تعتمد على النبض الكبير المتولد من الحقل

المغناطيسي أو التشكيل بواسطة الهواء المضغوط إذ تستخدم الطاقة المتولدة عند التمدد الأدياباتي السريع للغاز المضغوط (هواء ، أزوت... إلخ).



الشكل (٤-٢١) رسم تخطيطي للتشكيل بالتفجير

٣-٤ التدميج على الساخن Hot compaction:

بالرغم من أن معظم الأجزاء الملبدة تصنع بكبس خليط المسحوق عند درجة حرارة الغرفة متنوعة بالتليد، فإن التدميج على الساخن مستخدم في بعض الحالات. فعند درجات الحرارة المرتفعة حيث تكون المعادن أكثر ليونة، فإنه بالإمكان عادة كبسها إلى كثافة عالية جداً دون زيادة الضغط المطلوب. وقد يكون بالإمكان الاستغناء عن عملية التليد المنفصلة، إلا أن هذا ليس عاماً، لأن التدميج على الساخن مسوَّغ فقط بالخصائص الأفضل كثيراً التي يمكن الحصول عليها. كذلك فإن خطوة تليد لاحقة لا محالة منحسن الخصائص الميكانيكية. واستخدام التدميج على الساخن مفيد بالتكلفة الأكبر بكثير، إذ يتطلب وجود قوالب خاصة مقاومة للحرارة، وجوَّاً وقائياً يمكن التحكم فيه، لإضافة إلى أن معدلات الإنتاج نسبياً، متدنية جداً. ويستخدم هذا الأسلوب في إنتاج أشكال المعادن الصلبة وأدوات القطع الماسية المترابطة، اللذين يكونان في أي حالة مواد غالية وباهظة التكاليف.

تُحسب سرعة تَكَثُّفِ مَهِمَّاتِ المَسَاحِيقِ عِنْدَ الكَبَسِ عَلَى السَّاحِخِ بِالعَلاقَةِ التَّالِيَةِ:

حَبِيبًا لِّنَّاسٍ

إذا كانت الإجهادات الناشئة نتيجة للتحميل فوق حد الخضوع σ_y للمسحوق المراد تدميجه، فإنه يظهر الانكماش نتيجة للانفعال اللدن ϵ_{pl} ، وتكون آلية تكثيف المدمج

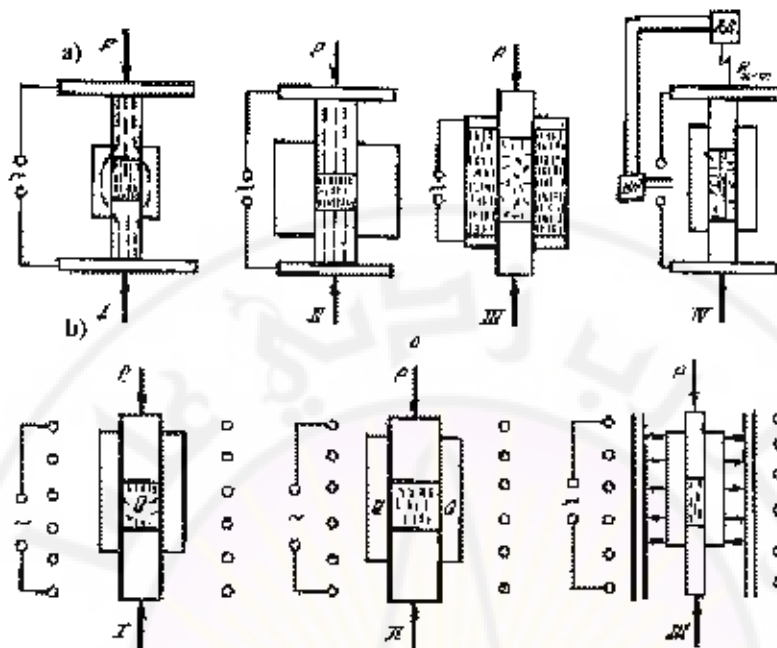
مشابهة لآلية التكتيف الناتجة عن عملية التليد: تشكيل الالتحام بين الجزينات، ازدياد الكثافة ونمو الأبعاد وبالنتيجة نمو الجزينات عند زيادة بسيطة في الضغط. تتعلق خواص مدمجات المساحيق عند الكبس على الساخن بظروف عملية الضغط. وهي تملك حدّ خضوع أكبر، ومطيلية أكبر، وقساوة أكبر، وناقلية كهربائية أفضل، وأبعاداً أكثر دقة من المدمجات المصنعة بالطريقة المجزأة، أي كبس على البارد ثم تليد. كما تمتاز هذه المدمجات ببنية حبيبية ناعمة، لا تختلف كثيراً عن المنتجات المصنعة بالطرق التقليدية. وتستخدم لعملية التسخين تيار كهربائي كما هو مبين في الشكل (٤-٢٢)، ويستخدم القالب الغرافيتي عند درجات حرارة مرتفعة، أما عند درجات الحرارة المنخفضة فتستخدم القوالب الفولاذية المقاومة للحرارة، أما المكابس فتكون إما ميكانيكية وإما هيدروليكية وإما تعمل بالهواء المضغوط. ويمكن أن تكون عملية التليد عند التدميج على الساخن بواسطة الصعق الكهربائي أو عن طريق النبضة الكهربائية عبر المسحوق بمساعدة الكترود منبك قالب الضغط.

ومن عيوب عملية الالمنخفضة، الساخن:

- ارتفاع كلفة قالب التشكيل وقصر عمره الزمني.
- الطاقة الإنتاجية المنخفضة ، لأن دورة التسخين والكبس تكون أكبر.
- الحاجة المستمرة لاتخاذ الإجراءات الوقائية للسيطرة على الجو المحيط أثناء مراحل التشكيل والتبريد.

أما مزايا عملية التدميج على الساخن:

- مقاومة شد وصلادة مُحسّنة وأحياناً استطالة أفضل.
- كثافة أعلى.
- دقة في أبعاد المدمجات أفضل.
- تقلدي الصعوبات الناتجة عن الأكسدة في جو محيط مسيطر عليه.



الشكل (٢٢-٤) طرق تسخين المسحوق عند عملية التدميج على الساخن

(a) - مرور التيار الكهربائي بشكل مباشر عبر المسحوق و القالب (I)، عبر المسحوق

(II)، و عبر القالب (III)، تيار نبضي عالي الجهد،

(b) - تسخين تحريضي للمسحوق (I)، أو للقالب (II)، أو عبر لوح بيني (III)

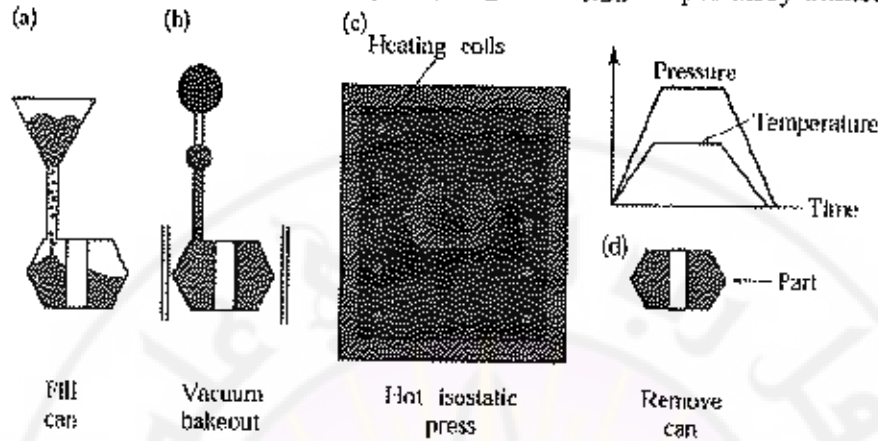
١-٣-٤ الكبس الإيزوستاتيكي على الساخن Hot iso-static pressing:

يعني مصطلح HIP في ميتالورجيا المساحيق الكبس تحت تأثير الضغط المتماثل من جميع الاتجاهات على الساخن، وله العلاقة نفسها مع الكبس تحت تأثير الضغط المتماثل من جميع الجهات على البارد تماماً كالتي تربط بين الكبس على الساخن والكبس على البارد، ولكن هذه المماثلة تنتهي عند هذا الحد. ولكن كبس كبس التضاضط المتوازن أو المتماثل على الساخن يتم القيام به لمعظم الأجزاء عند درجات حرارة عالية، بحيث إن استخدام الضغط السائل ليس قابلاً للتطبيق العملي، وفي الممارسة العملية فإن الغاز الخامل، وهو الأرجون، هو المستخدم. والسبب في استخدام

هذا الغاز الخامل، بالرغم من أنه غال، هو أن أي غاز آخر عند درجة حرارة وضغط عاليين يتفاعل مع المادة التي يتم تدميرها ومع المواد المصنوعة منها المعدات. وتتألف المعدات في هذا الأسلوب بصورة رئيسية من حاوية الضغط، التي يكون قد وضعت في داخلها فرن بسخن كهربائياً يحيط بمنطقة عمل مركزية توضع فيها قطع الشغل. كذلك تم توفير عزل بين الفرن ووعاء الضغط، كما تم وضع مزدوجات حرارية thermocouples لقياس درجة الحرارة في النقاط الاستراتيجية.

وهذا الأسلوب في أبسط أشكاله يكون بوضع أو حمل قطعة الشغل إلى داخل الحجرة ثم إغلاق الفتحة العلوية، وإدخال غاز الأرجون المضغوط. وإذا بدأ تشغيل الفرن فإن درجة الحرارة ترتفع أوتوماتيكياً بالإضافة أنها تزيد الضغط، والكثير من المعدات المتاحة تجارياً الآن يمكن أن تشغل عند 2000°C و 2000 bar ضغط. وكلما ارتفعت درجة الحرارة أصبحت المواد أكثر ليونة، بحيث يمكن تحقيق كثافة كاملة فوراً. وبما أن الغاز يكون خاملاً، فإن أي كمية من غاز الأرجون المحتجزة في المسام المتصلة بسطح قطعة الشغل أو في الفراغات البينية إذا كان المسحوق قد عولج بالضغط الإيزوستاتيكي على الساخن HIP فإنه سيكون قد ضغط فقط وسيبقى (أي الغاز) كإقطاع في المعدن مما يؤدي إلى الإضرار بالخواص الميكانيكية للمركب النهائي. ولهذا السبب، فإن الأجزاء التي سبق أن تم تلييدها لا بد أن تكون ذات مسامية مترابطة لطيفة جداً مفتوحة على السطح، وهذا يعني في الممارسة العملية أنها يجب أن تتمتع بكثافة تزيد على 90% من الكثافة النظرية، وفي الحالة التي ستكون فيها المسام إما محتوية على الهواء، وإما لا شيء، إذا كان الجزء قد تم تلييده في الفراغ. وعلى درجة الحرارة والضغط العاليين المستخدمين، فإن الهواء إما أن يتفاعل مع و إما يذوب في المعدن مفسحاً المجال لحدوث إغلاق كامل للمسام. ويكون أسلوب الضغط الإيزوستاتيكي على الساخن HIP قد طبق الآن بصورة روتينية ليس على مواد ميتالورجيا المساحيق فحسب، بل أيضاً على المصبوبات، من أجل الحصول على كثافة تامة، وتبعاً لذلك الحصول على أفضل الخواص الميكانيكية الممكنة. والمعادن

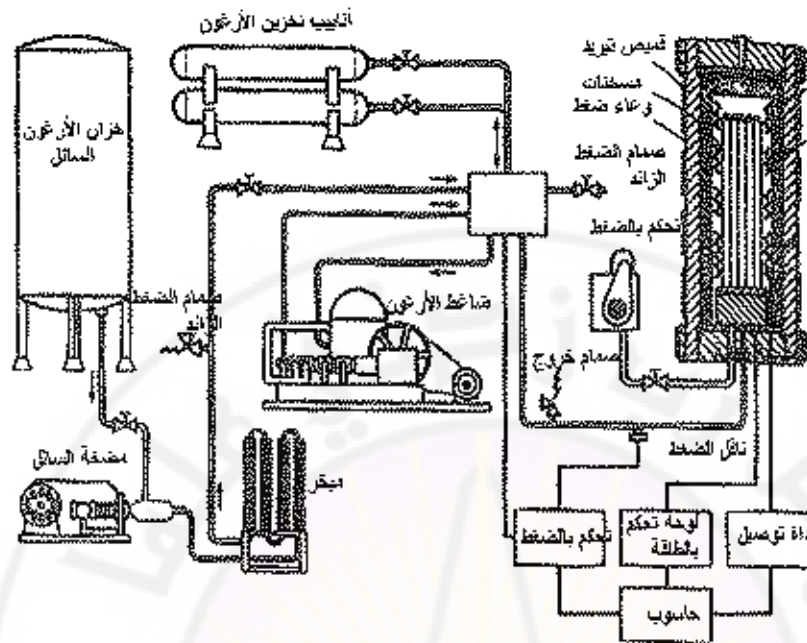
الصلبة كالكربيدات المسننة هي أشياء مفيدة بصورة بارزة كريش سبائك ممتازة
super alloy blades لتوربينات الغاز عالية الحرارة.



الشكل (٤-٢٣) مراحل عملية الضغط الإيزوستاتيكي على الساخن HIP

(a) عملية ملء القالب، (b) عملية تفريغ الهواء، (c) عملية التسخين والضغط الإيزوستاتيكي
وفي الآونة الأخيرة، تطور أسلوب جديد في إنتاج القطع أو المشغولات والمعروف
باسم التلييد - الضغط المتماثل على الساخن sinter- HIP في احتلال مركز بارز. إذ
إنه في هذا الأسلوب، يتم القيام بالتلييد الأولي للمدمجات وتبعاً لذلك تكثيفها في الحاوية
نفسها في دورة واحدة. ومن أجل تجنب تعقيد الغاز في المسام، فالتلييد يتم القيام به في
الفراغ، وإذا كانت كثافة الـ 90% الضرورية قد تحققت، فإن الضغط بالأرغون يكمل
العملية. أما الجدوى الاقتصادية لهذا الأسلوب بالمقارنة مع التلييد العادي المتنوع
بأسلوب الضغط المتماثل على الساخن HIP في عملية منفصلة فتكون واضحة جلية،
و أصبح مقبولاً في صناعة المعادن الصلبة تفوق عملية التلييد على الضغط المتماثل
على الساخن sinter- HIP على الأسلوب القديم المنفصل.

ويبين الشكل (٤-٢٥) الدارة المغلقة لعملية التدميج الإيزوستاتيكي على الساخن والغاز
المستخدم.

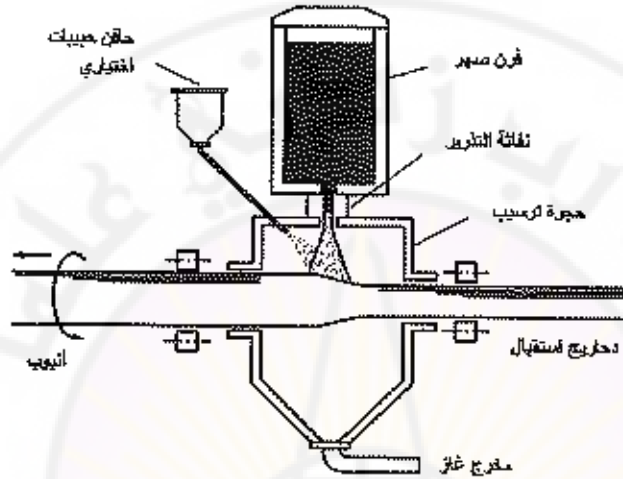


الشكل (٤-٢٥) دائرة التدميج الإيزوستاتيكي على الساخن

٢-٣-٤ التشكيل بالرشي Spray Forming:

حقق هذا الأسلوب تقدماً تجارياً كبيراً في الآونة الأخيرة، إذ يستدعي هذا الأسلوب القيام بتبرير المعدن المسائل بواسطة الغاز مثل (النيتروجين)، ولكن بدلاً من السماح للقطرات بالتصلد كمسحوق، أتيح لتيار الرش (الرذاذ) أن يرتطم على سطح صلب بحيث إن القطرات السائلة أو شبه الصلبة تتسطح بفعل الصدم وتتصلب على شكل طبقة من المعدن المكثف. ويمكن بناء هذه الطبقة إلى أي سماكة مطلوبة، وذلك بالاختيار المناسب لتصميم الهدف وزاوية الرش (التريذ) والعوامل الأخرى، وبذلك يمكن إنتاج الأشكال القريبة من النهائية، فمثلاً إذا كان الهدف أسطوانة تدور أفقياً وقابلة لأن تتحرك بطريقة متحكم بها في الاتجاه المحوري، فإن بالإمكان عندئذ تشكيل أنبوب من معدن مرستب، ويكون لذلك المرستب كل مزايا المعدن المكثف المنتج من المسحوق، أي الانعدام التام للفصل والعزل على المستوى المجهري للمركب وكذلك

لإعداد الأجزاء الأنبوبية pipe، التي تتكون عادة في الصببات عند الأطراف نتيجة للتصلب، كما في الشكل (٤-٢٦). وزيادة على ذلك فإن حقن حبيبات مسحوق ناعم مقاوم للحرارة، مثلاً بواسطة إمرارها في نفق تيار الغاز المذرع، فإن مادة مقواة بالتشبت يمكن أن تترسب.



الشكل (٤-٢٦) تشكيل أنبوب بالرش

٤-٤ نظرية التدميج:

١-٤-٤ العلاقة بين كثافة المدمجات و ضغط التدميج:

تعرف عملية التدميج أو ما يسمى ضغط المسحوق، الذي هو عبارة عن عملية تشكيل في قالب الصوغ تحت تأثير الضغط، أما المدمج فهو عبارة عن المسحوق المشكل، الحاصل عن عملية الضغط، و يتلخص مبدأ عملية الضغط بنشوء الحجم للمسحوق المناسب في قالب الصوغ تحت تأثير الضغط، بحيث يتناقص الحجم الأولي ويتشكل المدمج بالشكل أو الحيز المخصص له ضمن قالب الصوغ أو التشكيل بالأبعاد والخواص الناتجة. يتغير حجم الجسم المسحوق عند عملية الضغط نتيجة لاحتكاك الحبيبات لتعبئة الفراغات فيما بينها و تشكلها في الشكل الجديد، كم هو موضح في

الشكل (٤-٣). حيث تمر عملية التدميج بثلاث مراحل: هي مرحلة ملء الفراغات ومرحلة الانفعال المرن والانفعال اللدن، ومرحلة تقلص البعاد وتشكيل المدمج. إنه من الصعب شرح كيف سيتغير الضغط خلال عملية ذلك أو رص المسحوق حتى الوصول إلى زوال المسامات. ومعروف أن الإجهاد في كل جزيء لا يمكن أن يزيد على القيمة العظمى، كما أن تحليل توزيع الإجهادات على الحبيبات عند ملء قالب الصوغ صعباً.

إذا كان d_0 القطر الأصلي للحبيبة، و d قطر سطح التلامس مع سنبك المكبس، و h ارتفاع الجسم بعد الضغط تحت تأثير القوة F ، و كان الإجهاد الأعظم عند التشوه اللدن، فيمكن حساب d من العلاقة التالية:

$$d^2 = 4F / \pi \sigma_{max} \quad (11-4)$$

وبحسب الارتفاع حسب نشر ماكلورين بالعلاقة التالية:

$$h = d_0 / ((d_0 - d)^2 + 3d^2/2 + 3\pi d (d_0 - d)/4) \quad (12-4)$$

وبتعويض (8) في (9) نحصل على:

$$h = d_0 / \{ 1 + (3\pi/4 - 2)(4F/\pi d_0 \sigma_{max})^{1/2} + (10 - 3\pi)/8 (4/\pi)(F/d_0^2 \sigma_{max}) \} \quad (13-4)$$

بحيث تم إهمال القوى القطرية، التي تنشأ نتيجة للتشوه المحدود لجدران أسطوانة القالب. ويحدد الوزن النوعي للمكبوس بالعلاقة التالية:

$$\gamma' = 2d_0 \gamma / 3h \quad (14-4)$$

حيث γ - الوزن النوعي للمعدن المصمت، ولكن الكثافة النسبية:

$$\theta = \gamma' / \gamma_t \quad (15-4)$$

وبتبدل h بقيمتها من العلاقة (10) فتصبح العلاقة (12) على النحو التالي:

$$\theta = 2/3 \{ 1 + ((3\pi/4) - 2) (p/\sigma_{max})^{1/2} + ((5/2) - 3\pi/4) \cdot p/\sigma_{max} \} \quad (16-4)$$

حيث إن: p هو الضغط المطبق على الأسطوانة:

$$p = 4F/\pi d_0^2 \quad (17-4)$$

و العلاقة (13) هي من النوع:

$$\theta = \gamma'/\gamma_t = k_1 + k_2 p^{1/2} + k_3 p \quad (18-4)$$

حيث k_1 و k_2 و k_3 - قيم ثابتة.

ويمكن تقريب العلاقة (15) إلى معادلة عامة لقطع مكافئ:

$$\theta = \gamma'/\gamma_t = k_1 + k_2 p^{1/2} \quad (19-4)$$

ويمكن تقريب هذه العلاقة من علاقة الإجهاد - الانفعال $\sigma - \epsilon$ الحقيقي في حالة الضغط، وإذا لم يحصل تشويه في الحبيبات وزيادة في التصليد أثناء عملية الضغط فإن الكثافة النسبية من الممكن أن تتناسب مع ضغط الكبس تناسباً لوغاريتمياً وفق علاقة بالشين:

$$Lgp = -L(\beta - f) + lgp_{max} \quad (20-4)$$

$$\text{and:} \quad lgp = -m \lg \beta + lgp_{max} \quad (21-4)$$

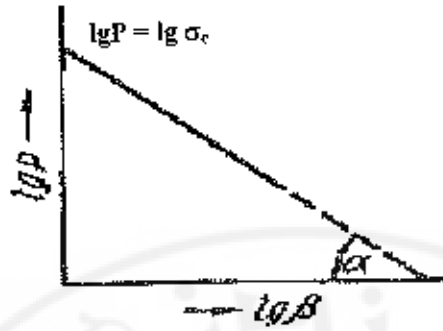
$$\text{or:} \quad lgp = m \lg \theta + lgp_{max} \quad (22-4)$$

حيث: p - الضغط المطبق، p_{max} - الضغط الذي يؤمن مدمج بلا مسامات، m ، L - ثوابت تتعلق بمؤشر الضغط وبطبيعة المسحوق، θ ، β - الكثافة النسبية والحجم النسبي للمدمج.

فإذا كانت $\beta = 1$ نحصل على الإجهاد الحرج σ_c وهو النسبة بين ضغط المكبس و مساحة مسقط سطح التلامس لطبقة واحدة من حبيبات المسحوق المعرض للكبس على المستوي الأفقي:

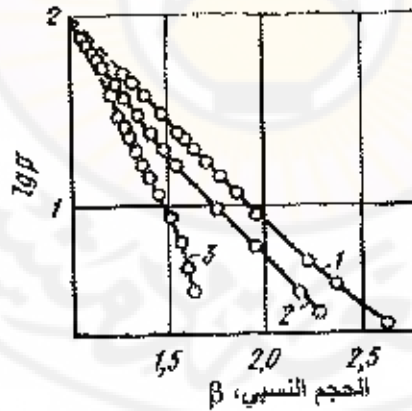
$$\lg p_{max} = \lg p = \lg \sigma_c \quad (23-4)$$

يبين الشكل (٢٧-٤) رسم توضيحي للعلاقة اللوغاريتمية بين الضغط بالحجم النسبي، وهو ما يفسر خضوع حبيبات المسحوق أثناء الضغط لقانون هوك. كما تؤثر سرعة الكبس تأثيراً كبيراً في كثافة المدمجات، فعند الكبس البطيء نحصل على مدمجات ذات كثافة عالية. كما أن تكرار عملية الكبس بضغط متغير - يؤدي إلى الحصول على مدمجات عالية الكثافة أيضاً.



الشكل (٢٧-٤) المنحني اللغاريتمي لعلاقة الحجم النسبي بالضغط

لا بد من ضغط قليل من أجل الحصول على كثافة قليلة للمساحيق عند كثافة مسكوب حر (بدون هز) كبيرة، كما هو موضح في الشكل (٢٨-٤). وزيادة نسبة التكتيف إلى 100% أي عندما يكون $(\beta = 1)$ ويكون الضغط متقارباً للمساحيق ذات التركيب الكيميائي المتجانس، كما أنه لا تؤثر الخواص الفيزيائية مثل حجم وشكل الحبيبات، و الوزن النوعي للسكب الحر (الكثافة) بشكل مباشر في P_{max} ولكن تؤثر بشكل كبير في انضغاطية المساحيق، لذلك من الضروري من أجل الحصول على مدمجات ذات الكثافة المطلوبة زيادة ضغط الكبس مع نمو تشتت الجزيئات.



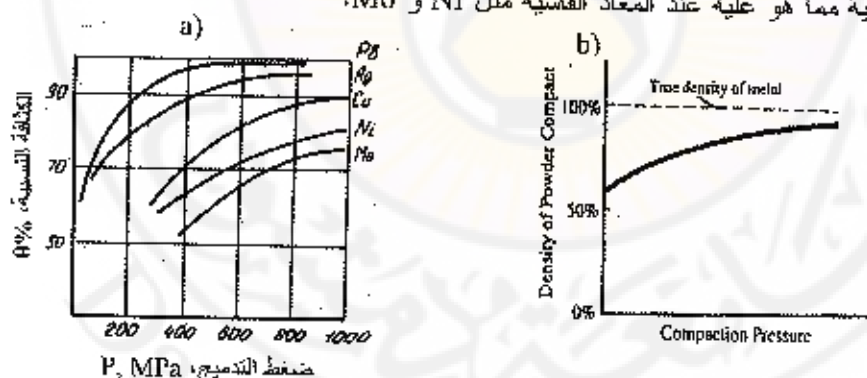
الشكل (٢٨-٤) علاقة الضغط بالحجم النسبي لمسحوق النحاس ذي كثافة المسكوب
1) $\gamma' = 0.97 \text{ g/cm}^3$, 2) $\gamma' = 1.5 \text{ g/cm}^3$, 3) $\gamma' = 4.5 \text{ g/cm}^3$

إن قيمة مؤشر الضغط m لمعظم المساحيق يكون ثابتاً عند مجال كبير للضغط، وقيمته تصل $m \geq 3$. والضغط الأعظم ضروري للحصول على مدمجات بلا مسامية أي مصمتة، مساوياً لضغط المادة حسب قساوتها. انظر الجدول (٣-٤):

الجدول (٣-٤) بعض الخواص الفيزيائية للمسحوق الحر

نوع المادة	كثافة المسحوق المنكوب الحر، $[g/cm^3]$	الكثافة النظرية للمادة $[g/cm^3]$	القساوة للمسحوق $HB_{max} [MPa]$
الزئاض	5.4 - 5.7	11.3 - 11.4	100
القصدير	3.2 - 3.8	7.3	140
الفضة	1.8 - 2.2	10.5	760
النحاس	1.5 - 2.5	8.3 - 8.9	920 - 1090
الألمنيوم	1.0 - 1.7	2.5 - 2.7	420
الحديد	1.8 - 3.0	7.8 - 7.85	1260 - 1330
التنجستن	2.4 - 4.0	19.3	4000

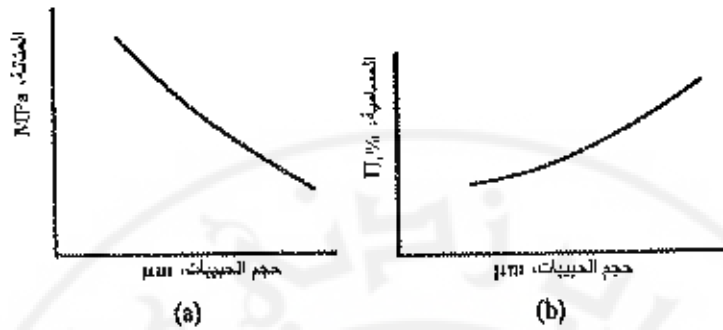
والشكل (٢٩-٤) يبين علاقة الكثافة النسبية بالضغط في الشروط الطبيعية للمعادن اللدنة، مثل Pb ، Ag ، و Cu ، حيث يبين الشكل إمكانية الوصول إلى كثافة نسبية عالية مما هو عليه عند المعاد القاسية مثل Ni و Mo .



الشكل (٢٩-٤) علاقة الكثافة النسبية بضغط التدميج

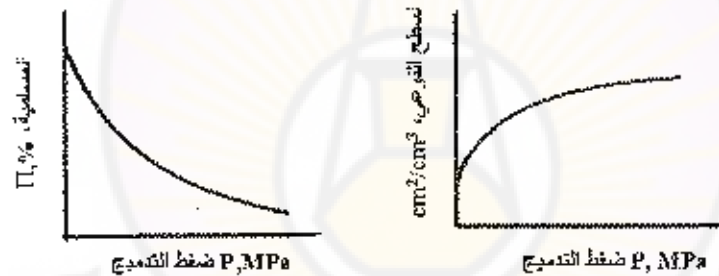
a- للمواد المختلفة، b- العلاقة العامة

ويؤدي زيادة حجم الحبيبات إلى زيادة المسامية ومن ثم نقصان المقاومة أو المتانة، كما هو موضح في الشكل (٣٠-٤)



الشكل (٣٠-٤) علاقة المتانة (a) والمسامية (b) بحجم الحبيبات

والشكل (٣١-٤) يبين علاقة ضغط التدميج بكل من المسامية والسطح النوعي، فكلما زاد ضغط التدميج نقصت المسامية والعكس صحيح بالنسبة لسطح التلامس.

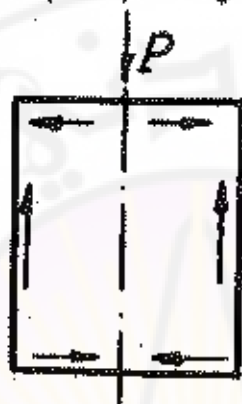


الشكل (٣١-٤) علاقة ضغط التدميج بالمسامية و السطح النوعي

٢-٤-٤ الضغط الجانبي:

يسلك المسحوق أثناء التدميج بالضغط سلوكاً مشابهاً لسلوك السائل، ويتحرك جزيئات المسحوق ليس فقط في اتجاه التحميل، ولكن تتجه نحو الجوانب أي باتجاه جدران القالب، وخاصة عند الكبس باتجاه واحد، يسمى هذا الضغط بالضغط الجانبي. ولكن خلافاً لما يجري في السائل فإن المسحوق ينقل الضغط إلى الاتجاهات بشكل غير منتظم، هذا مرتبط بالاحتكاك بين الجزيئات وبمعامل أخرى تعيق حركة انتقال

الجزئيات إلى الجهات المختلفة. مما يؤدي إلى توزيع غير منتظم للكثافة، حيث تتلامس الطبقات العلوية مع جوانب السنيك العلوي المتحرك وبتزايد الكثافة من المركز باتجاه الجوانب، أما في الطبقات السفلية الملاصقة للسنيك الثابت فيكون توزيع الكثافة معاكساً تماماً للطبقات العلوية، حيث يتزايد الضغط من الجوانب باتجاه المركز، وتبقى الكثافة في المركز ثابتة دون تغيير كما في الشكل (٣٢-٤).



الشكل (٣٢-٤) مخطط توزيع الكثافة في المدمجات عند الضغط أحادي الاتجاه
تسمى نسبة الضغط الجانبي إلى الضغط المحوري بمعامل نسبة الضغط الجانبي ξ و يجب أن يكون أصغر أو مساوياً للواحد:

$$\xi = P_{\parallel} / P \leq 1 \quad (24-4)$$

حيث إن: $P_{\parallel}$ - الضغط الجانبي (الناظمي)، P - الضغط المحوري المطبق.
ومعلوم أن الانفعال المرن عند الضغط يساوي حاصل قسمة كل من الإجهاد أو الضغط (P أو $P_{\parallel}$) على معامل المرونة E ، أما مقدار الانفعال عند الضغط مضروباً بمعامل بواسون ν فيسمى التوسع العرضي المرن، والذي هو عبارة عن مجموع التوسع العرضي المرن بالاتجاه الأفقي $(P/E) \cdot \nu$ والتوسع العرضي الناتج عن تأثير الضغط الجانبي لجدار الغالب أي يساوي:

$$(P/E) \cdot \nu + (P_{\parallel}/E) \cdot \nu = P_{\parallel}/E \quad (25-4)$$

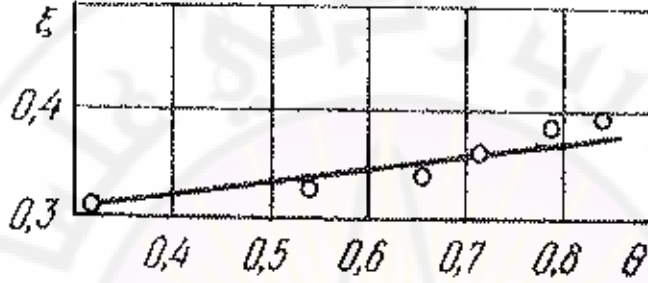
ومنه:

$$P.v = P_n(1 - v) \quad (26-4)$$

$$\Rightarrow \xi = P_n / P = v / (1 - v) \quad (27-4)$$

$$v = \xi / (1 + \xi) \quad (28-4)$$

يتناقص الضغط الجانبي مع ارتفاع المدمجات، بينما يزداد معامل الضغط الجانبي مع ازدياد الكثافة النسبية للمدمجات، كما هو موضح في الشكل (٣٣-٤):



الشكل (٣٣-٤) علاقة معامل الضغط الجانبي بالكثافة النسبية

٤-٣-٤ تأثير الاحتكاك في جدران قالب التشكيل:

تتحرك الجزيئات في قالب التشكيل أثناء الضغط في الاتجاه الشاقولي وفي الاتجاه الأفقي. تنشأ قوى الاحتكاك عندما تتحرك الجزيئات على طول القالب وعلى طول سطح السنيك، مما يؤدي إلى إعاقة حركة الجزيئات وإنفاص ضغط التدميج، ويمكن تقسيم الاحتكاك إلى قسمين أساسيين: احتكاك خارجي بين الجزيئات وسطح قالب التشكيل واحتكاك داخلي يحدث فيما بين الجزيئات نفسها. يؤدي الاحتكاك الخارجي إلى عدم التوزيع المتجانس للكثافة عبر العمق، ويمكن تمثيل الضغط المطبق على عينة من المساحيق أسطوانية الشكل كما هو مبين في الشكل (٣٤-٤)، ويمكن تبسيط العينة وتصغيرها لتصبح عبارة عن قرص متناهي في الصغر قطره D وسماكته dH . ينتقل الضغط المطبق من الأعلى P_n اللازم للتدميج عبر العينة نحو الأسفل، مما يؤدي إلى خروج الضغط المنتقل P_f من الجهة الأخرى، ويكون فارق الضغط المؤثر

في القرص المتناهي في الصغر ذا السماكة dH اللازم لتدميجه أو تشكيله من المساحيق حسب العلاقة التالية:

$$dP = P - P_b \quad (29-4)$$

حيث إن: $-P$ الضغط المؤثر في السطح العلوي للقرص،
 $-P_b$ الضغط المؤثر في السطح السفلي للقرص.
 بينما تكون قوة الاحتكاك المؤثرة في جدار القالب مساوية لـ:

$$F_f = \mu \cdot F_n \quad (30-4)$$

حيث إن:

μ - معامل الاحتكاك بين جدار القالب وجسيمات المسحوق

F_n - القوة الناعمية (قوة الضغط الجانبي) المؤثرة عمودياً في جدار القالب.

ويحدث التوازن الستاتيكي المكتسب لمجموع قوى الضغط المؤثرة عندما تتسارع أو تتباطئ حركة المسحوق داخل قالب التشكيل تحت تأثير الضغط المطبق P_b ، ومن ثم يكون مجموع القوى المؤثرة مساوياً للصفر حسب العلاقة التالية.

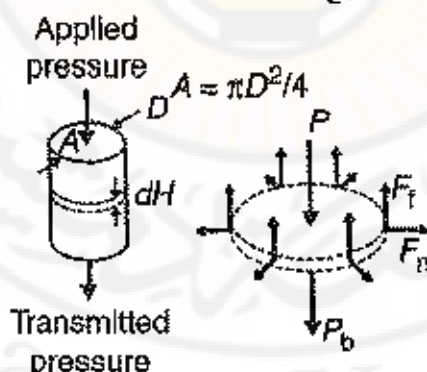
$$\sum_{i=1}^n F = 0 \quad (31-4) \Rightarrow$$

$$A \cdot dP + \mu \cdot F_n = 0 \quad (32-4) \Rightarrow$$

$$dP = -\mu \cdot F_n / A \quad (33-4)$$

حيث أن: A - مساحة مقطع القالب وتساوي $A = \pi D^2/4$

D - قطر قالب الصوغ



الشكل (٤-٣٤) توزيع الضغط على عينة أسطوانية الشكل

ويكون الضغط الجانبي (الناظمي) المؤثر في جدار القالب ثابت، وبمراعاة نسبة الضغط الجانبي إلى الضغط المحوري ξ فإنه تحسب القوة الناضمية (الجانبية) من العلاقة التالية:

$$F_n = \pi D \cdot dH \cdot \xi \cdot P \quad (34-4)$$

ولكن قوة الاحتكاك تساوي:

$$F_f = \mu \cdot F_n = \mu \pi D \cdot dH \cdot \xi \cdot P \quad (35-4)$$

وبالتعويض في العلاقة (30) يمكن حساب فرق الضغط المطبق:

$$dP = - \frac{4\mu \pi D \cdot \xi \cdot P \cdot dH}{\pi D^2} = - \frac{4\mu \xi P \cdot dH}{D} \quad (36-4)$$

وبما أن هذه العلاقة تفاضلية متغيرة مع الارتفاع h ، فيمكن استخدام التكامل للضغط ضمن الحدود من $P = P_a$ و $h = 0$ إلى $P = P_x$ حسب الارتفاع $h = x$ عندها:

$$\int_{P_a}^{P_x} \frac{dP}{P} = - \frac{4\mu \xi}{D} \int_0^x dH \quad (37-4)$$

ومن ثم نؤول العلاقة:

$$\ln \frac{P_x}{P_a} = - \frac{4\mu \xi x}{D} \quad (38-4)$$

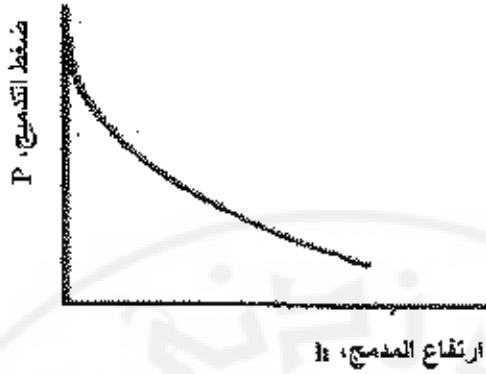
أو نكتب بالشكل الأسّي:

$$P_x = P_a \cdot \exp \left(- \frac{4\mu \xi x}{D} \right) \quad (39-4)$$

وهذا يعني أن انتقال الضغط بين الحبيبات يتناقص بشكل أسّي مع تزايد العمق (ارتفاع المدمج h) وتنتهي $P_x \rightarrow 0$ عندما نؤول $x \rightarrow \infty$. وعندما $x = h$ فتصبح العلاقة:

$$P_h = P_a \cdot \exp \left(- \frac{4\mu \xi h}{D} \right) \quad (40-4)$$

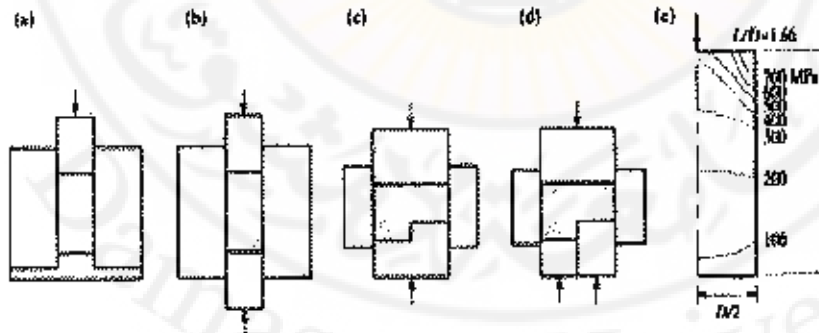
نجد من العلاقة السابقة أن الضغط يسلك القانون الأسّي، ويتعلق توزيعه بارتفاع المدمج، كما هو مبين بالشكل (٤-٣٥):



الشكل (٤-٣٥) توزيع الضغط بحسب ارتفاع المدمج

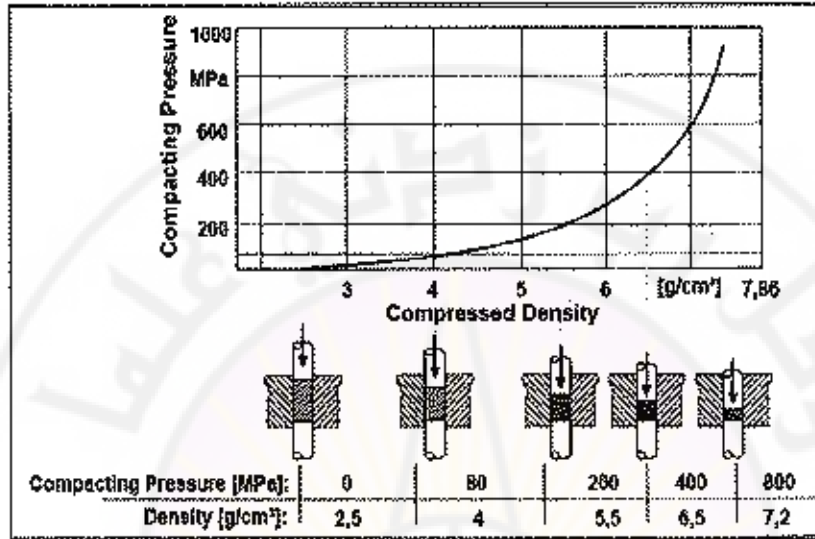
من الممكن أن الاحتكاك الداخلي بين الجزيئات أكبر من الاحتكاك الخارجي، فهذا يعني أن معامل الاحتكاك بين جزيئات المسحوق $\mu_i > \mu_e$ ، فذلك للتغلب على قوى الاحتكاك بين الجزيئات تصرف طاقة إضافية. وهذا الاحتكاك الداخلي بين الجزيئات لا يؤدي إلى عدم تجانس الكثافة كما هو الحال عند الاحتكاك الخارجي، ولكن من الضروري التغلب عليه.

ويؤثر الاحتكاك سواء كان بين جزيئات المعدن من جهة (الاحتكاك الداخلي)، أم بين السنبك وجدران القالب من جهة أخرى تأثيراً كبيراً في كثافة المدمج وتوزيعها سواء كان التدميج من طرف واحد أم من طرفين، أما الشكل (٤-٣٦) فيبين المنحني التجريبي لتزايد ضغط التدميج مع تزايد الكثافة لخلات الحديد.



الشكل (٤-٣٦) أشكال التدميج المختلفة

نلاحظ من الشكل (٤-٣٦): أن (a) و (c) هي عبارة عن ضغط من طرف واحد، أما (b) و (d) فهي عبارة عن ضغط من الطرفين، ويمثل (e) توزيع الضغط من طرف واحد عبر العمق لدمج من مسحوق النحاس حيث تكون L طول المشغولة و D قطرها.



الشكل (٤-٣٧) المنحني التجريبي لزيادة ضغط التدميج مع الكثافة لخلات الحديد

٤-٤-٤ تأثير التزييت في عملية التدميج:

إن إضافة التزييت أو التشحيم عند عملية التدميج، هي واحدة من الطرق المفضلة للتخفيف من الاحتكاك الخارجي، ولتحسين عملية تدميج المساحيق، ولزيادة تجانس توزيع الكثافة على سطح المدمجات. والهدف من عملية التزييت هو:

١. تخفيف الاحتكاك الداخلي و الخارجي، وإبقاء ضغط التدميج.

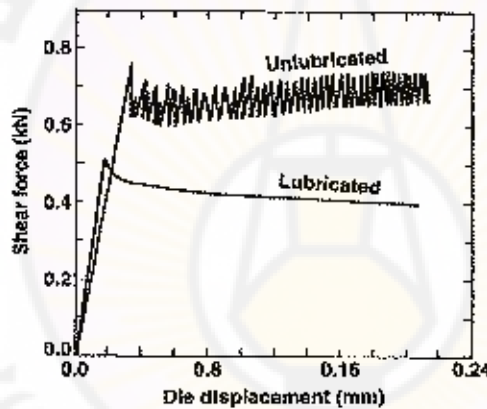
٢. تخفيف ضغط اللفظ.

٣. منع الاهتراء والاستعناء في زوج القالب.

٤. منع تطاير المسحوق.

ونقسم الزيوت إلى مجموعتين: خاملة ونشطة على السطح. أما الزيوت الخاملة: فهي التي تنقص الاحتكاك بين المسحوق وجدار القالب، وهي لا تتفاعل مع مادة المسحوق.

وهي قد تكون سائلة مثل زيوت السيارات، التي تدخل في تحضير الشحنة بنسبة لا تزيد على 1.5%، أو جامدة مثل الغرافيت وغيرها مثل اللدائن البلاستيكية، التي تستخدم عند تدميج المساحيق الهشة. أما الزيوت النشطة : فهي التي تستخدم لتخفيف الاحتكاك وتسهيل الانفعال أو تشكيل جزيئات المساحيق، كما تنقص ضغط التدميج اللازم للوصول إلى الكثافة المطلوبة. ومبدأ عملها هو امتزاز جزيئات الزيوت هذه إلى سطح حبيبات المسحوق ثم نفوذها إلى المسامات الميكروية، والتشققات الموجودة على سطح الحبيبات. فلذلك تنشأ قوى تؤدي إلى تحطم الحبيبة أو تسهيل عملية تشكيلها أو انفعالها. يستخدم من هذه المزيّنات زيت النخيل أو سترات الزنك أو حمض البنزويل..الخ. وعادة ما يستخدم محلول هذه المواد في الفازلين أو الأسيتون أو البنزول وغيرها من المواد السريعة التطاير.



الشكل (٤-٣٨) تأثير قوى القص في مسافة اللفظ من قالب التشكيل المزيّن وغير المزيّن
٤-٤-٥ ضغط اللفظ و الارتداد المرن:

من الضروري تطبيق قوة ضرورية لللفظ أو دفع المدمج بعد الانتهاء من عملية التشكيل، ويسمى الضغط المكافئ بضغط اللفظ. ويجب معرفة مقدار هذا الضغط من أجل حسابات تصميم القالب، يتزايد ضغط اللفظ مع ازدياد ضغط التدميج بشكل طردي، وهو يتعلق بمعامل الاحتكاك الخارجي و بمعامل بواسون للمسحوق المدمج، و عادة يساوي 0.2-0.35 من ضغط التدميج.

يسمى زيادة أبعاد المدمجات نتيجة تأثير قوى المرونة بعد إزالة الضغط بالارتداد اللاحق المرن للمدمجات. وللتخلص من هذا الأثر من الضروري عند تطبيق ضغط التدميج أن تثبت الحمولة على المدمج من بضع ثوانٍ إلى 3 - 2 min لزيادة الكثافة. عادةً يحدث القسم الأكبر من الارتداد المرن بشكل لحظي عند إخراج المدمجات مباشرة من القالب، أما القسم المتبقي من الارتداد المرن فينتطلب وقتاً أطول قد يصل إلى عدة أيام. يمكن أن يحسب الارتداد المرن δ بنسبة تغير طول المدمج بالعلاقة التالية:

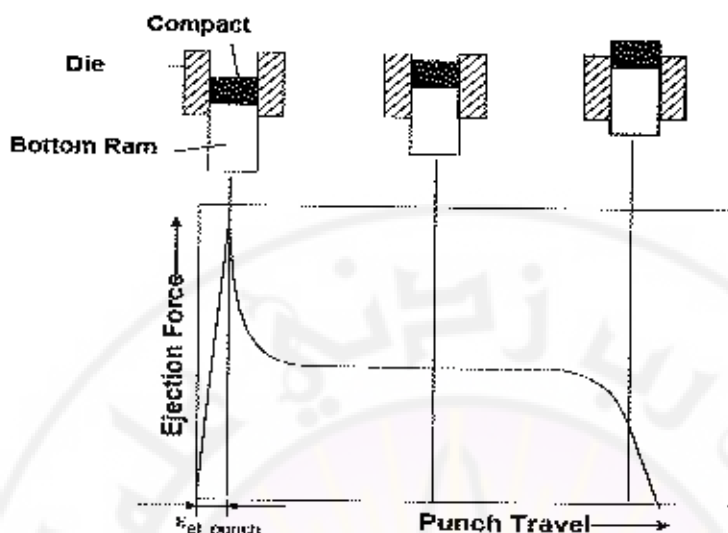
$$\delta_l = (\Delta l / l_0) \cdot 100 \% \quad (41-4)$$

حيث: δ_l - الارتداد المرن، Δl - التمدد الطولي أو القشري للقالب، l_0 - الطول الأصلي (القطر الأصلي)، l_1 - طول (قطر) المدمج بعد إزالة الحمولة. ويحسب الارتداد المرن الحجمي بعلاقة مشابهة:

$$\delta_v = (\Delta V / V_0) \cdot 100 \% \quad (42-4)$$

يكون تأثير الارتداد المرن باتجاه ارتفاع القالب أكبر، من الارتداد المرن بالاتجاه العرضي، ويصل إلى 5 - 6% . يتعلق الارتداد المرن باللفظ (الضغط المعد للتشكيل، مثل درجة التشبث وشكل الحبيبات و سطحها ونسبة الأكاسيد) و بالخواص الميكانيكية و الفيزيائية لمادة المساحيق، كما يتعلق بالتزييت و بخواص المرونة لقوة الكبس وبعوامل أخرى.

يكون الارتداد المرن للمدمج المصنوع من المساحيق المعدنية القصيفة، أكبر من الارتداد المرن للمدمج المصنوع من المساحيق اللدنة.



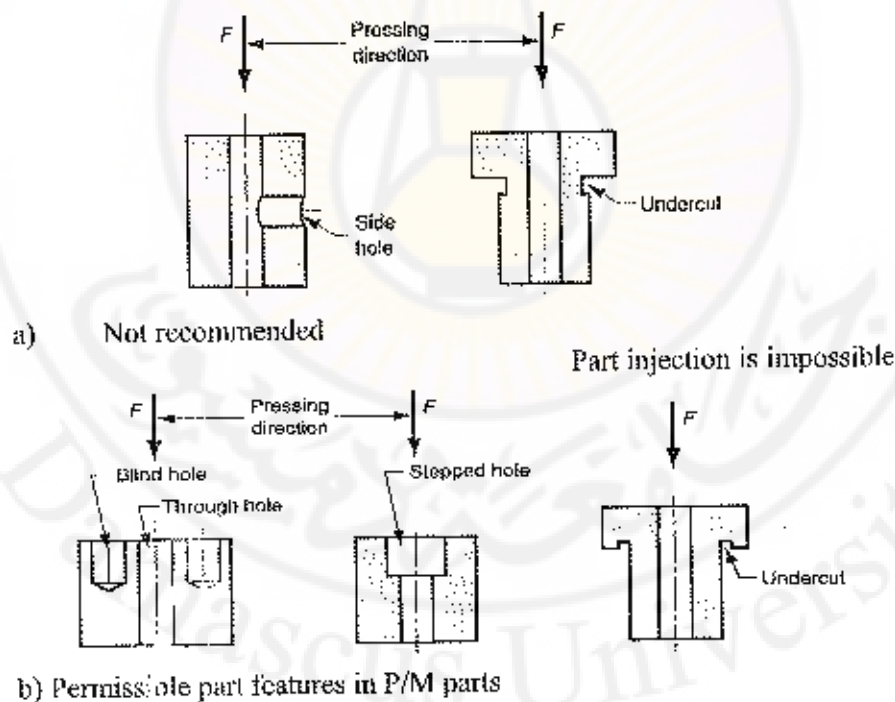
الشكل (٤-٣٩) علاقة قوة اللفظ (ضغط اللفظ) بحركة السنبك

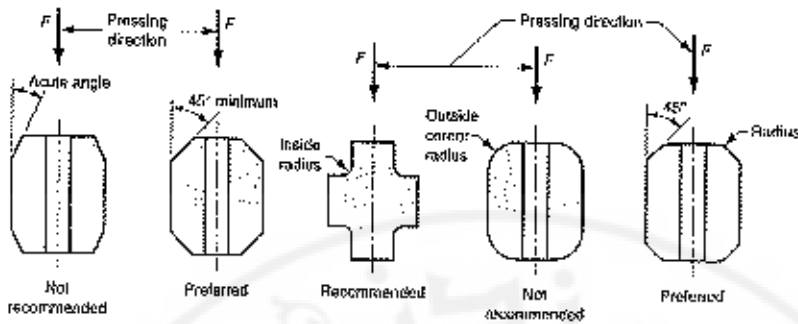
٤-٥ تصميم قالب التشكيل:

مما لا شك فيه أن الشكل العام لأي جزء هندسي تمليه الوظيفة التي يتطلب أدائها، إلا أن هناك اختلافاً لا يستهان به في التفاصيل دون إلحاق الضرر بأي حال من الأحوال بأدائه في الخدمة. وهناك اعتبارات تصميمية يجب مراعاتها:

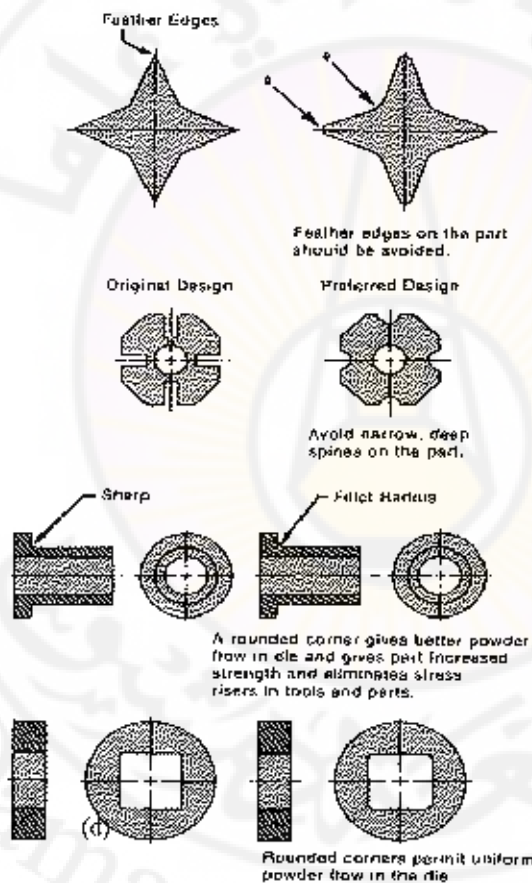
١. من الضروري الأخذ بعين الاعتبار أن المدمج يجب أن يكون قابلاً للإخراج بصورة سليمة من القالب. لذلك ليس بالمستطاع قولبة أخلايد، وفتوءات أو بروزات في الممنج، أو تقويب إلا إذا كانت موازية لاتجاه الكبس أي لاتجاه لفظ العينات.
٢. ضرورة تجنب عناصر المعدات البالغة الهشاشة. فمن الواضح أن المقاطع الرقيقة جداً تكون مصدراً محتملاً للفشل، مثل مساطر تشطيب الزوايا أو ما شابهها، وهي تتطلب وجود سنايك ذات أطراف رقيقة الشكل. ومقاطع التدميج الرقيقة غير مرغوب فيها لمسيب آخر، وهو أنها تدخل مشكلات الانسياب و التدفق الرديء للمساحيق إلى داخل القالب.

٣. هناك قيود متعلقة بضرورة تجنب الشقوق التي تحدث لدى القيام بلفظ المدمج من القالب. فعملية الإخراج نفسها والارتداد المرن المواكب لها، تتسبب في وجود إجهادات قد تؤدي إلى التشققات، إذا لم تؤخذ بعين الاعتبار من قبل المصمم.
٤. التغيرات المفاجئة في المقطع والزوايا الحادة، يمكن تجنبها بأن تشطف وتحول على شكل أنصاف أقطار.
٥. يجب أن يكون شكل المدمجات بسيطاً وسهل التشكيل.
٦. كما يجب أن تكون هذه المدمجات ضمن النقاوت المسموح به، بحيث لا يقل التسامح المسموح به عن 0,1 mm.
٧. يجب أن لا تقل سماكة جدران العينات عن 1,5 mm.
- و الشكل التالي يبين التصميم الصحيح من الخاطئ، بحيث يكون a - التصميم الخاطئ و b - التصميم الصحيح لبعض النماذج المستخدمة في الصناعة، كما هو موضح في الشكل (٤-١٠).





c) Rules for chamfers and corner radii in P/M parts



الشكل (٤-١٠) يبين بعض تصميم المدمجات:

a - تصميم خاطئ، b - تصميم صحيح، c & d - طريقة شطف الزوايا

٤-٥-١ الحسابات التصميمية:

لإجراء الحسابات التصميمية لقالب التشكيل من الضروري معرفة المعطيات التالية:

- الرسم الهندسي للأجزاء المراد تصميمها،
- أسلوب الضغط (التشكيل)،
- الخواص التكنولوجية والفيزيائية للمساحيق المستخدمة،
- التركيب الكيميائي للمسحوق،
- مقدار الانكماش للمدمجات عند التليد،
- مقدار الارتداد المرن للمدمجات،
- أبعاد المنتجات النهائية من أجل إجراء المعالجات اللاحقة،
- مقدار قوة ضغط التشكيل،
- خصائص المكبس (نوعه، حمولته)

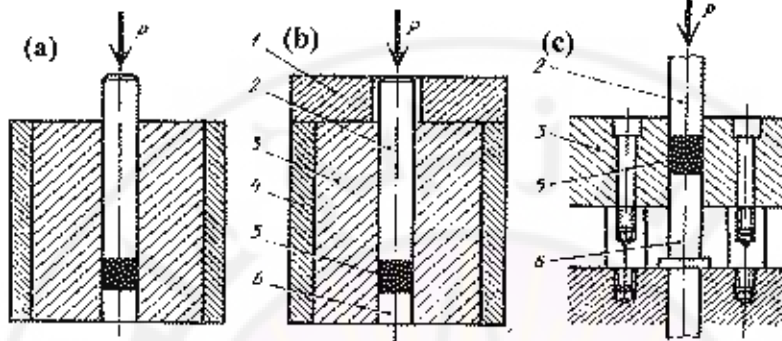
ويتم في البداية أثناء رسم الأجزاء المراد تدميجه اختيار أسلوب التشكيل. ويكون الضغط عادة إما أحادي الاتجاه و إما ثنائي الاتجاه. يستخدم الضغط ثنائي الاتجاه عندما تزيد نسبة ارتفاع العينة h إلى قطرها d على 1، أو نسبة الارتفاع إلى سماكة العينة t يزيد على 3:

$$(4-4) \quad 1 < h/d < 5 \quad \text{أو} \quad 3 < h/t < 17$$

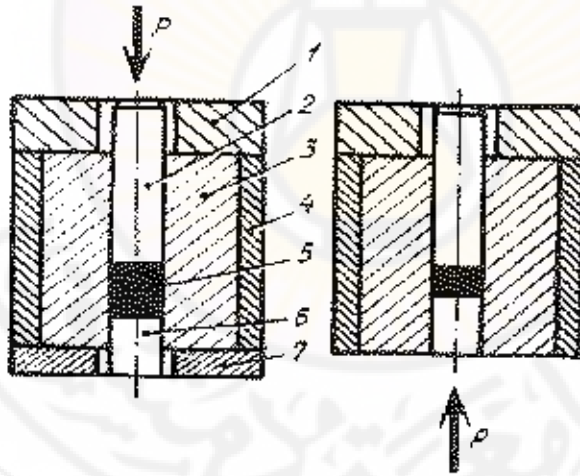
أما عند الضغط أحادي الاتجاه، فإنه يؤخذ بعين الاعتبار فقط أبعاد السنك العلوي. كما هو مبين في الشكل (٤-٤١). و يتم التحميل بالتتابع أو التحميل معاً على السنك العلوي والسفلي عند الضغط ثنائي الاتجاه، الشكل (٤-٤٢) أو بمساعدة القالب المتحرك.

ويُحدد ضغط التشكيل الحدي - أي حتى نهاية الارتفاع المحدد- بواسطة قرص تحديد يوضع يدوياً على قالب التشكيل عندما يراد الحصول على أبعاد دقيقة للمدمجات وخاصة بالنسبة للارتفاع.

ويتم لفظ الأجزاء المدمجة بواسطة لأقط خاص بذلك، مصمم تحت الدليل السفلي للقلب، أو على الدليل العلوي أو بدون ذلك عند الضغط المؤتمت عن طريق إزاحة أو تحريك الدليل السفلي أو أنثى القلب.



الشكل (٤١-٤) قالب التشكيل للضغط أحادي الاتجاه، (a) و (c) عند الضغط، (b) الضغط الكامل بوضع قرص التحديد، (a & b) ضغط يدوي، (c) ضغط مؤتمت: 1- قرص تحديد، 2- سنك علوي، 3- أنثى القلب، 4- طوق، 5- العينة، 6- السنك السفلي.



الشكل (٤٢-٤) رسم تخطيطي لقالب التشكيل اليدوي للضغط ثنائي الاتجاه
(a) ضغط السنك العلوي، (b) ضغط السنك السفلي، 1- قرص التحديد العلوي، 2- السنك العلوي، 3- أنثى القلب، 4- طوق، 5- المدمج، 6- السنك السفلي، 7- قرص تحديد سفلي

ومن أجل اختيار المكبس عند التشكيل بالضغط، فإنه من الضروري حساب قوة الضغط من العلاقة التالية:

$$F = p \cdot S \cdot n \quad , \quad [N] \quad (44-4)$$

حيث إن: p - ضغط التشكيل، MPa،

S - مساحة السطح الداخلي لأنثى قالب التشكيل، cm^2

n - عدد الأجزاء المدمجة في قالب التشكيل.

ومنه يمكن اختيار قوة (حمولة) ضغط التشكيل F_p :

$$F_p = F \cdot K \quad (45-4)$$

حيث K - معامل أمان، ويسمى بمعامل زيادة الاستطاعة، يؤخذ مساوياً $K=1.5$ ويبين الشكل (٤-٤٣) منحنيات الضغط التجريبية حسب الكثافة النسبية للمدمجات، ويمكن تقدير ضغط لفظ المدمج بـ $25 \cdot 35\%$ من الضغط المطبق.

ويحسب ارتفاع أنثى القالب $[H, cm]$ ، من العلاقة التالية:

$$H = (\rho_c / \rho_a) \cdot h + l \quad (46-4)$$

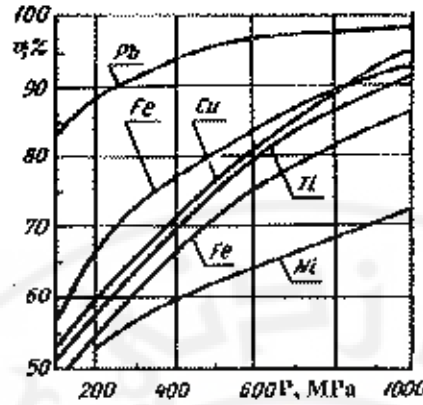
حيث إن: ρ_c - كثافة المدمج، g/cm^3 ، ρ_a - الكثافة الظاهرية للمسحوق g/cm^3 ،

h - ارتفاع المدمج مع مراعاة السماحية أو التفاوت في الأبعاد، مع مراعاة

مقدار الارتداد المرن والانكماش بالارتفاع cm ،

l - مقدار ارتفاع ولوج السنك العلوي والسفلي في القالب وهو عبارة

عن: $l = l_{np} + l_{lp}$ ، بالـ cm ويؤخذ عادةً مساوياً $1.5 \cdot 2.0 cm$



الشكل (٤٣-٤) علاقة الكثافة النسبية ρ_r للمدمج بضغط التشكيل للمعادن المختلفة

أما ارتفاع المدمج (h_{max}, mm)، فينصح بأخذ الارتفاع الأكبر وفق العلاقة التالية:

$$h_{max} = h_o + (A_h / 2) + \varepsilon \pm \lambda - \delta \quad (47-4)$$

حيث إن: h_o - الارتفاع الاسمي للعينة mm،

A_h - التفاوت المسموح به بالنسبة للارتفاع mm،

ε - تسامح التشغيل mm،

λ - التغير بارتفاع المشغولة عند التثبيت mm، (+) موجب عند نقصان

الارتفاع، و (-) سالب عند زيادة الارتفاع.

δ - الارتداد المرن mm.

إذا كان مقدار تسامح التشغيل، أو الانكماش والارتداد المرن لا يزيد على مقدار

التسامح المسموح به بالنسبة للأبعاد، فإنه يمكن تحديد ارتفاع المدمج (h, mm) بالعلاقة التالية:

$$h = h_o + A_h / 2 \quad (48-4)$$

عند تركيب قالب التشكيل على طاولة المكبس، فإن المسافة (mm) من سطح الطاولة

حتى الزلافة للواقعة في القسم العلوي يجب أن تساوي:

$$L = 3H + (150 + 200)$$

ويحدد القطر العامل لأثنى القالب (D, mm) مع أخذ بعين الاعتبار الارتداد المرن،

الانكماش وتسامح التشغيل الإضافي، بالعلاقة التالية:

$$D = D_0 + (A_D / 2) - \delta \pm \lambda + \varepsilon \quad (49-4)$$

حيث إن: D - القطر الداخلي لأنثى القالب mm،

D_0 - القطر الخارجي الاسمي للمشغولة mm،

A_D - التسامح المسموح به بالنسبة للبعد mm، D_0

δ - الارتداد المرن بالنسبة للبعد mm، D_0

λ - مقدار التغير في القطر الاسمي D_0 عند التليبد، وهو موجب عند

نقصان الأبعاد، وسالب عند زيادة الأبعاد mm، ε - تسامح التشغيل الإضافي بالنسبة

لـ D_0 mm.

و تستخدم العلاقة السابقة (42) في حساب قطر السنك d_p ، وذلك عندما يكون قطر

العينة الأصلي d_0 (mm):

$$d_p = d_0 + (A_d / 2) - \delta \pm \lambda + \varepsilon \quad (50-4)$$

بحسب ارتفاع السنك العلوي (h_{up1} , mm) بالعلاقة التالية:

$$h_{up1} = H + h_1 \quad (51-4)$$

حيث إن: H - ارتفاع أنثى القالب، mm،

h_1 - ارتفاع السنك فوق أنثى القالب قبل التدميج، mm.

ويحسب ارتفاع السنك السفلي (h_{p2}) (h_{p2}) lower، مساوياً لمسافة الدخول من

الجزء السفلي للقالب، ويكون بحدود 10 - 15 mm.

ويحدد القطر الخارجي للقالب الأسطواني D_2 (mm) حسب العلاقة التالية:

$$D_2 = D_1 \frac{\sqrt{[\sigma] + p}}{[\sigma] - p} \quad (52-4)$$

حيث إن: D_1 - قطر العينة المدمجة، mm

$[\sigma]$ - إجهاد الشد المسموح به لمادة القالب، MPa،

p - ضغط التشكيل الأعظم MPa،

ν - معامل بواسون، وعادة في الحياة التطبيقية تستخدم علاقات تقريبية:

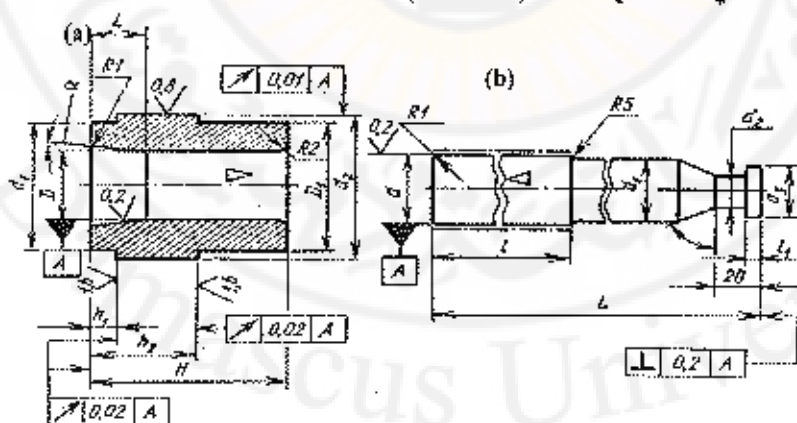
$$D_2 \geq 3D_1 \quad (53-4)$$

حيث إن: D_1 - القطر الداخلي لفجوة أنثى القالب mm،

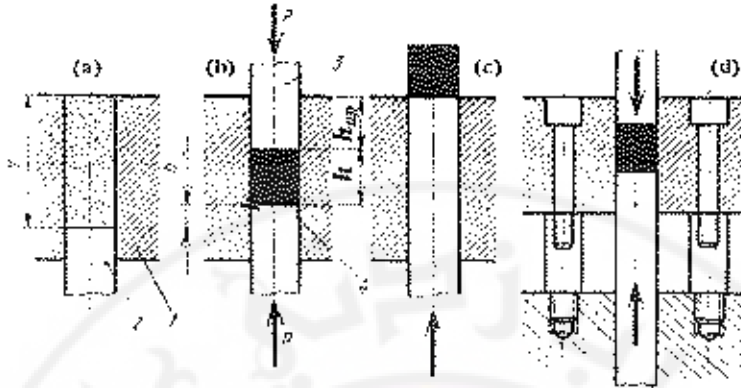
D_2 - القطر الخارجي لأنثى القالب mm.

وتصنع القوالب من مواد خاصة بصناعة القوالب والعدد. حيث يستخدم سنك إضافي من أجل تشكيل الفجوات في المدمجات، بحيث يزيد طول الجزء العامل فيه على ارتفاع فجوة ملء القالب بالمسحوق بنحو: 10 - 20 mm، ويجب أن يكون لهذا السنك ساق (ذيل) للتثبيت في القالب. ويظهر الشكل (٤-٤٤) الرسم التصميمي للقالب والسنك.

أما في حال قالب التشكيل ذي الضغط من الجهتين: فيستخدم قالب التشكيل في الضغط الثنائي الاتجاه للتغلب على عيوب الضغط الأحادي الاتجاه وخاصة التوزيع غير المنتظم لكثافة المدمج باتجاه الارتفاع، والتوزيع غير المنتظم للكثافة الحجمية للمدمج بسبب الضياع في ضغط التشكيل التخلص من الاحتكاك بين جزيئات المسحوق وجدار القالب. حيث يستخدم ارتفاع الجزء القالب H_2 (تعاير كمية المسحوق حجمياً)، كما في الشكل (٤-٤٥، a). ويحقق الضغط p بمساعدة السنك العلوي، حيث يدخل السنك العلوي في قالب التشكيل لمسافة h_{up} . ثم يطبق الضغط p على السنك السفلي و يدخل لمسافة h_{lp} ، وعادة تكون $h_{lp} < h_{up}$ ، الشكل (٤-٤٥، b)، ويمكن أن يكون مخطط الضغط هذا عندما يطبق على كلا السنكين في نفس الوقت ومسافة دخولهما في قالب التشكيل واحدة. ويتم إخراج المدمج بتطبيق ضغط الإخراج على السنك السفلي كما هو مبين في الشكل (٤-٤٥، c). أما قالب التشكيل ذو الضغط من الجهتين للتشكيل الألي فمبين في الشكل (٤-٤٥، d).



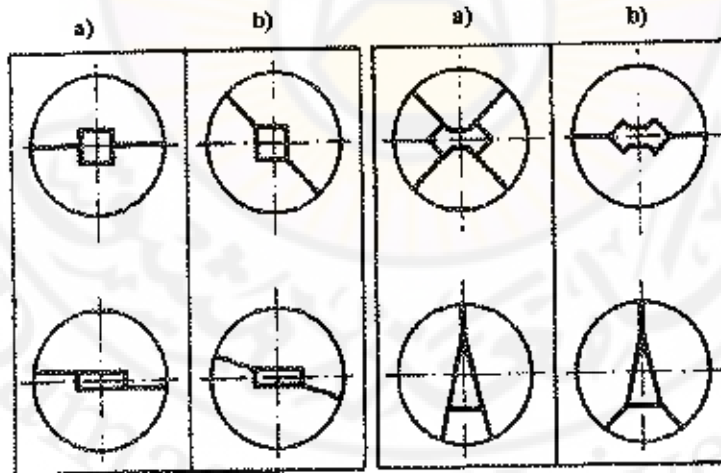
الشكل (٤-٤٤) مخطط تصميمي لقالب التشكيل (a) وللسنك الإضافي (b)



الشكل (٤-٤٥) مخطط لقالب التشكيل ذي الضغط من الجهتين

a- ارتفاع ملء القالب بالمسحوق، b- تطبيق الضغط، c- ضغط الإخراج، d- قالب التشكيل عند الضغط الآلي، 1- أنثى القالب، 2- السنك السفلي، 3- السنك العلوي، 4- المدمج.

يجب أن تحتوي أجزاء القالب على شق، يؤمن أثناء تصنيع القالب، وذلك لتصحيح الأبعاد، التي تتغير نتيجة اهتراء السطح العامل أو غياب الإشارة (العلامة) على السطح الجانبي للمدمج، كما هو مبين في الشكل (٤-٤٦).

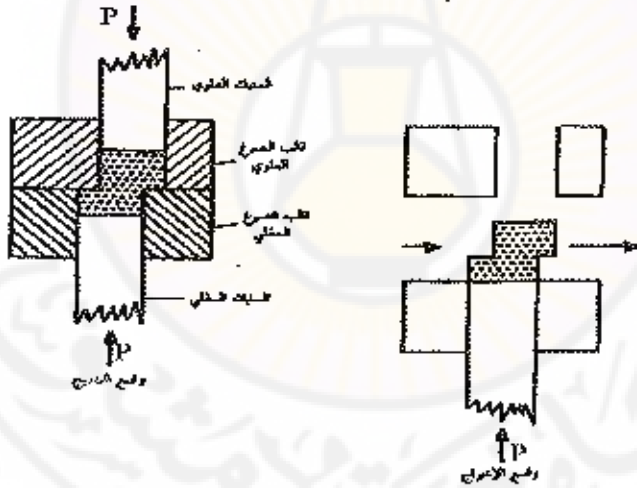


الشكل (٤-٤٦) مخطط أجزاء القالب المحتوية على شق،

(a) تصميم غير صحيح، (b) تصميم صحيح

٤-٥-٢ التغلب على قيود التصميم:

- يمكن تخفيض القيود المفروضة على إخراج المدمج من قالب التشكيل بعدة طرق:
١. أسلوب قالب التشكيل المجزأ split die الذي قامت به شركة أوليفيتي Olivetti، و يدعى بأسلوب أوليفيتي، هو يستخدم في الواقع قالبين الواحد منهما فوق الآخر، ويتم تدميج المسحوق من كلا الطرفين. وبعد التدميج يفصل القالبان بعضهما عن بعض، ويتم استخراج المدمج من فتحة بينهما، كما هو مبين في الشكل (٤-٤٣).
 ٢. يمكن تحقيق هدف مماثل عن طريق جعل الجزء عبارة عن مدمجين منفصلين وتليدهما بعضهما مع بعض، أي بوضع أحدهما فوق الآخر، وفي هذه الحالة فإن نوعاً من الملامح يجب أن تضمن في التصميم من أجل تأمين النفاذ الكافية. وقد يتم بصورة تبادلية وصل الجزأين بعضهما مع بعض بعد التليد عن طريق اللحام النتوي projection welding أو اللحام بالنحاس الأصفر.



الشكل (٤-٤٧) رسم تخطيطي يبين مراحل التدميج باستخدام قوالب التشكيل المجزأة

٣. وبهدف التقليل من قوة اللفظ (الإخراج) على الجزء العامل لتجفيف القالب يمكن إجراء ميل مخروطي في الحدود المسموح بها للأبعاد، ويتجه ارتفاع المخروط بعكس

جهة لفظ المدمج. كما يمكن إجراء ميل مخروطي أيضاً في الجزء العلوي من القالب ومن أجل التغلب على تشكل التشققات في المدمجات أثناء لفظها، كما هو مبين في الشكل (٤-٤٨)، بحيث يكون:

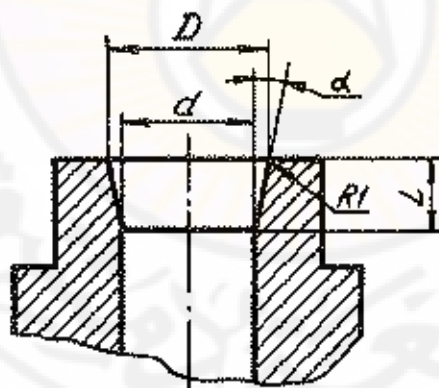
$$D - d \approx 0.2 \text{ , mm} \quad (54-4)$$

ويمكن تحديد طول الجزء المخروطي بالعلاقة التالية:

$$L = (h_3 - h) / 2 \quad (55-4)$$

حيث إن: h - ارتفاع الجزء المدمج، mm، h_3 - ارتفاع المسجوق mm. ويبين الجدول (٤-٤٩) مقدار زاوية المخروط α ، حسب طول الجزء المخروطي من القالب. جدول (٤-٤٩) أبعاد الجزء المخروطي وزاوية المخروط لقالب التشكيل

اللفات المسجوق به	زاوية المخروط α	طول الجزء المخروطي، mm	
		حتى	أكثر من
6'	1°	5	3
6'	0°35'	10	5
5'	0°25'	16	10
4'	0°15'	25	16
3'	0°10'	40	25
2'30"	0°05'	63	40
2'	0°04'	100	63



الشكل (٤-٤٨) رسم تخطيطي للجزء المخروطي من القالب



الفصل الخامس

التلييد

Sintering

تلييد الطور الصلب	١٨٢
نظام التلييد للخلائط متعددة التراكيب	١٨٣
تلييد الطور السائل	١٨٤
التطبيق العملي للتلييد	١٨٥
التلييد المنشط	١٨٦
تلييد المسحوق السائب	١٨٧
التلييد تحت الضغط والحرارة	١٨٨
التشكيل والتطريق بالتلييد	١٨٩
التلييد والتشكيل بالتطريق	١٩٠
عيوب عملية التلييد	١٩١



التلييد Sintering

١-٥ مقدمة:

تعتبر عملية التلييد ذات أهمية كبيرة في أسلوب ميتالورجيا المساحيق، ليس من أجل تأكيد إعطاء المتانة اللازمة للأجزاء للقيام بدورها المطلوب كمركب هندسي، فحسب، بل أيضاً أن تكون أبعاد هذه الأجزاء صحيحة. ودون استثناء فالتلييد يتطلب وجود الحرارة، ويمكن تعريف أسلوب التلييد على النحو التالي: هو المعالجة الحرارية للمسحوق أو المدمج على درجة حرارة أدنى من درجة حرارة انصهار المكون الرئيسي بغرض زيادة قوة تحمله، وذلك عن طريق ربط وتماسك جزيئاته بعضها مع بعض، أي بهدف تأمين الخواص الميكانيكية والفيزيائية المطلوبة. وعادة تتراوح درجة حرارة التلييد ما بين $(0.6 - 0.8) T_{m.p}$ من درجة حرارة الانصهار. ويمكن - من التعريف السابق - ملاحظة أن المدمج أو المسحوق يمكن أن يلبد، وقد يتم القيام بصورة مقصودة في بعض الحالات بتلييد المسحوق المسائب Loose powder، مثال ذلك فقد سبق لنا التعرف أن رأينا في صناعة مساحيق الحديد الأسفنجية التي تلبد جزئياً أثناء مرورها عبر فرن الاختزال، وعلى أية حال، فإن اهتمامنا هنا منصب على تلييد المدمجات. ويشير التعريف الآنف الذكر أيضاً إلى ربط الذرات بعضها مع بعض، أي تشكيل روابط ميتالورجية عن طريق النمو البلوري عبر الحدود المتداخلة للذرات. وقد ذكر سابقاً أن تشكيل مثل هذه الروابط في المناطق التي تكون فيها الذرات المتجاورة مشوهة في نقاط تلامسها نتيجة ضغط التدميج الذي يكون مسؤولاً عن توليد المتانة الخضراء. أما أثناء عملية التلييد فإن مناطق التلامس الميتالورجي هذه تنمو، و من ثم فإن قوة التحمل تزداد بصورة تصاعدية. إن تسخين المدمجات أو المسحوق المسائب يؤدي إلى تحقيق ظواهر فيزيائية- كيميائية معقدة، يتعلق بعضها بإصلاح (إزالة) عيوب الهياكل الشبكية المختلفة. ومن أهم هذه العيوب هي:

(١) الفراغات الموجودة في زوايا الهياكل الشبكية:

مثل العيوب النقطية التي تتشكل بسبب انتقال الذرات تاركة مكانها فراغات (عيوب شوتكي). وتتكون هذه الفراغات كنتيجة لانتقال الذرات من أماكنها في عقد النسق البلوري إلى سطح البلورة، وفي بعض الحالات تتكون الفراغات نتيجة لمغادرة الذرات أماكنها في عقد النسق البلوري إلى أماكن بينية أي بين العقد (عيوب فرنكل)، وتظهر العيوب النقطية للنسق البلوري نتيجة لتأثير ذرات الشوائب التي توجد دائماً حتى في أكثر المعادن نقاء. وكلما ارتفعت درجة الحرارة زاد تركيز الفراغات (أي عددها في وحدة الحجم من البلورة). وقد يصل عدد الفراغات في البلورة عند درجات الحرارة القريبة من درجة حرارة الانصهار إلى نحو 1% من العدد الإجمالي للذرات في البلورة.

(٢) العيوب الخطية (الانخلاع):

و هي عبارة عن عيوب في النسق البلوري بعدان من أبعادها الهندسية متناهية في الصغر بينما البعد الثالث يكون كبيراً، والانخلاع هو عبارة عن تشوه موضعي ناتج عن وجود نصف مستوي زائد من الذرات. يحدث أثناء عملية التليد الحراري تغير في أبعاد وفي بنية وفي خواص المنمجات، بسبب عمليات الانتشار الذاتية وغير المتجانسة، مما يؤدي لظهور الانخلاعات المختلفة وانتقال المادة إما عبر الطور الغازي وإما التفاعلات الكيميائية و إما استرخاء Relaxation الإجهادات الميكروية والماكروية و إما إعادة التبلور... إلخ.

إن العوامل الرئيسية لعملية التليد الحراري هي - درجة الحرارة و زمن التليد ووسط التليد - وفي التطبيق يستخدم عادة المبدأ التجريبي من دون أي تفسير أو شرح. مثال، اختيار درجة حرارة التليد، فكلما كانت درجة الحرارة أقل كانت درجة حرارة الانصهار أقل لمادة المساحيق، ولكن عند كثير من المواد هذا غير مؤكد ولا يمكن اعتماده. ومنه نجد أن درجة حرارة التليد لمسحوق الحديد النقي هي - 1000 °C، ولمسحوق الفولاذ المقاوم للصدأ 1250 - 1300 °C، في حين درجة حرارة انصهار الحديد هي 1539 °C. من الممكن إن هذا الشذوذ يتعلق باختلاف

درجة حرارة إعادة التبلور Recrystallization لكل خليطة وبالروابط بين الذرات في الهيكل الشبكي وبأثير حركة انتشار الذرات، انظر الجدول (١-٥).

جدول (١-٥) درجة حرارة التبليد التقريبية لبعض المعادن والخلائط

نوع المادة	درجة حرارة التبليد، °K
سبائك الألمنيوم	863 - 893
سبائك النحاس الأصفر	1163 - 1183
الحديد	1393 - 1553
الفولاذ Fe - C	1393
الفولاذ السبائكي 316SS (Fe-Cr-Ni)	1473 - 1553
الفولاذ الكرومي 430LSS (Fe-Cr)	1473 - 1553
سبائك التتعتين	1673 - 1773

مما تقدم نستنتج أن الهدف الأساسي لعملية التبليد هو تحقيق المستوى المطلوب من خواص المدمجات، الحاصلة أثناء تسخينها. لذلك من الضروري الابتعاد عن انصهار مادة الأساس أثناء التبليد، ولكن أثناء تسخين مواد متعددة في الخليطة يمكن أن ينصهر أحد هذه المركبات (ولكن ليس مادة الأساس)، مما يؤدي لظهور طور سائل يؤثر في طبيعة عملية التبليد. تنقسم عملية التبليد إلى نوعين أساسيين: تبليد الطور الجامد Solid phase sintering، من دون تشكيل انصهار لمركبات الخليطة أثناء عملية التسخين. وتبليد الطور السائل (تبليد حالة السيولة) Liquid phase sintering، التي عندها ينصهر أحد مركبات الخليطة أو المكونات السطحية للمادة أثناء عملية التبليد.

٢-٥ تبليد الطور الصلب Solid phase sintering:

وهي تبليد المدمجات دون تشكيل طور سائل أي دون انصهار لأحد مركبات الخليطة. مثل هذا النوع من التبليد يمكن أن يحدث لخليطة أحادية النظام أو لخليطة متعددة النظام، ويتعلق سلوك التسخين بطبيعة ودرجة نقاوة المركبات الداخلة في الخليطة. يمكن الإشارة إلى أن أي خليطة أحادية التركيب، ونظراً لوجود الشوائب فيها تصبح خليطة متعددة التراكيب أو متعددة النظام. ويحدث عند تبليد الطور الجامد عمليات فيزيائية وكيميائية معقدة: اختزال وتفكك الأغشية الأكسيدية - منع امتزاز البخار

والغازات - انتشار الذرات - إصلاح عيوب البنية البلورية للمساحيق - إعادة التبلور وانتقال المعدن عبر الطور الغازي... إلخ. وبغض النظر عن العمليات المعقدة أثناء التلييد فإن التلييد الخارجي يؤدي إلى تغيير أبعاد المدمجات إما نقصاناً (انكماش) و إما زيادةً (تمو)، وفي أكثر الأحيان يحدث انكماش في الأبعاد.

تدرس عملية التلييد و الانكماش الحاصل، على المستوى الذري ونتيجة انتقال الذرات في أماكن التلامس بشكل جسور أو رقاب Necking، التي تزداد أبعادها أثناء عملية التلييد مما يساعد على اندمال أو التئام المسامات. ونتيجة لذلك، فإن الزوايا الحادة أصلاً بين الذرات تأخذ في الاستدارة، وفي النهاية فإن الفراغات البينية تصبح على هيئة مسام كروية كما هو موضح في الشكل (٥-١). ويجري انتقال الذرات نتيجة حركة العيوب النقطية مثل الفراغات أو العيوب الخطية مثل الانخلاعات. وفي النهاية فإن الخطوط الخارجية للذرات الأصلية تختفي مع عودة حدوث البلورة مرة ثانية.

تشير الأبحاث الحديثة إلى وجود أماكن فارغة (ثقوب) في عقد الهياكل الشبكية، يكون تركيزها (أي نسبة عدد الأماكن الفارغة إلى الأماكن الكلية في الهيكل الشبكي) مساوياً للصفر عند درجة حرارة الصفر المطلق، ويزداد هذا التركيز عند ارتفاع درجة الحرارة، ويمكن حسابه حسب العلاقة التالية:

$$n/N = C = e^{-(U_b / KT)} \quad (1-5)$$

حيث إن:

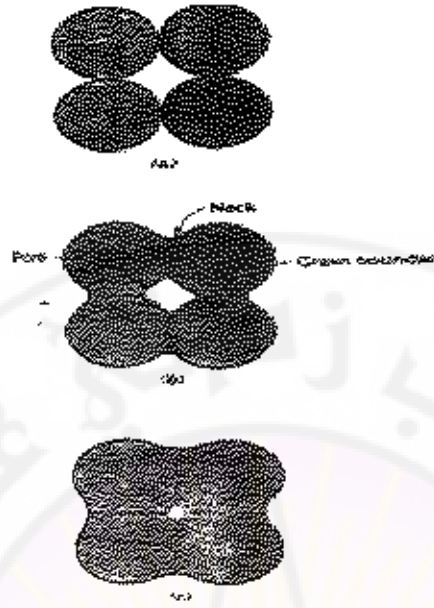
N - العدد الكلي للذرات في وحدة الحجم $[atoms/m^3]$

n - عدد الثقوب في ذلك الحجم،

U_b - طاقة تشكيل الفراغات $[J]$ ،

K - ثابت بولسمان (ثابت الغازات العام $8.314 J/mol \cdot ^\circ K$)،

T - درجة الحرارة المطلقة $[^\circ K]$.

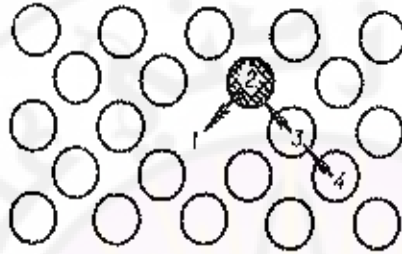


الشكل (١-٥) مراحل عملية التلبيد

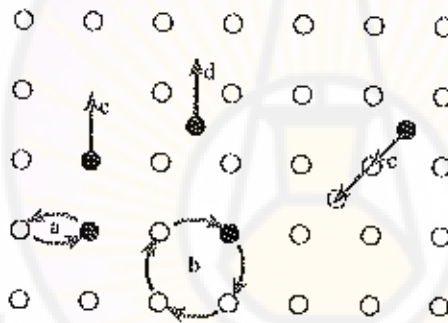
(a) بداية التلبيد، (b) تشكيل الرقاب، (c) نمو الرقاب وتشكيل حدود البلورات

تنقسم كثير من العمليات التي تحدث في المعادن والسبائك والمساحيق المعدنية (عمليات التشكيل - التحولات الطورية - إعادة التبلور - التلبيد... إلخ) بأنها ذات طابع انتشاري. ويطلق مصطلح "الانتشار" على ظاهرة انتقال الذرات في الأجسام البلورية لمسافات تزيد على المسافة المتوسطة بين ذرات المادة، فإذا لم تؤد هذه التحركات الذرية إلى تغيير التركيز C في الأجزاء (الأحجام) المختلفة للجسم البلوري سميت هذه الظاهرة بالانتشار الذاتي. أما الانتشار المصاحب لتغير في تركيز الأجزاء المختلفة من عينات المعادن والسبائك التي تحتوي على نسب مرتفعة من الشوائب أو العناصر السبائكية فيسمى بالانتشار غير المتجانس. وتقوم ظاهرة الانتشار في البلورات المعدنية على آلية ذرية قوامها أن كل ذرة تتذبذب حول موقع اتزانها بطريقة عشوائية تقوم خلالها بسلسلة من القفزات بين مواقع الاتزان الذري المتجاورة في النسق البلوري، والنهج الغالب على عمليات الانتشار في المساحيق المعدنية هو نهج الانتشار

عن طريق الفراغات (المسامات) vacancy، وفي مثل هذه الحالة تنتقل الذرة 2 التي تنقسم بقدر أكبر من الطاقة الحركية بالمقارنة بالذرات المحيطة لتتسلل مكان الفراغ 1 وبذلك يصبح الفراغ الجديد هو المكان السابق للذرة 2، ومن ثمّ تستطيع الذرة 3 أن تنتقل إليه وهلم جرا، انظر الشكل (٢-٥)، أما انتقال الذرات التداخلية interstitial وانتشارها فيتم على حدود الحبيبات (الشكل ٣-٥).



الشكل (٢-٥) آلية انتقال الذرات عبر الفراغات (المسامات)



للشكل (٣-٥) أنواع انتشار الذرات

a- انتشار تبادلي exchange، b- انتشار حلقي ring، c- انتشار عبر الفراغ

d- vacancy، انتشار تداخلية interstitial، e- انتشار تصادمي knock-on.

والآلية الغالبة على عملية الانتشار في المساحيق المعدنية هي من نوع آلية الانتشار عن طريق الفراغات (الثقوب)، حيث تنقسم الذرة التي تنتقل بطاقة حركية أكبر من الطاقة الحركية للذرات المحيطة لتتسلل مكان الفراغ (الثقب). تتحدد سرعة الانتشار بمقدار المادة المنتشرة في وحدة المساحة لسطح الانفصال في وحدة الزمن، بحيث تعتمد كمية المادة المنتشرة في وحدة الزمن على مقدار تدرج تركيز العنصر في

الاتجاه العمودي على سطح الانفصال وتتناسب مع معامل الانتشار D (cm^2/sec)، والذي يعرف بأنه كمية المادة المنتشرة خلال وحدة المساحة 1 cm^2 في وحدة الزمن 1 sec عندما يكون مقدار تدرج التركيز مساوياً للوحدة. ويعتمد معامل الانتشار على طبيعة المعدن أو السبيكة، وعلى حجم الحبيبات، وبوجه خاص على درجة الحرارة. كما أن انتقال الذرات حسب علاقة فرنكل وفوق نظرية الانتشار يتعلق بـ D :

$$D = C \cdot D' \quad (2-5)$$

حيث إن: D' هو معامل الانتشار للفراغات (الثقوب) الذي يحدد وفق العلاقة التالية:

$$D' = e^{-(U_a / KT)} \quad (3-5)$$

حيث إن: U_a - طاقة تنشيط حركة الذرات أو الفراغات $[J]$ ، وتأخذ العلاقة بين معامل الانتشار ودرجة الحرارة شكل الدالة الأسية، التي تحسب وفق العلاقة التالية:

$$D = D_0 \cdot e^{-((U_a + U_b) / KT)} = D_0 \cdot e^{-Q / KT} \quad (4-5)$$

حيث:

D_0 - ثابت لا يتعلق بدرجة الحرارة.

Q - طاقة تنشيط الانتشار $[J]$.

وتعبر طاقة تنشيط الانتشار Q عن طاقة تراكب الذرات في النسق البلوري، فكلما ازداد مقدار Q ازداد مقدار الطاقة اللازمة لانتقال ذرة من المادة المنتشرة من وضع اتزان في الهيكل الشبكي إلى وضع اتزان آخر. وتسهل عملية الانتشار عبر سطح وحدود الحبيبات، حيث تتركز عيوب الهيكل الشبكي (الفراغات - الانخلاعات... إلخ)، وينتج عن ذلك أن طاقة التنشيط في منطقة حدود الحبيبات أي في حالة الانتشار السطحي تقل بمقدار النصف تقريباً عن طاقة التنشيط داخل الحبيبات أي في حالة الانتشار الحجمي. ومنه تكون طاقة التنشيط مساوية لمجموع طاقة تشكيل الفراغات U_a و طاقة تنشيط حركتها U_b . ولكن يزداد تركيز الفراغات بالقرب من وجود المسامات حسب العلاقة التالية:

$$\Delta C = (2\sigma/r) \cdot (V_v / KT) \cdot C_0 \quad (5-5)$$

حيث إن: σ - قوى التوتر السطحي MPa

V_0 - حجم الخلية cm^3

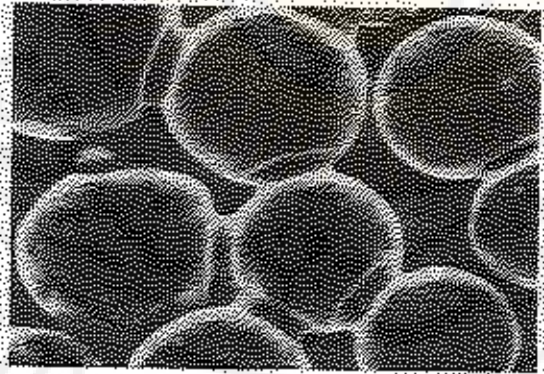
r - نصف قطر المسام cm

T - درجة حرارة التليد المطلقة $^\circ\text{K}$

K - ثابت بولتزمان.

يزداد تركيز الفراغات في أماكن الاتحناء والتقعير، أي في أماكن التلامس بين الحبيبات ويؤدي تدرج تركيز الفراغات الناشئة في الهيكل الشبكي إلى وجود ميزاب (سيل) الانتشار اعتباراً من سطح المسام وأماكن التلامس إلى الأماكن الأقل تركيزاً بالفراغات، وبالمقابل فإن تحريك الذرات يؤدي إلى زيادة الانتشار في المسامات. ويحدد حجم المسام مقدار التلامس بين الجزيئات والذي يرمز له بـ x بالنسبة للزمن t ، أما مقدار الانكماش فهو مقدار المسافة بين مراكز الجزيئات والذي يرمز له بـ ΔL وعندما تكون $t = 0$ فإن سطح التلامس بين جزيئات يكون عبارة عن نقطة انظر الشكل (٥-١)، وعند دراسة عملية التليد لا بد لنا من شرح السؤالين التاليين:

- ١- الانتقال الكتلي عند التليد (كيف تجري عملية التليد؟).
- ٢- آلية الانتقال الكتلي (أي طريق تملك عملية التليد؟).



الشكل (٥-٤) تشكل الرقاب بين الذرات المتجاورة للبرونز الكروي المنبذ

٥-٢-١ الانتقال الكتلي (القوى):

عند دراسة السؤال المطروح حول الانتقال الكتلي، فإنه يوجد عدة طرق تسلكها هذه القوى للانتقال من مكان لآخر وهي:

٥-٢-١-١ السلوك الترموديناميكي:

يعتمد السلوك الترموديناميكي على مسلمة أن الجسم المسحوق (المدمج) يكون حتى بداية التسخين بعيداً عن وضع الاتزان، أي يمتلك طاقة حرة كبيرة تتعلق بالطاقة السطحية الفاصلة وبالأسطح الحرة. فكلما كان المسحوق أنعم، أي سطحه أكبر كانت الطاقة السطحية أكبر، وذلك حسب العلاقة التالية:

$$\Delta\sigma_s = s \times \sigma \quad (6-5)$$

حيث يكون: s - السطح النوعي للمسحوق،

σ - الطاقة الحرة النوعية (التوتر السطحي).

وبما أن المساحيق هي عبارة عن جزيئات ذات بلورات متعددة لها حدود فاصلة متقطعة ذات عيوب كثيرة في البنية البلورية أي تمتلك طاقة حرة زائدة ناتجة عن تلك العيوب والحدود الفاصلة الكثيرة، فلذلك من الضروري أثناء عملية التليد تخفيض الطاقة الحرة السطحية وإنقاص عدد العيوب والحدود الفاصلة للجزيئات. لذلك يعتبر انتقال القوى عند التليد واحدة من أهم طموحات النظام لإنقاص الطاقة الحرة السطحية على حساب إنقاص العيوب والحدود الفاصلة من وجهة نظر السلوك الترموديناميكي.

٥-٢-١-٢ السلوك الميكانيكي:

ينحصر السلوك الميكانيكي بتقييم القوى المشككة على الحدود الفاصلة بين الجزيئات. ويتعلق منبع القوى المتحركة عند التليد بالسطح المنحني للجزيئات وبحجم المسامات وتركيز العيوب في البنية البلورية للمدجم. يمكن تعيين التوازن الميكانيكي على حدود طورين مختلفي السطح بمعادلة لابلاس:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = [\sigma(1/R_1 + 1/R_2)] \quad (7-5)$$

حيث يكون: Δp - الضغط السطحي بين الأطوار.

p_1, p_2 - الضغط على الحدود الفاصلة.

σ - الطاقة السطحية (التوتر السطحي) النوعية على الحدود الفاصلة للأطوار.

R_1, R_2 - أنصاف أقطار تقوس الأسطح للجزيئات على الحدود الفاصلة للأطوار.

أما إذا كانت الجزيئات كروية الشكل، فإن $R_1 = R_2 = R$ ومنه تصبح العلاقة:

$$\Delta p = 2\sigma/R \quad (8-5)$$

وإذا درسنا التأثير المتبادل بين جزيئات المادة و مساماتها، فإن توازن القوى على السطح الخارجي (الرقبة) يصبح على النحو التالي:

$$p_s = p_p - \sigma[(1/p) - (1/x)] \quad (9-5)$$

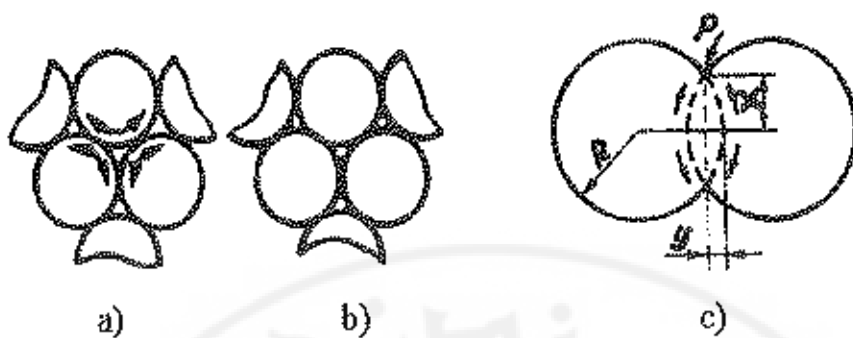
حيث إن: p_s - الضغط الناشئ (الإجهاد) على سطح الجزيئة، p_p - ضغط الغاز في المسام والعائق لتوسيع الرقبة، p - نصف قطر التقوس للرقبة، x - نصف قطر التلامس، انظر الشكل (٤-٢).

وبما أن دائماً $x \ll R$ فإن $x \ll p$ أي إن $1/p \gg 1/x$ ومنه يمكن تقريب المعادلة السابقة إلى:

$$p_s = p_p - \sigma/p \quad (10-5)$$

حيث إن: σ/p هي عبارة عن الإجهادات المشادة المؤدية إلى تحريك الرقبة المشككة باتجاه المسام التي تؤدي إلى إنقاص سطح المسامات عن طريق إنقاص أبعادها، ومن ثم إلى زيادة المتانة والكثافة للمدمج. في حال $p_p > \sigma/p$ فإن أبعاد الرقاب سوف تزداد، أي يحصل انكماش، وتكون القوى المتحركة مساوية $p_s - p_p$ سالبة، ويتناقص الإجهاد المؤثر في الحدود بين الأطوار المحيطة بالمسام. ومن الملاحظ أنه تتغير p عادة لعدة ميكرونات يقابلها تغير الحد σ/p لثبات اللبيوتات في السنتيمتر المربع.

ويؤدي زيادة درجة الحرارة عند التسخين إلى نقصان حجم المسامات وتشكيل بخار الماء الناتج عن اختزال الأكاسيد على أسطح المسامات. ويحدد انحناء سطح الجزيئات والرقاب المشككة وجود قوتين للتلييد، إحداها تختلف عن ضغط الاتزان للبخار فوق المدمج، وأخرى تتعلق بعدم توازن تركيز الفراغات بالقرب من سطح التقعر.

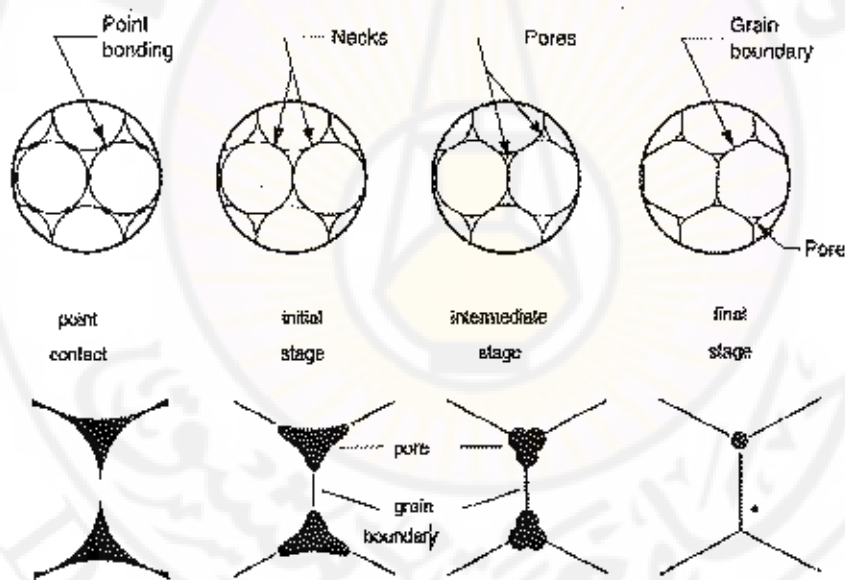


الشكل (5-3) رسماً تخطيطياً للمدمجات قبل (a) وبعد (b) التسخين

ونموذج تلييد لحبيبتين (c)

حيث إن: R - نصف قطر الحبيبة، y - نصف مقدار تقارب مراكز الحبيبتين،

ρ - نصف قطر الرقبة، x - نصف قطر التلامس



الشكل (5-4) مراحل عملية التلييد في الطور الصلب

١- مرحلة تشكل التلامس بين الجزيئات، ٢- مرحلة تشكل الأعناق،

٣- مرحلة نمو الأعناق وتشكل المسامات، ٤- مرحلة عزل المسامات ونمو الحبيبات.

٥-٢-١-٣ الانتقال الكتلي عبر الطور الغازي:

يتم الانتقال الكتلي عبر الطور الغازي نتيجة لاختلاف الضغط الجزئي فوق الأسطح المحدبة والأسطح المقعرة. ومن المعروف أن الضغط الجزئي للبخار فوق السطح المحدب يحسب بالعلاقة التالية:

$$p = p_0 \cdot [1 - (\sigma \cdot V_0) / (R_0 \cdot T \cdot \rho)] \quad (11-5)$$

أما الضغط الجزئي فوق السطح المقعر فيعطى بالعلاقة:

$$p = p_0 \cdot [1 + (2\sigma \cdot V_0) / (R_0 \cdot T \cdot R)] \quad (12-5)$$

حيث إن:

p_0 - ضغط البخار فوق السطح المستوي

R_0 - ثابت الغازات العام

V_0 - حجم الذرة

وبما أن الضغط الجزئي فوق السطح المقعر أقل من الضغط الجزئي فوق السطح المحدب، فإنه يحدث تبخر للمادة من السطح المحدب وتكثيف على السطح المقعر. وتظهر هذه الآلية في المراحل الأخيرة من عملية التليد عندما تتغلق قنوات المسامات، مما يؤدي إلى نمو رقاب التلامس وإلى زيادة المتانة و صقل أو تنعيم للسطح، ولكن الانتقال الكتلي عبر الطور الغازي لا يؤدي إلى الاتكماش.

٥-٢-٢ آلية التليد:

تتقسم آلية التليد - التي هي عبارة عن مقدار نمو سطح التلامس بين الحبيبات عند درجات الحرارة العالية - إلى عدة مراحل:

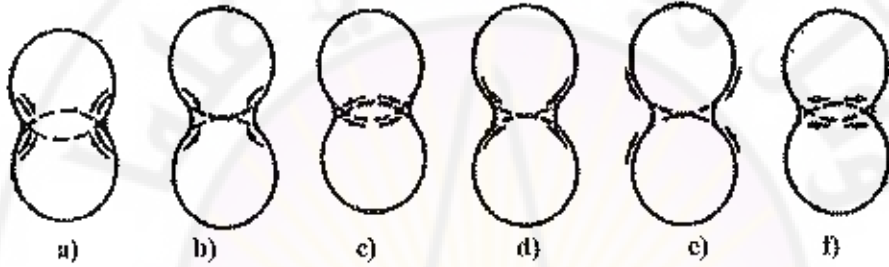
١. مرحلة الانسياب اللزج :

وهي شبيهة بآلية انسياب السوائل، التي عندها يحدث تحرك الذرات بشكل موجه عبر الحجم إلى بداية التلامس وتشكيل الرقاب بحيث يزداد سطح التلامس وتتقارب مراكز الجزيئات فيما بينها (الشكل ٥-٧). تُحدّد سرعة هذه العملية بمعامل اللزوجة للمادة الملتدة الذي يتعلق مباشرة بمعامل الانتشار $D^{-1} \sim \eta$ ، ويمكن تعريفه بأنه الانتشار الناتج عن عملية الزحف الذي يؤدي إلى الانتقال الموجه للمسامات (الثقوب) من

السطح المعرض لإجهادات الشد إلى الأسطح الطليقة، مثل الحدود الخارجية للجزيئات، مما يؤدي إلى تحرك الذرات بالاتجاه المعاكس كما في الشكل (٨-٥). تؤدي الحركة العكسية للذرات إلى تشوهات ماكروية تتعلق بتدرج تركيز العيوب، ومن وجهة نظر عملية الانسياب اللزج للمادة فإن معدل تركيز الإجهادات يتعلق بمعدل الضغط الشعري الذي يحسب بالعلاقة:

$$\Delta c = \Delta p \cdot (V_0 / K.T) \cdot c_0 \quad (13-5)$$

حيث يكون: V_0 - حجم وحدة الخلية، و c_0 - تركيز الفراغات الموجودة على السطح.



الشكل (٧-٥) مخطط آلية الالتحام المختلفة للجزيئات الكروية الشكل



الشكل (٨-٥) مخطط انتشار المصامات (1)

والذرات (2) في الأجسام البلورية تحت تأثير القوى الخارجية

وتتعلق سرعة الانسياب اللزج $1/\eta$ (سرعة الزحف) بمعامل الانتشار الحجمي D ، وبطول ضلع الهيكل الشبكي a ودرجة الحرارة T وبطول الأبعاد الخطية L في

النظام المدروس مثل نصف قطر الرقبة المتشكلة بين جريئين عند الالتحام، وتحسب سرعة الانسياب اللزج بالعلاقة التالية:

$$U/\eta = [(D.a^2) / (K.T.E.)] \quad (14-5)$$

حيث K : ثابت بولتزمان.

يمكن اعتبار زيادة متانة المدمج ناتجة عن الانسياب اللزج والانتشار الحجمي، ولكن الاختلاف بين آلية الانسياب اللزج وآلية الانتشار الحجمي هو وجود تيار من الفراغات الماكروية يزحف إلى السطح الخارجي للمدمج من جهة ووجود تيار من تيار من الفراغات الميكروية غير المتجانس بين عناصر البنية يبدأ بالزحف من الأسطح الداخلية باتجاه السطح الخارجي مما يؤدي إلى تشكيل الفراغات (المسامات).

٢. مرحلة الانتشار الحجمي دون تقارب بين مراكز الحبيبات:

التي عندها تتحرك الذرات عبر الحجم من بداية التحدب (الانحناء) إلى نهاية تقعر سطح التلامس للرقاب (الشكل ٧-٥ b)، أي يكون تيار الفراغات الفاضلة التي تنشأ بالقرب من تقعر سطح الرقبة عبارة عن تقعر سطح الحبيبات، ويلاحظ هنا نمو سطح التلامس ولكن لا يحدث تقارب بين مراكز الحبيبات.

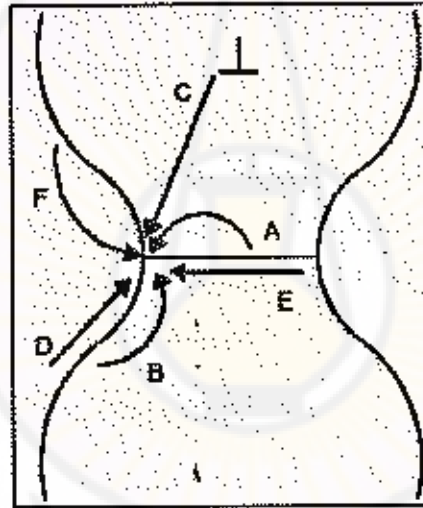
٣. مرحلة الانتشار الحجمي مع وجود تقارب بين مراكز الحبيبات:

التي عندها تنتقل الذرات من حدود الجزيئات بالقرب من السطح في أماكن التلامس (الشكل ٧-٥ c) أي يحدث هنا تحرك الفراغات، ويمكن ملاحظة ازدياد سطح التلامس مع وجود تقارب بين مراكز الحبيبات.

ويحدث حسب آلية الانتشار الحجمي انتقال الذرات عند المسامات المغلقة والمعزولة من المسامات الكبيرة إلى المسامات الصغيرة حيث ينساب المعدن إلى داخل المسامات، ومع زيادة التلامس بين الرقاب يتناقص حجم المسامات، و من ثم ينكمش المدمج.

يظهر أثناء عملية التليد للمدمجات اختزال الأكاسيد انتقال المادة عبر الطور الغازي عن طريق تحولها إلى جزيء الأكسيد، وتنفذ بذلك الارتباط بشكل جزئي مع الأساس

Matrix ولكن يزداد نشاطها مما يسهل انتقالها إلى الطور الغازي. يتعلق انتقال المادة في الطور الغازي أثناء التليد بعملية تبخير للمادة من سطح إحدى الحبيبات من ناحية وتكثيف على سطح حبيبة أخرى من ناحية ثانية مشروطة باختلاف مرونة البخار وباختلاف الانحناء على السطح، بحيث تمثل الجزيئات ذات نصف قطر الانحناء الأكبر مرونة بخار أكبر. من العتبة ذات نصف قطر الانحناء الأصغر. لذلك يحدث على العتبة تكثيف الذرات مما يؤدي إلى زيادة أبعاد العتبة، ومن ثم إلى حدوث الانكماش. تعتبر هذه العملية عملية اضمحلال بسبب اختلاف مرونة البخار الذي يتناقص مع الزمن. يؤدي لانتقال الذرات عبر الطور الغازي إلى تغيير شكل المسامات ونمو العتبات (الجسور) بين الحبيبات، ولكن لا يظهر أي تأثير على الكثافة (الانكماش) عند التليد.



الشكل (٥-٩) الانتقال الكتلي أثناء عملية الانتشار

- A- الانتشار من حدود الحبيبات، B- الانتشار من السطح،
- C- الانتشار من العيوب (الانخلاعات)، D- الانتشار السطحي من السطح،
- E- انتشار على حدود الحبيبات، F- الانتقال عبر الطور الغازي.

٤. مرحلة الانتشار السطحي:

التي عندها يحدث انتقال المادة نتيجة لانتشار الذرات عبر سطح الحبيبات ابتداء من الأجزاء المنخفضة وانتهاء بالأجزاء المحدبة لسطح رقبة التلامس (الشكل ٥-٧ d)، يلاحظ هنا نمو سطح التلامس بين الحبيبات من دون تقارب بين المراكز. يعتبر الانتشار السطحي للذرات الأكثر وجوداً تحت تأثير الجهد الترموديناميكي Thermodynamic Potential، إذ تتعلق حركة الذرات بالمكان الذي تشغله، وتكون الحركة أقل ما يمكن في أماكن التلامس (تمتلك الذرات هنا أقل طاقة حرة)، كما يلاحظ عدم تغير للشكل شبه الكروي للمسامات عبر الحجم. وبالنسبة يحدث كبر في سطح التلامس وزيادة التماسك بين الجزيئات، ولكن لا نلاحظ هنا انكماش عند التليد. لا يؤدي الانتشار السطحي للذرات إلى إتقاص مجموع حجم المسامات، ولكن يمكن أن يحدث امتصاص المسامات الصغيرة من قبل المسامات الكبيرة أي يحدث اندماج للمسامات. ويتعلق هذا الاندماج بأن الذرات الموجودة على أسطح المسامات الصغيرة تمتلك طاقة حرة كاملة أقل من الذرات الموجودة على أسطح المسامات الكبيرة، ويحدث عند عملية التليد تحريك الذرات من المسامات الكبيرة إلى المسامات الصغيرة. وفي النهاية يزداد حجم المسامات الكبيرة على حساب نقصان حجم المسامات الصغيرة بالنسبة للمسامات المفتوحة.

١- مرحلة انتقال المادة عبر الطور الغازي:

الذي يفضي بسبب اختلال توازن ضغط البخار بجوار أجزاء الأسطح المحدبة والمنخفضة للحبيبات المتلامسة، وتحدد سرعة هذه العملية من قبل معامل الانتشار في الطور الغازي، ويحدث هنا زيادة سطح التلامس من دون حدوث تقارب بين مراكز الحبيبات (الشكل ٥-٧ e)، وتعتبر المراحل الخمس المبينة أعلاه ذاتية الحدوث، أي تحدث من دون تأثير العوامل الخارجية المختلفة.

٢- آلية التصاق الحبيبات:

التي تحدث نتيجة تأثير ضغط خارجي إضافي مما ينتج عنه حدوث انسياب المادة إلى حقل التلامس (الشكل ٥-٧ f). ويلاحظ هنا ازدياد سطح التلامس مترافقاً مع تقارب بين الجزيئات. مثال عملية التدميج على الساخن.

٥-٢-٣ إعادة التبلور:

يحدث أثناء تسخين مدمجات المساحيق نمو (تضخم) الجزيئات كما هو الحال عند نمو الحبيبات في المعادن المصنوعة بالطرق التقليدية، ولكن لا يحدث تطابق تام بين المدمجات والمصبوبات أثناء عملية إعادة التبلور نظراً لوجود فراغات سطحية عند المدمجات. تتشكل الجزيئات الكبيرة نتيجة لانتقال المادة من أسطح الجزيئات الصغيرة الحجم إلى الجزيئات الكبيرة الحجم، التي تحدث عن طريق انتقال الذرات على طول الحدود بين الجزيئات باتجاه الجزيئات ذات الطاقة الحرة الأقل وعلى عرض الأجزاء المتلامسة. تُحدد قوى انتقال إعادة التبلور طموح النظام في الانتقال إلى حالة أكثر استقراراً ذات حدود سطحية إجمالية أقل، واختلاف الطاقة الحرة للجزيئات في اتجاهي الحدود بينها تحدد اتجاه حركة السطح نحو مركز الانحناء. ومعروف أن البلورة التي لديها ستّ أضلع أو أكثر فسيكون السطح ذا حدود مقعرة، مما يؤدي نمو حجم البلورة إلى حجم معين، وإذا كان للبلورة أقل من ستّ أضلع فسيكون السطح محدباً، فهذا يعني أن البلورة تتناقص في الحجم حتى اختفائها تماماً. مخطط نمو البلورة مبين في الشكل (٥-١٠) وتشير الأرقام إلى عدد الحدود في البلورة بينما تشير الأسهم إلى اتجاه حركة النمو. وتتناسب سرعة نمو الجزيئات عكسياً مع نصف قطر الانحناء، حسب العلاقة التالية:

$$d - d_0 = K \cdot \tau^{0.5} \quad (15-5)$$

حيث إن:

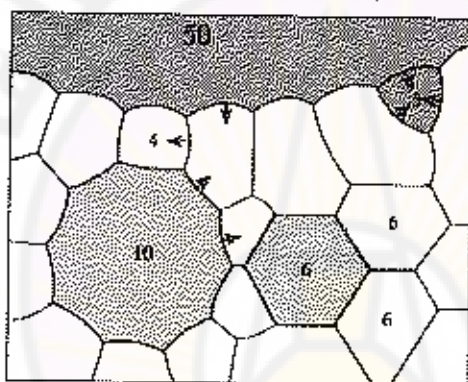
d_0 - قطر الجريئة قبل نموها،

d - قطر الجريئة النامية بعد زمن مقداره τ ،

K - معامل يتعلق بطبيعة المادة.

يؤدي زيادة التلامس بين حدود الجزيئات إلى إمكانية التنقل من جزيئه إلى أخرى، وتسمى هذه الظاهرة إعادة تبلور بين الجزيئات. وعملياً يستمر نمو الحبيبات ليس فقط حتى تشكيل البلورات الأحادية Monocrystal كما هو معلوم نظرياً، ولكن يتأخر قليلاً بسبب تأثير كبح الشوائب الغريبة الموجودة على حدود الحبيبات مثل: المسمات، فقاعات الغازات، الأكاسيد وغيرها.

تبدأ درجة حرارة إعادة التبلور في المدمجات البسيطة عند درجة حرارة $0.3 - 0.4 T_m$ أما عند درجة حرارة $0.75 - 0.85 T_m$ فإننا نصل لنهاية تشكيل المدمج الملبد. يحدث أثناء عملية إعادة التبلور عمليات أخرى مثل الانكماش وغيرها.

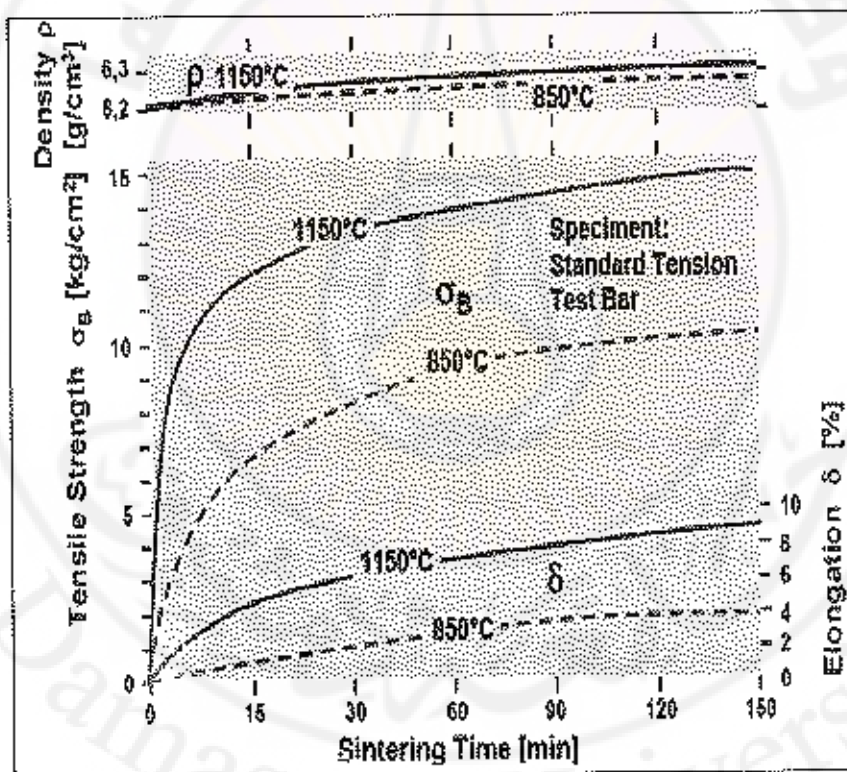


الشكل (١٠-٥) رسم تخطيطي لنمو الحبيبات الكبيرة في المدمجات عند التسخين

٥-٢-٤ التغيرات التي تحدث أثناء التليد:

إن الأبحاث النظرية الخاصة بما يحدث أثناء التليد بالرغم من أهميتها العلمية الكبيرة، فإنها لا تهتم بصورة مباشرة، ولكن ما يهمنا هو تأثير عملية التليد في الخصائص الهندسية لهذه الأجزاء، وخاصة تزايد المتانة كمقاومة الشد. مثلاً- وهذا هو الهدف الرئيسي لهذه العملية- وأحد قوانين الطبيعة يقول: إن كل الأنظمة تميل نحو حالة الطاقة الدنيا، ولما كانت السطوح الحرة ذات طاقة مرتبطة بها، كان تقليل مساحة السطح هو الهدف. وهذا يعني أنه في حالة مواد المساحيق فإن المسمات تميل إلى أن تكون على شكل قريب من الكروي، والجسم بصفة عامة يميل نحو التقلص أي نحو

الانكماش، وبذلك تتزايد الكثافة مما يؤدي لزيادة المتانة، إلا أن الأبعاد يمكن أن تتغير نحو الزيادة أو النقصان، وبالممارسة العملية يمكن تحديد كمية الخلط وملء القالب بحيث يكونان ثابتين، ويمكن مراعاة ذلك والسماح فيه لدى تصميم المعدات والأدوات مع وجود بعض التباين. ولحسن الحظ فإن التباينات الطفيفة يمكن تسويتها بواسطة عملية التحجيم والمعايرة. ومن الملاحظ أن زيادة الكثافة (المتانة) يتعلق بارتفاع درجة الحرارة ويزمن التليد اللذين يؤديان لزيادة المتانة في البداية بشكل كبير، ثم تتباطأ (انظر الشكل (١١-٥))، كما أن سرعة التسخين تأثيراً كبيراً في المدمجات، إذ يؤدي إلى انفصال موضعي عند الانكماش.



الشكل (١١-٥) تأثير الزمن ودرجة حرارة التليد في الخواص الميكانيكية للمادة

٥-٢-٤-١ الانكماش وزيادة الكثافة أثناء عملية التلييد:

من المعروف أن عملية التلييد تؤدي إلى زيادة الكثافة ونقصان أبعاد المدمجات (الانكماش الخطي) ونقصان الحجم (الانكماش الحجمي) نتيجة إنقاص عدد وحجم المسامات بسبب التنامي بعضها مع بعض، وقد لوحظ تزايد تدريجي في المتانة - وهذا هو الهدف الرئيسي لهذه العملية - وهذه الزيادة في الكثافة تتمخض عن قوة ومتانة متزايدة، إلا أننا نكون أقل معادة فيما يتعلق تأثير ذلك في الأبعاد. أما فيما يتعلق بالممارسة العملية، بشرط أن يكون خليط المسحوق وملء القالب ثابتين، فإن التغيير دائماً هو نفسه، ويمكن السماح فيه لدى تصميم المعدات والأدوات. وحسب سرعة ظهور التغير بالأبعاد (الانكماش) في المدمجات فإن زيادة الكثافة يمكن تقسيمها إلى ثلاث مراحل عند التلييد:

١. المرحلة البدائية: تكون كثافة المدمج قليلة، بينما تكون سرعة الانكماش كبيرة، ويحدد طبيعة التكتيف ظهور أماكن التلامس التي تتعلق بالتركيب البنيوي و بأبعاد المدمج، ويحدث تقلص سريع لحجم المسامات.

٢. المرحلة البينية: تتناقص عندها سرعة الانكماش ويحدث نقصان في حجم المسامات، كما تزداد الكثافة في جميع اتجاهات المدمج، بينما يسلك اللب Matrix سلوك الوسط اللزج وتكون الكثافة متجانسة.

٣. المرحلة الأخيرة: يكون فيها الانكماش وزيادة الكثافة قليلين، ويحتوي المدمج هنا على مسامات معزولة تلتئم نتيجة الانتشار الحاصل في اللب مع خروج الفراغات إلى السطح الخارجي، ويمكن القول: إن هذه المرحلة هامة جداً، لأنه لو حصل إعادة عملية التلييد حصل ثانية انكماش في المدمجات.

من ميزات خصائص الانكماش للمدمج المسخن هو تناقص سرعته بالنسبة لزمان التلييد كما هو مبين في الشكل (٥-١١)، فمع زيادة درجة حرارة التلييد تزداد سرعة التكتيف ولكن سرعان ما تتناقص هذه السرعة عند ارتفاع درجة الحرارة بشكل

ملحوظ. ويبين الشكل (١٢-٥) منحنيات الانكماش لدمجات الحديد مشكلة عند ضغوط مختلفة. ويعبر عن الانكماش الحجمي بالعلاقة التالية:

$$\Delta V = K \cdot \tau^{0.5} \quad (16-5)$$

حيث إن: V و ΔV - حجم المسام وتغير الحجم عند ثبات الزمن الإيزوترمي τ ، بينما K هو ثابت. ويتعلق تناقص سرعة تقلص حجم المسامات بنقصان حجمها حسب العلاقة التالية:

$$(dV/d\tau)_1 / (dV/d\tau)_2 = (V_1/V_2)^n \quad (17-5)$$

حيث إن: V_1 و V_2 مجموع أحجام المسامات عند اللحظة الزمنية τ_1 ، τ_2 على التوالي أي قبل وبعد عملية التليد، و n - فهو مؤشر كبح الانكماش، أما آلية تغير المسامية فيتم حسابها وفق العلاقة التالية:

$$V = V_0 \cdot (qmr + 1)^{-1/m} \quad (18-5)$$

حيث إن:

V - حجم المسام بعد زمن الثبات الحراري الإيزوترمي τ ،

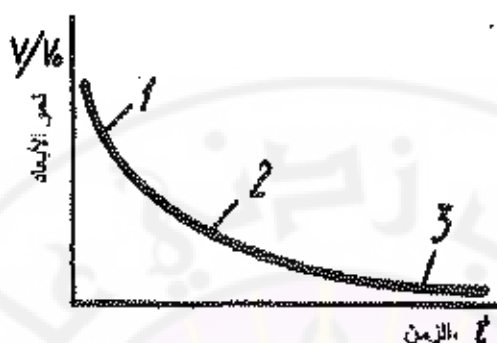
V_0 - الحجم البدائي للمسام عندما $\tau = 0$ ،

m - ثابت يتعلق بشدة نقصان سرعة تقلص حجم المسامات خلال عملية التليد

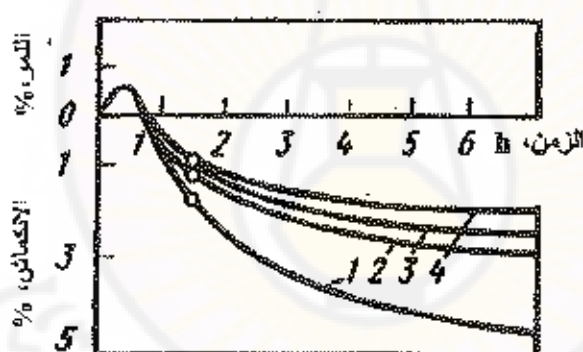
حيث إن: $m = n - 1$ و q - ثابت يتعلق بسرعة تقلص حجم المسام عند بداية التليد $\tau = 0$.

يتعلق الانكماش عند عملية التليد بمقدار حجم التشوهات الحاصلة للجزيئات تحت تأثير قوى التوتر السطحي التي تحدث أثناء الانتشار الذاتي، وتغير مع الزمن نتيجة نقصان تركيز العيوب في البنية البلورية. و يسمى تأثير العيوب في البنية البلورية في الانكماش بمعامل البنية، بينما يسمى تأثير التصليد عند زيادة الكثافة بالمعامل الهندسي. يجب مراعاة الانكماش عند وضع الحسابات وتصميم قالب التشكيل، كما يجب ملاحظة أن زيادة الكثافة عند التليد تكون أكبر في المدمجات المشكلة عند ضغط نوعي قليل من المدمجات المشكلة عند ضغط عال انظر الشكل (١٣-٥). كما أن التباينات الطفيفة

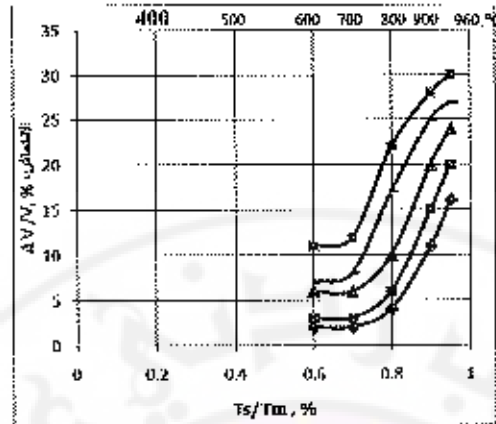
يمكن تسويتها بواسطة عملية التحجيم والمعايرة Sizing. وكما هو متوقع فإن الثبات البعدي Dimensional أسهل تحقيقاً إذا كان التغير في الأبعاد صغيراً أثناء التليد.



الشكل (١١-٥) تأثير زمن التليد على الانكماش
1 - المرحلة الأولى، 2 - المرحلة البينية، 3 - المرحلة الأخيرة للتليد



الشكل (١٢-٥) الانكماش الغطلي لمدمجات الحديد عند 890°C وضغوط مختلفة MPa
1 - 400، 2 - 600، 3 - 800، 4 - 1000، بينما العلامة - 0 تشير إلى بداية زمن التليد.



الشكل (١٣-٥) تأثير درجة الحرارة ومعدلها والضغط على الانكماش

- 1- تلييد بدون ضغط، 2- تلييد مع ضغط $p = 0.65 \text{ MPa}$ ، 3- $p = 1.3 \text{ MPa}$ ، 4- $p = 2.3 \text{ MPa}$ ، 5- $p = 3.4 \text{ MPa}$

٢-٤-٢-٥ التحكم في الانكماش Control of shrinkage:

بما أن الانكماش، كما سبق رأينا، عبارة عن نتيجة طبيعية للتلييد، فإن إمكانية إنتاج خلطات غير نامية No-growth mix يحتاج إلى شرح. ويمكن المر في سلوك عناصر السبك المعدنية المضافة إلى الخلطة في شكل عنصري elemental بسيط، ومثال على ذلك تكون إضافة النحاس إلى الحديد ذات أهمية عملية بالغة. وعلى هذا فإن إضافة نحو 2 - 3 % من النحاس كافية لتعويض التقلص في مدمجات الحديد المتبعة بالطريقة المعتادة. إذ إن إضافة كميات أكبر تتسبب في وجود نمو فعلي، وذلك لأن النمو والتقلص يتأثران أيضاً بعوامل أخرى منها:

- خصائص مسحوق الحديد المستخدم وطريقة تحضيره،
- .. توزيع حجم الحبيبات،
- .. نظام التلييد، إذ إن درجة الحرارة الأعلى وزمن التلييد الأطول يؤديان إلى التقلص.

ومع ذلك فإن الألية الحقيقية التي يحدث النحاس بواسطتها النمو، هي موضوع نقاش وجدال. وفي أول الأمر كان الاعتقاد السائد هو أن التمدد ناجم عن انتشار ذرات

النحاس في الهياكل الشبكية lattice للحديد، ولكن وجهة النظر هذه لم يعد بالإمكان الدفاع عنها عندما ثبت أن التمدد يحدث بصورة مفاجئة تماماً بعد انصهار النحاس، إذ يكون انتشار أحد العناصر في الآخر بطيئاً جداً. وقد أثبتت الأبحاث الحديثة أنه عندما ينصهر النحاس فإنه يشق طريقه أولاً على طول الحدود بين ذرات الحديد، أما الفراغات التي كانت مشغولة بذرات النحاس فإنها تصبح مسام. ومما لا شك فيه، أن العملية بأكملها هي عملية ترموديناميكية، وإذا أبقى المدمج عند درجة حرارة التليد لأوقات أطول بصورة تصاعدية، فإن التقلص يحدث بصورة متزايدة. إن تأثير تعزيز التنامي للنحاس يمكن مقاومته بإضافة عنصر النيكل، الذي يقوم بمفرده، بالإسراع في عملية التليد، إذ من المحتمل أن يكون ذلك بزيادة معدلات الانتشار. وهكذا يكون بإمكاننا إنتاج خلطات غير نامية تتمتع بمستويات مختلفة من المتانة.

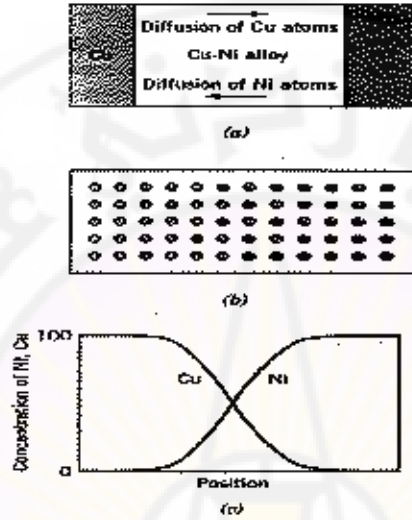
وهناك آلية تحكم في النمو مماثلة موجودة في البرونز؛ فإذا تم صنع هذه السبيكة من خلطات عنصر النحاس ومساحيق القصدير، فإن النمو في الأبعاد يحدث لدى القيام بعملية التليد. ويعزى هذا النمو إلى وجود تفاعل بين مادتين غير متطابقتي الانصهار عند درجة حرارة ٧٩٨ م° التي تتشكل فيها حالة سائلة غنية بالقصدير. وعندما يزداد ارتفاع درجة الحرارة فإن الانكماش المتوقع يبدأ في الحدوث، لذلك يمكن استخدام تغيير درجة حرارة التليد كوسيلة للتحكم في الأبعاد النهائية، إلا أنه توجد حدود للقيام بفعل ذلك.

٥-٣ نظام التليد للخلائط متعددة التراكيب:

ن تليد النظام المتعدد التراكيب يكون أكثر تعقيداً من النظام الأحادي التركيب وتغير الكثافة يكون أقل، وذلك لأن تيار الانتشار للعناصر غير متساو، أي غير متجانس Heterodiffusion، و يمكن تمييز ثلاثة أنواع هكذا نظام:

١- نظام الذويان الكامل للعناصر مثل أنظمة: $\text{Cu} - \text{Ni}$, $\text{Fe} - \text{Ni}$, $\text{Co} \cdots \text{Ni}$ إلخ.... يحدث في مثل هذه الأنظمة الانتشار المسامي أو انتفاخ بسبب الاختلاف بمعامل الانتشار بين العناصر، مثال تدخل

8 ذرات نحاس في الهيكل الشبكي للنikel، بينما تدخل ذرتي نيكل في الهيكل الشبكي للنحاس، لذلك ينتفخ أو يتضخم الهيكل الشبكي للنikel بينما يتشكل فراغات أو مسامات في النحاس، ويؤدي إضافة العنصر الثاني للنظام إلى إنقاص سرعة التكتيف، و من ثم إلى نقصان المتانة، ويكون هذا الاختلاف صغيراً عندما تكون النسبة 1:1.



الشكل (١٤-٥) نظام الذوبان الكامل في نظام Ni - Cu

٢- نظام الذوبان المحدود للعناصر مثل أنظمة: Fe - W, Fe - C, Fe - Cu, Ni - Cu - W، وغيرها. إذ يؤدي العنصر الثاني في النظام دور الإضافات الخاملة. مثال: يكون الكربون حتى درجة حرارة 900°C - خاملاً وبارتفاع درجة الحرارة فوق 900°C يبدأ نشاطه بتشكيل السمنتيت. فإذا تشكل طوراً جديداً ذو حجم أكبر من حجم الطور الأساسي، فإنه يحصل انتفاخ لجزيئات المساحيق ونمو أبعاد المدمج والانكماش يكون محدوداً ويحدث فقط على حدود العنصر الثاني ذي الذوبان المحدود.

٣- نظام عديم الذوبان للعناصر: مثال على هذه الأنظمة: W, W - Ag, Cu - C, Mo - Cu, - Cu وغيرها، يمكن أن يحدث تلييد هذا النظام لجزيئتي عنصرين غير متجانسين، وذلك عندما تكون الطاقة السطحية المتشكلة بين الأطوار الحدودية σ_{AB} أقل من مجموع الطاقة السطحية للعناصر الملبدة، أي:

$$\sigma_{AB} < |\sigma_A + \sigma_B| \quad (19-5)$$

لذلك يكون هناك احتمالان:

$$\sigma_{AB} > |\sigma_A - \sigma_B| \quad (20-5)$$

$$\sigma_{AB} < |\sigma_A - \sigma_B| \quad (21-5)$$

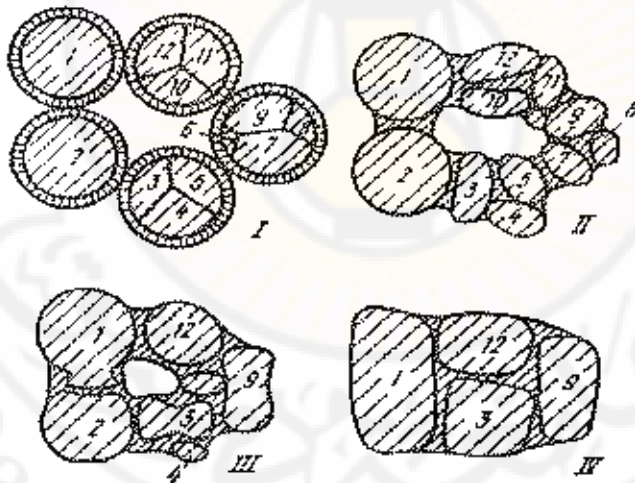
إذا تحققت الشروط وفق المعادلة (20) فإنه تتشكل بين جزيئات العنصرين A و B "برزخ" مغمور بكلا العنصرين، وصعب الحصول على تكثيف كامل أي قريبة من الكثافة النظرية. أما إذا جرت وفق المعادلة (21) فإنه يحدث تليد الجزيئات ذات الطاقة السطحية الأكبر، وفي هذه الحالة تجري عملية التليد وكأنها أحادية التركيب وليس كمعددة التركيب، لذلك يكون التليد ممكناً حتى الحالة المسامية دون تغيير.

٥-٤ تليد الطور السائل *Liquid phase sintering*:

يشير هذا الأسلوب الذي يدعى "الطور السائل موجوداً لأحد العناصر السهلة الانصهار" أو بسبب تشكل البيوتكتيك في بعض المراحل أثناء دورة التليد، والهدف من تشكيل الطور السائل هو زيادة الكثافة و تحسين الخواص الفيزيائية ميكانيكية للمساحيق المعدنية، وإنقاص درجة حرارة تليد المواد الصعبة الانصهار Refractory materials. وهناك نوعان مختلفان يمكن تمييزهما، تلك الأنواع التي يكون فيها الطور السائل موجوداً خلال مرحلة التليد بأكملها، وتلك التي يكون فيها الطور السائل عابراً ومؤقتاً يختفي بالانتشار في المادة الصلبة إما أثناء عملية التسخين و إما في الوقت الذي يكون فيه المعدن محتفظاً به عند درجة حرارة التليد النهائية نفسها، أي يمكن أن يظهر في المدمجات قبل نهاية عملية التليد.

... يوجد الطور السائل في الحالة الأولى لإنقاص درجة حرارة تليد المواد الصعبة الانصهار، التي تنصهر بشكل جزئي متحولة إلى الطور السائل و موجودة خلال عملية التليد. ولكن تبقى البنية غير متجانسة ومتكونة من أجزاء من المعادن صعبة الانصهار مع وجود كميات صغيرة سهلة الانصهار. ومن الأمثلة على ذلك الخلطات المحتوية على الكوبالت وكربيد التنغستن والتيتانيوم. يتشكل الطور السائل نتيجة انصهار الكوبالت الذي يبقى سائلاً بالرغم من أنه يذيب كمية صغيرة من كربيد التنغستن. ويمكن شرح عملية إدخال معدن (أو معادن) ذي نقطة انصهار متدنية، و

هي عبارة عن حيلة لتمكين المواد الصعبة من التليد بنجاح إلى كثافة عالية. لذلك تكون المسامية هنا قريبة من الصفر، أي الكثافة قريبة جداً من الكثافة النظرية. وبالرغم من أن التتغستين كتقريب أول غير قابل للانحلال، من المعقول الاستنتاج بأنه يجب أن تكون هناك درجة صغيرة نوعاً ما من الانحلال، لأنه مع وجود أوقات أطول بصورة تصاعدية عند درجة حرارة التليد، فإن حجم ذرات التتغستين تزداد، و يمكن أن يتم ذلك فقط عن طريق نقل ذرات التتغستين عبر الطور السائل. و مثال آخر هو نظام $W - Ni$ مبين في الشكل (١٥-٥) الذي يمثل مخطط الانكماش عند تليد الطور السائل لخليط المساحيق المؤلف من النيكل و التتغستين. تبين المرحلة I الحالة الأصلية لأحادية ومتعددة البلورات لجزيئات التتغستين محاطة بالنيكل. وتتصف المرحلة II بهجرة الجزيئات المتعددة البلورات وتجمع ميكانيكي شديد أثناء انصهار النيكل. تتصف المرحلة III بتجمع كيميائي يؤدي إلى الالتحام ونمو جزيئات التتغستين الكبيرة على حساب الجزيئات الصغيرة، ثم يحدث التكثيف النهائي (زيادة المتانة) في المرحلة الأخيرة IV.

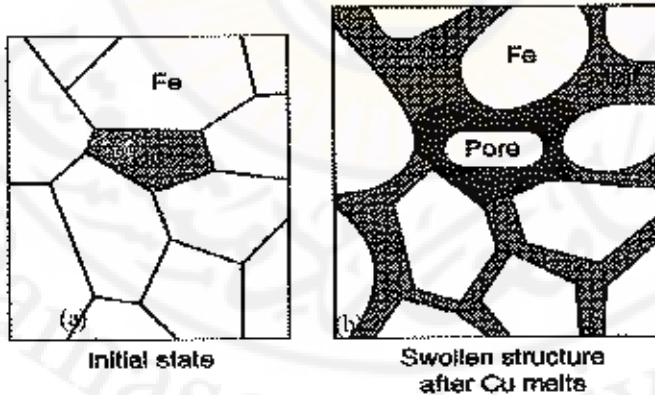


الشكل (١٥-٥) مخطط عملية الانكماش أثناء تليد الطور السائل للنظام $W - Ni$ (١-١٢- جزيئات التتغستين المختلفة)

- يوجد الطور السائل في الحالة الثانية خلال المراحل الأولى للتلييد، ثم ينتشر في حبيبات المركب الصلب مشكلاً محلولاً صلباً متجانساً، وبعدها تكمل عملية التلييد طريقها كتلييد في الطور الصلب.

مثال على ذلك: صناعة المغناطيسات الدائمة ذات التركيب: $28\% \text{ Ni} - 27\%$ ، $13\% \text{ Al}$ و**الباقى Fe**. يتشكل الطور السائل هنا أثناء انصهار الألمنيوم عند درجة حرارة 1423°K . ومثال آخر تلييد سبائك الفولاذ النحاسي والبرونزي. وفي هاتين الحالتين، فإن حدوث التلييد في الطور السائل هو مجرد مصادفة، إذ إن هدف وجود النحاس في الحديد وهدف وجود القصدير في البرونز هو أن يعمل كعنصري تسبيك لتعديل وتحسين الخصائص النهائية للمادة.

- وهناك تطبيق صناعي آخر للتلييد بالطور السائل، ألا وهو إنتاج مركبات ذات كثافة تامة في سبائك الفولاذ السريع القطع، بحيث تتم عملية التدميج إما في قوالب جاسئة وإما تحت أحمال متساوية من جميع الاتجاهات ويتم تلييدها في الفراغ. ويتطلب هذا الأمر تحكماً بالغ الدقة، إلا أن النتيجة تستحق العناء لأن الاقتراب الوثيق من الشكل المطلوب يقلل كثيراً جداً كمية المكننة اللازمة. ومما لاشك فيه أن سبائك الفولاذ السريع القطع، مستخدمة في قطع المعادن، وأية مكننة ضرورية لمادة الحدة نفسها يجب أن يتم القيام بها بواسطة التجليخ، وهي عملية مستهلكة للوقت وبالغة التكاليف.



الشكل (٥-١٦) البنية قبل وبعد تلييد الطور السائل
a- الحالة البدائية، b- البنية النامية (المنتفخة) بعد ذوبان النحاس

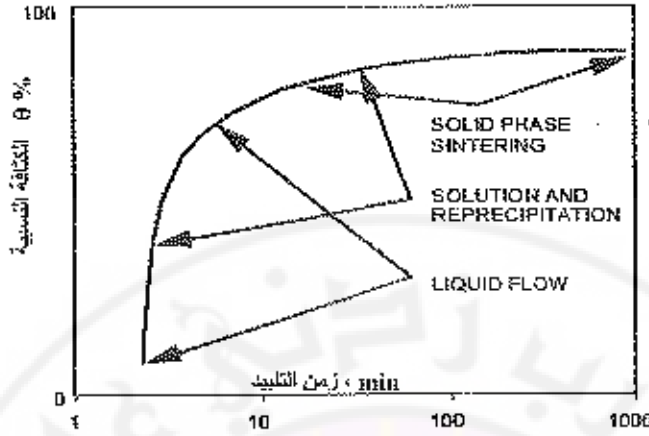
تنقسم عملية تلييد الطور السائل إلى ثلاث مراحل:

١. الانسياب اللزج للسائل: وفي هذه المرحلة ينساب السائل لغمر المسامات بسبب تأثير قوى التوتر السطحي التي تؤدي إلى انتقال أو إعادة توزيع الجزيئات لزيادة الكثافة. تظهر هذه المرحلة في الأنظمة التي لا يوجد فيها انحلال لمركبات الشبكة.

٢. الانحلال - الترسيب: تسمى أيضاً بإعادة التبلور، يمكن أن تظهر هذه المرحلة في الأنظمة المحتوية على مركبات ذات انحلال كافٍ وتشكيل كمية قليلة من السائل (من 3 - 5 حتى 25 - 35 % من الحجم) بحيث يجري ذوبان الجزيئات الصغيرة الحجم وترسيبها على الجزيئات الكبيرة. وتنقسم عملية إعادة التبلور إلى ثلاث عمليات أساسية: (١) ذوبان الجزيئات الصغيرة، أي انتقال الذرات من سطح الجزيئات إلى المحلول (يسمى هذا بالتفاعل بين الأطوار السطحية)، (٢) انتشار الذرات المنحلة في السائل بين أسطح الجزيئات الصغيرة والكبيرة، (٣) ترسب المادة المنحلة على سطح الجزيئات الكبيرة.

٣. تلييد الطور صلب: وهي المرحلة الأخيرة التي يحدث عندها نمو الجزيئات الصلبة مع تشكيل هيكل صلب وزيادة الكثافة هنا تخضع لطبيعة التلييد في الطور الصلب، يخفقي هنا الطور السائل في لحظة ما أثناء التسخين (يحدث التبلور نتيجة إغنائها بالعناصر الصعبة الانصهار أو يحدث الذوبان في العناصر الصعبة الانصهار)، والانكماش يحدث هنا كما هو عليه عند الانكماش أثناء تلييد الطور الصلب. انظر الشكل (٥-١٦).

وفي جميع الحالات يجب أن لا تزيد كمية الطور السائل على كمية الطور الصلب، وإلا فيمكن تشويه شكل المنتجات أثناء عملية التلييد. يتشكل أثناء الطور السائل نظام الأتابيب الشعيرية، أي غمر السائل للمسافات البينية في الجسم الصلب، إذ تؤثر زاوية التبلل θ تأثيراً كبيراً في عملية التلييد، فعند التبلل الكامل تكون $\theta = 0$ ، أما عند عدم التبلل فتكون $\theta = 180^\circ$ ، و يكون التبلل سيئاً عندما تكون $\theta \geq 90^\circ$ وفي هذه الحالة يعيق الطور السائل عملية التلييد. انظر الشكل (٥-١٧).



الشكل (١٦-٥) مراحل تبليد الطور السائل

ويعتبر التبلل جيداً عندما تكون $\theta \approx 65 - 85^\circ$ ، و تحسب الزاوية θ من شرط توازن القطرة السائلة:

$$\cos \theta = (\sigma_{s-g} - \sigma_{l-g}) / \sigma_{s-l} \quad (22-5)$$

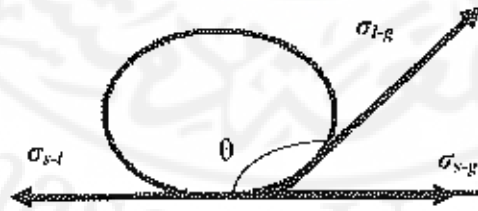
حيث إن: σ_{s-g} - الطاقة السطحية على حدود الجزء الصلب - الغازي.

σ_{l-g} - الطاقة السطحية على حدود السائل - الغازي.

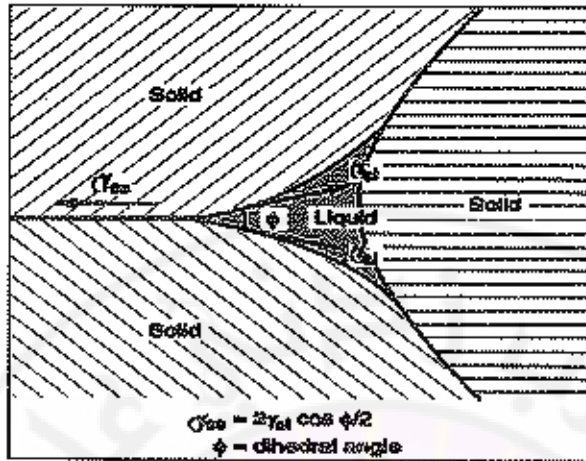
σ_{s-l} - الطاقة السطحية على حدود الجزء الصلب - السائل.

ويحدد العمل اللازم لفصل القطرة السائلة عن السطح الصلب بالعلاقة التالية:

$$W = \sigma_{s-g} + \sigma_{l-g} - \sigma_{s-l} \quad [J] \quad (23-5)$$



الشكل (١٧-٥) مخطط القوى المؤثرة على القطرة السائلة المتواضعة على السطح الصلب

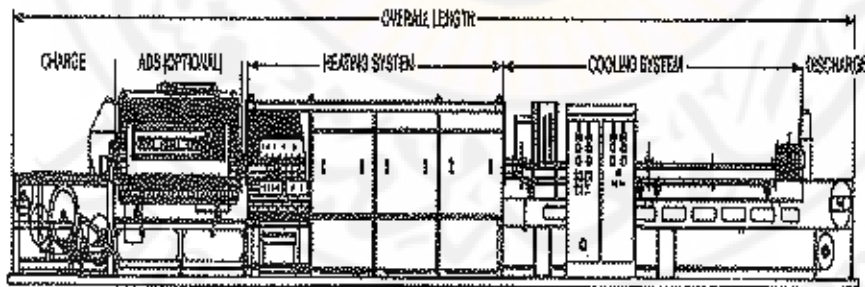


الشكل (١٨-٥) الرسم التخطيطي للقوى المؤثرة في القطرة السائلة المحاطة بالأسطح الصلبة

٥-٥ التطبيق العملي للتليد:

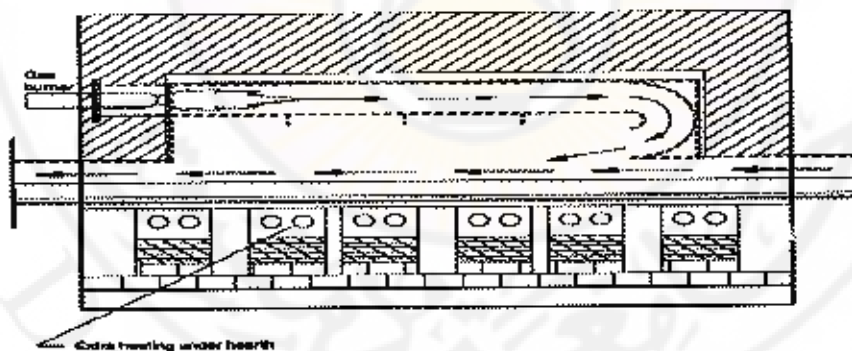
١-٥-٥ أفران التليد:

تجري عملية التليد في أفران متواصلة ذات سيور شبكية من الأسلاك المنسوجة التي تنتقل عليها تلك الأجزاء. وفي كثير من الحالات يتم تحميل الأجزاء على السيور مباشرة، إلا أنها في حالات خاصة يتم وضعها في صوان أو على بلاطات سيراميكية مقاومة للحرارة، وتتكون عملية التليد من ثلاث مراحل كما هو مبين في الشكل (١٨-٥):



الشكل (١٨-٥) مناطق فرن التليد

١. المرحلة الأولى: هي مرحلة التسخين الأولي Pre-heating، وفيها يتم طرد مادة التزليق العضوي ويجب مراعاة. أولاً: أن تكون مادة التزليق قد تم طردها كبخار بدون تحلل، وذلك لأن الانحلال يترك فضلات تحتوي على الكربون. ثانياً: ينبغي أن يكون معدل التسخين مناسباً بحيث يتم طرد مادة التزليق من المقطع بكامله. ومن الواضح أن الطبقات السطحية للمدمج تسخن أولاً ومن ثم فإن الحرارة تدخل بصورة تدريجية إلى المركز. فإذا كان معدل التسخين عالياً جداً فقد يحدث أن تلبد الطبقات السطحية مما يخلق المسام قبل أن تكون مادة التزليق في المركز قد تبخرت، وذلك لأن طريق خروجها قد أصبحت مسدودة، وقد ينجم عن ذلك تنفط (أي ظهور فقاعات سطحية). كما أن معدل التسخين البالغ السرعة يمكن أن يؤدي أيضاً إلى التشويه الناتج عن الاختلافات في درجات الحرارة بين المقاطع الرقيقة والسميكة. ولذلك، فإن الممارسة العملية القياسية المتبعة فيما يتعلق بأفران التلبد هي أن تكون محتوية على تحكم منفصل في منطقة إزالة الشمع عند درجة حرارة أدنى من تلك المستخدمة في منطقة التلبد الرئيسية. أما فيما يتعلق بإزالة الشمع، فإنه مطلوب أيضاً الإبقاء على وجود تدفق كاف للغاز من أجل طرد البخار، لأنه إذا لم يتم التخلص منه، فإنه سينتفخ ويشوه سطوح الأجزاء المنتجة.



الشكل (٥-١٩) منطقة إزالة الشحوم والتزيوت

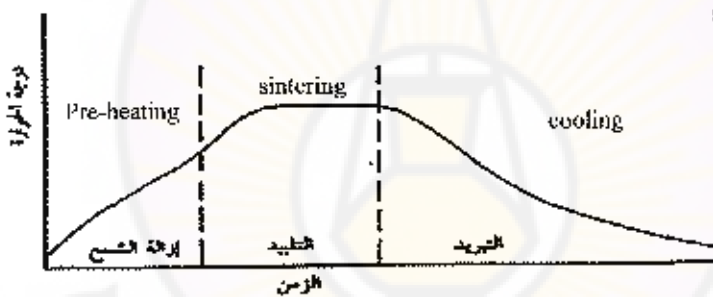
والجدول (٥-٢) التالي يبين درجة حرارة انصهار بعض أنواع مواد التزليق المستخدمة عند عملية التدميج وتركيبها الكيميائي.

الجدول (٢٠-٥)

مادة اللزائيق	الصيغة الكيميائية	درجة حرارة الانصهار، °C
مبيّنات الزرك	$Zr(C_{18}H_{15}O_2)_2$	130
مبيّنات الليثيوم	$LiC_{18}H_{15}O_2$	221
البيرافين	$C_{22}H_{46}$ to $C_{27}H_{56}$	40 - 60

٣- المرحلة الثانية: وهي مرحلة التليد الرئيسي، الذي يتألف من عدد من مناطق التحكم المستقلة الخاصة به من أجل تأمين درجة حرارة ثابتة ما أمكن خلال فترة وجود هذه القطع في قسم التليد، وفي هذه المرحلة يتوقف تدفق الغاز.

٤- المرحلة الثالثة: وتسمى بمرحلة التبريد، التي تكون عادة محاطة بغلاف مائي، وفي نهاية المطاف تخرج القطع من الفرن عند درجة حرارة منخفضة كافية على الأقل لتجنب الأكسدة لدى ملامستها أو تعرضها للهواء، وغالباً ما يكون قسم التبريد مساوياً في الطول لقسم التليد والتسخين الأولي. انظر الشكل (٢٠-٥).



الشكل (٢٠-٥) مخطط درجة حرارة عملية التليد والزمن

٢-٥-٥ تصميم أفران التليد:

هناك اختلافات واسعة في تفاصيل تصميم أفران التليد، التي يمكن تصنيفها حسب الخصائص التالية:

- ١- نوع وسط التسخين أو مصدر الطاقة: التسخين بالكهرباء أم بالغاز.
- ٢- مبدأ عملها: دورية و مستمرة أو لا.
- ٣- خصائص الجو العمل: الوسط هواء أو وسط خامل أو وسط اختزالي بالغاز أو وسط مخلخل من الهواء.

٤- درجة الحرارة: أفران تعمل عند درجات حرارة منخفضة $T < 1250^{\circ}\text{C}$ و

أفران تعمل درجات حرارة عالية $T > 1250^{\circ}\text{C}$.

٥- درجة المكننة: أفران آلية و أفران نصف آلية و أفران يدوية.

ومنكتفي بتقديم المبادئ العامة لأنواع الأكثر انتشاراً وشيوعاً في الاستخدام:

٥-٢-١ أفران السيراميكي المستمر:

تسمح هذه الأنواع بتقليل المصاريف وزيادة الإنتاجية، و دخول وخروج سلس للمنتجات. وعادة يتألف الفرن كما أشرنا سابقاً من ثلاثة أقسام وهي: ١- قسم التسخين المسبق أو قسم إزالة الشمع، وأحياناً يشار إليه على أنه قسم الحرق، ٢- قسم التليد الرئيسي،

٣- قسم التبريد.

وهذه الأقسام متصلة بصورة تبادلية، وعادة تكون أفقية، إلا أن بعض المستخدمين كانوا يفضلون البنية المحدبة التي يكون فيها قسم التليد أفقياً، ولكن أقسام إزالة الشمع و التبريد ينحدران منه على زاوية بحيث تكون الأطراف تحت مستوى أرضية موقد الفرن. وذلك لتخفيض خطر انتشار الهواء إلى داخل الفرن لأن الجو الواقع أخف من الهواء، وبهذه الطريقة يتم تخفيضه إلى أدنى حد.

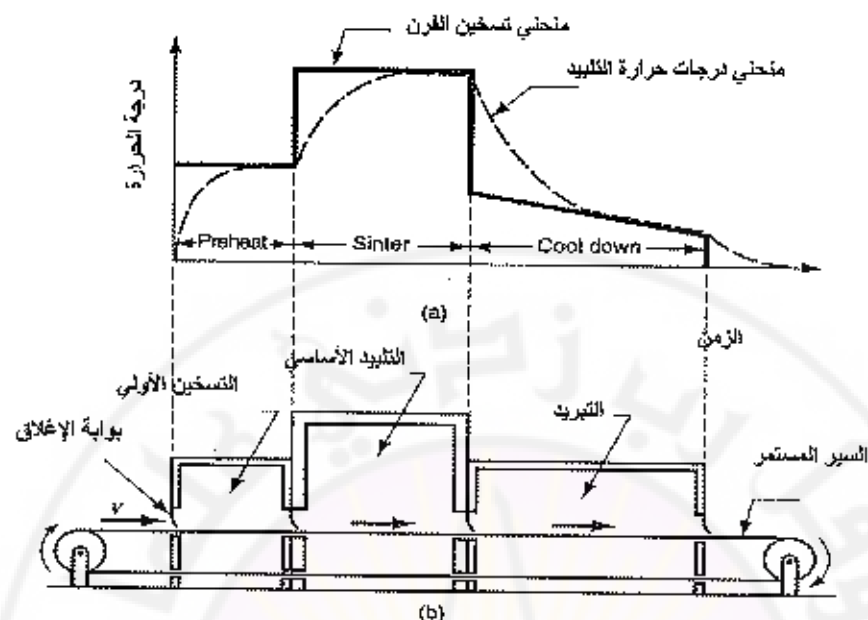
أما قسم إزالة الشمع والتليد، فلهما غلافان فولاذيان، مبطنان بمادة مقاومة للحرارة، كما أن لهما وشائع تسخين في الداخل. بينما قسم التبريد عبارة عن أنبوب فولاذي مستطيل المقطع محاط بغلاف مائي. وغالباً ما يكون قسم التبريد مساوياً في الطول لكامل بقية الفرن. والشكل (٥-١٩) يبين المراحل الثلاث لعملية التليد مع رسم تخطيطي للفرن ذي السير المستمر. وتوجد في بعض الأفران كاتمات معدنية مقاومة للحرارة داخل مناطق التسخين المسبق والتليد من أجل منع تسرب الغاز، كما أن هذه الكاتمات تعمل على تأمين تجانس درجات الحرارة. أما الأفران التي ليس لها كاتمات فيجب أن يكون لها أغلفة خارجية كاتمة للغاز.

يرتكز السير الناقل على قعر حجرة الفرن، الذي يبلغ عرضه 60 cm أو أكثر. ويحكم ارتفاع الفرن في معظمه ارتفاع الأجزاء التي سيستخدم لإنتاجها، وينبغي أن يكون

هناك خلوص كاف، مع ملاحظة أن الارتفاع الإضافي أمر غير مفيد، لأنه يزيد في الحجم ويدخل في خطر تكون طبقات stratification في الجو الأمر الذي يمكن أن يؤدي إلى عدم كفاءة التلامس بين الغاز السخترل والقطع المراد تلييدها. يتم منع دخول الهواء بواسطة التدفق الخارجي لجو الغاز الوافي، والذي هو ضروري على أي حال لطرد بخار مادة التزليق. ويتم سحب الغاز في أنابيب إلى داخل الفرن عادة في عدد من النقاط على طول قسم التلييد وبصورة متقاربة. ومن المعتاد أن الغاز المتدفق إلى الخارج يحترق لدى خروجه من الفرن، إلا أنه في بعض التصاميم الحديثة فإنه يحترق بإمدادات ثانوية لإعادته إلى داخل منطقة إزالة الشمع. كذلك فإن بخار الزيت يحترق أيضاً ويقدم كثيراً من الحرارة المطلوبة للتسخين المسبق.

وتشكل تكلفة عملية التلييد جزءاً مهماً من إجمالي تكلفة الأجزاء الملبدة، وكذلك الطاقة اللازمة للتسخين، ليس للأجزاء الملبدة بذاتها بل أيضاً للسير، وبصورة كبيرة لجو الغاز، الأمر الذي يشكل جزءاً كبيراً من التكلفة. لذلك يتوجب مراعاة هذه الأمور من حيث تقليل التكلفة كالاستفادة من استخدام بعض الحرارة المفقودة.. إلخ.

وتصنع شبكة السيور عادة من الخلطات المقاومة للحرارة مثل سبيكة 20Cr / 80Ni أو غيرها ذات مواصفة قريبة منها كي تتمتع بحياة طويلة ومفيدة عند درجات حرارة مرتفعة، و الجدول (٥-٢) يبين بعض خواص المواد المستخدمة في الأفران. ومن ميزات الأفران ذات السير الشبكي المستمر: أنها اقتصادية، وتؤمن توزيعاً متجانساً لدرجات الحرارة في منطقة التسخين، مما يؤدي للحصول على منتجات متجانسة الخواص.



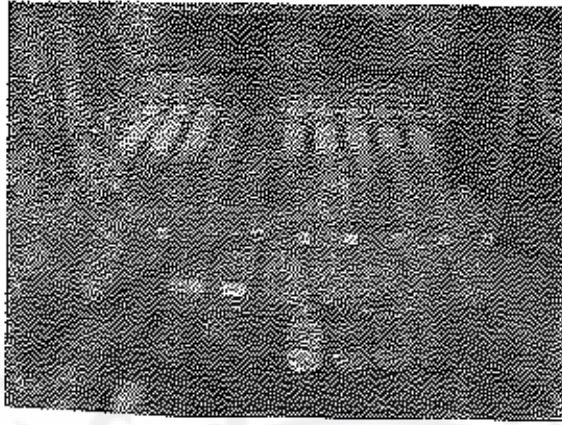
الشكل (١٩-٥) دورة المعالجة الحرارية للتكبيد (a)،
و (b) قطاع في فرن التلبيد ذي السير الشبكي المستمر

جدول (٢٠-٥) أنواع المواد المستخدمة في صناعة الأفران وبعض خصائصها

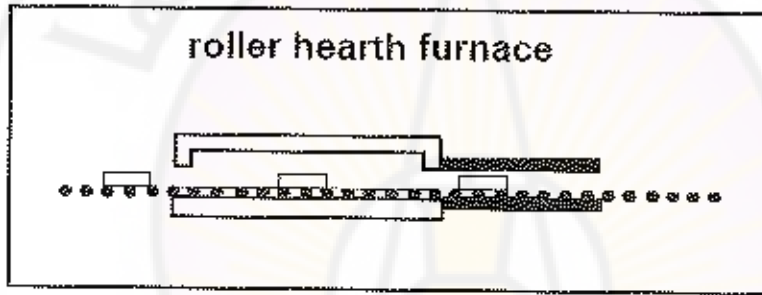
درجة الحرارة العاملة العظمى، °C	درجة حرارة الانصهار، °C	المقاومة التهرمتية للتوعية 2 mm ² /m	نوع المادة
1150	1400	1.1	20Cr / 80Ni
1180	1400	1.3	3Ti/2Cr/80Ni
2000	2620	0.052	موليبدينوم
2500	3000	0.15	تانتاليوم
2800	3380	0.05	تلمعسين
2400 - 2800	—	8 - 13	غرافيت
1050	1400	1.1	15Cr / 60Ni

٥-٢-٢-٥ أفران الدوافع Pusher:

وقد يكون فرن الدوافع إلى حد بعيد هو نفس فرن السير الشبكي في التصميم العام، إلا أنه بدلاً من نقل الأجزاء على السير المتحرك فإنها تحمل على صوان تدفع الواحدة منها تلو الأخرى من قبل عامل التشغيل، على طول موقد الفرن. لذلك تعتبر هذه الأفران نصف آلية ولكن مستمرة، لأنها تتطلب وجود عامل تشغيل ليدفع في داخل الفرن بصينية جديدة على الفترات المحددة، ويزيل ويفرغ صينية أخرى على طرف الخروج من قبل عامل آخر، والشكل (٥-٢٠) يبين رسماً تخطيطياً لفرن الدوافع. ويمكن تركيب مغالق طرفية أكثر إحكاماً مما يمكن تنفيذه بصورة عملية على أفران السيور الشبكية، لأن بالإمكان ترتيبها بحيث إن الأبواب، التي يمكن أن تكون مانعة لتسرب الغاز، تفتح فقط لتسمح بدخول أو خروج الصواني. وهكذا فإن كمية الغاز الواقع قد تكون أقل، كما أن تدفق الغاز يكون من جهة التفريغ أي عكس تدفق الغاز في فرن السير الشبكي، لذلك فهي أرخص وأقل تكلفة من تصميم أفران السيور الشبكية لأن تصميمه أبسط. أما درجة حرارة الفرن فتصل إلى 1300°C ، واستطاعته تصل إلى 20 kg / h . وأحد أنواع فرن الدوافع هو نوع الدلفيني ذي البكرات roller hearth type الذي يتم فيه دفع الصواني عبر الفرن على بكرات أو دلافين دوارة الذي يملك استطاعات كبيرة تصل إلى أكثر من 100 kg / h ، وعلى مخرج و مدخل الفرن بكرات تدور بشكل متقطع مما يسمح بمناولة ملسة للصواني، انظر الشكل (٥-٢١).



الشكل (٢٠-٥) مخطط فرن الدوافع



الشكل (٢١-٥) فرن الدوافع الدلفيني المستمر

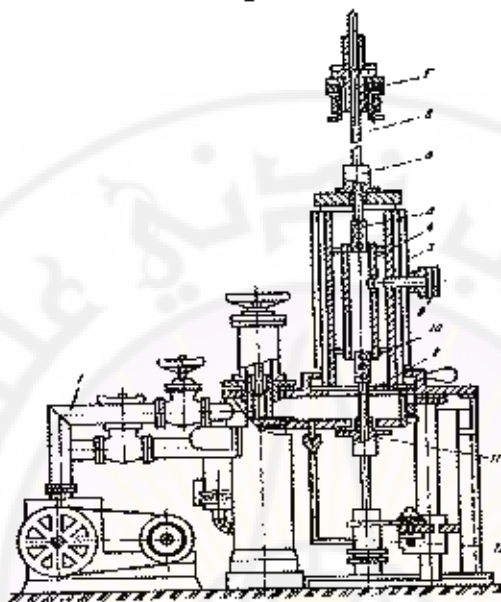
٣-٢-٥-٥ أفران ذات العمل الدوري:

تستخدم هذه الأفران على نطاق واسع - وخاصة للأغراض البحثية - في تلييد المنتجات المسحوقية الصغيرة أو المتوسطة الحجم ،. يمكن أن تكون هذه الأفران مستقيمة أو مائلة ذات تسخين كهربائي أو تحريضي، و يبين الشكل (٢٢-٥) رسماً تخطيطياً للفرن الذي يستخدم للمدمجات الطويلة المقطع.

٤-٢-٥-٥ أفران الأنزع المتحركة:

تنتقل الأجزاء المراد تلييدها في صوان تتقدم على فترات مسبقة التحديد بواسطة سلسلة من الآليات الداخلية التي تقوم برفع هذه الأجزاء، ودفعها إلى الأمام، كما تقوم بخفيضها وإعادتها إلى الموقد، ومن ثم تعود آليات الرفع هذه على مستوى أدنى إلى

مكائنها الأصلي. وتتكون هذه الألياف من مادة مقاومة للحرارة، ولذلك فإن مثل هذه الأفران يمكن أن تشغل عند درجات حرارة أعلى بكثير من أفران الميوسر الشبكية T 1300°C ، وتبلغ استطاعة هذا الفرن $70 \text{ kg/h} \pm 14$.



الشكل (٥-٢٢) قطاع في الفرن ذو العمل الدوري لتثبيت المعدن المقاومة للانصهار

١- نظام الخلطة، ٢- نراع سفلية، ٣- أنابيب ماء التبريد، ٤- شاشة، ٥- ماسك علوي، ٦- نراع علوية، ٧- ناقل تيار علوي، ٨، ١١- غطاء إحكام الخلطة، ٩- نافذة للرؤية، ١٠- ماسك سفلي، ١٢- ناقل تيار سفلي

٥-٣ أجواء التليد والحماية:

تجري عملية التليد للمدجات المساحيق في وسط محمي بالغاز أو في الفراغ، والجو المحمي ضروري لحماية المواد المسخنة من الأكسدة عند عملية التليد، وكذلك اختزال الأكاسيد الحاوية على مخلفات على السطح. لأن معظم المعادن فيما عدا المعادن الكريمة أو النيلة، التي إما أنها لا تشكل أكاسيد ثابتة - مثل الذهب والبلاتين - وإما أن أكسيدها يتحلل عند درجة حرارة منخفضة - مثل الفضة - فإن التليد ينبغي أن يتم القيام به في جو واق. وهذا يكاد يكون بصورة ثابتة عبارة عن جو مختزل، وذلك لأنه

بالإضافة إلى أنه يمنع أكسدة المعدن الملبد، فقد يكون مطلوباً اختزال الأغشية من الأكسيد الذي لا مناص منه على سطوح الذرات. يتعلق اختيار جو الحماية بتركيب المادة المسحوقة، وبالعوامل الاقتصادية، وبنوعية الفرن المستخدم، كما أنه يجب الأخذ بعين الاعتبار عدم حدوث تفاعل بين الجو أو الوسط العامل ودخل الفرن، مما يؤدي إلى الإضرار بخواص بالمنتجات. يؤثر وسط التليد في امتزاز الغازات، وفي اختزال وتفكك الأكاسيد، وفي انتقال المادة عبر الطور الغازي، تشكيل اتحادات كيميائية مختلفة، وفي الانتشار السطحي للذرات،... إلخ. و الأجواء الشائعة الاستخدام تضم هيدروكربونات محترقة جزئياً، مثل غاز الميثان، والبروبان، والبوتان، والأمونيا المفككة، والغازات الخاملة (انظر الجدول ٤-٢):

١- الأجواء الاصطناعية البسيطة Synthetic: وهي عبارة عن غاز Ar أو N_2 أو H_2 .

٢- الأجواء الاصطناعية المركبة: أو كما يطلق عليها أيضاً الأجواء ذات الأساس النتروجيني، فقد أصبحت شائعة الاستخدام بصورة متزايدة أثناء عقد التسعينيات من القرن الماضي بسبب موثوقيتها، ونقطة الندى المتدنية فيها، والسهولة التي يمكن بها ضبط المحتوى النتروجيني.

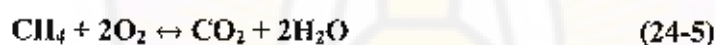
٣- أجواء الفراغ vacuum مبدأ عملها يعتمد على سحب الهواء من داخل الفرن للوصول إلى درجة عالية من الخلطة 10^{-6} مم زئبق. ويعتبر هذا الجو حالة خاصة من الأجواء المضبوطة الباهظة التكاليف و المعقدة وذات إنتاجية قليلة ويصعب أتمتها، وتستخدم فقط عندما تعطي نتائج مقنعة، وخاصة عند المعادن ذات الأكاسيد الثابتة مثل التيتانيوم والزركونيوم والتنتاليوم والمعادن المحتوية على التيتانيوم.

٤- الجو الهيدروجيني: يستخدم للمواد الحلوية على أكاسيد لينم اختزالها خلال عملية التليد. ويعتبر الهيدروجين من أفضل العناصر المختزلة للأكسجين، لذلك يستخدم بشكل واسع في تليد المنتجات ذات القاعدة الحديدية. كما أنه يستخدم في التليد الكمي في مصانع ميتالورجيا المساحيق، ومما يحد من استخدامه هو سعره المرتفع، لذلك يستخدم بدلاً منه غاز النشادر المفكك.

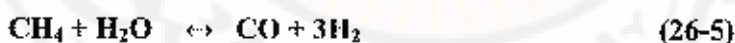
٥- جو النشادر (الأمونيا) المفكك: يحتوي على H_2 75% و N_2 25% ، إذ يحدث التفكك عند درجة حرارة $600 - 650 ^\circ C$ في وعاء دوار خاص للتفكيك. ولاستخدام النشادر المفكك كجو محمي فلا بد من مراعاة الأمور التحذيرية التالية: يجب عدم استخدام مقياس ضغط زئبقي manometer، لأن النشادر يشكل مع الزئبق خليطاً قابلاً للانفجار، سهولة اشتعاله وانفجاره عند تلامسه مع الهواء.

٦- جو الغاز الطبيعي، الذي يحتوي على غاز الميثان بنسبة CH_4 93 - 98 %، إذ يتفاعل مع بخار الماء في النسبة المتبقية عند درجة حرارة $900 \dots 1100 ^\circ C$ مشكلاً الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون. وهو غاز سريع الاشتعال وقابل للانفجار.

٧- الجو الماص للحرارة endo gas: هذا الجو يعتبر ماصاً للحرارة، وهو ذو قابلية اختزال أقل من الهيدروجين، ولكنه أرخص بكثير منه و أقل خطورة لأنه أقل قابلية للانفجار، يتشكل نتيجة لاحتراق الغاز الطبيعي وغيرها من الغازات مثل البروبان، البوتان، ...إلخ. وذلك ضمن شروط عدم كفاية الهواء، بحيث يخلط الغاز الأساسي مع الهواء بنسبة 3 : 2,5 : 1، وعند ارتفاع درجة الحرارة إلى $1223 - 1373 ^\circ K$ يحدث الاحتراق. فإذا استخدم غاز الميثان مثلاً يحدث التفاعل على النحو التالي:



وغاز الميثان الزائد يتفاعل مع بخار الماء و ثاني أكسيد الكربون المتشكّلين، بسبب عدم كفاية الأكسجين:



وبالنتيجة نحصل على CO 18 - 20% و H_2 38 - 40% و CO_2 1% و $\leq 1\%$ و CH_4 و الباقي هو N_2 . ومن الملاحظ هنا أنه لا يحدث نزع للكربون.

٨- الجو الطارد للحرارة exo gas: ولما كان هذا التفاعل طارداً للحرارة أطلق على هذا الجو اسم طارد للغاز exo gas، و هو أرخص جو تلييد متاح، ولكن جهده

الاختزالي منخفض، لذلك فإن إزالة الأكاسيد من مدمجات المساحيق أقل كفاءة مما قد ينجم عنه تدن في قوة التحمل. أما فيما يتعلق بتليد الفولاذ، أي السبائك ذات القاعدة الحديدية المحتوية على الكربون كعنصر سبك أساسي، فإن جهد الكربون في الجو carbon potential على درجة كبيرة من الأهمية، ويجب أن تكون على اتزان مع الفولاذ بحيث لا يحدث فقد أو كسب للكربون (كربنة أو عدم كربنة). يخلط عادة الغاز الأساسي بالهواء بنسبة 9 : 4,5 : 1، ويحدث الاحتراق عند ارتفاع درجة الحرارة 1273°K - 1373°K ، ويلاحظ هنا حدوث نزع للكربون وذلك بسبب وجود CO_2 ، لذلك يكون استخدامه محدوداً في السبائك ذات القاعدة الحديدية.

الجدول (٥-٣) التركيب الكيميائي للغازات مع نسبة سعرها

نسبة السعر %	التركيب الكيميائي، %								الغاز
	CH_4	CO_2	CO	NH_3	H_2O	N_2	O_2	H_2	
100	—	—	—	—	<0,5	—	≤0,2	≥99,8	الهيدروجين
30 - 50	—	—	—	<0,02	<0,01	25	—	75	الغاز المفك
3 - 10	≤1,5	≤0,5	10	—	—	<73,5	—	15 - 16	Exo-gas
5 - 20	<1,0	≤1,0	18-20	—	—	38-42	—	38 - 40	Endo-gas
8 - 10	≤0,5	1-2	22-23	—	1-1,5	0 - 1	—	75 - 76	الغاز الطبيعي
20 - 30	—	—	—	—	—	95 ^a	—	—	الأزوت
—	—	0 - 2	97	—	—	—	0,2	0 - 1	CO
—	≤4,0	4-8	28-34	—	4-5	≤48	≤0,2	12 - 16	الغاز المولّد
400-500	—	≤0,005 المجموع	—	—	—	<0,01	≤0,003	—	الأزوت

^a البقية عبارة عن شوائب منها O_2 ، H_2O وغيرها.

٩- جو الغاز المولّد: يتشكل الغاز المولّد نتيجة التأثير المتبادل عند توهج الفحم الحجري أو الفحم الشجري أو فحم الكوك مع الهواء في مولد الغازات، وهو يحتوي على CO 28 - 32% و H_2 12 - 16% و CO_2 4 - 8% و H_2O 5% - 4 و أقل

من 4% كربون الهيدروجين و الأكسجين والباقي أزوت، يستخدم هذا الجو لتلييد بعض مدمجات المساحيق التي ليست بحاجة لاختزال قوي.

٥-٥-٤ تأثير العوامل التكنولوجية في عملية التلييد:

تؤثر أبعاد المدمجات وشكل سطح الجزيئات والتكوين الحبيبي للمساحيق ومحتوى الأكاسيد والبنية البلورية غير المكتملة في عمليات التلييد الحاصلة مثل الانكماش وتغير الكثافة و تشكيل خواص المنتجات. وتتعلق جميع هذه العوامل بشروط تحضير المسحوق المستخدم:

٥-٥-٤-١ خواص المسحوق:

كلما كان السطح النوعي للمساحيق أكبر، كانت عملية التلييد أفضل، لأن النظام ينزغ إلى تقليل الطاقة المسطحية. فكلما كانت الجزيئات أنعم، كان نصف قطر رقبة التلامس أصغر، و كانت قوى لابلان أكبر وعملية التلييد أشد وأكثر نشاطاً. ولكن زيادة شدة التلييد يحفز الأكاسيد على الاختزال مما يؤدي إلى زيادة سطح التلامس بين الجزيئات.

٥-٥-٤-٢ ضغط التشكيل:

كلما كانت الكثافة الأصلية أكبر، كان الانكماش أقل. لذلك عند زيادة ضغط التشكيل يتناقص الانكماش، أما عند الوصول للضغط المطلوب والمناسب لمسامية أقل من 10% فيمكن أن يحدث نمو في أبعاد المدمج بسبب انغلاق المسامات مما يعيق خروج الغازات الموجودة في داخلها. يكون الانكماش أكبر باتجاه خط أثر قوة الضغط، كما هو معلوم، من الانكماش بالاتجاه العرضي، وذلك حسب أسطح التلامس المختلفة. أما عند المدمجات المشكلة حتى كثافة نسبية تصل إلى $0.97 - \theta$ أو أكثر، فإنه لم يلاحظ تغير في الكثافة بعد عملية التلييد.

٥-٥-٤-٣ درجة حرارة التلييد:

إن ارتفاع درجة الحرارة يؤدي إلى زيادة الكثافة، ومن ثم تتحسن الخواص الميكانيكية، كلما كانت درجة الحرارة أعلى كان نشاط عمليات الانتشار أكبر. تمتلك سرعة التسخين قيمة كبيرة عند تلييد المنتجات الكبيرة الحجم، وعند تلييد المنتجات

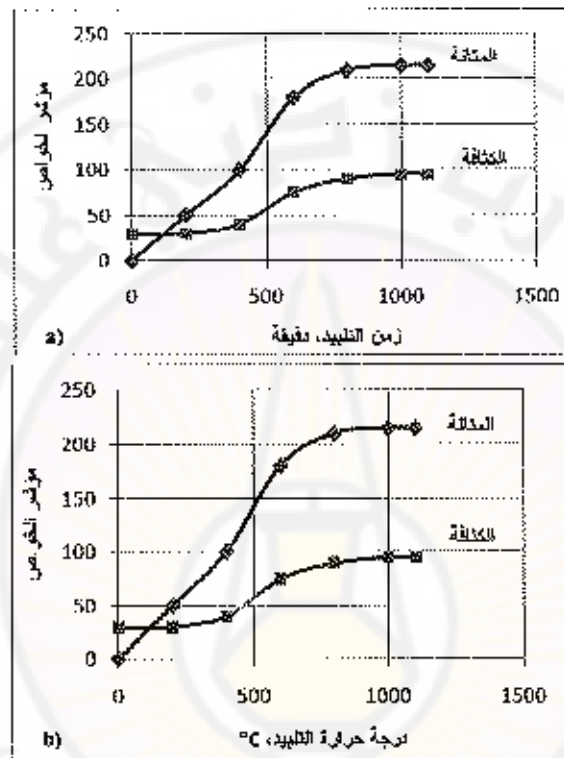
ذات الأبعاد المتغيرة في الارتفاع أو في العرض. في هذه الحالة إن الارتفاع السريع لدرجة الحرارة في المدمجات الكبيرة الحجم يمكن أن يؤدي إلى انكماش موضعي بسبب الاختلاف بدرجات الحرارة، مما يسمح بتثويته الشكل. كما أن التسخين السريع للمدمجات المشكلة من المساحيق فائقة النعومة قد يؤدي إلى انهيار الترابط بين الجزيئات بسبب شدة انحباس الغازات و انخفاض القدرة على الخروج، كما هو مبين في الشكل (٥-٢٣).

٥-٤-٤ زمن التليد:

يؤدي زمن التليد الحراري للمدمجات عند درجة حرارة التليد إلى تغيير فجائي في جميع الخواص لا يلبث أن يتباطأ. ويتحقق أكبر متانة في بداية زمن الصمود الحراري عند التليد، ومن ثم تتشكل معظم الخواص الميكانيكية للمنتجات عند درجات الحرارة المرتفعة خلال زمن تليد قصير، أما استمرار إطالة زمن التليد فيبقي المدمجات عند نفس المستوى من المتانة والخواص أو تتناقص، ولكن في الحياة العملية زمن الإبقاء عند التليد يتغير ضمن مجال كبير (من بضع عشرات الدقائق إلى عدة ساعات) ويتعلق ببنية المادة ويكتاقتها وبأبعاد المدمجات وبوسط التليد وبنوع الفرن المستخدم.... إلخ. وبالنتيجة عند زيادة درجة حرارة التليد يمكن نقصان زمن التليد، وبالعكس، فإن عملية التليد لسبب ما تؤول إلى نقصان درجة الحرارة، فإن زمن ثبات التليد يزداد، كما هو مبين في الشكل (٥-٢٣).

الجدول (٥-٤) نظام التليد الموصى به لبعض المواد

نوع المادة	درجة حرارة التليد °K	زمن التليد min
الحديد	1423 - 1473	30 - 45
النحاس	1173 - 1223	45 - 60
سبائك الحديد - غرافيت	1373 - 1423	45 - 60
فولاذ مقاوم للصدأ	1473 - 1573	60 - 90
نيكل - غرافيت	1423 - 1473	90 - 120
كروميت	1373 - 1673	60 - 180



الشكل (٢٣-٥) علاقة درجة الحرارة (a) وزمن التلييد (b) بالنسبة والكثافة التسمية

٥-٤-٥-٥ وسط التلييد:

يؤمن التلييد في وسط مختزل الوصول إلى كثافة أكبر من التلييد في وسط معتدل. يفسر ذلك التأثير الكيميائي لوسط الاختزال في الغشاء المتأكسد والمتشكل على السطح، مما يؤدي إلى إزالته بسبب هجرة الذرات على سطح التلامس عبر المسطح وعبر الحجم وظهور تشوه كبير على سطوح البلورات وانتشاره في العمق منشطاً بذلك الانتشار الحجمي للذرات.

يجري التلييد بشكل سريع ومتكامل في وسط الفراغ بالمقارنة مع الوسط المعتدل، إذ يبدأ التلييد عند درجات حرارة منخفضة نوعاً ما، ويسمح بالوصول إلى الكثافة العظمى التي يمكن الحصول عليها. ويزداد نشاط تأثير وسط التلييد بإضافة الهالوجينات مثل الكلوريدات أو الفلوريدات.

٥-٦ التلييد المنشط Activated sintering:

يستخدم هذا المصطلح لوصف الأسلوب الذي يتم فيه عن قصد القيام بإضافات، تكون عادة صغيرة، إما إلى خليط المساحيق وإما إلى وسط التلييد، من أجل الحصول على تلييد أكثر سرعة أو تلييد عند درجة حرارة أدنى.

تسمى منشطات التلييد تلك المنشطات الفيزيائية والكيميائية المستخدمة في مدمجات المساحيق أثناء عملية التلييد، التي تؤدي إلى تغيير الخواص المختلفة. تؤدي المنشطات الكيميائية إلى تغيير تركيب وسط التلييد مثل الاتحادات الكيميائية المسببة في اختزال الأكاسيد المتواجدة على سطح حبيبات المسحوق، مثال إضافة غاز كلور الهيدروجين HCl بنسبة 5% إلى 10% إلى وسط التلييد الهيدروجيني يؤدي إلى تغيير مفاجئ بكثافة ومقاومة المدمجات المعرضة لعملية التلييد.

أما المنشطات الفيزيائية فيمكن أن تتحقق بزيادة درجة تعميم الجزيئات أو باستخدام الأمواج فوق صوتية أو الحقل المغناطيسي أو الأشعة الذاتية لتحريك العيوب وتجميعها ومن ثم زيادة الطاقة الحرة، ومعروف أن النظام الترموديناميكي يسعى دائماً أثناء التسخين إلى إنقاص الطاقة الحرة ومن ثم تسريع عملية التلييد. وتعتبر طريقة التسخين الدوري Thermocycle عند التلييد واحدة من المنشطات الفيزيائية المهمة التي تعتمد على رفع وخفض درجة الحرارة بشكل دوري عند الوصول إلى درجة حرارة التلييد، مما يؤدي إلى تسهيل انتشار أسرع للفرات تحت تأثير التدرج الحراري Gradient مما هو عليه في الحالة الإيزوثرمية Isotherm، وبذلك يحصل غمر وإغلاق المسامات وتجانس في التركيب الكيميائي وزيادة متانة المدمج. ومن الأمثلة النموذجية على ذلك هو تلييد التنغستين النقي بمساعدة كمية صغيرة $0.5\% >$ من النيكل. ولا يتطلب هذا الأسلوب حالة السيولة، إذ إن التأثير يحدث بصورة

دراماتيكية عند درجات حرارة أعلى بكثير من نقطة انصهار النيكل. وعلى أية حال، فإن تلييد الطور المسائل، يمكن اعتباره ويحق حالة خاصة من التلييد المنشط.

٧-٥ تلييد المسحوق السائب Loose powder sintering:

كما يتضح من الاسم، فإن هذا يعني تلييد المساحيق غير المدمجة. ولقد سبق لنا أن رأينا أثناء إنتاج مسحوق الحديد الأسفنجي أن معالجة التلدين للمسحوق السائب على شريط فولاذي ينتج عنه تشكل الكعكة التي يجب أن تكسر لإعادتها إلى مسحوق. وهذا يعني أن نوعاً من التلييد قد حدث للمسحوق السائب، ولكن لحسن الحظ، إلى مدى طفيف فقط. وعلى أية حال فإن هذا الأسلوب يستخدم بصورة متعمدة في حالات تكون فيها المنتجات المسامية هي المطلوبة، على سبيل المثال عناصر الترشيح filter وأيضاً المحامل المركبة ذات التدعيم بالفولاذ steel-backed bearing.

٨-٥ التلييد تحت الضغط والحرارة:

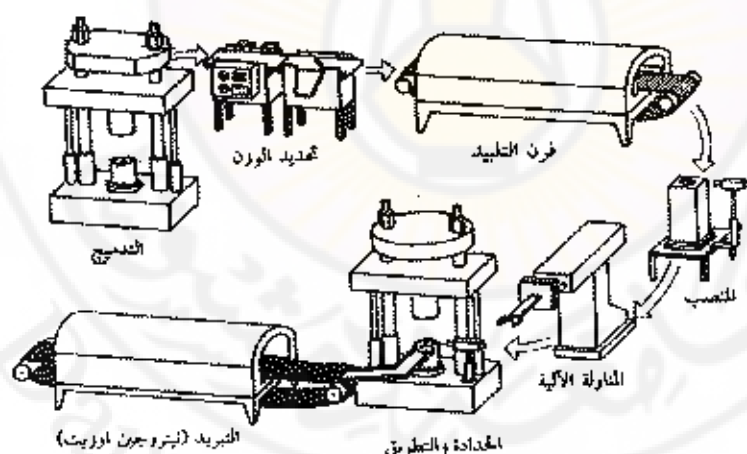
هناك عدة أساليب يحدث عندها التدميج والتلييد في وقت واحد. والتدميج على الساخن، الذي يدعى أيضاً التلييد بالضغط، قد سبق ذكره آنفاً. ويتطلب هذا الأسلوب عادة تسخين القالب والمسحوق أو المدمج، ولذلك هو بطيء وغالٍ. ولهذه الأسباب فإنه غير مستخدم على نطاق واسع. وهناك أسلوب بديل يسمى التلييد الشراري spark sintering، إذ يتم تدميج المسحوق في قالب ثم يسخن عن طريق إمرار تيار كهربائي عبر السنابك punches المتقابلة. وكما هو واضح، فإن التدميج على الساخن يطبق في إنتاج القطع المنفردة. وهناك أساليب أخرى مستخدمة بصورة متزايدة لإنتاج المنتجات المطاوعة من المساحيق، وتشمل هذه الأساليب أسلوب بثق كريات المسحوق على الساخن. وقد لا تحتاج إلى دمج سابقاً، وكذلك أسلوب الكنفورم conform process، وأسلوب التدميج على الساخن تحت تأثير ضغط متماثل من كافة الجهات (متوازن التضغوط). كما يستخدم هذا الأسلوب الأخير في إنتاج الأشكال شبه النهائية لأحجام كبيرة نسبياً من مواد خاصة. وإذا استخدمت لإنتاج المنتجات المطروقة، فإن هذه

الأساليب تقدم إما مزايا فنية للمواد ذات قاعدة الصبة المعدنية ingot-based، وإما في بعض الحالات، مزايا اقتصادية.

٥-٩ التشكيل والتطريق بالتلييد (التشكيل بالمساحيق) Sinter forging:

اقترح هذا الأسلوب للتشكيل والتطريق اللاحقة على الساخن، منذ وقت مبكر في تطوير أجزاء ميتالورجيا المساحيق الإنشائية، إلا أنه لم يلق رواجاً إلا في سبعينيات القرن الماضي. يعتمد هذا الأسلوب على التشكيل بالتلييد، الذي يعتبر هو نفسه التشكيل الدقيق precision forging بالطرق التقليدية (التشكيل بالقالب المغلق closed-die forging) لأنواع الفولاذ المشكل، ولكنه يختلف عنه من ناحيتين اثنتين:

١. عندما تكون الأجزاء المراد تشكيلها بالتلييد مستديرة الشكل على هيئة أقراص أو أسطوانات، فإنها تتخذ شكلاً أقرب إلى الجزء النهائي المراد إنتاجه.
٢. يمكن إنتاج مركبات معدنية معدة للتشكيل ذات وزن ثابت عن طريق القيام بقياس دقيق لكمية المسحوق الموضوع في قالب التدميج. وبالنسبة فإن عملية التشكيل والتطريق بالتلييد لا تنتج أية زوائد رقيقة، ولذلك فإن الأبعاد تكون أكثر ثباتاً. (انظر الشكل ٥-٢٤).



الشكل (٥ - ٢٤) تسلسل عملية إنتاج مركبات المساحيق بالتشكيل بالتلييد والتطريق

١٠-٥ التلييد والتشكيل بالطريق: Sintering and forging

توجد بعد عملية التلييد بعض العمليات البديلة، كتلييد المدمجات بالطريقة العادية في أفران مستمرة، وتبعاً لذلك يتم إعادة تسخينها، وغالباً ما يكون ذلك بواسطة التسخين بالتحريض ذي تيار عالي التردد، استعداداً لعملية التشكيل و التطريق. والعملية البديلة هي أن تؤخذ القطع المراد تشكيلها مباشرة من المنطقة الساخنة في فرن التلييد، والتي ستكون من دون وجود منطقة تبريد، مباشرة إلى مكبس التشكيل. وهذا هو الاختلاف الذي أدى إلى وجود تسمية مختلفة - التشكيل بالتلييد والتشكيل بالمساحيق - ولكن في الواقع لا يوجد هناك اختلاف، ففي كلتا الحالتين فإن قطعة المعدن الملبدة هي التي تشكل.

تحدث الأكسدة سطحية سريعة للفولاذ لدى تعرضه للهواء عند درجة حرارة التشكيل بالمساحيق (التشكيل و التطريق)، وفي حالة المركبات المسامية فإن هذا الإجراء يكون أكثر ضرراً مما هو عليه في حالة القطع المصممة المصنعة بالطرائق التقليدية، وذلك بسبب إمكانية اختراق الأكسدة إلى ما تحت السطح. لذا من أجل الحصول على عملية ناجحة فلا بد من نقل المركبات الملبدة بسرعة (بضع ثوانٍ) من فرن التلييد، مع الحفاظ على جوها الواقى، إلى قالب التشكيل و التطريق كي لا يخرج الغاز الواقى المحتجز داخل المسام.

وتكون المساحيق المستخدمة للتشكيل بالتلييد بصورة دائمة سبائك فولاذية مسبقة السبك، كأن تحتوي على النيكل والمولبدنيوم و الغرافيت والنحاس وغيرها. ويظهر مقارنة المركبات المشكلة بالتلييد مع المركبات المماثلة المصنعة بواسطة التشكيل الدقيق للمعادن الصلبة الملامح التالية:

١. لا يوجد اختلاف كبير في الخواص الميكانيكية، وتكون إلى حد ما قريبة بعضها من بعض، مع تفوق للتشكيل بالتلييد بسبب تماثل الخواص في جميع الاتجاهات بصورة أكبر مما هو عليه عند التشكيل الدقيق.
٢. يكون ثبات ودقة أبعاد المركبات المنتجة بواسطة التشكيل بالتلييد أفضل.
٣. تتمتع المركبات المنتجة بواسطة التشكيل بالتلييد بسطوح مصقولة أفضل.

٤. يتمتع منتج التشكيل بالتليد بمستوى جودة أفضل من المركبات المنتجة بطرق التشكيل الدقيق التقليدية.

٥-١١ عيوب عملية التليد وطرق الوقاية منها:

تظهر العيوب أثناء عملية التليد نتيجة خلل في نظام التليد، مثال: بسبب خطأ يحصل أثناء تحضير المساحيق أو أثناء عملية التدميج. وسوف ندرس العيوب الشائعة:

٥-١١-١ التليد غير الكامل:

يظهر على شكل انخفاض في مستوى الخواص الفيزيائية والميكانيكية للعينات بالمقارنة مع الخواص المطلوبة، وسبب ذلك هو وجود خطأ في نظام التليد، كانهضاض درجة حرارة التليد أو زمن التليد عن المطلوب، ويمكن أن يكون التليد الناقص بشكل جزئي أو كلي، أما إصلاح هذا العيب فيتم بإعادة عملية التليد بشكل صحيح.

٥-١١-٢ الحرق:

ينتج عن التسخين المفرط للمدمجات المراد تليدها، ويظهر على شكل تصدع أو تشقق أو تقشر في بنية المدمجات، كما أن ارتفاع درجة الحرارة المفرط أثناء التليد يؤدي إلى زيادة المسامية. ويعتبر هذا العيب غير قابل للإصلاح.

٥-١١-٣ التأكسد:

وهو ظهور تقرح في الألوان - عدم وضوح اللون - على سطح المدمجات المراد تليدها، مثل قشور الأكاسيد أو بقايا التآكل الكيميائي، وذلك بسبب اختلال وسط التليد (وجود الأكسجين أو الهواء أو الغازات الأخرى التي تتفاعل مع مادة المدمج) إذ تظهر ألوان التقرح على الأجزاء المتأكسدة في قسم التبريد من الفرن عند درجات الحرارة المنخفضة (أقل من 773°K). ويمكن إصلاح هذا العيب بالتسخين مرة أخرى في وسط مختزل، أما في حال وجود أكاسيد صعبة الاختزال فإن الإصلاح يصبح غير ممكن.

٥-١١-٤ نزع الكربنة:

وهو نقصان محتوى الكربون على سطح المدمج، ويتعلق هذا العيب بزيادة نسبة المؤكسدات مثل H_2O و CO_2 في منطقة التسخين من الفرن وإغلاق فتحة الفرن بصفيحة معدنية أو غرافيتية ورش مسحوق كالغرافيت يحتوي على الكربون مما يؤدي إلى إصلاح هذا العيب.

٥-١١-٥ الإعوجاج أو الالتواء:

وهو وجود تشوه في الشكل الهندسي للمدمجات وتغير في أبعادها. يظهر مثل هذا العيب في العينات المسطحة أي ذات الطول الكبير بالمقارنة مع السماكة، وكذلك عند عدم تجانس الكثافة وارتفاع درجة الحرارة بشكل فجائي عند عملية التليد. يمكن إصلاح هذا العيب بإعادة الضغط على البارد أو على الساخن وإبطاء سرعة التسخين عند التليد.

٥-١١-٦ الانتفاخ:

وهو عبارة عن تشكل فقاعات على سطح المدمجات ناتجة عن الضغط الشديد للغاز عند عملية التليد في الطور السائل، والانصهار في مركبات مواد المساحيق بسبب التسخين غير المتجانس. ومثل هذا العيب غير قابل للإصلاح، ولكن يمكن تلافيه بتغيير نظام التليد وخاصة إبطاء سرعة التسخين.

٥-١١-٧ الرش:

وهو عبارة عن خروج الطور السائل إلى سطح المدمج نتيجة التبلل السيئ للطور السائل أو زيادته في المواد صعبة الانصهار. وهذا العيب لا يمكن إصلاحه، ولكن يمكن تلافيه عن طريق تغيير التركيب الكيميائي للمادة.

٥-١١-٨ الانفصال:

وهو عبارة عن وجود تشققات داخلية في المدمجات الملبدة تتشكل في مرحلة التدميج. وهذا العيب لا يمكن إصلاحه، ولكن يمكن تداركه بضرورة الإنهاء الجيد لعملية الضغط في مرحلة التدميج.

٥-١١-٩ عدم تجانس الخواص:

وهو عبارة عن اختلال الطبقة السطحية للمنتجات بسبب تغير البنية والخواص، ويمكن أن تحدث بسبب دخول روابط عضوية على الخليط (الشحنة) المراد تدميجها. هذا العيب لا يمكن التخلص منه، ولكن يمكن تداركه بتسخين المدمجات بشكل بطيء ومتجانس ورش العينات بمسحوق الغرافيت وزيادة ضغط غاز وسط التلييد.

٥-١١-١٠ الترفقات:

وهي عبارة عن ظهور طبقة رقيقة داكنة اللون على سطح المدمجات الملبدة بسبب تفتت أكاسيد الكربون أو غاز الميثان أو غيره من الكربوهيدرات في الزيوت المستخدمة في التزليق، كما يمكن تشكل ترفقات من الكبريتات إذا دخل عنصر الكبريت إلى وسط التلييد. وهذا العيب غير قابل للإصلاح، ولكن من حسن الحظ أن هذا العيب لا يؤثر إلا في سطح المدمجات.

٥-١١-١١ خشونة السطح:

اختلال في استواء سطح المدمج الملبد بسبب اختزال الأكاسيد الموجودة على السطح قبل عملية التلييد، أو أن تتشكل هذه الأكاسيد في مرحلة التسخين الأولي للفرن.

٥-١١-١٢ انتشار المسامية:

تنشأ عند تلييد المدمجات ذات التراكيب المتعددة، مما يؤدي إلى اختلاف في معاملات الانتشار. مثال التبلل السيئ أثناء التلييد، وهذا العيب لا يمكن إصلاحه.

الفصل السادس

عمليات ما بعد التلبيد

Post- sintering Operations

- العمليات الخاصة بميتالورجيا المساحيق
- العمليات الميكانيكية
- المعالجة الحرارية
- المعالجة الكيميائية- حرارية
- الطلاء الكيميائي والطلاء الكهروكيميائي



عمليات ما بعد التلبيد

Post-sintering Operations

غالباً عملية التلبيد لا تكون عملية نهائية، ومن أجل الحصول على الخواص الاستخدامية المطلوبة لمنتجات المساحيق والمواد المركبة فلا بد عمليات إضافية تسمى بعمليات إنهاءية Finishing operations مثل تلك العمليات الخاصة بميتالورجيا المساحيق مثل (إعادة الكبس وإعادة التلبيد، والحدادة، والمعايرة وضبط الأبعاد... إلخ.) أو العمليات الميكانيكية مثل (إزالة الزوائد، القص، التشغيل، الربط... إلخ.) أو المعالجة الحرارية أو المعالجة الكيميائية- حرارية أو الكهروكيميائية... إلخ. ومن الملاحظ أن العمليات الإضافية للمساحيق المعدنية تختلف عن المواد المصممة التقليدية بأنها واقعة تحت ظروف المسامية للمنتجات الملبدة، وأنها - غير متجانسة الأطوار، وأنها ذات بنية غير متجانسة أيضاً.

١-٦ العمليات الخاصة بميتالورجيا المساحيق:

١-١-٦ إعادة الكبس وإعادة التلبيد Re-press and re-sinter:

إن الهدف من هذه العملية هو زيادة الكثافة مما يؤدي إلى تحسين الخواص الميكانيكية، ومن ثمّ تزداد التكلفة.

٢-١-٦ إعادة الكبس على الساخن Hot re-press:

إن هذا الأسلوب أكثر فاعلية من إعادة الكبس وإعادة التلبيد، والهدف هو نفسه أي زيادة الكثافة و من ثمّ تتحسن الخواص الميكانيكية، ولكن تزداد التكلفة أكثر من سابقها.

٣-١-٦ الطريقة على الساخن في قالب مغلق Hot forge closed die:

وهذه الطريقة هي عبارة عن حالة خاصة من إعادة الكبس على الساخن، التي تؤدي إلى تغيير الأبعاد وفي الشكل المطلوب بالإضافة إلى زيادة الكثافة. وهذا الأسلوب يدعى بالتلبيد بالطرق.

٦-١-٤ المعايرة وضبط الأبعاد Sizing:

هي عبارة عن عملية تكنولوجية لضبط الطبقات السطحية المشوهة عن طريق الضغط أو الكبس في قالب المعايرة. إن الهدف الرئيسي من هذا الأسلوب هو تصحيح الشكل وضبط أبعاد الأجزاء وليس زيادة الكثافة أو تحسين الخواص الميكانيكية. وتجري المعايرة وضبط الأبعاد عادة بسبب تآكل المعدات الأمر الذي لا مناص منه، مما يؤدي إلى بعض التباين في أبعاد الجزء المنتجة من مسحوق ما في مجموعة محددة من العدد. ومن بين أسباب التباين هذا:

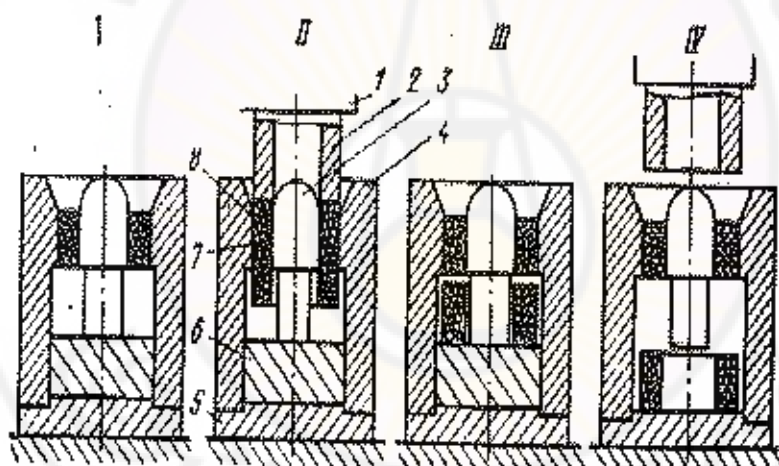
١. تغير الكثافة: يوجد تغير الكثافة في الأجزاء ذات المقاطع الرقيقة على زاوية قائمة لاتجاه الكبس أو بسبب الاهتزازات المتباعدة التي يمكن أن تؤثر في ملء القالب.
٢. تآكل المعدات: إن الهدف الرئيسي من إدخال المواد المزينة إلى قالب التشكيل واستخدام عدد مقاومة للتآكل هو تقليل التآكل. ولكن بعض البلى أمر لا يمكن تجنبه وقد يحصل زيادة تدريجية في المقطع العرضي للمنتجات. وعادة يكون التليد على درجة عالية من الدقة في التسامح إلى حد 0.2% في الاتجاه العمودي على اتجاه الكبس، و 0.4% في الاتجاه الموازي لاتجاه الكبس. ويمكن أيضاً عند ضبط الأبعاد والمعايرة تحسين الدقة وتنشيط السطوح المنتجة وتصحيح الالتواء. وعلى افتراض استخدام خلطات مساحيق غير نامية في صنع الأجزاء المطلوبة، فإن ضبط الأبعاد يمكن أن يتم في قالب التشكيل، ولكن من الضروري أن يكون لدينا أدوات مستقلة لعملية ضبط الأبعاد مثل مكابس مستقلة وغيرها من الأدوات.

ومن الأمثلة التي تجري عليها المعايرة هي جلب كراسي المحامل، التي تعابر عادة فيها الأقطار الداخلية أو الخارجية، وذلك للوصول إلى الدرجة الثانية أو الثالثة من الدقة. أما الارتفاع فقليلاً ما تجري عليه عملية المعايرة. تردد القساوة الميكروية نحو 130% - 100 إلى عمق 70 - 50 μm . ولتأمين الكثافة المطلوبة للمنطقة السطحية، يكون تسامح المعايرة المسموح به للقطر الخارجي للمحامل كما هو مبين في الجدول (٦-١).

تجرى عملية المعايرة بطريقتين: الأولى منفردة والأخرى مجتمعة، يتم في الطريقة المنفردة في البداية معايرة السطح الخارجي ثم السطح الداخلي، أما الطريقة المجتمعة فتجري المعايرة للسطح الخارجي والسطح الداخلي معاً.

الجدول (١-٦) علاقة التسامح المسموح به بالمسامية

مادة المحمل	المسامية، %	التسامح المسموح به للقطر الخارجي، %	صغير	وميط	كبير
حديد غرافيت	15	0.5	0.8	0.9	
	25	0.8	1.0	1.2	
	30	1.0	1.2	1.5	
حديد	15	0.6	0.8	0.9	
	25	0.9	1.2	1.3	
	30	1.2	1.4	1.6	



الشكل (١-٦) رسم تخطيطي لمعايرة السطح الخارجي والسطح الداخلي لعينة ما.

I - تحميل، II - معايرة، III - صدم العينة، IV - نزع الصفيحة

٦-١-٥ المعالجة بالبخار Steam treatment:

يقتضي هذا الأسلوب بتعريض الأجزاء الحديدية لبخار محمص عند درجة حرارة 500°C ، إذ تؤدي هذه العملية إلى تشكيل طبقة رقيقة من أكسيد الحديد magnetite على كل السطوح التي يمكن الوصول إليها، تؤدي إلى عدد من الفوائد:

- ١- زيادة كثافة الطبقات السطحية و من ثم زيادة المتانة.
- ٢- تحسين مقاومة التآكل.
- ٣- زيادة صلابة السطح.
- ٤- زيادة مقاومة الاهتراء.
- ٥- عادة ما تكون المعالجة بالبخار متبوعة بغمس في الزيت الذي سيعطي لوناً أسوداً ضارباً إلى الزرقة. يتشكل غشاء أكسيد أزرق اللون يؤدي لتحسين المظهر وزيادة مقاومة التآكل.

٦-١-٦ التغلغل Infiltration والتشريب Impregnation:

وهو القيام بملء المسامات السطحية بمعنن آخر ذي نقطة انصهار أدنى من نقطة انصهار الجزء الأصلي. ويتم عمل ذلك بوضع كمية من المواد المرشحة وغالباً ما تكون عبارة عن مساحيق معدن توضع على السطح العلوي للجزء وإمراره عبر فرن التلبيد على درجة حرارة أعلى من نقطة انصهار المرشح، الذي ينصهر ويسري بفعل الخاصية الشعرية إلى داخل المسام. وهذا الأسلوب مستخدم على نطاق واسع جداً مع الأجزاء الحديدية، وذلك باستخدام النحاس كمرشح، وكي نتجنب التآكل فغالباً ما يتم استخدام سبيكة تحتوي على سبيل المثال، على حديد و منغنيز. وعلى أية حال فإن انتشار النحاس في الحديد يمكن أن يؤدي إلى نمو الأبعاد، ومن ثم فإن الجزء المرشحة تكون أقل دقة بصورة عامة فيما يتعلق بالأبعاد. ويستخدم الترشيح أيضاً في المواد المركبة المستخدمة في التلامس الكهربائي (الفحومات)، وفي صناعة مقاعد الصمامات لمحركات الاحتراق الداخلي، بحيث يتم ترشيح (تغلغل) الجزء الملبد المسامي بالرماس.

أما أسلوب التثريب فهو مشابه لأسلوب التغلغل ما عدا أن المسام تملأ بمادة عضوية بدلاً من المادة المعدنية. والمثال على ذلك هو المحامل المشبعة بالزيت، أو التثريب بمواد البلاستيك الحراري أو مواد بلاستيكية أخرى. ومن ميزات هذا الأسلوب هو تحسين الخواص الميكانيكية ومدد المسام لتوفير طرف يساعد على عدم تسرب الضغط أو منع الخلايا الكهروليتيّة التي تهاجم المعدن. ومن ثمّ تؤدي إلى تآكله.

٦-١-٧ النقش Coining:

وهو إبراز نموذج لنقش نافر على السطح النهائي، تماماً كما يحدث في صناعة قطع النقود و الميداليات من الصفائح المعدنية.

٦-٢ العمليات الميكانيكية:

٦-٢-١ إزالة الزوائد De-burring:

يستخدم هذا الأسلوب لتنعيم الحواف الخشنة وإزالة الزوائد الرقيقة (الناتجة عن تسرب المعدن من جوانب القالب عند التدميج)، وذلك باستخدام تقليب المنتجات في وعاء دوار، أو في وسط سائل يحتوي على مسحوق حالك (صنفرة) أو استخدام القذف بالخرق أو الجليخ والصلل للحصول على نعومة في السطح.

٦-٢-٢ التشغيل Machining:

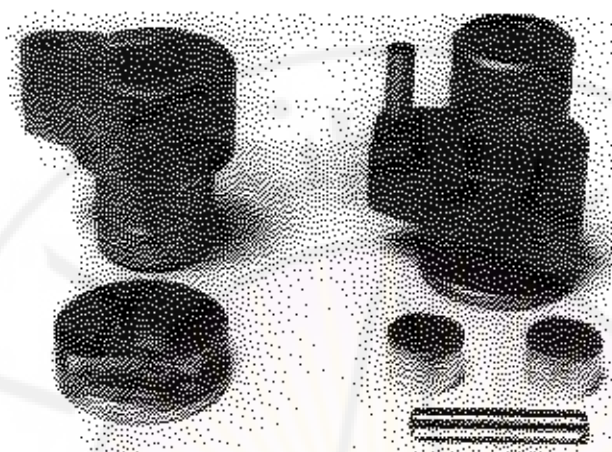
من ميزات أسلوب ميتالورجيا المساحيق إنتاج أجزاء قريبة جداً للأبعاد المطلوبة لا تتطلب تشغيلاً ميكانيكياً إضافياً، وبحيث يتم إلغاء التشغيل الميكانيكي في معظم الحالات، فإن هناك حدوداً فيما يتعلق بالشكل الهندسي، التي يفرضها استخدام القوالب الجاسنة المصنعة من الفولاذ، حيث يحدد التصميم الهندسي شكل وأبعاد ودرجة خشنونة السطح ودقة تحضير هذه القوالب. لذلك ليس من الضروري في أغلب الأحيان القيام بشيء من المكننة ولو على نطاق محدود، كتقب الثقوب على زوايا بالنسبة لمحور الضغط، وقطع الأخاديد أو التفريزات، وعمل قلائوظ داخلي أو خارجي..... الخ. وفي بعض الأحيان يمكن القيام بأعمال مكننة واسعة وشاملة كما هو الحال عند صناعة مسند ذراع التحكم بنقل الحركة في سيارات الركاب، انظر الشكل (٦-٢)، وهذا المركب عبارة عن جزأين ملبدين، ويشمل إنتاجه عدداً كبيراً من العمليات التشغيلية،

ومع ذلك إذا ما قورن مع الجزء المشكل بصورة تقليدية، فقد تبين وجود توفير في التكلفة مقدارها 43%. وهذا التوفير ناتج عن تدني كمية التشغيل المطلوبة على جزء ميتالورجيا المساحيق، والمجموعة المنتجة بميتالورجيا المساحيق والجزء المشكل تقليدياً كانا يستخدمان بصورة متبادلة على مدى سنين عديدة من أجل تقدير الأداء قبل أن ينتقل المستخدم بصورة نامة إلى النسخة المنتجة بأسلوب ميتالورجيا المساحيق، مع العلم أن العمر الزمني للجزء المنتج بأسلوب ميتالورجيا المساحيق يتفوق بمرتين أو أكثر على العمر الزمني للجزء المنتج بالطريقة التقليدية.

تحتوي المادة من الفولاذ النيكل على Ni 2% وعلى 0.6% كبريتات المنغنيز التي تضاف لتحسين قابلية التشغيل وزيادة الخواص التريبولوجية وتقليل الاهتراء في العدد tool wear، وخاصة أقلام تجويف الثقوب broaches الغالية الثمن. أما تدميج خليط المسحوق فيتم إلى كثافة تصل إلى $7 - 6.85 \text{ Kg/cm}^3$ ، كما يتم التلبيد عند درجة حرارة مرتفعة نسبياً تصل 1280°C ، من أجل الحصول على انتشار جيد لعنصر النيكل.

وبعد ذلك فإن الجزأين المبيينين على اليسار يتم لحامهما باللحام التتوي من أجل زيادة صمود قوة القص من دون حدوث تكسر. وعموماً، فإن وجود المسامية، التي تعيق عملية القطع، تؤدي إلى زيادة اهتراء المعدات، ولهذا السبب فإنه يوصى باستخدام عدد المعادن الصلبة وكذلك سرعات القطع البطيئة. تتحسن قابلية التشغيل بإضافات معينة إلى الفولاذ مثل كبريتات المنغنيز كما هو مذكور في الفقرة السابقة، ويستخدم الرصاص في النحاس والنحاس الأصفر للغرض نفسه. أي يمكن الاستنتاج بأن أي أسلوب يقوم بملء المسام بمادة صلبة مثل التغلغل infiltration والتشريب (الإشباع) بالراتنج resin impregnation، يحسن قابلية التشغيل العادية مثل الخراطة، التثقيب، التفريز، والتسنيث... إلخ. ومن الملاحظ أن المواد المسامية صعبة التشغيل، فلذلك لا ينصح باستخدام العدد المصنعة من فولاذ السريع القطع و المواد السيراميكية بسبب انخفاض المقاومة، لذلك كانت النتائج الجيدة عند استخدام أقلام الخراطة ذات الزوايا الحادة المصنعة من الخلائط القاسية من التتغستين والكوبالت و التيتانيوم، التي تكون

صالحة في قطع المنتجات الملبدة ذات الأساس حديد - غرافيت أو برونز - غرافيت مختلفة المسامية ذات سرعات قطع مختلفة. ويبين الجدول (٢-٦) نظام القطع الموصى به للمواد برونز - غرافيت.



الشكل (٢-٦) مسند ذراع التحكم بنقل الحركة

الجدول (٢-٦)

الخطوئة Ra, μm	بارامترات القطع			مادة العدد القاطعة	نظام القطع
	f_z mm	S_z mm/rot	v_c m/min		
0.8 - 0.63	0.2	0.07	120 - 130	WCo6M, WCo8	الشميد
1.25 - 1.00	0.4	0.115	300 - 900	WCo6M, WCo8	العمادي

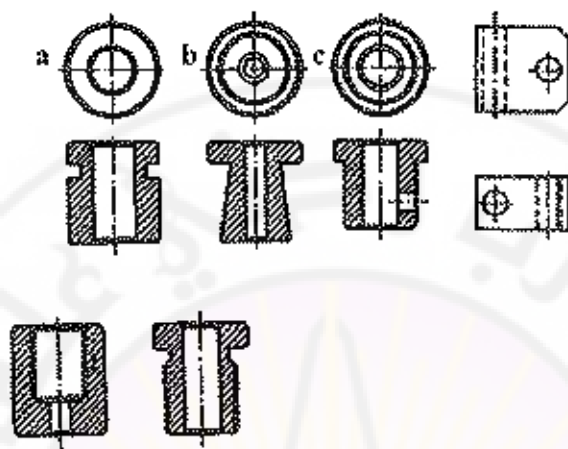
حيث إن:

v - سرعة القطع، S - التغذية، f_z - عمق القطع.

يستخدم التشغيل الميكانيكي لمدمجات المساحيق عند تحضير المنتجات التالية:

- ١- المنتجات ذات السطح غير الأسطواني الشكل.
- ٢- العناصر الصعبة الحصول عليها في القوالب الفولاذية؛ الثقوب المتواضعة بشكل عمودي أو زاوي بالنسبة لاتجاه ضغط التشكيل.

٣- الأخابد على السطح الأسطوانى الخارجى: مثل التسنين أو التخرش، السطح
المخروطى الداخلى أو الخارجى.... إلخ. الشكل (٣-٦).



الشكل (٣-٦) التشغيل الميكانيكى لمنتجات المساحيق

a- تخديد دائرى، b- سطح مخروطى، c- ثقب عمودى على اتجاه ضغط التشكيل،
d- تسنين

٣-٢-٦ الربط Joining:

تستخدم معظم أساليب الربط أو الوصل مع الأجزاء الملبدة عملية اللحام
بالنحاس Copper brazing أو اللحام النئوى projection welding، ومن الممكن
الربط بين جزأين بعد عملية تدميجهما بشكل منفصل تليدهما فى التصاق وتيق بينهما.
ويعتبر أسلوب الربط فعالاً فى الخارجى للمنتج يؤدي إلى تقلص أثناء التليد بالنسبة
للمقطع الداخلى، مما يحدث ضغطاً خفيفاً على الوجه المتداخل أو الفاصل، وبهذه
الطريقة يمكن الوصول إلى نتائج ربط جيدة. انظر الشكل (٣-٦).

٣-٢-٦-٤ التخيوش:

تستخدم عملية التخيوش فى أجزاء المساحيق بعد التثقيب مباشرة، وذلك من أجل
لتصحيح الثقب، والحصول على نظافة عالية للسطح ودقة فى الأبعاد. ومن الأدوات
المستخدمة للتخيوش (توسيع الثقوب) الفولاذ السريع القطع و من الخلائط القاسية ذات

الأساس تنغستين. حيث يحد من استخدام المجموعة الأولى (فولاذ السريع القطع) متانتها الضعيفة وخاصة عندما تصل تزايد السرعة عن 30 m/min، لذلك في هذه الحالة يفضل استخدام المجموعة الثانية (الخلاط القاسية). يصل الاهتراء في العدد القاطعة عند تخويز المواد المسامية إلى قيمة عظمى في منطقة انتقال الجزء القاطع إلى المعايير، تماماً مثل تشغيل المواد المتراسة التقليدية. لذلك يكون الاهتراء المعياري للسطح المشغل في حدود (0.2 – 0.3) mm. ويوصى بنظام تخويز للمواد ذات الأساس الحديدي ذات مسامية 20% هو: سرعة تشغيل (15 – 30) m/min، عمق قطع لا يزيد على (0.1 – 0.2) mm، التغذية (0.2 – 0.3) mm/rot. ومن الضروري أثناء عملية التحويز استخدام سائل تبريد زيتي.

٦-٣ المعالجة الحرارية: Heat treatment :

٦-٣-١ التقسية والإرجاع hardening and tempering :

إن معظم الأساليب المستخدمة في الأجزاء الحديدية عموماً يمكن أن تطبق على الأجزاء الملبدة، ولكن يجب ملاحظة وجود بعض الاختلافات المتعلقة بالمسامية. لذلك تعتبر المعالجة الحرارية والمعالجة الكيميائية-حرارية والمعالجة الميكانيكا-حرارية من أكثر الطرائق انتشاراً في التطبيقات الصناعية لتحسين الخواص الميكانيكية والخواص الفيزيا-كيميائية لأجزاء المساحيق. ويتحكم بطبيعة هذه الأنواع من المعالجة واختيارها المسامية وعدم تجانس البنية.

وقد بينت الحياة التطبيقية أن كثيراً من منتجات المساحيق الإنشائية ينبغي أن تتعرض لأحد أنواع المعالجة الحرارية. ويتعلق إمكانية استخدام المعالجة الحرارية بأن كل جزيئه هي عبارة عن قطعة ميكروية مصبوبة أو مدرقة، والتي تجري التحولات المختلفة أثناء التسخين والتبريد، تماماً كما هو الحال عند القطع الكبيرة المصبوبة أو المدرقة أثناء التسخين أو التبريد.

ويحدد تأثير المعالجة الحرارية على البنية وخواص المواد من قبل التحولات الطورية وبارامترات نظام المعالجة المطلوبة. مثال، يمكن أن تؤدي التقسية أو التقوية إلى تشكيل المحاليل الجامدة وبنية غير متجانسة مختلفة الأحجام أو بنية غير مستقرة كالمارتنسيت في المواد ذات الأساس الحديد. ومن مميزات المعالجة الحرارية لمواد المساحيق أنها متنوعة ببنية حبيبية ناعمة، وتعلق بالمسامية وبنقصان الناقلية الحرارية ودرجة الموصلية الحرارية، ويوجد شوائب لا معدنية وعيوب في البنية. لذلك تختلف سرعة التسخين والتبريد لمواد المساحيق - لوجود المسامية فيها - عند نفس الشروط عن سرعة التسخين والتبريد للمواد التقليدية المصنعة بلا مسامية.

تنقسم المعالجة الحرارية لمواد المساحيق إلى قسمين أساسيين: الأول هو التلدين بمختلف أنواعه، والثاني هو التقسية والإرجاع.

يستخدم التلدين من أجل خفض القساوة وتحسين خواص التشغيل وإزالة الإجهادات الداخلية وزيادة استقرار البنية. تتعرض منتجات المساحيق إلى عملية التلدين بعد المعالجة وإعادة الكبس. ويمكن أن يكون التلدين إما تاماً (مرتفع) وإما غير تام وإما منخفضاً مترافقاً بإعادة تبلور وانتشار وإما لا. والنوع الأخير من التلدين مستخدم للمساحيق غير المتجانسة لتأمين خواص أفضل على كامل المقطع.

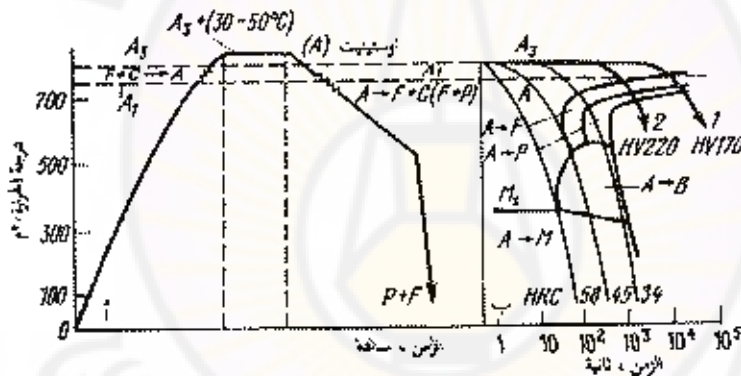
ويُلخص **التلدين التام** في تسخين منتجات فولاذ المساحيق قبل البيوتكتونيد حتى درجة حرارة تزيد بمقدار $30 - 50^{\circ}\text{C}$ على درجة الحرارة المناظرة للنقطة Ac_3 ثم الإبقاء عند هذه الدرجة لتنفيذ التسخين وإتمام التحولات الطورية في المنتج ثم التبريد البطيء

(شكل ٤-٦).

وفي هذا النوع من التلدين يحدث تحول طوري كامل للمنتج الفولاذي. ويؤدي التسخين إلى درجات حرارة تزيد أكثر مما يجب عن النقطة Ac_3 إلى نمو حبيبات الأوستنايت الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض الخواص للفولاذ. أما التبريد البطيء فيجب أن يحقق تفكك الأوستنايت عند درجات بسيطة من فرط التبريد حتى يمكن تحاشي تكون بنية

فريتية كربيدية مفرطة الصغر وتغادي الحصول على القساوة الأعلى التي تكون عادة ملازمة لهذه البنية.

ويجري التلدين غير التام للفولاذ المنتج بأسلوب ميتالورجيا المساحيق قبل اليونكتونيدي لتحسين قابليته للتشغيل. وعند إجراء التلدين غير التام يحدث في الفولاذ تحول طوري جزئي، إذ يتحول البيرلايت إلى أوستنايت. فلهذا إن التلدين غير التام يطبق أساساً على الفولاذ بعد اليونكتونيدي، حيث يسخن الفولاذ إلى درجة حرارة تزيد قليلاً على النقطة الحرجة A_{c1} بمقدار $10 - 30^{\circ}C$ ويسمح ذلك بالحصول على شكل حبيبي للبيرلايت بدلاً من الشكل الصفائحي. وتقوم دقائق السمنتايت التي لم تذوب أثناء التسخين بدور مراكز التبلور للسمنتايت الذي يفصل عند التبريد التالي تحت درجة حرارة A_{c1} . ويتميز الفولاذ ذو البيرلايت الحبيبي بانخفاض في المتانة والقساوة ومن ثم بارتفاع قيم المصلية بالنسبة للطول والمساحة.



الشكل (٦-٤) أ- التلدين التام للفولاذ السباكي قبل يونكتونيدي،

ب- التبريد المتواصل مع التحول الطوري (١- تلدين، ٢- تطبيع)

أما إلتلدين المنخفض فهو يجري لإزالة الإجهادات المتبقية، إذ يطبق هذا النوع من التلدين على منتجات المساحيق الملحومة التي تنشأ فيها إجهادات متبقية أثناء العمليات التكنولوجية السابقة للتلدين كنتيجة لعدم انتظام التبريد وما شابه ذلك. وتتراوح درجة حرارة التلدين بين $350^{\circ}C$ و $600^{\circ}C$ في أغلب الأحيان وعادة يصل زمن الإبقاء إلى عدة ساعات ويتم تحديد هذا الزمن بالتجربة.

تجري عملية نزع الكربون ($C + O_2 \rightarrow CO_2$) والأكسدة ($Fe + O_2 \rightarrow FeO$) في منتجات المساحيق عادةً عندما تكون المسامية فيها أكثر من 15% أي عندما تكون المسامية مفتوحة، إذ يتم التأكسد في كامل الحجم مما يؤدي إلى تقشر العينات، والتسخين والتقسية لا يمكن أن يكونان في الهواء. لذلك من الضروري يجب أن يكون تسخين منتجات المساحيق في وسط محمي مثل غاز الهيدروجين، أو الغاز الطبيعي، أو الوسط الإندوغازي، أو وسط تفكك غاز النشادر، أو في وسط صلب يحتوي على الكربون مثل الغرافيت أو الفحم الخشبي وغيرها... إلخ. من أجل المحافظة على الأبعاد الصحيحة، وتجنب حدوث التقشر scaling. أما مواد المساحيق ذات المسامية الأقل من 10% فتتصف بأنها مسامية مغلقة، وتتناقص شدة التأكسد، ولكن يلاحظ أكسدة وتقشر سطح العينات فقط.

وتتلخص عملية التقسية في تسخين الفولاذ المنتج بالطرق التقليدية حتى درجة حرارة تزيد على Ac_3 بمقدار بمقدار $50^\circ C - 30^\circ C$ في حال الفولاذ قبل البونكتويدي أو تزيد بنفس المقدار في حال الفولاذ بعد البونكتويدي، ثم الإبقاء عند هذه الدرجة لإتمام التحولات الطورية مع التبريد التالي بسرعة تزيد على سرعة التبريد الحرجة (الشكل ١). ومن الضروري أن يعرض الفولاذ بعد التقسية لعملية الإرجاع لتقليل القسافة و الإجهادات الناشئة عن التقسية وللحصول على الخواص الميكانيكية المطلوبة. وتطبق التقسية المتبوعة بالإرجاع على فولاذ العدد لزيادة القساوة ومقاومة الإهتراء والمتانة، كما يطبق على الفولاذ الإنشائي لزيادة المتانة والقساوة والحصول على مطيلية مرتفعة وزيادة مقاومة الصدم.

أما في حال الفولاذ المنتج من المساحيق فإن توضع النقاط الحرجة لا يحدد من قبل التركيب الكيميائي فقط بل من قبل المسامية و مدى تجانس البنية أيضاً. فلهذا عند عدم توافر المعلومات المساعدة لاختيار درجة حرارة التقسية فمن الضروري لكل حالة على حدا إيجاد النقطة الحرجة أو وضع درجة حرارة التقسية تجريبياً. ودرجة الحرارة المثلى لتسخين الفولاذ المنتج بأسلوب ميتالورجيا المساحيق عند التقسية، هي أعلى من درجة حرارة التقسية للفولاذ المنتج بالطرق التقليدية (جدول ٦-٣).

وكما هو ملاحظ من الجدول (٦-٣)، أن زيادة كمية ومحتوى عناصر السبك تؤدي إلى نقصان قساوة الفولاذ. يمكن شرح ذلك أنه كلما نقص محتوى الكربون في المارتنسايت لفولاذ المولبدنيوم الكروم الملبّد، كان محتوى الملبدينوم والكروم أكبر. فهذا يعني أن كمية كبيرة من الكربون تتحد على شكل كربيدات. والتسخين كما ذكرنا يجب أن يكون في جو محمي من الهواء، أما التسخين في وسط من الأملاح المنصهرة فلا ينصح به بسبب إمكانية تغلغل الأملاح إلى داخل المسامات مما يسبب في ظهور خلايا تآكل كيميائي. و لا ينبغي غمس الأجزاء المصنعة من المساحيق في سوائل أكالة corrosive بسبب صعوبة إزالة مثل هذه المواد من المسامات. كما أن هذا الأسلوب يستبعد استخدام المغاطس الملحية salt baths للتسخين واستخدام المحلول الملحي brine للتقسية بالسقاية quenching أو التبريد السريع.

جدول (٦-٣) علاقة نظام المعالجة الحرارية بالقساوة

نوع الفولاذ	Ac ₁ , °K	Ac ₃ , °K	Temp. Hard. °K	القساوة HRC
Fe-0.77%C	988	1028	1113	51 - 60
Fe-0.74%C-2%Cr	1025	1059	1113	55 - 58
Fe-0.66%C-2%Mo	1003	1036	1113	52 - 55
Fe-0.68%C-2%Cr-2%Mo	1033	1068	1133	48 - 52
Fe-0.35%C-5%Cr-5%Mo	1060	1153	1183	41 - 45
Fe-0.27%C-5%Cr-10%Mo	1073	1153	1193	38 - 45
Fe-0.28%C-12%Cr-2%Mo	1080	1156	1243	34 - 40

وللمسامية تأثير أيضاً في قابلية التصليد، أي في مدى عمق التصليد، لأنها تخفض الناقلية الحرارية للفولاذ ولذلك فإن عمق التصليد يتناقص كلما زادت المسامية، انظر الشكل (٥-٤). ومع زيادة المسامية تزداد السرعة الحرجة للتقسية أي يزداد معدل التبريد الحرج وترتفع درجة حرارة بداية التحول المارتنسي، بينما ينخفض مستوى النقاط الحرجة Ac₁ و Ac₃ أي يجري التحول الأوستيني عند درجات حرارة متدنية وهذا يعني أن - مهما كانت كفاءة التبريد عند السقاية - فإن القساوة التامة لا تتم إلا

إلى عمق محدود فقط بسبب التمدد المتزايد في معدل التبريد من السطح إلى الداخل. ويؤثر وجود العناصر السبائكية في الفولاذ مثل الكروم، النيكل، المولبدنوم، المنغنيز على نتائج عملية التفسية تماماً كما يحدث عند الفولاذ المنتج بالطرائق التقليدية، أي تؤدي إلى انخفاض السرعة الحرجة للتفسية ويحسن قابلية التصليد.

يؤدي تناقص المسامية وزيادة نسبة عناصر السبك إلى زيادة المتانة و القسوة ، انظر الجدول (٦-٤) إذ تصل القسوة الميكروية للفولاذ بعد التفسية عند تكون المسامية 13% إلى 740 – 860 MPa بينما تصل إلى 600 – 720 MPa عندما تكون المسامية 24%، و مع ارتفاع درجة حرارة الإرجاع من $180 - 250^{\circ}\text{C}$ إلى $400 - 500^{\circ}\text{C}$ سوف تتغير بنية المارتنيسيت إلى تروستيت و سوربيت، مما يقلل المتانة، و من ثم تردد المطيلية. كلما نقصت المسامية، كان تأثير المعالجة الحرارية أفضل، و كان الاختلاف في الخواص الميكانيكية بين الأجزاء الملبدة والأجزاء المصنعة بالطرائق التقليدية أقل.

تؤثر درجة حرارة التسخين عند المعالجة الحرارية للمساحيق في البنية والخواص وذلك حسب ترتيبها الكيميائي، أما زمن الثبات الحراري فيتعلق بأبعاد المنتجات وبسرعة التحول الناشئة في المعدن المسخن، كما هو الحال عند المنتجات المصنعة بالطرق التقليدية. بينما تؤثر سرعة التبريد وبشكل قوي في بنية وخواص المواد ويمكن أن يكون لها أثر نهائي في تحديد خواص المنتج، لذلك يمكن تحديد سرعة التبريد بحسب المتطلبات النهائية للاستخدام.

تتلخص عملية الإرجاع في تسخين الفولاذ المقسى حتى درجة حرارة تقل عن A_{C1} ثم الإبقاء في درجة الحرارة المختارة مع التبريد التالي بسرعة معينة. والإرجاع عملية نهائية من عمليات المعالجة الحرارية، ويحصل الفولاذ نتيجة لإجرائها على الخواص الميكانيكية المطلوبة. وفضلاً عن ذلك يؤدي الإرجاع إلى إزالة الإجهادات الداخلية التي تنشأ أثناء التفسية إزالة كلية أو جزئية. وتكون إزالة هذه الإجهادات أكثر اكتمالاً كلما ارتفعت درجة حرارة الإرجاع. لهذا تقسم عملية الإرجاع إلى ثلاثة أنواع:

الجدول (٤-٦)

نوع الفولاذ		المستوية، %		الخواص بعد التلدين		نظام المعالجة الحرارية		الخواص بعد عملية الإرجاع	
HB	σ_b MPa	T _{temp}	T _{hard}	HB	σ_b MPa				
280	520	180	850	70	150	17	Fe-0.5%C		
380	1000	200		90	240	10			
290	780	180	860	70	220	17	Fe-0.5%C- 1%Cr		
400	1050	200		100	300	10			
330	780	180	820	80	250	17	Fe-0.5%C- 1%Cr-1%Ni		
420	1100	200		100	300	10			
340	800	180	860	80	300	10	Fe-0.5%C- 1%Cr-1%Ni- 1%Mo		
430	1100	200		110	350	17			

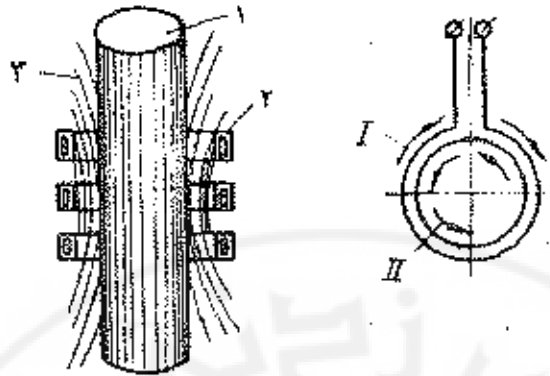
• الإرجاع المنخفض: الذي يجري في درجة حرارة من 180°C حتى 250°C . وفي هذه الحالة تقل الإجهادات الداخلية ويتحول المارتنسايت الناتج عن التقسية إلى مارتنسايت مرآج وتزداد المتانة وترتفع مقاومة الصدم قليلاً من دون حدوث انخفاض ملحوظ في القساوة. تطبق المراجعة المنخفضة على أدوات القطع المصنعة من الفولاذ الكربوني وكذلك على القطع المعرضة للمعالجة الكيما-حرارية مثل الكربنة والنتردة..

• الإرجاع المتوسط درجة الحرارة: والذي يجري في درجات حرارة تتراوح بين $(350 - 500)^{\circ}\text{C}$ ، وهذه المراجعة توفر حداً عالياً للمرونة والتعب، وتكون بنية الفولاذ المسحوق بعد عملية الإرجاع المتوسط من ترومنايت أو تروستون-مارتنسايت، مما يخفض المتانة ويزيد المطيلية.

• الإرجاع المرتفع: يجري هذا النوع من الإرجاع عادة عند درجة حرارة (500 - 680)°C، وتكون بنية الفولاذ المسحوق بعد عملية الإرجاع المرتفع من سوريلايت الإرجاع، ويعطي الإرجاع المرتفع أحسن تناسب من المئات و المئيلية العالية، ولكنه قليل الاستعمال في منتجات المساحيق لصغر حجمها. وعادة يتراوح زمن الإرجاع في حدود 1-2.5 h حسب أبعاد المبيدات.

٢-٣-٦ التفسيرية السطحية: Surface hardening:

تجري عادة التفسيرية السطحية في عمق معين من السطح بحيث لا يحدث إصلاذ إلا في الطبقة السطحية، في حين أن قلب المنتج يظل غير مصلاً. والغرض الأساسي للتفسيرية السطحية هو زيادة القساوة ومقاومة الاهتراء والتعب في المنتج المسحوق المعالج حرارياً. ويظل قلب العينة مرتفع اللدونة ويتحمل الأحمال الديناميكية. ويستخدم التسخين بواسطة التيار الكهربائي عالي التردد أو التسخين الحثي induction heating الذي لا يحتاج إلى استعمال وسط الحماية والتبريد، والسقاية يجب أن تكون بالزيت. ويحدث التسخين الحثي كنتيجة للأثر الحراري للتيار الكهربائي الناتج بالحث في المنتج الموضوع في مجال مغناطيسي متردد من درجة حرارة الغرفة حتى نقطة كوري (768°C)، ويزداد عمق نفاذ التيار بارتفاع درجة الحرارة (انظر الشكل ٦-٥)، وتكون هذه الزيادة شديدة بشكل خاص عندما تزيد درجة الحرارة عن نقطة كوري، ويحدث ذلك نتيجة للانخفاض الحاد في النفاذية المغناطيسية عند انتقال الحديد الفريتي من الحالة المغناطيسية إلى الحالة البارامغناطيسية paramagnetic، وفي نفس الوقت تقل سرعة التسخين، الأمر الذي يجب أخذه بعين الاعتبار عند تحديد نظام التسخين. وتعتبر سرعة التسخين مثالية في حدود 400°K/sec عند التحولات الطورية $\alpha \leftrightarrow \gamma$ وزمن التسخين لا يكون كبيراً و يتراوح بين 2 - 5 sec بسبب استخدام قدرة نوعية كبيرة نسبياً (0.15 Kw/mm²). ولا تتغير سرعة التسخين مع تغير المسامية للمنتج المسحوق. ويعتمد اختيار السمك الأمثل للطبقة المقصاة على ظروف التشغيل للمنتج.



الشكل (٥-٦) رسم تخطيطي للتسخين بالتيارات العالية التردد:

- ١- المشغولة، ٢- ملف لولبي للتحميض الحثي، ٣- خطوط المجال المغناطيسي،
- ١- اتجاه التيار في الملف، II- اتجاه التيار في المشغولة.

ويساعد التسخين الحثي على الآتي:

- ١- اختصار زمن المعالجة الحرارية وزيادة الإنتاجية.
- ٢- الحصول على منتجات خالية من القشور الأكسيدية مما يقلل التفاوت المسموح به.
- ٣- تقليل التشوه والاعوجاج بالمنتجات أثناء المعالجة الحرارية.
- ٤- التحكم الآلي بعملية الإنتاج وأتمتتها.
- ٥- وهذه الطريقة عالية الكفاءة بشكل خاص في حالة الإنتاج بالجملة أو بطلبات كبيرة. ولكنها في نفس الوقت غير مجدية اقتصادياً عند تقسية أجزاء منفردة، لأن ذلك يتطلب منها إعداد ملف تحريض خاص واختيار نظام خاص للمعالجة الحرارية.

٣-٣-٦ عيوب المعالجة الحرارية:

من العيوب الشائعة عند المعالجة الحرارية لمواد المساحيق وخاصة ذات القاعدة الحديدية هي: الأكسدة ونزع الكربون، احتراق عناصر السبك، ظهور تشقق واعوجاج ناتج عن عملية التقسية، عدم الحصول على البنية والقساوة المطلوبة.

إن أي نوع من أنواع المعالجة الحرارية يؤدي لظهور مثل هذه العيوب، لأنه يعتمد على مبدأ واحد في المعالجة: تسخين حتى درجة الحرارة المطلوبة، ثبات عند تلك الدرجة المرتفعة لزمان معين. هذه العملية يمكن أن تؤدي إلى احتراق الكربون وعناصر السبك الأخرى، وكذلك إلى أكسدة الملبدات. مع العلم أن زيادة المسامية في الملبدات تؤدي إلى ارتفاع نسبة العيوب. لذلك من أجل تلافي تلك العيوب إنشاء المعالجة الحرارية من الضروري مراعاة زمن ودرجة حرارة المعالجة المطلوبة.

من العيوب المتعلقة بعملية التلدين هي: الأكسدة ونزع الكربون، أو تسخين المنخفض، أو تسخين مفرط أو حروق. حيث يتعلق التسخين الناقص بانخفاض درجة حرارة التلدين بالمقارنة مع درجة حرارة التلدين المتبعة في تكنولوجيا نظام المعالجة، وكذلك بسبب انخفاض زمن الثبات الحراري، مما يؤدي إلى الحصول على عدم انتظام في البنية وارتفاع في القساوة للمنتج. وهذا يعني أن التسخين الناقص للفولاذ البيوتكتونيدي أثناء التلدين يؤدي إلى الحصول على بنية برلينية صفائحية ذات قساوة عالية.

أما فرط التسخين فيتعلق بارتفاع درجة الحرارة وزيادة زمن الثبات عند التلدين. وهذا يؤدي إلى الحصول على بنية ذات حبيبات كبيرة الحجم وتصعد كبير. في البلورات. وهذا يعني أن مثل هذه العينات تمتلك متانة ومقاومة صدم منخفضة. يمكن إصلاح هذين العيبين (التسخين المنخفض أو الإفراط في التسخين) عن طريق إعادة التلدين أو التطبيع.

والعيب الذي لا يمكن إصلاحه هو الحرق الذي يتعلق بظهوره بزمان ثبات طويل عند درجة الحرارة المرتفعة في وسط مؤكسد، وخاصة عند انصهار سطح العينة، وتصل الأكسدة إلى عمق كبير بين الجزيئات وعلى حدود الحبيبات.

وتظهر تشققات الترسبة نتيجة: التسخين والتبريد غير الصحيح، لا يتناسب نظام المعالجة الحرارية مع التركيب الكيميائي للعينة، التصميم غير الصحيح لغالب التشكيل (زوايا حادة، تغيرات مفاجئة في الأبعاد، عتبات رقيقة). من الضروري عند اكتشاف هذه التشققات معرفة سبب ظهورها، ولذلك يجب مراقبة التشققات السطحية، هل هي متأكسدة أم لا؟ فإذا وجد أكسدة فهذا يعني أن ظهور التشقق يتعلق بتكنولوجيا تحضير.

العينات قبل المعالجة الحرارية. أما عدم وجود الأكسدة فهذا يشير إلى ظهور التشقق أثناء التقسية بسبب خلل في نظام التبريد (التبريد في وسط مفرط)، إذا كان مكسر التشققات لأمعاً فهذا يعني أن البنية ذات حبيبات كبيرة الحجم، ومن المحتمل أن سبب ظهور التشققات هو التسخين المفرط في ارتفاع درجة الحرارة عند التقسية. وسبب ظهور الأعوجاج عند عملية التقسية هو التسخين السريع وعدم انتظام توزيع العينات في الحاويات عند التسخين، وكذلك عدم انتظام وعدم تجانس التبريد في وسط التقسية. و للتقليل من إمكانية ظهور الأعوجاج يتوجب إجراء التسخين البطيء والمتجانس أثناء التقسية حسب المستطاع، مع إمكانية إجراء التسخين المسبق للملبدات. يظهر انخفاض القساوة أثناء التقسية عند التسخين الناقص (درجة حرارة منخفضة، زمن ثبات قليل) أو عند المناولة الطويلة من الفرن إلى حوض التقسية، وكذلك عند عدم كفاية سرعة التبريد عند التقسية (أدنى من درجة الحرارة الحرجة)، ومن أجل إصلاح عيوب التقسية من الضروري إجراء عملية التلدين والتقسية حسب النظام التكنولوجي المتبع للمعالجة الحرارية.

٦-٤ المعالجة الكيما-حرارية chemical heat treatment :

يطلق اصطلاح المعالجة الكيما-حرارية على عمليات الإشباع السطحي للفولاذ المنتج من المساحيق المعدنية بعنصر مناسب مثل الكربون أو الأزوت أو البور أو الكروم وغيرها، ويتم ذلك بانتشار هذا العنصر في حالة ذرية من الوسط الخارجي عند درجة حرارة مرتفعة، وتتلخص المعالجة الكيما-حرارية في تسخين المنتج حتى درجة حرارة معينة في وسط جامد أو غازي أو سائل، ويفصل من هذا الوسط بسهولة وفي حالة ذرية العنصر الذي ينتشر في وسط المعدن، وبعد ذلك يتم الإبقاء عند هذه الدرجة ثم التبريد التالي. وخلافاً للمعالجة الحرارية فإن المعالجة الكيما-حرارية لا تؤدي إلى تغيير البنية فحسب، بل التركيب الكيميائي للطبقات السطحية في نفس الوقت، الأمر الذي يسمح بتغيير خواص هذه الطبقات.

وتتكون عملية المعالجة الكيما-حرارية من ثلاث مراحل أساسية:

١- انفصال عنصر الانتشار في حالة ذرية بفضل التفاعلات التي تحدث في الوسط الخارجي،

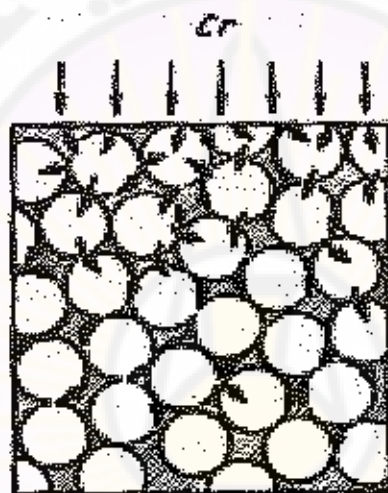
٢- تلامس ذرات عنصر الانتشار مع سطح المنتج المصنوع من فولاذ المساحيق وذوبائها في الهيكل الشبكي للحديد،

٣- انتشار ذرات العنصر المشبع للسطح إلى داخل المنتج.

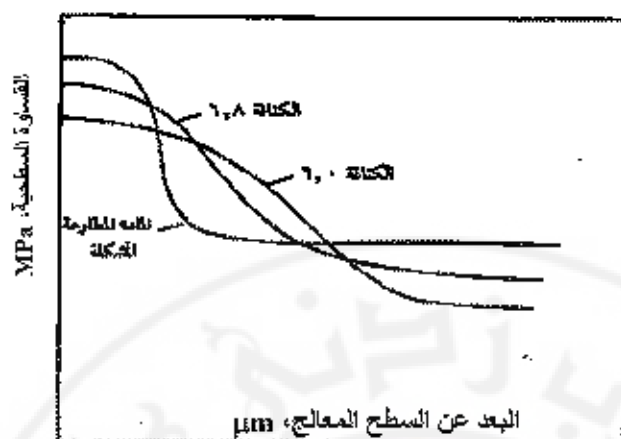
وتختلف سرعة انتشار ذرات العنصر المشبع للسطح في الهيكل الشبكي للحديد تبعاً لترتيب وبنية الأطوار التي يكونها العنصر مع الحديد والمسامية. فعند الإشباع بالكربون أو النيتروجين، اللذين يكونان مع الحديد محاليل جامدة تداخلية، تكون سرعة الانتشار أكبر مما في حالة الإشباع بمعادن تعطي مع الحديد محاليل جامدة تبادلية. ولهذا فعند الإشباع الانتشاري بالمعادن (الطلاء الانتشاري بالمعادن) تجري عملية الانتشار عند درجات حرارة أكثر ارتفاعاً ولفترة زمنية أطول، ومع ذلك تكون الطبقة الناتجة أقل سمكاً مما في حالة الإشباع بالنيتروجين أو بالكربون.

تستخدم الكربنة carburizing والتتردة nitriding والكربونتردة carbonitriding والكرمنة chromizing و البورنة boronizing وغيرها، جميعها لأجزاء ميتالورجيا المساحيق، و للمسامية تأثير كبير في سماكة طبقة الانتشار (الغلاف)، وبسبب وجود المسامية في المنتجات المصنعة بأسلوب ميتالورجيا المساحيق فإن عملية المعالجة الكيميائية-حرارية لها طابع حتمي، أي إن تغلغل عنصر الإشباع يصل إلى عمق أكبر مما هو عليه عند المواد المصنعة (بدون مسامية) و المصنعة بالطرائق التقليدية (انظر الشكل ٥-٦). وتحد المسامية من تأثير تركيب وسط الإشباع، مثال تقليل زمن التثبيت الحراري. ويستخدم لعملية الإشباع الانتشار عادةً أوساط إما غازية وإما مسحوقية صلبة، وبشكل أقل تستعمل الأوساط السائلة. كما أن الغازات بإمكانها أن تدخل إلى داخل المسام إلى فترة زمنية محددة من المعالجة لا تليث أن تمتلئ بسبب تغلغل عنصر الانتشار، والخط الفاصل بين الطبقة الانتشارية السطحية والقلب أقل تحديداً. وهذه الظاهرة عموماً تشكل ميزة مفيدة بدلاً من أن تكون على العكس. وترافق عادةً عملية الإشباع السطحي عملية إغراق وملء المسامات المفتوحة نتيجة تغلغل

عنصر الإشباع إلى داخلها، ويمكن أن تتحول المواد المسامية المرشحة إلى مواد نصف مرشحة أو إلى مواد غير مرشحة نهائياً. تكون العناصر القريبة في الخواص من الحديد (مثل الكروم، الفاناديوم، المنغنيز، النيكل وغيرها) قادرة على إغراق وملء المسامات، أما العناصر التي تختلف عن الحديد مثل (السلكون، الكربون، الأزوت وغيرها) فتكون أضعف على إغراق وملء المسامات. وتؤثر أيضاً كثافة المعدن والمسامية تأثيراً كبيراً في كل من سماكة طبقة الانتشار و القساوة السطحية، فكلما لزدادت الكثافة (نقصت المسامية)، قلت سماكة طبقة الانتشار و القساوة السطحية، كما هو مبين في الشكل (٦-٦).

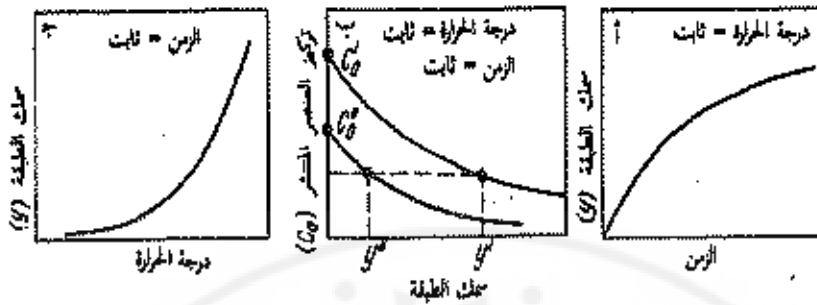


الشكل (٦-٥) رسم تخطيطي لعملية انتشار الكروم في الفولاذ المنتج من المساحيق



الشكل (٦-٦) تأثير الكثافة على القسوة السطحية عبر عمق السطح المعالج

تعتمد سماكة طبقة الانتشار على درجة حرارة وزمن الإشباع، وكذلك على تركيز العنصر المنتشر على السطح وعلى مسامية المنتج (شكل ٦-٦). وبزيادة زمن الثبات الحراري τ يزداد سماكة طبقة الانتشار y . وبزيادة درجة الحرارة و المسامية تزداد سماكة الطبقة الانتشارية أيضاً. أما زيادة تركيز العنصر المنتشر على سطح المعدن يزداد سمك الطبقة الانتشارية إذا تساوت جميع الظروف الأخرى. ويعتمد تركيز العنصر المنتشر على السطح على درجة نشاط وسط الانتشار المحيط، الذي يوفر ورود ذرات هذا العنصر إلى السطح، وكذلك على سرعة العمليات الانتشارية المؤدية إلى انتقال هذه الذرات إلى عمق المعدن، وعلى التركيب الكيميائي للخليط الجاري معالجته وكذلك على تركيب وبنية الأطوار المتشكلة على السطح. وتؤدي زيادة درجة الحرارة إلى زيادة سرعة الانتشار، لهذا فإن سماكة طبقة الانتشار تزداد بشدة عند ارتفاع درجة حرارة عملية المعالجة.



الشكل (٦-٦) علاقة سماكة طبقة الانتشار بالزمن (أ) وبالتركيز (ب) وبدرجة الحرارة (ج)

٦-٥ الطلاء الكيميائي والكهروكيميائي chemical and electro-chemical coating

يستخدم الطلاء الكيميائي والطلاء الغلفاني (الغلفنة) في الملبات المصنعة بأسلوب ميتالورجيا المساحيق من أجل حمايتها من التآكل وبشكل أقل من أجل الزخرفة والحصول على مظهر خارجي جميل للقطع. يمكن حماية منتجات المساحيق ذات المسامية القليلة أو المغلفة (حتى 7%) بواسطة الطلاء الكيميائي أو الغلفنة حسب نظام الطلاء المتبع للمعادن المعصنة المصنعة بالطرائق التقليدية. أما عند عملية الطلاء للمواد المسامية (أعلى من 7%) أي ذات مسامية مفتوحة، فمن الضروري في البداية إجراء ترشيح أو تغلغل مواد إلى داخل المسام لمنع دخول الكهروليت إلى داخل المسامات المفتوحة. ومن المتطلبات الأساسية لمادة التغلغل إلى المسامات يجب أن تكون ذات انسيابية عالية (لزوجة منخفضة)، وذات التصاق جيد، وليس لها تأثير تآكلي متبادل مع المادة الأساس. كما يجب أن تكون مادة التغلغل ذات انكماش قليل عند عملية التبلور أو البلمرة، ومقاومة للتآكل.

ومن مواد التغلغل الجيدة والمستخدمه هي 10% من محلول سائل السيليكاات اللامائية في الكحول الإيثيلي. ويتم إدخال السائل عن طريق تحميل الأجزاء في سلة من أسلاك أو صفائح مثقبة، والتي يتم عندئذ غمسها في سائل التغلغل الموجود في حاوية مفرغة (ضغط التخلخل يساوي 10 Pa) محكمة السد من الأعلى. وعندئذ يطبق التفريغ ويتم امتصاص الغاز تدريجياً من المسام واستبداله بسائل التغلغل عند إزالة التفريغ خلال

20 min. ثم تجري عملية بلمرة السائل عند درجة حرارة $^{\circ}\text{C}$ (140 – 130) لمدة 1 h. وقبل أن تجري عملية الغلفنة يجب تنشيط الملبدات من خلال إدخالها في وعاء دوار مع مسحوق الحديد لفترة زمنية 6 h. ثم تنقل إلى الوسط الكهروليتي، الذي يفضل أن يكون حمضياً.



الفصل السابع

خواص منتجات ميتالورجيا المساحيق وطرق الاختبار

P/M Product Properties and Testing Procedure

خواص منتجات ميتالورجيا المساحيق

الاختبارات الميكانيكية

الاختبارات الفيزيائية



خواص منتجات ميتالورجيا المساحيق وطرق الاختبار

P/M Product Properties and Testing Procedure

٦-١ خواص منتجات ميتالورجيا المساحيق:

إن واحدة من أهم المسائل الرئيسية التي تواجه صناعة المنتجات في ميتالورجيا المساحيق هي الحصول على مدمجات متماسكة ذات خواص جيدة عند مختلف الظروف. وحل مثل هذه المعضلة يكون في مجموعة من العمليات (مثل صناعة المساحيق الرئيسية، و خلطها،... إلخ)، ثم إجراء عمليات أخرى لها (مثل التشكيل، والتلييد، والمعالجة الحرارية الإضافية وغيرها)، ومن أجل إيجاد التماسك بين جزيئات المنتج فهذا يعني وجود عمليات غير مستقلة (كزيادة وتثبيت التلامس بين الجزيئات) ووجود أفعالات (كنقصان التلامس أو انهياره). ولهذا يتعلق كثير من خواص الجسم المسحوقي (الدمج) ليس فقط بكثافته النسبية ρ ، وبالتلامس الحرج بين جزيئاته. و يحدث هذا، لأن الجسم المسحوقي هو عبارة عن طورين هما الطور الصلب و طور الفراغات (المسامات المملوءة بغاز مثل الهواء). ومن صفاته:

a. توصيل الطاقة و الإجهاد عبر الجسم المسحوقي فعلياً يتركز بشكل كامل في الطور الصلب.

b. خواص طور الفراغات هذه، مثل المتانة، التوصيل الكهربائي، التوصيل الصوتي... إلخ، بالمقارنة مع الطور الصلب فعلياً يساوي الصفر.

c. عندما يتألف الطور الصلب من بعض المركبات المختلفة غير مبني على التجربة (أي قبل إجراء التجارب)، فإن تقويم خواص الجسم المسحوقي يكون صعباً. ومن أكثر العلامات المميزة لمواد المساحيق (الأجزاء) هو وجود مسامية متبقية، وتكون كبيرة في كثير من الأحيان، مما يؤثر في مجمل الخواص. و يمكن أن يكون

شكل المسام مختلف ويتعلق بأبعاد وشكل الجزيئات للمسحوق الأساسي، وبنظام تحضيرها وبالمعالجة الحرارية للقطع. يعتبر الشكل الكروي للمسام من أكثر الأشكال تجانساً وتوزعاً في الأجزاء التي تحضر من جزيئات المساحيق الكروية الشكل. وينحدر مستوى الخواص الميكانيكية عندما تكون المسام دقيقة الحجم أو مغلقة أو دائرية الشكل، وهي تتأثر كثيراً بأجواء الفرن وبسرعة التسخين. وبشكل عام تتأثر الخواص النسبية للجسم المسحوق بالكثافة النسبية σ ، التي تتعلق بها وفق المعادلات التالية:

$$\chi = \sigma / \sigma_c \quad (1-7)$$

$$\chi \sim \theta^m \quad (2-7)$$

حيث إن:

σ - هي متانة الجسم المسحوق،

σ_c - هي متانة الجسم المتراص دون مسامية،

m - تتراوح قيمتها من 0 حتى 10، ويمكن تمييز أربع مجموعات للخواص

(انظر الشكل ٧-١):

١- المجموعة الأولى: عندما ($m = 0$) لا تتعلق بالمسامية وخاصة القساوة

الميكروية ودرجة حرارة الانصهار ومعامل التمدد الحراري لمادة الجزيئات.

٢- المجموعة الثانية: عندما ($m = 1$) ذات صفات إضافية وتعلق فقط بكمية

المادة من حيث السعة الحرارية لها وقابلية التأثير المغناطيسي.

٣- المجموعة الثالثة: عندما ($m = 1.5 \dots 2$) تتمتع ببعض الخواص مثل النفاذية

الكهربائية والحرارية، معامل المرونة، العازلية الكهربائية وبدائية النفاذية

المغناطيسية.

٤- المجموعة الرابعة: عندما ($m = 3 \dots 10$) تكون البنية حساسة (متأثرة)

للخواص المختلفة مثل المتانة، اللدونة، النفاذية المغناطيسية العظمى، مقاومة الصدم

وغيرها.

أما معامل التصحيح النسبي لخواص الجسم المسحوقي غير القابلة للقياس فتعطى بالعلاقة التالية:

$$M = C / C_e \quad (3-7)$$

حيث يكون:

C - خواص الجسم المسحوقي منسوبة إليه البارامترات الاسمية مثل المقطع أو الطول الاسمين.

C_e - خواص الجسم المتراس.

وبمعرفة مقياس أي من الخواص للنموذج المسحوقي يمكن حساب بقية المواصفات مثل: معامل المرونة، و معامل الانزياح، و الضغط من جميع الجوانب، و معامل بواسون، و سرعة الصوت، و الناقلية الكهربائية وغيرها من الخواص التي لا تتعلق بالمسامية، بل بخواص جزيئات المادة المسحوقة.

وبالحالة العامة يوجد علاقة ذات صفة كمية بين العوامل المختلفة والخواص:

$$\alpha = E / E_e \quad (4-7)$$

$$\alpha / \theta = (l / l_e)^{-2} \quad (5-7)$$

حيث إن:

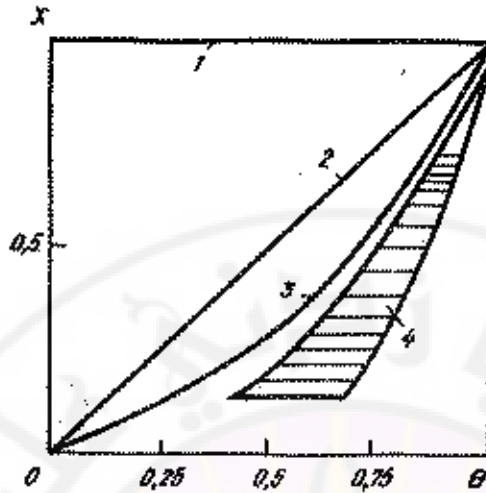
E - معامل المرونة للجسم المسحوقي.

E_e - معامل المرونة للجسم المتراس بدون مسامية.

l - الطول الحقيقي للجسم المسحوقي.

l_e - الطول الاسمي للجسم المسحوقي المتراس دون مسامية.

يشير تقييم خواص مواد المساحيق أو الأجزاء إلى قيمها عند الكثافة المعطاة ليس فقط بتحديد العوامل الستاتيكية، بل بتحديد العوامل الفيزيائية والعوامل التكنولوجية.



الشكل (١-٧) علاقة الخواص النسبية x للجسم المسحوق بالكثافة النسبية θ
 1- بنية لا تتعلق الخواص فيها بالمصامية، 2- بنية ذات صفات إضافية،
 3- بنية ذات خواص من نوع النافذية، 4- بنية حساسة (متأثرة) للخواص

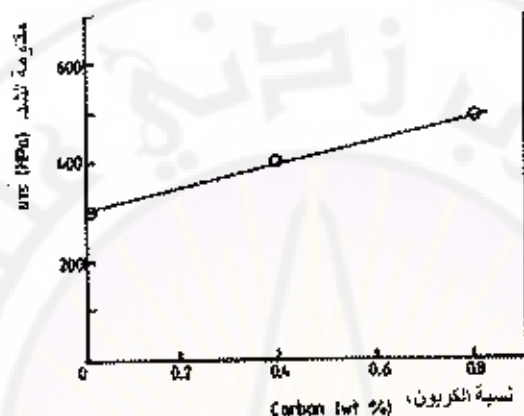
١-١-٧ التركيب الكيميائي وبنية منتجات مواد المساحيق:

إن أبسط تركيب هو الحديد غير المسبوك unalloyed. ويستخدم هذا المصطلح بدلاً من النقي لوجود آثار قليلة من عناصر أخرى داخلية في تركيب أنواع مساحيق الحديد. والحديد غير المسبوك يكافئ الحديد الطري (المطاور) المصنوع بالطرائق التقليدية. وهو من بين أسهل المواد التي يمكن استخدامها، كما أن خواصه تتحسن عن طريق المعالجة الحرارية، وهناك عيب فيه هو النقص الكبير (الانكماش) أثناء عملية التلبيد، ولتأمين متانة أفضل من الضروري إضافة عناصر تسبيك مثل C, Cr, Si, Mn, Ni ، إلخ... Cu.

ويعتبر عنصر الكربون من عناصر السبك الشائعة والأرخص، ويبين الشكل (٧-٢) تأثير النسب للمئوية لإضافة عنصر الكربون في نقوية الفولاذ العادي، ويتدخل النسب من $0.5\% - 0.8\%$ في معظم تركيبات مساحيق المواد.

أما عنصر النحاس Cu فيكاد يكون استخدامه نادراً في الفولاذ الطري، ويستخدم بشكل واسع في تركيبات ميتالورجيا المساحيق، ويمكن أن يكون بكميات تصل إلى نسبة

Cu 20% ، وهي أكبر نسبة يمكن أن تتحلل في الهياكل الشبكية للحديد، مع الإشارة إلى أن النسبة الأكثر شيوعاً تكون بحدود Cu 8% . ويؤثر استخدام النحاس في تغيير الأبعاد أثناء عملية التليد، وبنسبة Cu % (3 - 2) تكون كافية للتحكم بالأبعاد، كما أن تأثير التقوية يكون طفيفاً بصورة نسبية، ويمكن الحصول على قوة محسنة مع وجود الكربون أيضاً.

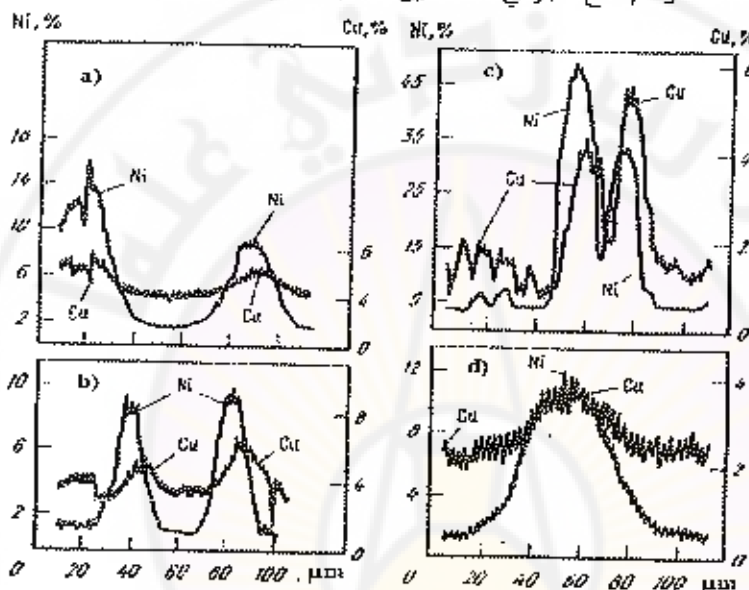


الشكل (٧-٢) علاقة نسبة الكربون بمقاومة الشد لفولاذ المساحيق عند مسامية 10%

وعنصر النيكل Ni هو من عناصر السبك الواسعة الاستخدام، حيث يستخدم إما وحده وإما مع الكربون وإما مع النحاس والكربون. وللنيكل دور فعال في تقوية المحلول الصلب في الهيكل الشبكي lattice للحديد وتحسين المتانة و قابلية التصلب hardenability (انظر الشكل ٧-٣).

ويضاف عنصر المولبدنيوم Mo عادة مع النحاس والنيكل للتقوية وتحسين المتانة، كما أن له تأثير مفيد في قابلية التصلب. والسبب في استخدام عناصر التسبيك الثلاثة أنف الذكر هو سهولة اختزال أكاسيدها، مع العلم أنها عالية نوعاً ما، وذلك بالمقارنة مع عناصر السبك الأرخص مثل الكروم Cr و المنغنيز Mn والسيلكون التي تستخدم في الفولاذ الطري المتدني السبائكية، لا تختزل في أي جو. من أجواء التليد الاقتصادية. وتضاف هذه العناصر من أجل المحافظة على انضغاطية compressibility جيدة لمسحوق الحديد، ومن الملاحظ أن إضافة هذه العناصر تؤدي إلى عاقبتين: الأولى هو

الانتشار في الهيكل الشبكي للحديد أثناء التلبيد من أجل إعطاء سبيكة متجانسة ذات خواص ميكانيكية كافية ولكن من دون تجانس مجهري. والثانية: أن مخاليط المساحيق المختلفة تكون مبالغة إلى الانفصال أو الانعزال segregate أثناء المناولة، إذ إن عدم التجانس المجهري الناتج يكون غير مرغوب فيه إلى حد بعيد. وأحد الحلول الجيدة لهذه المشكلة هو الإنتاج الجزئي للمساحيق المسبقة السبك.



الشكل (٣-٧) توزيع النحاس والنيكل حسب التركيب و النظام التكنولوجي

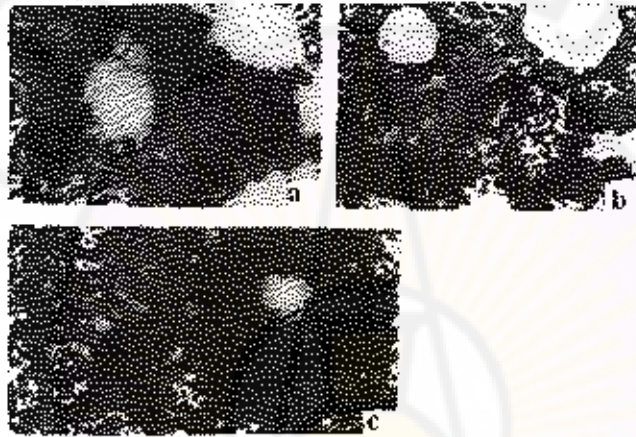
a&b - (92%Fe - 6%Cu - 2%Ni) تليبيد عند 1200°C خلال

1h و 2h على الترتيب c&d - (94% Fe - 2%Cu - 2% Ni) تليبيد

(1200°C, 1h) و (1250°C, 2h).

ومن أجل حل المشكلة السابقة فقد اكتشف في العقد الأخير من القرن العشرين، أنه إذا تم إدخال الكروم و المنغنيز والفاناديوم في خلطات المساحيق على شكل كربيدات لا تتأكسد أثناء التلبيد في أجواء الفرن التقليدية، و يمكن إضافتها على شكل كربيدات بالغة النعومة (5 - 10)µm مصنعة بالسحق الميكانيكي و مختلطة مثل - كريد المنغنيز /الكروم/ الموليبدنيوم، أو كريد المنغنيز/فاناديوم/ موليبدنيوم -

واستخدامها لا يحدث تأثير قوي، وربما يكون السبب عائداً إلى أنها تحتاج درجة حرارة تليد أعلى من 1200°C بالمقارنة مع درجة حرارة تليد خلاط الحديد $1120 - 1140^{\circ}\text{C}$ ، وهذه الدرجة العالية من الحرارة ترفع من تكلفة عملية التليد. ولكن من أجل الحصول على بنية متجانسة من الضروري رفع درجة حرارة التليد وزمن الثبات الحراري، فمثلاً من أجل الخليطة $\text{Fe} - \text{Cu} - \text{Ni}$ يستخدم نظام تليد $(1250^{\circ}\text{C}, 3\text{h})$ ، بينما نقصان درجة حرارة التليد أو تقليل زمن التليد يؤديان إلى الحصول على بنية غير متجانسة (تليد غير كامل)، كما هو مبين في الشكل (٤-٧).



الشكل (٤-٧) البنية المجهرية للفولاذ: $94\%\text{Fe} - 0.4\%\text{C} - 1.5\%\text{Cu} - 3\%\text{Ni} - 1\%\text{Mo}$
a - تليد عند $(1200^{\circ}\text{C}, 2\text{h})$ ، b - تليد عند $(1250^{\circ}\text{C}, 2\text{h})$ ، c - تليد عند $(1350^{\circ}\text{C}, 2\text{h})$

وهناك تطور آخر في استخدام الفسفور كعنصر تسبيك، فمن المعروف أن الفسفور شيء رديء إذا وُجد في الفولاذ التقليدي، وقد وضعت هيئة المواصفات العالمية حداً أعسى لمحتوى الفسفور في الفولاذ على أنه شوائب لا يمكن تجنبها. والسبب في ذلك هو أن الفسفور يشكل مع الحديد يوتكتيك له نقطة انصهار أدنى من معظم أنواع الفولاذ، لذلك فهو ينفصل متجهاً نحو مركز المصبوبة بتأثير ضار على الخواص الميكانيكية الناتجة عن هشاشة فوسفيد الحديد. أما في ميتالورجيا المساحيق فإنه يضاف الفسفور إلى الحديد بشكل ناعم وموزع بصورة متجانسة، وعندما تصل درجة حرارة

التلبيد إلى 1050°C يظهر الطور السائل لفوسفيد الحديد مما يساعد في زيادة سرعة الانتشار والتلبيد. و من مساوئه هو أن التقلص يزداد إذا أضيف بنسبة تزيد على $P > 0.25\%$ ولكن هذا بالإمكان تعويضه بإضافة النحاس.

ومن عيوب إضافة الكريبيدات و الفسفور إلى الخلائط أنها تزيد من اهتراء قالب التشكيل، لأن الكريبيدات وفوسفيد الحديد في غلبة القساوة، مما يجعلها تعمل كمواد حاكة محتملة.

ومن المعروف أن الذي يحدد خواص منتجات مواد المساحيق هو مجال استخدامها، إذ تؤثر البنية الماكروية و الميكروية، والتشكيل الذي يجري بعيداً عن نقطة انصهار مادة الأساس، فإما أن تكون في طور جامد بالكامل و إما مع وجود طور سائل بشكل محدود إلى جانب الطور الجامد. لذلك تتعلق البنية بطوروف الحصول على المساحيق المعدنية المراد تشكيل القطع منها، من حيث خواصها وطريقة تحضيرها وبسرعة التسخين وزمن التلبيد.. إلخ.

إن التركيب البنوي لمواد المساحيق هو عبارة عن طور معدني (الأساس) وشوائب لا معدنية (غرافيت، أكسيدات وغيرها) بالإضافة إلى المسامات. ويظهر تأثير خواص المساحيق الأساسية في اتجاهات مختلفة مثل تأثيرها في العمليات التكنولوجية المختلفة للحصول على المنتج. فلذلك يحدد نوعية المدمجات ليس فقط شكل الحبيبات وخشونة السطح، بل أيضاً بنية المادة المشكلة أثناء التلبيد عند أسطح التلامس بين الجزيئات (أعناق التلامس)، ويؤدي كبر حجم المساحيق المعدنية إلى تشكيل بنية حبيبية كبيرة الحجم مع وجود مسامات كبيرة متعددة الأشكال، بينما نقصان حجم المساحيق وزيادة دقتها وتشتتها يؤدي إلى تنشيط الانتقال الكتلي (القوى) أثناء التلبيد والحصول على كثافة أعلى (مسامية أقل)، ويمكن أن تزداد نسبة الشوائب بسبب أكسدة السطح.

يؤثر التركيب الكيميائي للمنتج المسحوق تأثيراً كبيراً في تشكيل البنية وخاصة عند وجود أكاسيد صعبة الاختزال مثل Al_2O_3 ، SiO_2 وغيرها. فإذا كانت المنتجات تحتوي على عدة عناصر، فإننا نحصل على بنية غير متجانسة الخواص بسبب عدم

تجانسها أثناء التلييد، مما يؤدي إلى تشكيل مسامات داخلية ناتجة عن اختلاف سرعة الانتشار الحجمي للعناصر المختلفة.

ويؤثر التدميج أيضاً في البنية النهائية للمنتج حسب ظروف التدميج، حيث تزداد الكثافة، وتتشوه الجزيئات، ويتغير السطح الخارجي والأسطح البينية لجزيئات التلامس. ويؤدي التدميج على البارد متبوعاً بزمان تلييد طويل نسبياً إلى تشكيل بنية متجانسة ولكن ذات حجم كبير للحبيبات. وعلى العكس تتشكل بنية حبيبية دقيقة وأكثر تجانساً عند التدميج على الساخن.

يتم دراسة البنية إما بالفحص الماكروبي وإما بالفحص الميكروبي وإما بدراسة البنية باستخدام الأشعة السينية وإما باستخدام المجهر الإلكتروني.

٢-١-٧ الفحص الماكروبي:

تستخدم طرق الفحص الماكروبي التي تعتمد على العين المجردة في دراسة البنية الماكروية. وتتيح هذه الطرق تحديد الشكل العام للبنية البلورية لمواد المساحيق وخلاتها في الأحجام الكبيرة، فإذا ما كانت البلورات كبيرة الحجم يمكننا دراسة حجمها وشكلها وأسلوب توزيعها. ويمكن دراسة البنية الماكروية بالوسائل التالية:

١- دراسة مكسر العينة: وذلك بأخذ مكسر من العينة، التي بواسطتها يمكن إظهار البنيان البلوري للمادة. ويمكن من فحص المكسر الحكم على حجم الحبيبات والمسافات ودراسة تقييم الفجوات أو حالة التقشر، كما يمكن الحكم على انتظام عملية التلييد أم لا وخصائص المعالجة الحرارية، مما يتيح تقدير بعض خصائص المنتج. وغالباً ما يدل المكسر الخشن للحبيبات على انخفاض الخواص الميكانيكية للمشغولات بالمقارنة مع المشغولات الدقيقة الحبيبات.

٢- دراسة الشرائح الماكروية: وفي هذه الحالة يؤخذ مقطع على شكل شريحة من المشغولات الكبيرة الحجم ويجلخ سطح هذا المقطع ثم يستقر ويصقل ويعالج كيميائياً باستخدام محاليل خاصة لإظهار بنيتها. وتستخدم لإظهار البنية في حالة التحليل الماكروبي للحديد والفولاذ مثلاً، المحاليل المائية لحمض كلور الماء HCl أو. أو. خليط

من HCl و HNO_3 و $K_2Cr_2O_7$ وغيرها. وينتج عن عملية التتميش الكيميائي للشريحة (العينة) إظهار الملامح التالية للبنية:

١. شكل وتوزيع أوضاع الحبيبات.
٢. العيوب الموجودة في البنية مثل الفجوات والمسامات والتشققات والفقاعات الغازية والانكماش الحاصل في الملبد والنقش السطحي الناتج عن الأكسدة وغيرها.
٣. عدم التجانس الكيميائي للخلات الناتج عن عمليات التليد والمعالجة الحرارية والمعالجة الكيميائية حرارية.

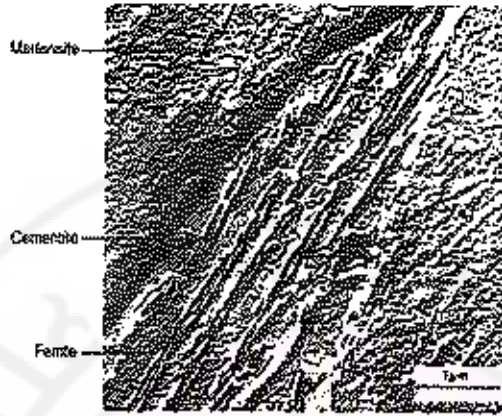
٧-١-٣ الفحص الميكروبي:

تستخدم هذه الطريقة لدراسة البنية المجهرية لمواد المساحيق وخلاتها، وتعتبر هذه الطريقة من أهم طرق فحص البنية، وذلك لوجود علاقة مباشرة بين البنية المجهرية للمعادن والخلات وبين العديد من خواصها.

ويتيح الفحص الميكروبي تعيين حجم وشكل الحبيبات والمسامات، ونمط توزيع الأطوار المكونة للخلات بالإضافة إلى إظهار البنية المميزة لبعض أنواع المعالجات، والكشف عن العيوب الدقيقة مثل الشوائب غير المعدنية أو الشقوق المجهرية.. إلخ.

ولإجراء التحليل المجهرى، تحضر عينات صغيرة من المنتج المسحوق، ويجلخ أحد مستوياتها ويسفر ويصفى بعناية ثم يتمش بمحلول كيميائي لإظهار البنية. فلإظهار بنية الحديد والفولاذ يستخدم محلول كحولي لحمض الأزوت ($5 \text{ cm}^3 \dots 1$ لكل 100 cm^3 من الكحول) أو غيرها من المحاليل. وتقوم هذه المحاليل الكيميائية بإذابة الأطوار المعدنية وغيرها ذوباناً انتقائياً، ويزداد تأثير هذه المحاليل في المناطق الحدودية بين الأطوار أو بين الحبيبات، حيث تتباين الخواص الفيزيائية كثيراً. وينتج عن ذلك تكوين بروزات وأخدود على سطح العينة. وعند دراسة العينة مجهرياً تظهر المناطق الأكثر ذوباناً أكثر قتامة، بينما تظهر المناطق الأقل ذوباناً أكثر سطوعاً. ويؤدي تتميش سطح المعدن إلى إظهار حدود الحبيبات في صورة شبكة قائمة دقيقة، وحدود الحبيبات يكون على شكل قنوات بسبب ذوبان هذه الحدود في الأحماض. ويبين الشكل (٧-٥) البنية المجهرية لخليطة من الفولاذ الكربوني المساحقي، تتكون البنية

من برلايت و سمكتايت، حيث يتكون البرلايت من خليط من رقائق الفرايت وكربيد الحديد Fe_3C (السمكتايت).

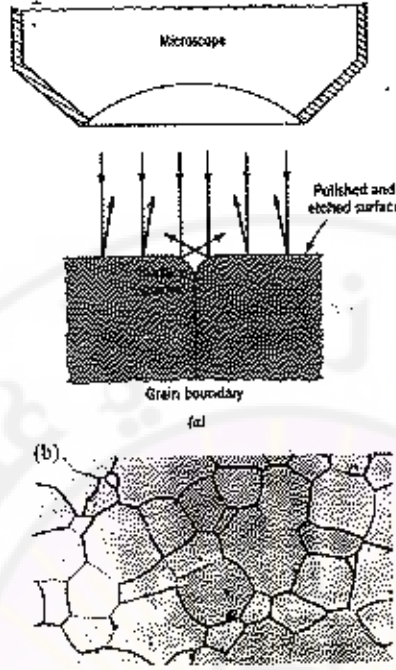


الشكل (٧-٥) البنية المجهرية للفولاذ الكربوني X1000

ويبين الشكل (٧-٦) عملية انعكاس الشعاع الضوئي على سطح العينة، والشكل العام للمجهر الميتالوغرافي الرأسي، الواسع الانتشار، الذي يتيح دراسة العينات سواء في المجال الساطع أم في المجال المظلم، وتحبب الإضاءة الرأسية أو المائلة أو باستخدام الضوء المستقطب (الشكل ٧-٧).

ولا تتعدى قدرة التحليل للمجهر الضوئي $0.2 \mu m$ (أي 2000 Å)، أي إنه لا يمكن استخدام هذا المجهر لتمييز دقائق البنية التي يقل بعدها عن $0.2 \mu m$ ، ويعني هذا أن أقصى تكبير يمكن الاستفادة منه في المجاهر الضوئية هو 2000 مرة.

وقد انتشر في الآونة الأخيرة استخدام المجاهر الإلكترونية، التي تتميز بقدرة تحليل تزيد كثيراً جداً على مثلثها في المجاهر الضوئية مما يمكن دراسة تفاصيل أدق في بنية المواد. وإن استخدام الأشعة الإلكترونية التي تنسم بموجات قصيرة جداً (0.04 Å) يتيح تمييز تفاصيل عناصر البنية التي يتراوح بعدها بين $2 - 5 \times 10^{-8} \text{ cm}$ أي التي تقرب في أبعادها من البعد بين الذرات في البلورة. وتنقسم المجاهر الإلكترونية إلى نوعين:

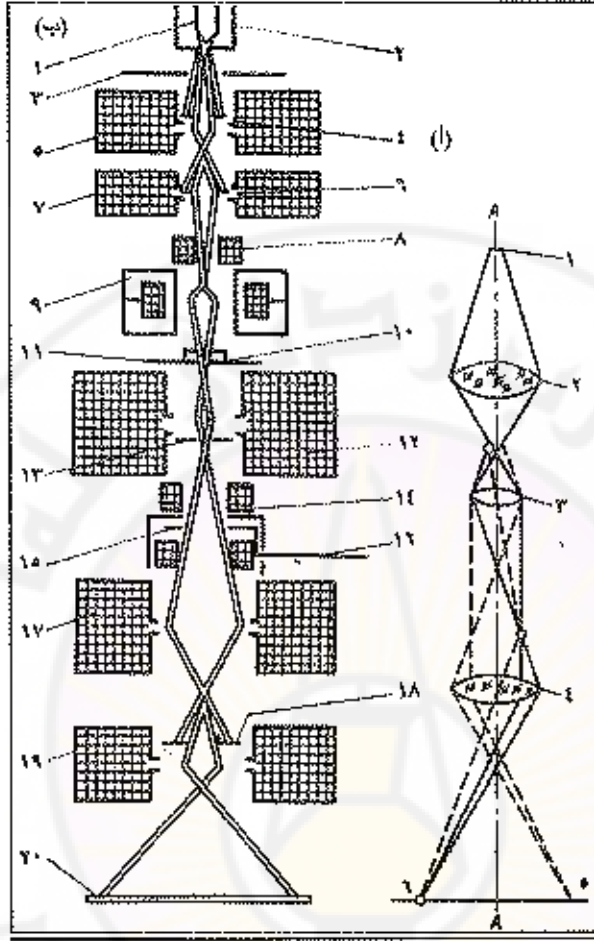


الشكل (٧-٦) انعكاس الأشعة الساقطة على سطح العينة في المجهر الضوئي (a)
مع إظهار شكل البنية (b)

٦- المجاهر الكهرومغناطيسية النفوذة: التي حظيت بانتشار واسع، وفيها تنفذ حزمة الإلكترونات خلال العينة المدروسة (على شكل رقائق). ولتباين القدرة على تَشْيِيت الإلكترونات في بنية العينة الرقيقة، فإننا نحصل على صورة لهذه البنية. ويتكون المجهر الإلكتروني من مصدر للإلكترونات يعرف باسم (مدفع الإلكترونات) وعدد من العدسات الكهرومغناطيسية. وتتبعث الإلكترونات من المهبط (وشيجة من التتغستين) عند تسخينه، ويؤثر بين المهبط والمصعد مجال كهربائي هائل، يؤدي إلى تحرك الإلكترونات في اتجاه المصعد بسرعة هائلة. وتعتبر الإلكترونات خلال ثقب في المصعد، ثم خلال العدسات المكثفة الموجودة أسفله (انظر الشكل ٧-٧)، وهذه العدسات الوظيفية نفسها التي تُوْديها العدستان الشبكية والعينية في المجهر الضوئي.

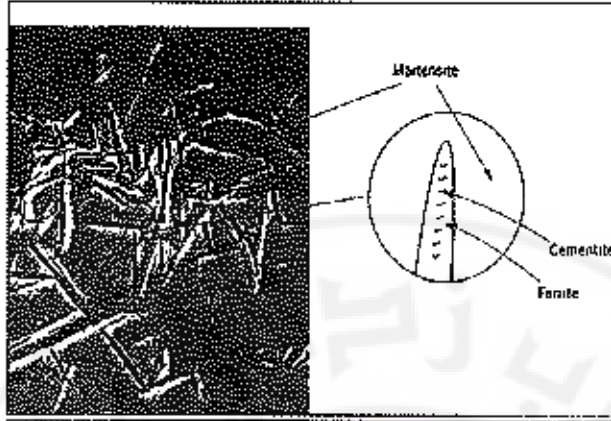
وتقوم العدسات المكثفة بتركيز الإلكترونات عن طريق تفاعل الأخيرة مع المجال المغناطيسي القوي الذي تصنعه العدسات، وتسقط حزمة الإلكترونات المركزة على العينة الرقيقة الجارية دراستها. وتتراوح قدرة التحليل لهذه المجاهر بين 5°A وحتى 120°A ، كما تتراوح نسبة التكبير بين 100000 - 400000 مرة. أما الجهد الكهربائي المطبق فيصل إلى 150 KV.

٢- المجاهر الإلكترونية الماسحة: electronic scanning microscope: لقد اتسع في السنوات الأخيرة استخدام المجاهر الإلكترونية الماسحة، التي تتكون فيها الصورة بواسطة الإلكترونات الثانوية المنبعثة من السطح الذي تسقط عليه حزمة الإلكترونات الأولية، وتتحرك بصفة مستمرة لتمسح هذا السطح. وينتج المجهر الإلكتروني الماسح دراسة سطح العينة المعدنية مباشرة، ولكن قدرة التحليل لديه أقل ($250 - 300^{\circ}\text{A}$).



يوضح الشكل (٧-٧) رسماً تخظيظياً مقارناً للمجهر الضوئي (أ) والإلكتروني (ب)

(أ) المجهر الضوئي: ١- منبع ضوئي، ٢- عدسة مكثفة، ٣- عدسة شبيقة، ٤- عدسة عينية، ٥- الصورة المتكونة. (ب) المجهر الإلكتروني: ١- المهبط، ٢- قطب مكثف، ٣- مصعد، ٤- فتحة المكثف الأول، ٥- المكثف الأول، ٦- فتحة المكثف الثاني، ٧- المكثف الثاني، ٨- مصحح المكثف الثاني، ٩- مصحح الضبط، ١٠- شريحة العينة المدروسة، ١١- حامل العينة، ١٢- العدسة الشبيقة، ١٣- الثقب الشبيقي، ١٤- مصحح العدسة الشبيقة، ١٥- الفتحة الانتقالية، ١٦- مصحح العدسة الوسطى، ١٧- العدسة الوسطى، ١٨- فتحة لتحديد مجال البصر، ١٩- عدسة الإسقاط، ٢٠- شاشة المجهر.



الشكل (٧-٨) البنية المجهرية كما تظهر في المجهر الإلكتروني

٧-١-٤ تحليل البنية باستخدام الأشعة السينية:

يتم دراسة البنية البلورية لمواد المساحيق باستخدام الأشعة السينية أيضاً، ويتم تحليل البنية باستخدام الأشعة السينية على ظاهرة حيود الأشعة السينية التي تنصف بقصر موجاتها عند سقوطها على الصفوف الذرية المتتالية في الجسم البلوري. تنتشلت الذرات بالأشعة الساقطة عليها ثم تتداخل الموجات المشتتة الصادرة عن الذرات المختلفة، وتجري الظواهر المعقدة لتداخل الأشعة السينية المشتتة على ذرات الجسم البلوري، بحيث يظهر الأمر كما لو كانت هذه الأشعة قد انعكست عن المستويات الذرية المتوازية للبلورة (انظر الشكل ٧-٩). غير أن هذا الانعكاس عن مجموعة المستويات المتوازية لا يحدث إلا عند زوايا السقوط 2θ (الشكل ٧-١٠)، وذلك حسب معادلة براغ:

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

(6-7)

حيث إن:

d - المسافة بين المستويات الذرية المتوازية والمتجاورة،

θ - زاوية سقوط الأشعة على المستوي الذري،

λ - طول موجة الأشعة السينية،

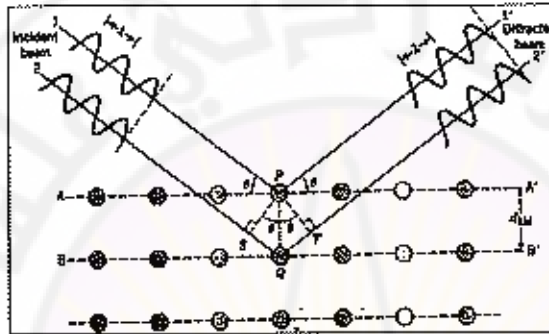
n - رتبة الانعكاس وهو عبارة عن عدد صحيح $n = 1, 2, 3, \dots$

ويمكن تحديد المسافة d بين أي مستويين ذريين في أي بناء شبكي للبلورات، وذلك بمعرفة طول ضلع الهيكل الشبكي a و معرفة إشارات ميلار (hkl) للمستوي الذري:

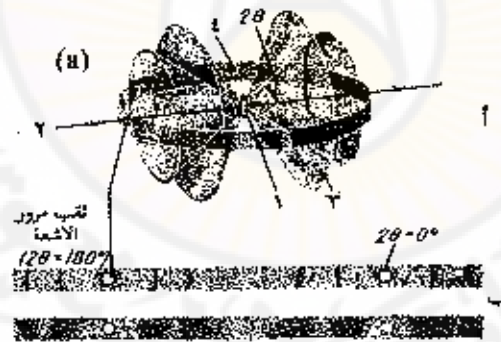
$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (7-7)$$

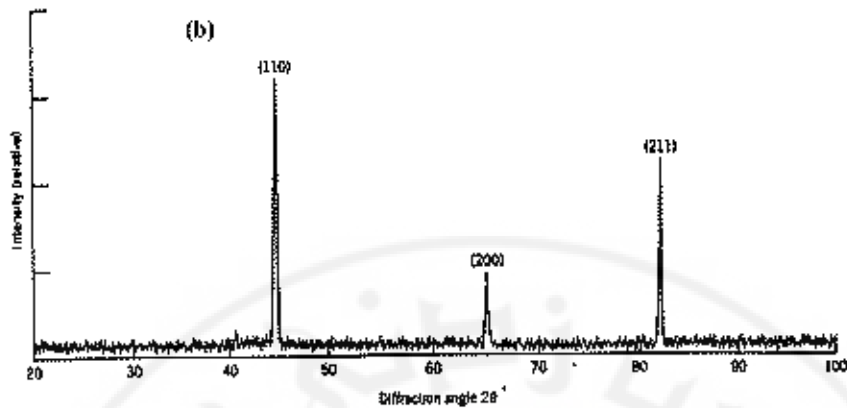
ومنه تصبح علاقة براغ على النحو التالي:

$$\frac{2a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda \quad (8-7)$$



الشكل (٧ - ٩) انعكاس الأشعة السينية على المستويات الذرية لسطح العينة





يوضح الشكل (٧-١٠) رسماً تخطيطياً يوضح كيفية الحصول على صور البنية (a) وإشارات للمستويات الذرية (b)

٧-٢ الاختبارات الميكانيكية للأجزاء الملبدة

Mechanical Testing of Sintered Parts:

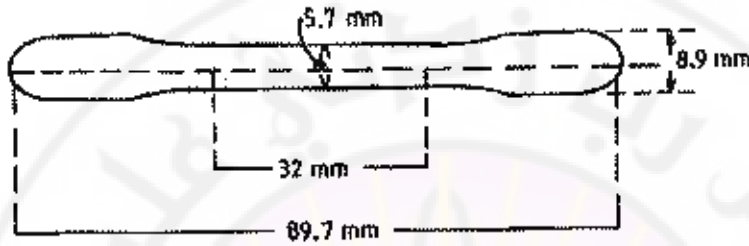
تعتبر خواص الأجزاء الملبدة ذات أهمية كبيرة بالنسبة للمنتج والمستخدم لها، وتجرى الاختبارات لمعرفة مدى مطابقتها للخواص المطلوبة والتأكد من تمشيها مع المواصفات المتفق عليها. ومن الملاحظ أن هناك اختلافات متباعدة عن سمتين من سمات أجزاء ميتالورجيا المساحيق:

١. أن هذه الأجزاء تحتوي على مسامية معينة، لا يمكن التخلص منها.
٢. أن هذه الأجزاء صغيرة الحجم.

ففي حال الأجزاء المشكلة بالطرق التقليدية، فإن من الممكن بصورة متكررة قطع المعدن الفعلية المصنوع منها ذلك الجزء. أما في حالة وجود تشكيل بالتطريق كبير فإن كمية إضافية كافية من المعدن يمكن إدخالها، لإتاحة القيام بقطع عينات الاختبار من التشكيل المطروق نفسه. ولا يتعلق أي من هذه الأساليب بالأجزاء الملبدة، ولذلك فإن أقرب شيء يمكننا الوصول إليه بالنسبة إلى العينة التمثيلية هو أن نقوم بكبس عينات الاختبار من خليط المسحوق نفسه إلى الكثافة نفسها مثل المركب، وأن نقوم بتليدها في الوقت نفسه مع الأجزاء الفعلية نفسها.

٧-٢-١: Tensile test اختبار الشد

يبين الشكل (٧-١٢) الشكل الهندسي لعينة الاختبار كما تحددها هيئة المواصفات الدولية رقم ISO 2740، حيث يترلوح سماكة العينة بين $t = (5.4 - 6) \text{ mm}$ أما الطول القياسي فهو $L_0 = 25 - 32 \text{ mm}$ معلماً بصورة متماثلة، وتتخذ بقية الأبعاد كما هو مبين في الشكل (٧-١٣).



الشكل (٧-١٢) عينة اختبار الشد

ويحدد إجهاد الشد الأعظم UTS أو ما يسمى بحد المئانة على الشد σ_t لمواد المساحيق وفق الطريقة العيارية على عينات نظامية. وقبل إجراء الاختبار يجري فحص عينة الاختبار بالعين المجردة جيداً لتحديد مدى صلاحيتها، وعند اكتشاف وجود اعوجاج أو شقوق أو نقثر أو غيرها من العيوب فلا يجري الاختبار عليها. يحسب إجهاد الشد عادةً بالعلاقة التالية:

$$\sigma_t = F / A \quad (9-7)$$

حيث أن: F - الحمولة المطبقة، [N].

A - مساحة سطح العينة العامل، m^2 .

تحدد القوة العظمى التي تنهار عندها العينة بدقة تصل إلى 1%. ونظراً لوجود المسامية التي لا يمكن التخلص منها في الأجزاء المصنوعة بأسلوب ميتالورجيا المساحيق، وعدم إعطاء نتائج حقيقية لمقاومة الشد فقد اقترح العالم الروسي بالشين علاقة أخرى لمراعاة تأثير المسامية I على متانة الشد لمواد المساحيق:

$$\sigma_{ip} = \sigma_{tc} \cdot (1 - I)^n \quad (10-7)$$

حيث إن:

σ_{te} و σ_{tp} - مقاومة الشد للأجزاء المصنعة من مادة المساحيق ومن المواد المترصة بدون مسامية على الترتيب.

n - ثابت يتعلق بطبيعة مادة المساحيق وعادة يتراوح بين (3 - 10).

٧-٢-٢ اختبار المطيلية Ductility:

تحدد المطيلية على نفس عينات اختبار الشد، وهناك نوعان من المطيلية:

٧-٢-٢-١ المطيلية بالنسبة للتقلص الطولي %EL:

ولتحديد المطيلية بالنسبة للطول يتم تعليم سطح العينة الملبدة بشكل لا يؤثر في الخواص الميكانيكية للعينة المختبرة، والمسافة المعلمة و المحسوبة هي 25 ± 0.1 mm. و L_0 هي الطول الأولي القياسي، أما L_f فهو الطول النهائي، ومنه تحسب المطيلية بالنسبة للطول وفق العلاقة التالية:

$$\% EL = 100 \cdot (L_f - L_0) / L_0 \quad (11-7)$$

٧-٢-٢-٢ المطيلية بالنسبة للتقلص العرضي %RA:

ويجري تحديد المطيلية بالنسبة للتقلص العرضي على نفس عينات اختبار الشد أيضاً، وتقاس سماكة العينة وعرضها في ثلاثة أماكن على الأقل ثم تحسب السماكة الوسطية والعرض الوسطي بدقة تصل إلى 0.05 mm، ثم تحسب مساحة المقطع A_0 البدائية ومساحة المقطع النهائية A_f . أما المطيلية بالنسبة للتقلص العرضي فتحسب بالعلاقة التالية:

$$\% RA = 100 \cdot (A_0 - A_f) / A_0 \quad (12-7)$$

٧-٢-٣ اختبار الانحناء Bending test:

يسمى أيضاً بحد المثانة على الانحناء أو ما يدعى بمقاومة التمزق العرضي transverse rupture strength ، وقد حددت عينة الاختبار حسب المواصفة القياسية بحيث تكون مستطيلة الشكل وأبعادها $6 \times 12 \times 30$ mm لتكسر في الانحناء في ثلاث نقاط three point bending. حيث يتم زيادة الحمل بصورة تدريجية إلى أن يحدث الكسر. و يحسب إجهاد الانحناء بالمعادلة التالية:

$$\sigma_b = (3FL) / 2ba^2$$

(13-7)

حيث إن:

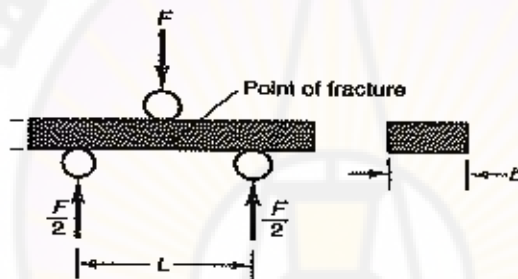
F - ترمز إلى الحمل الكسر، N .

L - المسافة بين الدعائم وتساوي (25 mm).

b - عرض العينة وتساوي (12 mm).

a - سماكة العينة وتساوي (6 mm).

يجري هذا الاختبار على آلة الاختبارات العامة بعد تجهيزها بدعائم خاصة بالاختبار، ويجب أن تكون سرعة الاختبار بطيئة في حدود (0.5 - 1.0) mm/min . ويمكن أن يحدد هذا الاختبار للمواد الملبدة وللمدمجات الخضراء، كمقياس لقوة التحمل الخضراء green strength.



الشكل (١٣-٧) طريقة اختبار الانحناء

٧-٢-٤ اختبار الصدم Impact testing:

بما أن المسام تسلك بصورة حقيقية كالقمامات moches، فلا داعي للتم في عينة الاختبار لأنها تؤدي وظيفة نويات للشقوق، ولذلك فإن العمل على المعدن يتعين أساساً بمقدار العمل اللازم لانتشار الشقوق. وتكون عادة قيم اختبار الصدم متدنية جداً بسبب وجود المميزات التي تؤدي إلى تشتت القيم. ومع هذا فإنه يستخدم من أجل أغراض البحث العلمي والتطوير، وتكون عينة الاختبار ذات مقطع مربع أو مستطيل وهي غير مثلمة كما في الشكل (١٤-٧) وأبعادها 10×10×55 mm أو 10×5×5 mm، وتكسر العينة بالآلة شاربي Charpy machine كما هو مبين في الشكل (١٥-٧). ويتم

تعيين المتانة الصدمية a_n باعتبارها مقدار العمل المبذول لكسر العينة منسوباً إلى مساحة المقطع العرضي للعينة قبل الاختبار:

$$a_n = W_n / A_0 \quad [\text{Kp.m/cm}^2] \quad (14-7)$$

ويمكن حساب العمل المبذول لكسر العينة من المعادلة التالية:

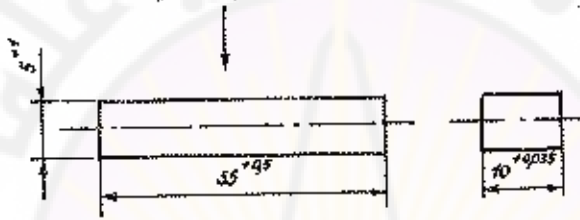
$$W_n = G.l (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (15-7)$$

حيث: 1- طول ذراع البندول، m؛

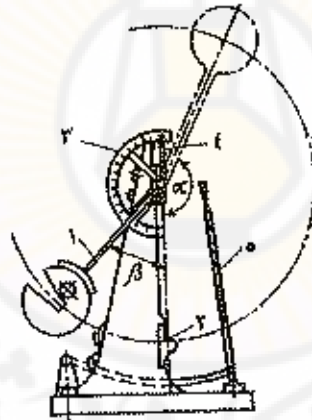
G- كتلة البندول، Kg؛

α - الزاوية التي يصنعها البندول مع المستقيم الرأسي قبل الصدم؛

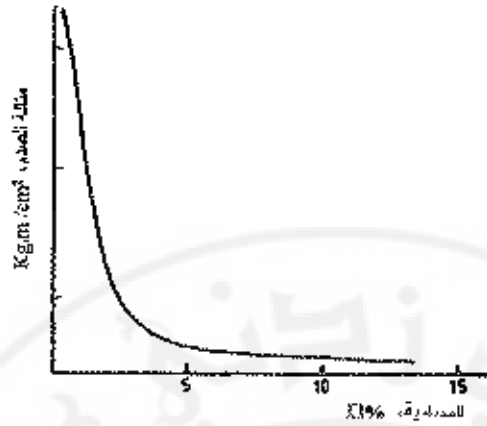
β - الزاوية التي يصنعها البندول مع المستقيم الرأسي بعد كسر العينة.



الشكل (١٤-٧) عينة اختبار الصدم



الشكل (١٥-٧) آلة تشابهي لاختبار الصدم



الشكل (٧-١٦) علاقة مقاومة الصدم بالمسامية

٧-٢-٥ اختبار المتانة الإنشائية Strength construcure testing

يستخدم - مصطلح المتانة التصميمية - لتقويم قدرة الأجزاء المصنعة من مواد المساحيق على الاستمرار في ظروف العمل المصممة لأجلها، ويعتبر معامل تركيز الإجهادات K_{Ic} أحد مؤشرات المتانة التصميمية المهمة، الذي يصف قدرة مقاومة المادة على التحطم أو الانهيار عند وجود حز Noeh أو عيوب ناتجة عن وجود تشققات (تركيز في الإجهادات)، مثال يمكن بواسطة K_{Ic} حساب الإجهاد المسموح به أو طول الشق، التي عندها ينهار النموذج المصنوع قبيل حدوثه.

يتعلق معامل تركيز الإجهادات K_{Ic} بالمادة المصنوع منها المنتج، وبطريقة تحضيرها وبخواصها وبالتركيب الكيميائي لها، ومع زيادة المسامية فإن معامل تركيز الإجهادات يتناقص، ويتناقص أيضاً عند انتشار التشققات عن طريق اتحاد المسامات الميكروية مع بعضها مع بعض عند انهيار الروابط بين الجزيئات. إن زيادة K_{Ic} مشروط بزيادة قوى التحطم في المواد اللدنة وليس بالعمل الناتج عن التشوه اللدن في رأس الشق. كما يمكن زيادة مقاومة الانهيار للمواد الهشة بإجراء المعالجة الحرارية الميكانيكية لها.

يوجد عدة طرق لقياس معامل شدة (توزع) الإجهادات K_{Ic} :

١. متانة التحطم لمواد المساحيق عالية المتانة K_{Ic} : يمكن إجراء الاختبار على عينات اسطوانية الشكل قطرها D ذات حز (ثلم) دائري في وسط العينة (بحيث لا يؤدي قطر الحز d إلى إنقاص الحمولة العظمى). ونختار النسبة في عينة الاختبار $d/D = 0.707$ ، ومنه تكون متانة التحطم (الانهيار) أو معامل تركيز الإجهادات كما يلي:

$$K_{Ic} = 0.414 \sigma_N \cdot \sqrt{D} \quad [\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}] \quad (16-7)$$

حيث إن:

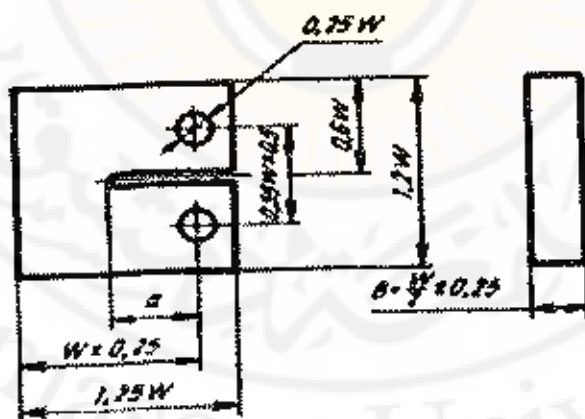
$$\sigma_N = F_{\max} / A_d \quad [\text{MPa}] \quad (17-7)$$

A_d - مساحة مقطع العينة التي بها حز (الثلم)، m^2 .

$F_{\max}$ - القوة العظمى للتحطم، N ؛ بحيث يتحقق: $\sigma_N \leq 1.1 \sigma_y$ ، (حيث

إن: σ_y هو حد الخضوع للمادة).

٢. ويستخدم معامل تركيز الإجهادات للمواد متوسطة المتانة K_{Ic} : حسب الاختبار الجاري على العينات المبينة في الشكل (١٧-٧) بعد إحداث شق (ثلم) شعبي في العينة وإجراء اختبار مقاومة الانحناء الستاتيكي بعيداً عن تركز الإجهادات، يتراوح طول الشق عادةً $a = 1.3 \text{ mm}$ ، ونصف قطر نصف سطحه الداخلي $R = 1 \text{ mm}$ وهو على شكل حرف U . أما عرض العينة فيجب أن يحقق $B \geq 2.5 K_{Ic} / \sigma_y$.



الشكل (١٧-٧) شكل عينة اختبار المتانة الإنشائية

٣. يحدد K_{Ic} أيضاً حسب نتائج اختبار التعب:

$$K_{Ic} = \sigma_f \sqrt{\pi L a} \quad [MPa \cdot m^{0.5}] \quad (18-7)$$

حيث: σ_f - حد الصمود على التعب، MPa؛

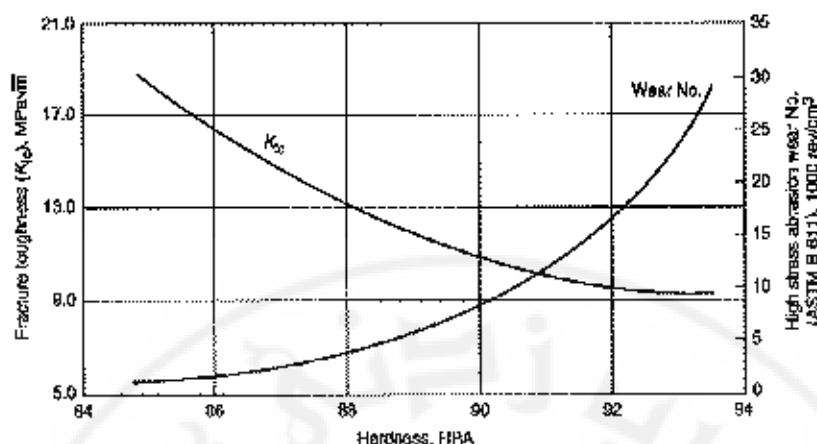
L - الطول الحرج للحز (الشق)، m؛

N_f - عدد دورات الاختبار.

ومن الملاحظ أنه عند حساب K_{Ic} لأجزاء المساحيق التي تكون مثانتها أكبر أو مساوية 700 MPa ومساميتها قليلة % (5 - 8) يجب أن تكون العينات ذات حز تعبي (شق)، أما عند العينات التي تكون مساميتها % 8 > II فلا داعي لإحداث حز تعبي (شق) فيها لأن المسامات تؤدي هنا وظيفة نويات للشقوق. وبالرغم من ذلك فإن لهذا الاختبار فائدة خاصة في إبراز حساسية مواد المساحيق للانتهيار الهش أو الانتهيار الهش عند وجود حز أو شق، إذ أن وجود حز أو شق في عينة الاختبار أو الجزء المستخدم يغير موقف الإجهاد ويحوّله من إجهاد بسيط محوري Uniaxial Stress إلى إجهاد مركب في الاتجاهات الثلاثة Triaxial Stress، ومن ثم يتحول نهج الانفعال اللدن من الانزلاق بواسطة إجهاد القص إلى الكسر أو الانتهيار الهش بالانفصال. ويتصف الانتهيار الهش بانخفاض الطاقة اللازمة لإتمامه، ويبدو مظهر الكسر الهش بمقطع بلوري يتفرع إلى فروع تشبه أغصان النخيل Chevron كما هو مبين في الشكل (٧-١٨)، حيث يسلك الشرخ (الشق) طريقه داخل الجزء ويتفرع من الجانبين نحو السطح. يتعلق معامل تركيز الإجهادات بالقساوة، بحيث يتناقص K_{Ic} كلما ازدادت القساوة بينما تزداد مقاومة الاهتراء، انظر للشكل (٧-١٩).



الشكل (٧-١٨) الانتهيار الهش الشبيه بأغصان النخيل



الشكل (٧-١٩) علاقة K_{1c} ومقاومة الاهتراء بالقساوة

٧-٢-٦ اختبار القساوة Hardness test:

يعتبر هذا الاختبار من الاختبارات الشائعة، لأن القساوة مؤشر مفيد لبعض الخواص الميكانيكية، ويمكن إجراؤه على الأجزاء الفعلية، لأنه اختبار سهل وغير مكلف، وعلى أية حال فيما يتعلق بالمواد المسامية. فإننا نكون في حاجة للتمييز بين ما يدعى القساوة الحقيقية true hardness أي قساوة المادة نفسها في حالة الكثافة الكاملة، و القساوة الظاهرية apparent hardness أي القساوة المختارة التي تجري على البلورات، وهي ما تسمى بالقساوة المجهرية microhardness، فإذا كان حجم المعدن المزاح بواسطة طبعة الاختراق يحتوي على مسام، فإن رأس الاختراق سيخترق إلى مدى أعظم مما يذهب إليه في المعدن المصمت، وذلك لأن الثقوب لا تبدي مقاومة للتشويه. ولذلك من الواضح أن قيم القساوة المشار إليها آنفاً تكون أدنى من القساوة الحقيقية. وتتمتع القساوة الظاهرية بعلاقة بمقاومة الشد النهائية مشابهة لتلك العلاقة مع المعدن المصمت، أما القساوة الحقيقية فهي على علاقة أوثق بمقاومة التآكل.

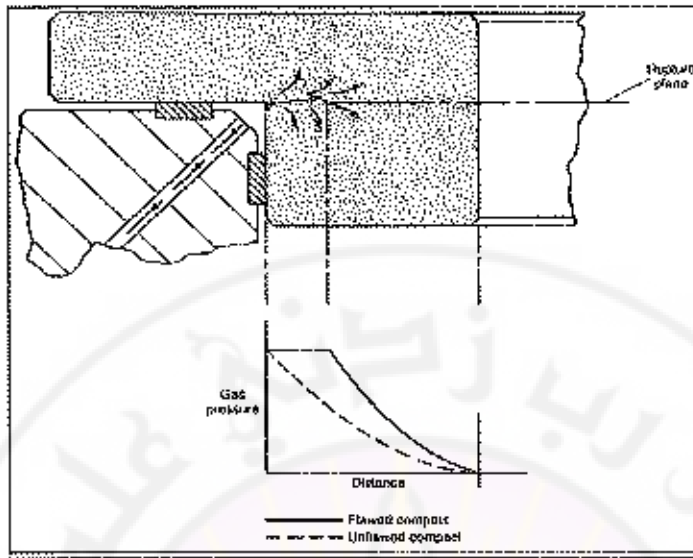
ويمكن تحديد القساوة الحقيقية بطريقة برينل Brinell لقياس القساوة HB أو طريقة فيكرز Vickers لقياس القساوة HV أو طريقة روكويل لقياس القساوة برأس اختراق إما كرة مصنوعة من الفولاذ السبائكي المقسى HRC تحت حمل إجمالي 100 Kgf، وإما رأس اختراق عبارة عن مخروط ماسي HRC تحت حمل إجمالي 150 Kgf.

فإذا لم يكن لاختبار القساوة انطباعات impressions واضحة المعالم، فإن تلك الانطباعات يتم إهمالها وتجاهلها. وعلى هذا يتم القيام بقياس خمسة انطباعات صحيحة واضحة و لا يجب إهمال أي واحدة منها سواء كانت قيمة القساوة كبيرة أم صغيرة ثم تأخذ المتوسط.

أما القساوة الظاهرية فيجب أن تحدد باختبار القساوة المجهرية، حيث تنتزع أهمية وضرورة تعيين القساوة المجهرية، وذلك بأن نختار تحت المجهر منطقة يكون فيها الانطباع بعيداً عن أي مسام بمقدار قطر طبعة الاختراق على الأقل لكي تعطي نتائج صحيحة. ويتكون جهاز تعيين القساوة المجهرية من جهاز لضغط الهرم الماسي حسب طريقة فيكرز أو الموشور الماسي حسب طريقة نوب Knoop، تحت تأثير أحمال صغيرة بالإضافة إلى مجهر ضوئي لدراسة المعدن. ويضغط الهرم الماسي في السطح الجاري اختباراً تحت تأثير حمل يتراوح قدره بين $g(500 - 15)$. ونتيجة لذلك فإنه يعطي انطباعاً صغيراً جداً تحدد أبعاد المتوسط للأثر بالميكرون بواسطة المجهر. ويتم تعيين القساوة المجهرية II باستخدام معادلة شبيهة لتلك المعادلة المستخدمة لتعيين القساوة بطريقة فيكرز. ويتطلب إعداد السطح للعينات بطريقة مماثلة لإعداد الشرائح المجهرية، ويجب اتخاذ الحيطة أثناء تحضير عينة الاختبار من أجل تجنب التصليد السطحي بالعمل work hardening المفرط على السطح. ويتطلب إجراء عدد كبير من الاختبارات، لأنه لا توجد لدينا أية وسيلة لمعرفة ما هو موجود تحت السطح عند طبعة الاختراق، ومن الواضح يتم التخلص من القراءات المتدنية.

٧-٢-٧ اختبار التمزق:

ابتكرت هذه الطريقة من الاختبارات للكشف عن العيوب الموجودة في المدمج الأخضر وخاصة الشقوق. بحيث يتم تطبيق ضغط محكم يصل إلى 3.5 MPa من الغاز الخامل عند الزوايا أو في المناطق المعرضة لتركز الإجهادات التي من المحتمل وجود شقوق فيها، كما هو موضح بالشكل (٧-٢٠) .



الشكل (٧-٢٠) اختبار الكشف عن التشققات بواسطة ضغط الغاز الخامل
 فإذا كان هناك شق في منطقة الضغط المطبق، فإن ضغط الغاز في الشق سيكون كافياً
 ليسبب انتشار هذا الشق عبر القطعة. ويُعتبر هذا الاختبار اختباراً إتلافياً أكثر منه غير
 إتلافي بسبب تحطم العينة في حال وجود شقوق في العينة وانتشار هذه الشقوق إلى
 داخل العينة تحت تأثير الضغط المطبق.

٧-٣- الاختبارات الفيزيائية للأجزاء الملبدة :Physical Testing

٧-٣-١ اختبار الكثافة والمسامية :Density and Porosity

هذه الخاصية خاصة بأجزاء ميتالورجيا المساحيق، وهي بطبيعة الحال ذات علاقة
 عكسية بالمسامية. يمكن تحديد هذه الخواص عند درجة حرارة الغرفة إذا لم يتفق
 مسبقاً على شروط تجريبية مختلفة. وقبيل إجراء التجربة من الضروري تنظيف أسطح
 الأجزاء المدروسة من الأوساخ العالقة عليها، و لا يسمح بدراسة الأجزاء الحاوية على
 تشققات أو تصدعات أو اعوجاج أو غيرها من العيوب. تجري عادة التجربة على
 ثلاث عينات على الأقل.

١- الطريقة الحسابية: يقاس حجم وكثافة العينة المدروسة، وذلك لتحديد الكثافة. بحيث نقيس أبعاد العينة بواسطة ميكرومتر بدقة تصل إلى $0,001 \text{ mm} \pm$ و يقاس وزن العينة بواسطة الميزان التحليلي ودقة حتى $0,01 \text{ g} \pm$ ، و منه يمكن تحديد الكثافة حسب العلاقة التالية:

$$\gamma = m / V \quad (19-7)$$

وتحسب المسامية الكلية بالعلاقة:

$$\Pi = 100 - (d/dc) = 100 - \theta_1 \quad (20-7)$$

حيث: θ - هي الكثافة النسبية، %، و Π - المسامية %.

m - وزن العينة، g.

V - حجم العينة، cm^3 .

d - كثافة العينة، g/cm^3 .

٢- الطريقة الهيدروستاتيكية: والأسلوب القياسي لتقرير الكثافة هو قاعدة أرخميدس Archimedes principle، أي مقارنة وزن الشيء في الهواء بوزنه عندما يغطس بالماء. يتم قياس الكثافة والمسامية المفتوحة (عندما تكون المسامية $\Pi > 10\%$) بوزن العينة في الهواء وفي الماء المقطر، ولكن بما أن الكثافة الكلية للجزء تشمل المسام التي يراد قياسها، لذلك يجب اتخاذ خطوات لمنع المياه من الدخول إلى المسام. ولهذا نقوم بغمس الجزء بالبراقين أو أي سائل لا يآلف الماء مع إزالة السطح باستخدام مادة غير ماصة. ويتم توفير إشارة سفيدة إلى كفاءة تشبع السطح بملاحظة فيما إذا كان هناك أية زيادة في الوزن الذي يحدث أثناء الوزن في الماء المقطر، وفيما إذا حدث، فإنه مبدئياً إلى أن الماء قد دخل إلى المسام. لا يسمح بتشكيل فقاعات الهواء على السطح عند وزن الجزء في الماء، وعند ملاحظة ذلك تخرج الأجزاء من الماء وتجفف ويعاد معالجتها بالبراقين ثم توزن في الهواء وفي الماء. فإذا كان وزن العينة في الهواء m_1 ، ووزنها في الماء m_2 ، أما وزن السائل المزاح فيكون $m_{\text{H}_2\text{O}}$. وبمعرفة هذه القيم يمكننا حساب حجم العينة بالعلاقة التالية:

$$V_i = (m_1 - m_2) / m_{\text{H}_2\text{O}} \quad (21-7)$$

ومنه تكون الكثافة:

$$\gamma_1 = m_1 / V_1 = m_1 m_{liq} / (m_1 - m_2) \quad (22-7)$$

و بما أن العينة هي مادة مسامية، لذلك نقوم بقياس وزنها في الهواء ثم نقيس وزنها في الهواء ثانية، ولكن بعد غمسها بالبرافين. وعندها تحسب الكثافة بالعلاقة التالية:

$$\gamma_2 = m_1 m_{liq} / m_2 - m_3 \quad (23-7)$$

حيث إن:

m_1 - وزن العينة في الهواء قبل غمسها بالبرافين، g.

m_2 - وزن العينة في الهواء بعد غمسها بالبرافين، g.

m_3 - وزن العينة في الماء المقطر بعد غمسها بالبرافين، g.

لقد تم الإشارة إلى المسامية المفتوحة للجزء II_2 ، حيث يفهم أن المسامات تبقى على السطح، والمسامية المغلقة II_3 التي هي عبارة عن الفرق بين المسامية الكلية II_1 والمسامية المفتوحة.

أي إن المسامية الكلية:

$$II = [1 - (\gamma_1 / \gamma_c)] \cdot 100 \quad (24-7)$$

$$II = [1 - m_1 m_{liq} / (m_2 - m_3) \cdot \gamma_c] \cdot 100 \quad (25-7)$$

ومنه تحسب المسامية المفتوحة بالعلاقة التالية:

$$\Pi_{open} = [(m_2 - m_1) m_{liq} / [(m_2 - m_3) \cdot \gamma_{p,liq}]] \cdot 100 \quad (26-7)$$

أما المسامية المغلقة فتحسب بالعلاقة:

$$\Pi_{clos} = II - \Pi_{open} \quad (27-7)$$

حيث إن: $\gamma_{p,liq}$ - كثافة المادة المسحوقية المغموسة في سائل مقياس الكثافة النوعي.

٣- الطريقة البيكنومترية Picknometer:

يمكن اعتماد هذه الطريقة في حساب الكثافة الحقيقية للمدمج، والمعتمدة في هيئة المواصفات العالمية ISO 2738. حيث يطلى سطح المدمج بطبقة رقيقة من البرافين مع كشط السطح من البرافين باستخدام مادة غير ماصة، وتوزن العينة في الهواء وفي الماء. تحسب الكثافة الحقيقية للمدمج بالعلاقة التالية:

$$V = W_{air} - W_{water}$$

$$Density = \gamma = W_{air} / (W_{air} - W_{water}) \quad (28-7)$$

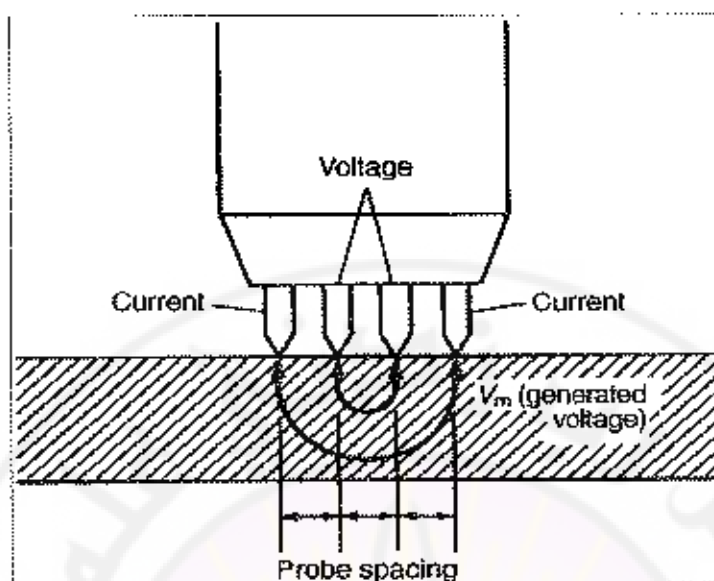
حيث إن:

V - حجم العينة cm^3 ، W_{air} - وزن المدمج في الهواء g، W_{water} - وزن المدمج مع البرافين في الماء، g.

٧-٣-٢ اختبار الخواص الكهربائية والحرارية والمغناطيسية:

إن دراسة الناقلية الكهربائية و الناقلية الحرارية لمدمجات المساحيق موجودة عند دراسة الخواص الكيميائية للمساحيق، وهي تتعلق بمساميتها و بنيتها؛ حيث تزداد هاتان الخاصيتان طردياً مع زيادة الكثافة مقتربةً من الناقلية الكهربائية والحرارية للمعدن المصنعت أو الخليطة المصنعة ذات التركيب الكيميائي نفسه. يبين الشكل (٧-٢١) علاقة معامل الناقلية الحرارية λ و معامل الناقلية الكهربائي للملبدات المصنوعة من الحديد والغرافيت بدرجة الحرارة و المسامية. حيث تتناقص الناقلة الكهربائية و الحرارية مع ارتفاع درجة الحرارة، ويصل التناقص إلى نحو ثلاثة أضعاف عند $500^\circ C$ بالنسبة للناقلة الكهربائية، وإلى نحو $(20 - 40)\%$ بالنسبة للناقلة الحرارية. ويستخدم لقياس المقاومة الكهربائية النوعية جهاز هبوط الجهد الكهربائي، وذلك لاكتشاف العيوب في العينات الفولانية الملبدة.

أما بالنسبة للخواص المغناطيسية لمواد المساحيق فيلاحظ أنها تتأثر تأثيراً كبيراً بشكل المسام وبنسبة الشوائب ودرجة نعومة البنية الميكروية (الحبيبات) وبالتصلد السطحي. تؤدي المسامات إلى تدهور الخواص المغناطيسية، إذ تخفض النفاذية المغناطيسية كما تنقص قوى التحريض المغناطيسية، ولا تتعلق النفاذية المغناطيسية فقط بمسامية الملبدات، بل بظروف التليد و بالخواص الأساسية للمساحيق، بحيث تتغير النفاذية المغناطيسية عند نفس قيمة المسامية بنحو مرتين. كما تتأثر النفاذية المغناطيسية تأثيراً كبيراً بأجواء التليد، فحسب وسط التليد فقد يتشكل مثلاً تتريدات مما يؤدي لتدهور الخواص المغناطيسية للمنتج.



الشكل (٧-٢١) مقياس المقاومة النوعية الكهربائية



الفصل الثامن

منتجات ميتالورجيا المساحيق

Powder Metallurgy Products

- ١. المواد الإنشائية ومنتجاتها
- ٢. مواد العدد القاطعة
- ٣. المواد التريبولوجية
- ٤. المواد الكهربية
- ٥. المواد الحرارية
- ٦. المواد والسبائك ذات الاستعمالات الخاصة



منتجات ميتالورجيا المساحيق

Powder Metallurgy Products

٨-١ مقدمة:

هناك مجال لميتالورجيا المساحيق أخذ في التوسع والنمو في الآونة الأخيرة، ألا وهو إنتاج المنتجات المشكلة بالتطريق (المطروقة)، منها إنتاج أسلاك التغمستن و المولبدنيوم الذي يصنع الآن على نطاق أوسع بكثير جداً من التغمستن نفسه، وتوجد في هذه المجموعة نفسها بعض المعادن الأخرى التي دخلت في الاستخدام في الآونة الأخيرة مثل البيريليوم beryllium والكروم والروثينيوم ruthenium، التي تشترك جميعها في سمة مميزة واحدة وهي تباين وعدم تجانس خواص التدونة في الاتجاهات المختلفة بصورة بارزة plastic anisotropy. وهذا يعني أنه إلى أن تكون البلورات قد تصافت جميعها بصورة مناسبة فإن التشغيل الميكانيكي غير ممكن. ولذلك لا تجد هذه المعادن سوى استخدامات محدودة ومتخصصة فقط.

والمواد الأكثر ارتباطاً بهدفنا الحالي هي المعادن التي كانت تصنع بصورة تقليدية في صورة مشكلة من المسبوكات، ولا يمكن إنتاجها بصورة أكثر اقتصادية من المسحوق أو تلك التي تتمتع بخواص تأخذ في التحسن إذا أنتجت بهذا الأسلوب. فإنتاج سبائك مقواة بالتشتت dispersion بخواص — خاصة عند درجات الحرارة المرتفعة — متفوقة كثيراً على خواص السبائك المصنعة بالطرائق التقليدية. وهذه المواد في الوقت الحاضر تحت البحث و المناقشة للتطبيقات الفضائية حيث فوائد الخواص المحسنة بالغة الأهمية بحيث إنَّ التكاليف لا تشكل الاعتبار الرئيسي. إن المنتجات المصنوعة بطريقة التذيرير كثيرة ومتنوعة، ولا يتسع المجال لحصرها، غير أنه يمكن تصنيف أهمها وأكثرها استعمالاً في مجموعات، بحسب مواصفاتها الأساسية ومجالات استعمالها.

تصنف منتجات مواد المساحيق والمواد المركبة ذات الأساس المعدني، إلى: المواد التريولوجية سواء المقاومة للاحتكاك أم المواد الاحتكاكية، والمواد الإنشائية، والمواد

المركبة، والمواد المسامية، ومواد العدد القاطعة، والمواد المغناطيسية، والمواد الكهربائية، والمواد الحرارية...إلخ. إذ تستخدم هذه المواد في بعض أجزاء السيارات والطائرات وأجزاء الماكينات وأجزاء الأجهزة المختلفة والأجزاء الإلكترونية وأجزاء آلات النسيج وأدوات الجراحة والأجزاء المستخدمة في التعويضات السنية والأجزاء المستخدمة في أعضاء جسم الإنسان وغيرها من الاستخدامات. ومن الملاحظ أن بعض هذه المواد ذات التركيب الكيميائي الواحد أو القريب بعضها من بعض تكون قادرة على الاستخدام في مجالات عدة، والعكس صحيح يمكن لاستخدام واحد أن يكون عدة تركيبات كيميائية مختلفة للمواد. مثال يمكن الحصول على المواد المقاومة للاحتكاك من المساحيق ذات القاعدة الحديد أو النحاس، وتحتوي هذه المنتجات على عشرات الأنواع المختلفة التراكيب الكيميائية والخواص ومجال الاستخدام. كذلك يمكن القول بالنسبة للسبائك القاسية مثل كريد التنتسيتين أو المواد التي لا تحتوي على التنتسيتين وغيرها من المنتجات المصنعة من مواد المساحيق و المواد المركبة. ولتسهيل دراسة هذه المواد يمكن تقسيمها إلى أربعة مجموعات أساسية هي: المواد الإنشائية - المواد التريبولوجية - مواد العدد القاطعة - والمواد ذات خواص فيزيائية خاصة.

٨-٢ المواد الإنشائية ومنتجاتها:

تعتبر منتجات مواد المساحيق الإنشائية من أكثر المواد شيوعاً في الصناعة، إذ تستخدم في صناعة أجزاء الآلات والسيارات والأجهزة المختلفة، لأن خواصه تكون قريبة من خواص المواد المصمتة ذات نفس التركيب الكيميائي، أما المؤشر الاقتصادي فهو لصالح المنتجات المصنعة بأسلوب ميتالورجيا المساحيق نتيجة لتقليل التشغيل الميكانيكي لحد كبير وجهد العمل وطلاقة (حرية) تصنيع المقاطع المختلفة السطوح. ويمكن الحصول على المنتجات القليلة التعرض للتحميل أو الإجهاد من الحديد النقي أو من الحديد المضاف إليه قليل من الغرافيت، بينما عناصر الآلات المعرضة للإجهادات المتوسطة أو العالية فتصنع من الفولاذ الكربوني أو الفولاذ السبائكي. كما يمكن تصنيع المنتجات الإنشائية من مساحيق المعادن الملونة وخلاتها.

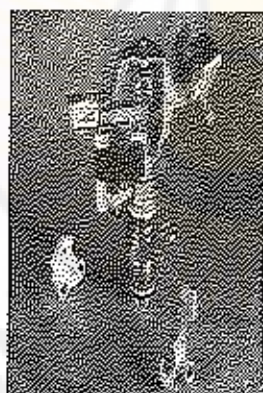
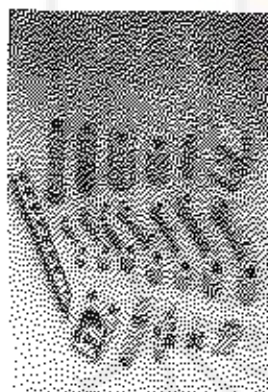
إن الفوائد والمزايا التي يُدعى الحصول عليها للمادة المصنوعة بأسلوب ميتالورجيا المساحيق تشمل الآتي:

- ١- عدم وجود الفصل على المستوى المجهرى macro-segregation.
 - ٢- سهولة التشغيل.
 - ٣- التحكم الأفضل في حجم الحبيبات، وهو يعد من الاعتبارات المهمة جداً.
 - ٤- الحصول على بنية مجهرية micro-structure وخواص ميكانيكية أكثر تجانساً.
 - ٥- إمكانية إنتاج سبائك أحدث وأكثر تعقيداً بسهولة أكبر. وإنتاج ما يسمى أشكالاً قريبة من الشكل النهائي near-net shapes.
- يتم تحضير المواد الإنشائية من خليط مؤلف من المساحيق الأساسية للسبيكة، أو من المساحيق الجاهزة ذات التركيب الكيميائي المطلوب، مصنعة هذه المساحيق بالطرائق المختلفة، إما بطريقة تذرية المصهور المعدني وإما بطريقة الطور المتجمد بواسطة الإلكترود الدوار وإما بطريقة الاختزال الأكاسيد... إلخ. ويستخدم المسحوق المنذر في التطبيقات الصناعية أكثر من المساحيق المصنعة بالطرائق الأخرى الذي يصلح للمواد المنخفضة والمتوسطة السبائكية لإمكانية الحصول على خواص أفضل للأجزاء المراد تصنيعها وخاصة عند تحضيرها واختيار طريقة تشكيلها ومعالجتها بشكل صحيح. ومن أجل تحسين الخواص الفيزيائية والميكانيكية يمكن تعريض الأجزاء الملبدة لعملية التطريق على الساخن، مما يؤدي للحصول على بنية ناعمة الحبيبات، ومن ثمّ تتحسن الخواص الميكانيكية وأبعاد وشكل المنتجات.
- إن الأشكال المعقدة للمنتجات التي لا يمكن الحصول عليها بالتشكيل و التدميج في قوالب الكبس الفولاذية، فإنها تُصنَع وتُلبَد بشكل مُجزأ بدون أي صعوبة (أي على مرحلتين). ثم توضع الأجزاء بعضها فوق بعض وتكبس حتى ضغط معين من أجل التصاقها، ومن ثم تُلبَد ثانية عند نفس نظام التلبيد من حيث درجة الحرارة والزمن و الوسط المحيط. إن عملية التلبيد اللاحقة هي عبارة عن عملية قريبة من عملية اللحام الانتشاري في جو مفرغ من الهواء، ولكن يختلف عن عملية اللحام لعدم الحاجة

لمعدات معقدة خاصة. و يبين الجدول (٨-١) يبين الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمنتجات الإنشائية.

الجدول (٨-١) خواص مواد المساحيق الإنشائية

البنية الميكروية	الخواص الفيزيائية والميكانيكية				التركيب الكيميائي، %
	HB, MPa	EL, %	σ_{10} , MPa	γ , g/cm ³	
فرايت	400	3,0	140	6,3 6,6	Fe-0,2 C
فرايت- يرايت	700	1,5	190	6,3 6,6	Fe-(0,3-0,6)C
فرايت	550	2,5	210	6,3 - 6,6	Fe-0,2C-(2-3)Cu
فرايت	550	9	210	7,0 - 7,4	Fe-0,2 C
فرايت- يرايت	1070	3,5	300	7,0 - 7,4	Fe-(0,3-0,6)C
α | σ	-	7	440	2,8	Al-(0,9-2,5)Cu-(1,4-1,8)Mg-(0,8-1,3)Fe
-	65	10	250	7,8	Cu-(40-43)Zn



الشكل (٨-١) بعض الأجزاء الإنشائية المصنعة من مساحيق الحديد والمعادن الملونة.

٨-٢-١ خصائص المواد الإنشائية:

يتوجب عند اختبار المواد الأولية و تكنولوجيا تحضير المنتجات الإنشائية مراعاة الظروف التالية:

١. يجب أن تكون بنية المادة متجانسة ومستقرة حرارياً، بحيث تؤمن المستوى المطلوب من الخواص الميكانيكية والعمر الزمني للتشغيل.
٢. تستخدم على نطاق واسع الأجزاء القليلة الإجهادات في تصنيع عناصر الآلات والأجهزة، ولا داعي لتصنيع هذه الأجزاء من الفولاذ السبائكي أو الفولاذ الكربوني إذا لم يكن هناك متطلبات لخصائص إضافية مثل الخصائص الكهربائية أو المغناطيسية أو الكيميائية. فلذلك تحضر هذه الأجزاء من مسحوق الحديد مع إضافة الغرافيت وندمج على البارد ثم تلبد للحصول على الخواص النهائية، وتكون المسامية المطلوبة في حدود $(16 - 25)\%$.
٣. أما الأجزاء العادية التحميل (الإجهاد) فتكون المسامية المطلوبة لها بحدود $(10 - 15)\%$ ، ويتم تحضيرها من مسحوق الفولاذ الكربوني أو الفولاذ المنخفض السبائكية، بحيث تشكل بالندمج الأحادي أو الثنائي والتلبيد. وبالنسبة للأجزاء المعقدة الأشكال فإنها بعد عملية التلبيد تتعرض للتشغيل الميكانيكي والمعايرة.
٤. الأجزاء المتوسطة التحميل (الإجهاد) تكون المسامية لها في حدود $(9 - 2)\%$ ، تستخدم هذه الأجزاء في الظروف التشغيل ذات الأحمال الستاتيكية القاسية أو الأحمال الديناميكية، وتصنع من مساحيق الفولاذ الكربوني أو الفولاذ السبائكي أو مساحيق المواد الملونة وخلاتها. بحيث تعرض للندمج الثنائي والتلبيد ثم التطريق على الساخن أو البارد أو تتعرض للندمج على الساخن ثم لمعالجة حرارية أو معالجة كيميا-حرارية.
٥. الأجزاء ذات التحميل القاسي (الإجهاد) التي تستخدم في ظروف التشغيل ذات الأحمال الستاتيكية أو الديناميكية، فمن الضروري أن تصنع هذه الأجزاء من مساحيق متجانسة من الفولاذ السبائكي، ويجب أن لا تزيد مساميتها على 2% ، تصنع الأجزاء الملبدة بالتطريق على الساخن أو البارد متنوعة بمعالجة حرارية أو كيميا-حرارية أو ميكانيكية حرارية، أو أن تصنع أو بالتشكيل بالضغط المتماثل من جميع الاتجاهات

على الساخن. ويبين الجدول (٧-٢) بعض خصائص أجزاء مساحيق المواد الإنشائية المستخدمة في مجالات الصناعة المختلفة.

الجدول (٨ - ٢)

No.	مستوى التحميل (الإجهاد)	% II	النسبة المئوية لخواص أجزاء مواد المصنعة، إلى خواص أجزاء المواد المصنعة، %
			اللدونة
1	قليلة التحميل	16 - 25	30 - 45
2	التحميل العادي	10 - 15	46 - 65
3	التحميل المتوسط	2 - 9	66 - 90
4	التحميل القاسي	2	91 - 100

وتستخدم مساحيق المواد الملونة وخلاتنها في المواد الإنشائية في الصناعات الكهربائية والإلكترونية وفي أجزاء السيارات والآلات. وهي تتصف بالناقلية الحرارية الجيدة والمقاومة العالية للتآكل وبقابلية تشغيل جيدة. كما أنها حسب التركيب الكيميائي لا تختلف عن المواد المصنعة بالطرق التقليدية، بل تختلف فقط من ناحية البنية. من هذه المواد الشائعة الاستخدام المواد ذات الأساس النحاس- النحاس الأصفر أو البرونز، أو الخلائط ذات الأساس الألمنيوم أو المغنيزيوم أو التيتانيوم. وتعتبر العناصر مثل المغنيزيوم أو المنغنيز أو الزنك من عناصر السبيك للألمنيوم وخلاتها، حيث تشكل مع الألمنيوم أشباه معادن التي تؤمن إمكانية إجراء معالجة حرارية مثل التعتيق للخلائط. وتكون عناصر السبيك للخلائط ذات الأساس مغنيزيوم هي الألمنيوم أو المنغنيز، أو الزنك، أو الكاديوم، أو النيوديم، التي تسمح بإجراء معالجة حرارية

للخلاطة الحاصلة. وعناصر السبك للثيتانيوم هي الألمنيوم والمليدينيوم والغاناديوم والكروم والسيلكون.

وتعتبر العناصر التي تشكل محاليل جامدة من نوع تداخلي substitutional من الشوائب في المعادن الملونة وخلاتطها، لأنها تبطن عمليات الانتشار، ويمكن أن تؤدي إلى زيادة حجم المدمجات أثناء التليد.

يتوجب عند تصنيع أجزاء المواد الإنشائية مراعاة عملية تحضير الخليط المعد لذلك، من حيث التوزيع المتجانس للعناصر الداخلة في الخلطة، وتقليل محتوى الشوائب قدر الإمكان، وتحسين خواص الخليط مثل تحسين الانسيابية و التكايسية. لهذا الغرض تعرض المساحيق لعملية تليد من أجل إزالة التصليد أثناء الطحن، وعملية خلط وعملية تحبيب.

٨-٢-٢ مواد عناصر الآلات:

إن الكثير من عناصر الآلات يكون من الصعب تصنيعها بالطرائق العادية، أو أن كثرة العمليات التشغيلية التي يجب أن تخضع لها تجعلها باهظة التكاليف، فيكون تصنيعها بأسلوب المساحيق أيسر وأقل تكلفة، ومن هذه القطع بعض أقراص نقل الحركة ومسنناتها وموانع تسرب الزيوت في محركات الاحتراق الداخلي ومحددات القياس وغيرها. وبالنظر إلى الشكل (٨-١) نجد أن الأجزاء المستخدمة في صناعة السيارات هي من أكبر التطبيقات لمنتجات مواد المساحيق مما يؤكد أن ازدهار صناعة ميتالورجيا المساحيق مرتبط بصورة أساسية بصناعة السيارات. وذلك بسبب أن أجزاء ميتالورجيا المساحيق هي عادة ما تكون صغيرة تماماً. ومن الأمثلة على ذلك هو تروس مضخات السيارات automotive pump gears الذي يصنع من الكربون المحتوي على نحاس ونيكل وفولاذ للمولبدنيوم، إذ يزن الترس الداخلي 40 gr وتصل المسامية فيه إلى 10% وأقصى إجهاد شد $\sigma_t = 600 \text{ N/mm}^2$ و القساوة إلى $HV = 220$ على جهاز فيكرز. أما الجزء الخارجي فيزن 180 gr و مساميته 15% وأقصى قوة شد $\sigma_t = 520 \text{ N/mm}^2$ و القساوة إلى $HV = 180$. وعملية

التشطيب الوحيدة المطلوبة بعد التنقية والإرجاع فهي تجليخ السطوح المستوية. انظر الشكل (٨-٢).

٨-٢-٣ المواد المركبة المقواة بالألياف:

يسمح التدعيم بالألياف fibers للمواد الإنشائية بالحصول على متانة عالية ومقاومة عالية للانصهار مع لدونة جيدة للقاعدة سواء كانت معدنية أم سيراميكية. وتسمى المواد الإنشائية المدعمة بالألياف بالمواد المركبة، أي تتألف من عناصر غير متجانسة، تتميز بمقاومة عالية للتشوه اللدن ومقاومة عالية للتحطم الهش خلال عمر زمني طويل نسبياً، بما فيها مقاومة الزحف عند ارتفاع درجات الحرارة.

يتم التدعيم بواسطة الألياف من خلال تشكيل بنية ثنائية الطور، التي فيها يستخدم تشوه القاعدة من أجل زيادة الإجهاد في الألياف، ومن ثم زيادة قوى الترابط على الحدود ما بين الألياف والقاعدة. فإذا كانت الألياف طويلة بما فيه الكفاية، فإنها عند التحميل يكون التشوه الحاصل على أكبر جزء من الليف بحيث يجب أن يساوي تشوه القاعدة، كما تعمل الألياف على تأخير انتشار التشققات، مما يؤدي إلى زيادة المتانة والمرونة للمنتج. وبفضل عدم تجانس البنية المكونة من شرائح لدنة وقاعدة غير متينة وألياف متينة، فإن المادة المركبة هذه من الناحية النظرية قادرة على العمل في درجات الحرارة القريبة من درجة حرارة انصهار القاعدة.

يتعلق نظام زيادة المتانة في المواد المقواة بالألياف بخواص الليف (تؤثر القاعدة فقط كوسط لمناولة الإجهاد)، لذلك مثل هذه الأنظمة بخصائصها المقاومة لدرجات الحرارة العالية تتفوق على المواد المركبة المقواة بالجزيئات الممتنعة. تستخدم الألياف التدعيم من الحديد أو الفولاذ أو التيتانيوم أو النيكل أو المولبدنيوم أو التيتانيوم أو الغرافيت أو أكسيد الألمنيوم أو الكربيدات أو البوريدات أو النتريدات أو غيرها من الاتحادات الصعبة الانصهار.

وللحصول على طوري المواد المركبة هناك عدة أساليب:

١. الأسلوب الأول- نحصل فيه على الألياف وحدها، ثم يتم إدخالها في القاعدة matrix بشكل مباشر، مثال تبلور اليوتكتيك الموجّه للخلط باستخدام سرعات تبريد محددة.

٢. الأسلوب الثاني- يستخدم مخاليط من معدنين غير قابلين للذوبان أو الانحلال، بصورة رئيسية، الواحد في الآخر، ولذلك لا يمكن إنتاجها عن طريق الصب أو الانصهار.

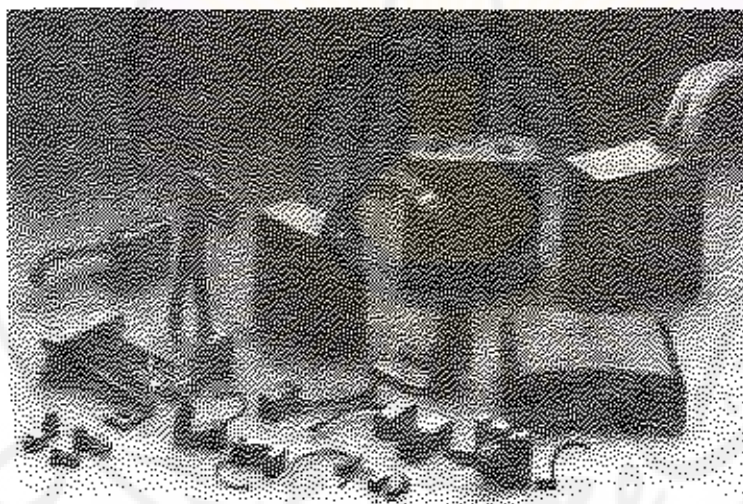
٣. الأسلوب الثالث- مخاليط معدن مع مادة غير معدنية مثل أكسيد أو كربيد المعادن، وغالباً ما يكون عبارة عن مسحوق ناعم أو ألياف.

٤. الأسلوب الرابع- يستخدم في تصنيع المواد المركبة المصهورة، وهذا ليس موضوع بحثنا.

طريقة تصنيع المواد المركبة المقواة بالألياف: يتم تحضير الشحنة المولفة من خليط المسحوق (القاعدة) والألياف، الذي يتم تدميجها ومن ثم نقوم بعملية تلييده. ومن الضروري تأمين مزج جيد للحصول على توزيع متجانس للألياف في القاعدة أثناء عملية تحضير الشحنة، كي لا يحصل تكتل للألياف أثناء عملية المزج، ويمكن التشكيل بالكبس بالطرق المعروفة، كما يجب الإشارة إلى أنه أثناء ضغط المدمجات في القالب تتوجه الألياف على الأسطح المتواضعة بشكل طبيعي باتجاه القوى الضاغطة، ولكن في الأسطح نفسها يكون توجيه الألياف عشوائياً. ومن ميزات عملية البثق أو الدفلة يمكن الحصول على بنية مركبة موجهة أفضل من الطريقة السابقة. ويتم التلييد بعد عملية التشكيل في جو محمي من الهيدروجين أو الغازات الخاملة أو في الخلاء. ومن الضروري تقليل زمن الثبات الحراري عند الوصول إلى الترابط أو التماس المطلوب، كي لا يحصل انصهار للمركبات. وبعد عملية التلييد يمكن أن تتعرض المنتجات إلى عملية معالجة إضافية لتحسين الخواص الفيزيائية والميكانيكية أو لإعطاء الشكل والأبعاد النهائية. ومن بين الأمثلة للمواد المركبة الإنشائية المقواة بالألياف في ميتالورجيا المساحيق ذات الأهمية الصناعية الكبيرة:

٨-٢-٣-١ الفحمات النحاسية - الكربونية Copper-carbon brushes

وهذه أيضاً تعتبر من مركبات التلامس المهمة، التي تتألف من النحاس و الغرافيت بنسب مختلفة بحسب الاستعمال. وقد تصل نسبة النحاس إلى نحو 80% من طرف، ومن الطرف الآخر تصل نسبة الغرافيت إلى نحو 70%. وقد يضاف القصدير أو الرصاص بكميات قليلة لتعديل الخصائص الكهربائية. يتم تصنيع هذه الفحومات بواسطة التدميج بالضغط على البارد والتليد. ومن الملاحظ أنه عندما تصل نسبة الغرافيت إلى 60% أو 70% من الوزن الكلي للمنتج فيجب أن لا تصنف هذه المادة على أنها مادة ميتالورجيا المساحيق، لأن أسلوباً مختلفاً يقتضي استخدام الروابط العضوية في تصنيعها. وتستخدم هذه الفحومات النحاسية- الكربونية في الملامسات الانزلاقية، كما يحدث على سبيل المثال في المحركات الكهربائية والمولدات والتي يستخدم فيها بكل صرامة مصطلح فحمة الكربون، انظر الشكل (٨-٣)، ولها استخدام آخر في إيصال التيار الكهربائي من الأسلاك التي تعلو القطارات والحافلات التي تعمل بالطاقة الكهربائية.



الشكل (٨-٣) الفحومات النحاسية - الكربونية

٨-٢-٤ مواد التقوية بتشتت الأكسيد Oxide dispersion strengthening

:(ODS) materials

يتطلب التطور الصناعي وخاصة في مجال صناعة الطائرات أو الصواريخ أو المركبات الفضائية... إلخ، إيجاد مواد تحافظ على مقاومتها العالية حتى في درجات الحرارة العالية. والمتطلبات الأساسية هي: مقاومة عالية للزحف عند درجات الحرارة المرتفعة، وكثافة منخفضة، وصمود حراري كبير، ومعامل توسع حراري منخفض، وناقلية حرارية كبيرة. يكون الهدف أثناء دمج الثوري في التسخين والبلاطين هو تمكين بنية مجهرية معينة من التطور، وليس لتحسين القوة بالرغم من أن ذلك يحدث بصورة إضافية. ومن المعروف تماماً أن التثبيت الناعم لطور ثانٍ ربما يوفر زيادة كبيرة جداً في القوة في الحديد من المعادن (الداعم). وهذه هي القاعدة الأساسية للأسلوب المعروف بأسلوب التصليد بالترسيب أو التصليد بالتعتيق، الذي يتم فيه تسخين سبيكة من معدنين لهما قابلية انحلال محدودة في درجة حرارة الغرفة إلى درجة حرارة تجعل عنصر التسيك ينحل في الهيكل الشبكي للمعدن الأساسي، الذي يكون عندئذ قد سقى وبقي عنصر التسيك في حالة معدنية شبه مستقرة meta-stable من محمل صلب. وعند إعادة تسخين المعدن إلى درجة حرارة أدنى من درجة الحرارة المستخدمة لإعادة حل عنصر التسيك، فإنه يتم قذف الأخير من المحلول كرواسب ناعمة (مشتتة) داخل حبيبات المعدن الأم، وبذلك فإنه يخلق الانخلاعات dislocations التي يعتمد عليها التشوه اللدن. وفي حالة بعض سبائك الألمنيوم، التي اكتشفت فيها هذه الظاهرة أول مرة فإن الترسيب يحدث عند درجة الحرارة المحيطة إذا أُتيح الوقت الكافي لذلك، ومن هنا جاء الاسم الأساسي للتصليد بالتعتيق. وإحدى السمات المميزة لهذه السبائك المصلدة بالترسيب هي أنها إذا عرضت لدرجات حرارة مرتفعة، فإنها بصورة تدريجية تلين بسبب تجاوز العمر الزمني، أي إن الترسيب الناعم لذرات الطور الثاني تلتحم، وتصبح أقل فعالية بصورة متزايدة، وفي الحقيقة فإنها تنحل ثانية إذا أصبحت درجة الحرارة عالية بما فيه الكفاية. أي إن هناك حداً لدرجات الحرارة لا يمكن بعده لا يمكن لمثل هذه المواد أن تعمل بشكل جيد. مثال، إن درجة الحرارة عامل مهم في تحديد كفاءة المحركات النفاثة عند استخدام السبائك الفائقة في العنفات الغازية.

وفي الأونة الأخيرة تم استبدال الترسيب بحالة ثانية غير قابلة للذوبان على الإطلاق، والعامل الرئيسي في هذا الأسلوب هو العثور على طريقة لإدخال العناصر المشتقة (البالغة النعومة) في الهيكل الشبكي لعنصر القاعدة matrix، ومن الأمثلة المستخدمة في طريقة التقوية بتشتت الأكسيد:

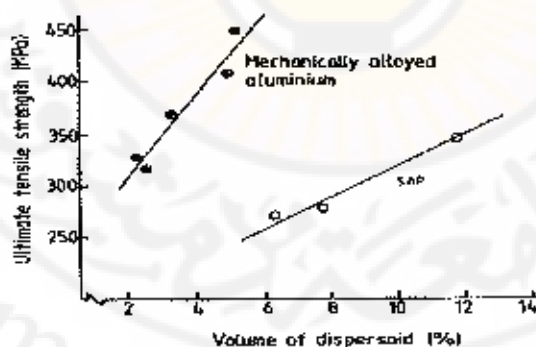
١. استخدام مسحوق الألمنيوم الملتد الذي يطلق عليه اسم (ساب) SAP: إذ تُشكل حبيبات مسحوق الألمنيوم أغشية من أكسيد الألمنيوم على السطح، يعمل على تحسين مقاومة الأجزاء المصنعة منه. إن تمزيق هذه الأغشية على الساخن وتشتيتها إلى جزيئات أصغر بكثير من بلورة الألمنيوم، والذي هو يعتبر الهدف من هذه الطريقة، ولتوفير أكسيد كاف، فقد تم استخدام مسحوق قشري flake powder، للحصول على مساحة سطحية كبيرة من الأكسيد. نعومة ودقة الجزيئات يمنع انفلاق البلورات، مما يسمح بزيادة المتانة، وتشير تجارب التحمل الحراري أن SAP لا تفقد خواصها الميكانيكية حتى الدرجة 550°C . أما عند التسخين لدرجة حرارة انصهار الألمنيوم 660°C ، فإن المتانة تنخفض حتى الوصول إلى متانة الألمنيوم النقي، غير أن هذه الجزيئات تحافظ على شكلها أي لا تنصهر حتى عند درجة حرارة 1000°C ولا تغير شكلها إذا لم تتعرض إلى الضغط. أما مجال استخدام SAP، فيُحدد خواصها الميكانيكية الجيدة مثل: المتانة العالية حتى عند درجات حرارة عالية، وناقلية جيدة للحرارة والكهرباء، ومقاومة اهتراء عالية. حيث يعتبر SAP مسحوقاً مثالياً لتصنيع كتاس المخدمات، ويمكن تصنيع الصفائح والقطع المصنعة بالتليد والتطريق، وكذلك مواشير المفاعلات الذرية. ولكن هذه الطريقة بقيت محدودة الاستخدام لانخفاض الجدوى الاقتصادية لها.

٢. أسلوب السبك الميكانيكي للأكسيد: هناك مثال آخر تم فيه حل مشكلة كيفية تشتيت حبيبات التقوية، وذلك بواسطة أسلوب السبك الميكانيكي mechanical alloying، بحيث تقوم بعملية الطحن في المطاحن ذات الكرات للمسحوق المعدني والأكسيد المقاوم للحرارة (Al_2O_3 , SiO_2 , ThO_2 , ZrO_2) في مطحنة عالية الطاقة وفترات زمنية طويلة نسبياً كافية لطرق حبيبات الأكسيد في حبيبات المعدن، مما يؤدي إلى

التحامها بعضها مع بعض بصورة تبادلية ثم يتم تحطيمها، بحيث يتقلص حجم الأكسيد بصورة متزايدة، وبعد ذلك يتم تصنيع المنتجات المقواة بالتشتت بواسطة أسلوب التشكيل بالبتق.

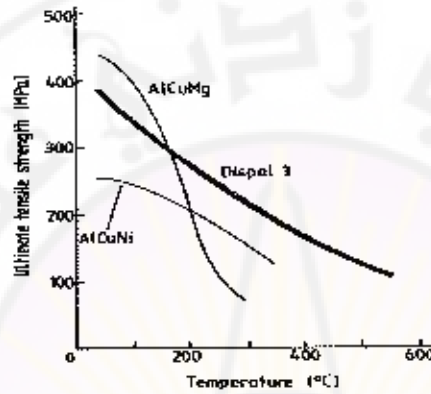
٣. تقوية الرصاص بواسطة أكسيده: ومن أمثلة التقوية بالتشتت المستخدمة على نطاق تجاري هو الرصاص. حيث تتم تقوية الرصاص بواسطة أكسيده، أما تصنيعه فتتم بنفس طريقة تصنيع مسحوق الألمنيوم الملبد SAP.

٤. أسلوب السبك الميكانيكي لمسحوق الألمنيوم والغرافيت: وهو عبارة عن عملية سبك؛ لأن الغرافيت أثناء عملية الطحن يتحول إلى كربيد الألمنيوم Al_4C_3 ، وعندما تتم عملية التسيبك فإن المسحوق يدمج بواسطة أسلوب الكبس تحت تأثير ضغط متماثل من جميع الاتجاهات على البارد CIP، كما يتم بثقه على الساخن. ويوجد بعض الأكسيد في المعدن لعدم إمكانية التخلص منه. وقد حدد حجم الحبيبات لما بين (18 - 85) nm ونعومة المادة المشتتة هي العامل الرئيسي في التأثير في الخواص الميكانيكية (انظر الشكل رقم ٨-٣)، والذي يبين قيم الشد للألمنيوم المسبوك بصورة ميكانيكية بالمقارنة مع SAP. ويوجد نسبة بمقدار 14% من المادة المشتتة، فإن قوة التحمل عند درجة حرارة الغرفة هي أكثر من ثلاثة أضعافها للألمنيوم، ولكن الشيء الأكثر أهمية هو قوة التحمل عند درجات الحرارة المرتفعة.



الشكل (٨-٣) تأثير نسبة حجم الحبيبات في مقاومة الشد

والشكل (٤-٨) يبين قوة الصمود الحراري عند درجات الحرارة المرتفعة للألمنيوم المقوى بالتشتيت، وخاصة الخليطة Dispal3 التي تحتوي على 14% في الحجم من إجمالي المادة المشتتة dispersoid. تستخدم هذه المواد في المكابس الخاصة بمحركات الاحتراق الداخلي، وكذلك الأجزاء الهيكلية أو الإنشائية المعرضة للأحمال في الطائرات.

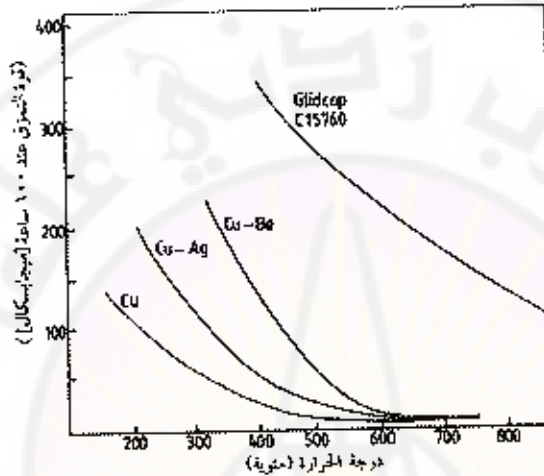


الشكل (٤-٨) تأثير ارتفاع درجات الحرارة على مقاومة الشد

٥. أسلوب الأكسدة الداخلية internal oxidation: يستخدم هذا الأسلوب في تقوية النحاس بواسطة أكسيد الألمنيوم عن طريق الأكسدة الداخلية، وليس باستخدام أكسيد النحاس، لأن أكسيد النحاس قابل للانحلال في المعدن نفسه. ويتم تذير سبيكة النحاس مع كمية صغيرة من الألمنيوم ويخلط المسحوق بأكسيد النحاس، ثم يتم تسخينه، عندئذ ينتشر الأكسجين في حبيبات السبيكة ويتفاعل مع الألمنيوم مشكلاً مشتتاً ناعماً من أكسيد الألمنيوم Al_2O_3 . ثم يؤخذ أكسيد الألمنيوم ويمزج مع النحاس بشكل جيد وذلك لتقوية النحاس ثم يتم تشكيله بالبتق. ومن مزايا هذا الأسلوب:

١. توفير مقاومة أو متانة جيدة للمنتج.
٢. تدعيم وتقوية المنتج بالحبيبات المشتتة من الأكسيد، التي تتوزع بشكل منتظم بين الحبيبات المعدنية، (طور داعم في المعدن الأساس).
٣. الاحتفاظ بالموصلية الكهربائية.

يبين الشكل (٥-٨) قوة التحمل (التمزق) في درجات الحرارة المرتفعة للنحاس المقوى بالتشبيت بالمقارنة مع سبائك النحاس الأخرى ذات الموصلية الكهربائية العالية. كما يستخدم أسلوب الأكسدة الداخلية أيضاً في إنتاج أكسيد الفضة/ القصدير Ag/Sn وفي إنتاج أكسيد الفضة/ الكاديوم AgO/Cd وهي مواد تستخدم في عملية التوصيل أو التلامس الكهربائي.



الشكل (٥-٨) قوة التمزق للنحاس المقوى بالتشبيت بالمقارنة مع سبائك النحاس الأخرى

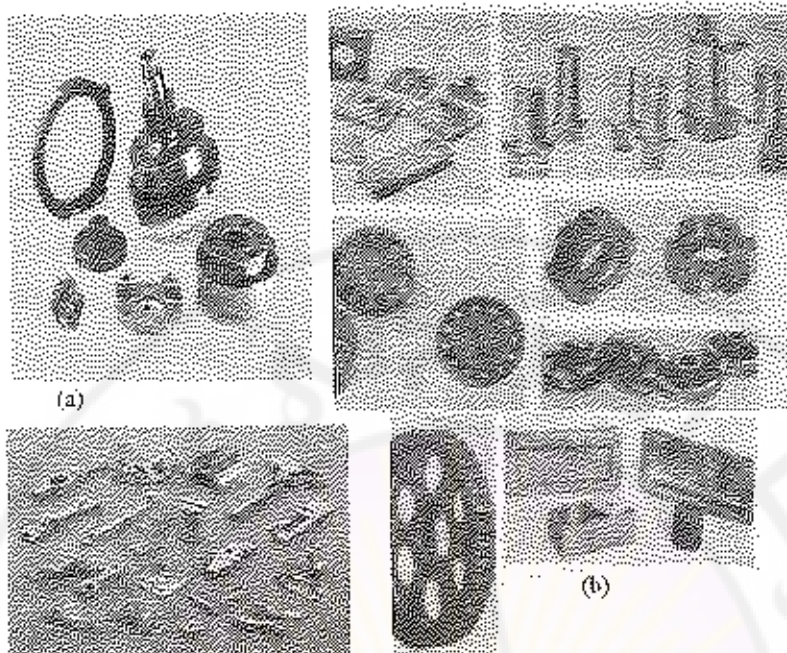
٥-٢-٨ الفولاذ الذي لا يصدأ Stainless steel:

يستخدم هذا الأسلوب في إنتاج الأنابيب بطريقة بثق المسحوق المذرر ذي الشكل الكروي على الساخن أو بالدلفنة على الساخن، أو إنتاج الشرائح Strips بطريقة دلفنة المساحيق Powder rolling. ويتم تدميج المسحوق بصورة متواصلة بدون مزيت بواسطة طاحونة دلفنة قياسية standard rolling mill تقريباً. ومن الضروري اتخاذ الاحتياطات الدقيقة للتأكد من تجانس الكثافة والسمانة عبر عرض الشريحة، وكذلك في المناولة والمعالجة اللاحقة للشريحة الخضراء، والتي تكون هشة. وبعد التلبيد، فإن الشريحة تدلفن على البارد من أجل إتمام التكثيف وإعطائها الصقل النهائي العالي المطلوب. أما التوفير في التكلفة بهذا الأسلوب فيأتي من تجنب الدلفنة المتكررة، والتلدين annealing والتخليل pickling والمعل cropping والتي تكون

ضرورية عندما يتم البدء بالصبة. أما العمليات نفسها فهي بالغة التكاليف، بالإضافة إلى أن جزءاً من المادة يفقد في كل مرحلة، وفي حال دفنة المساحيق فإن محصولاً عالياً جداً من الشرائح النهائية يمكن الحصول عليه.

تدخل الأجزاء المصنعة من مساحيق الفولاذ الذي لا يصدأ على نطاق واسع في صناعة الآلات والأجهزة. إذ تتصف مساحيق هذا الفولاذ باحتوائها الكبير على الشوائب التداخلية (الأزوت، الهيدروجين، الأكسجين). تؤدي عملية التليد في وسط من الهيدروجين (درجة حرارة التليد أعلى من 1100°C) إلى تشريب (تشبيع) هيكلها الشبكي بأطوار تداخلية مما يؤدي إلى زيادة قصافتها، أما التليد في الخلاء فيؤدي إلى خفض محتوى الغازات بسبب إجرائه عند درجة حرارة أقل مما يسمح بالحصول على منتجات أكثر نقاءً. أما التركيب الكيميائي لهذه المواد فهي قريبة من تركيبها في الفولاذ الذي لا يصدأ المصنوع بالطرق التقليدية، لذلك إدخال الكروم في الفولاذ يؤدي إلى تحسين الخواص، لأنه يشكل مع الحديد محاليل جامد من α و γ وكربيدات الكروم والحديد التي تظهر في الخلطات المحتوية على نسبة تزيد على 30% Cr، ومن صفات هذه الاتحادات بين الحديد والكروم القسافة العالية والبارمغناطيسية خاصة للطور FeCr . وإذا كان محتوى الكروم لا يزيد على 7% Cr فإنه يخفض النقاط A_1 و A_4 وحقل الطور γ يكون مفتوحاً، أما إذا كان محتوى الكروم 12,8% Cr فإن النقطة A_3 ترتفع وحقل الطور γ يغلق. كما يعتبر الكروم من العناصر القوية المشكّلة للكربيدات في الفولاذ فلذلك يجب أن تبقى نسبة الكربون في الحديد قليلة.

يدخل الكروم في الفولاذ المساحيقي على شكل مسحوق نقي ويمزج بشكل جيد مع الحديد، ومن خواص الكروم استقرار أكاسيده مما يعقد عملية الانتشار أثناء التليد، لذلك من الضروري إجراء عملية التليد في درجات الحرارة العالية ووسط اختزالي من الهيدروجين أو غاز النشادر. لذلك تتصف بنية ملبدات الفولاذ الذي لا يصدأ بعدم التجانس Heterogenous، أما إضافة النيكل Ni أو Mo إلى الفولاذ الذي لا يصدأ فيسمحان بالحصول على بنية أكثر تجانساً، كما تزداد الخواص الميكانيكية.



الشكل (٦-٨) بعض الأجزاء المصنعة من مساحيق المواد الإنشائية ذات الأساس الحديدي (a) وذات الأساس الألمنيوم (b) المستخدمة في صناعة السيارات وآلات النسيج.

٨-٣ مواد العدد القاطعة **Materials Tool**:

تعتبر معالجة المواد بالقطع واحدة من العمليات الإنتاجية الأساسية والواسعة الانتشار في الصناعة. كما تعتبر صناعة العدد القاطعة بأسلوب ميتالورجيا المساحيق من الطرق التي لها أثر مهم في تطور صناعة العدد القاطعة. ويكفي الإشارة إلى أن جميع المواد القاسية (الصلدة) والعدد السيراميكية والمواد العالية القساوة تصنع بأسلوب ميتالورجيا المساحيق أيضاً.

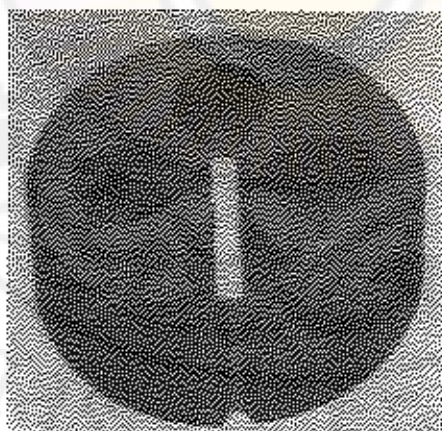
يمكن تصنيف مواد العدد القاطعة حسب درجة الصمود الحراري والمحافظة على المتانة أثناء الاستخدام في درجات الحرارة العالية:

- ١- سبائك العدد القاطعة **instrument alloy**: التي تعمل عند درجات حرارة تصل فيها درجة الصمود الحراري إلى $(500 - 600)^{\circ}\text{C}$ ، ومن هذه الخلطات الفولاذ

الكربوني والفولاذ السريع القطع high speed steels والخلائط ذات الأساس كوبالت وغيرها. إن هذه المبادئ عبارة عن تركيبات متعددة المكونات يتم إنتاجها على النحو التالي:

(أ) الكبس تحت تأثير ضغط متماثل من كافة الاتجاهات على البارد للمساحيق المذرة بالماء والمثبوعة بالبتق على الساخن.

(ب) الإنتاج المباشر للقطع المفردة من المساحيق غير المنتظمة إما بواسطة التدميج بالقلب و إما بواسطة الكبس تحت تأثير ضغط متماثل من كل الاتجاهات على البارد متبوعاً بمرحلة تليد الطور السائل في جو من الفراغ. وهذا الأسلوب مرن بصورة خاصة فيما يتعلق بالتركيب لحجم وجود تشوه ميكانيكي في أية مرحلة، مثال على ذلك قالب التسنين (القلوطة) المصنوع من الفولاذ السرعة العالية المبين في الشكل (٧-٨)، بحيث يكون قطر هذا الجزء 25mm ووزنه 25g. وهو مصنوع من المسحوق المذرر والذي تم تدميجها على البارد وتليده في الطور السائل ليصل إلى الكثافة النامة في جو من الفراغ. هناك مزايا باستخدام أسلوب ميتالورجيا المساحيق، فبالإمكان القيام بالتشكيل الجانبي للثقوب من أجل توفير الزاوية المثلى للقلوطة، كما يوجد نظافة متجانسة وخواص متجانسة في كل أجزاء المقطع وبكلفتة أقل من الأسلوب التقليدي في التصنيع.

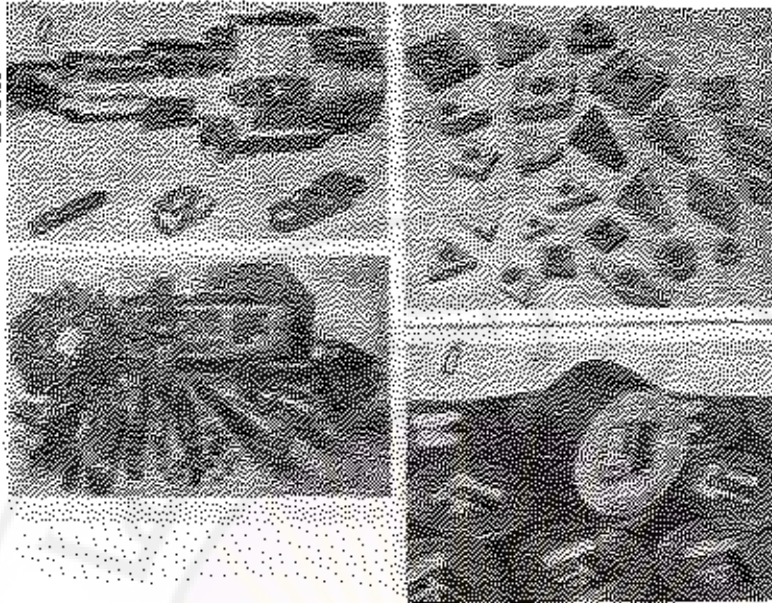


الشكل (٧-٨) قالب تسنين (قلوطة) مصنوع من فولاذ السرعة العالية

٢- الخلطات القاسية hard alloy وتسمى أيضاً بالمبائنك المعدنية الخزفية cermet أو القطع الكريبدية carbide tools، التي يقصد بها مادة مركبة ذات ذرات سيراميكية دقيقة في النسيج المعدني metallic matrix وهي ذات أهمية متزايدة، تصل فيها درجة الصمود الحراري إلى $^{\circ}\text{C}$ (600 - 700) تحتوي على حبيبات دقيقة التشتت (نانوية) من الكريبدات أو البوريدات أو الأكسيدات، وهي تقسم إلى خلطات تحتوي على التتغستين (طور التقوية reinforcement عبارة عن - كريبد التتغستين، والقاعدة matrix - كوبالت)، وكانت هذه المادة تستخدم على شكل قوالب لسحب الأسلاك من التتغستين على أنها بديل عن قوالب السحب الماسية، إلا أن العالم الألماني schroter قام باختراع أسلوب ومنتج جديد مؤلف من كريبد التتغستين المتماسك بواسطة أسمنت مؤلف من الكوبالت المعدني، الذي سمي شبيه الماس من العبارة الألمانية wie diamante. وأصبح هذا الكريبد المسمت في غاية الفائدة والأهمية كمادة لأدوات القطع وقوالب التشكيل. وهناك خلطات أخرى لا تحتوي على كريبد التتغستين ومواد رابطة أخرى غير الكوبالت، الذي هو أساساً باهظ الثمن. بحيث يكون طور التقوية reinforcement عبارة عن - كريبدات معادن أخرى مثل التيتانيوم والزنكاليوم والنيوبيوم أو نتريداتها أو بوريداتها، بينما تكون المادة الرابطة (القاعدة) matrix - هي معدن الموليبدنيوم.

٣- سيراميك العدد الفاطعة ceramic instrument: تصل درجة الصمود الحراري لها في حدود $^{\circ}\text{C}$ (900 - 1100)، التي تنقسم إليها معظم المواد القاسية والاتحادات الصعبة الانصهار (أكسيدات، نتريدات، كريبدات المعادن) بدون قاعدة matrix معدنية.

٤- المواد الفائقة super alloys: تصل درجة الصمود الحراري لها في حدود $^{\circ}\text{C}$ (1000 - 1300) إما أن تكون مصنوعة من مساحيق مادة واحدة أو أكثر، وإما تصنع من الألماس الصناعي، وإما من نتريد البورون.



الشكل (٨-٨) بعض العدد القاطعة المصنعة بأملوب مينالورجيا المساحيق

٥- مواد العدد السابقة جميعها مع الطلاءات المختلفة: حيث تصل طبقة الطلاء لها نعدة ميكرونات. يُحدد دورها في الصناعة من حيث المعالجات الحديثة التي تزيد من درجة الصمود الحراري للمواد غير المعالجة، وقد أثبت استخدامهما في صناعة الآلات والأجهزة المختلفة وكذلك في استخدامات أخرى مثل رؤوس الحفر و غيرها.

٨-٤ المواد التريبولوجية Tribological materials:

٨-٤-١ المواد المقاومة للاحتكاك Antifriction Materials:

من المسائل التي يجب الإشارة لها في أسلوب مينالورجيا المساحيق هو الحصول على مواد مختلفة الخواص والاستخدامات، ومن طبيعة معظم المركبات الملبدة أنها ذات مسامية، ولكن لا بد من الإشارة إلى المواد المسامية ليس كعيب من حيث وجود المسامية فيها، بل كمتطلب من متطلبات التصميم التي نريدها في هذه المركبات. و تعتبر المواد المقاومة للاحتكاك من المواد المسامية العاملة في العقد الاحتكاكية

الانزلاقية، ولا تتصف فقط بمعامل احتكاك منخفض، بل بخواص ميكانيكية وتريبولوجية تتعلق بظروف التشغيل المختلفة سواء في أوساط جافة أم في أوساط مزيتة، وبحسب مجال استخدام المواد المقاومة للاحتكاك وظروف عملها يمكن عرض المتطلبات الأساسية التالية فيها:

أ- يجب أن يكون معامل الاحتكاك منخفضاً: فمن أجل ظروف التشغيل الجافة يكون معامل الاحتكاك في حدود 0.12 - 0.30 بينما يكون في ظروف التشغيل المزيت في حدود 0.04 - 0.10، وتتعلق قيمته ببنية المادة وبالمسامية وظروف التشغيل. يؤدي انخفاض معامل الاحتكاك إلى انخفاض توليد الحرارة والتآكل لزوج الاحتكاك، ومن ثم زيادة العمر الزمني للعقد الاحتكاكية. وفي مساحيق المواد يتم خفض معامل الاحتكاك عن طريق التزييت الذاتي في المواد المسامية أو إدخال مواد التزييت الصلبة مثل الغرافيت أو كبريتات المواد.

ب- المقاومة العالية للاحتكاك: يجب أن تكون هذه المواد ذات مقاومة جيدة للاحتكاك مما يؤدي إلى زيادة العمر الزمني للعقد الاحتكاكية. إذ تؤثر فيها متانة المادة وبنيتها وقساوتها. ولذلك تحدد مقاومة الاحتكاك خواص البنية الثانوية المتشكلة على سطح الاحتكاك.

ت- البنية الثانوية: تتشكل هذه البنية في المرحلة الأولى من العمل نتيجة التآكل الحاصل على سطح العقد الاحتكاكية وتشتت المادة وامتزاجها بجزيئات الأكاسيد والغرافيت وغيرها من المواد المترسبة. ونتيجة للتأثير الموضعي لتوليد الحرارة والضغط تجري عملية تليد للمزيج المتشكل على السطح مما يؤدي إلى تشكيل طبقة سطحية ذات مقاومة جيدة للاحتكاك. إن استقرار البنية الثانوية المتشكلة يؤدي إلى تحديد مقاومة الاحتكاك للمادة وصمودها أثناء العمل. وإذا لم يتشكل على السطح طبقة ثانوية متينة ومقاومة للاحتكاك بشكل جيد، فإنه ينشأ التصاق وتآكل ميكروي يؤدي إلى انخفاض قدرة عمل العقد الاحتكاكية.

ج- العمل الإضافي: له أثر مهم في عملية التشغيل وتتعلق بقدرة توليد البنية الثانوية نتيجة للعمليات الفيزيائية والفيزيا-كيميائية والميكانيكية المتكونة أثناء الاحتكاك، يتعلق

العمل الإضافي بخواص المادة وتركيبها وبظروف العمل، ووجود المسامية ومادة التزيت بحسن العمل الإضافي.

ح- المتانة السطحية والحجمية: تتعلق المتانة بنوع مادة الأساس و الإضافات السبائكية وبنية ونوعية المعالجة الحرارية. كما تتعلق الخواص الميكانيكية وخاصة المتانة بقدرة المواد المقاومة للاحتكاك وهي عبارة عن حاصل ضرب الحمولة النوعية p بسرعة الاحتكاك الانزلاقي v ، وتمتلك كل مادة قيمة معينة من $p \cdot v$. فعند حمولة نوعية مرتفعة ومن أجل الحفاظ على قدرة عمل المادة لا بد من إنقاص سرعة الاحتكاك وبالعكس. وتتعلق المتانة أيضاً بدرجة حرارة الوسط المحيط وبطبيعة مادة التزيت ..إلخ.

خ- التزيت الذاتي: يعتبر واحداً من الميزات الأساسية للمواد المقاومة للاحتكاك، يتحقق تأثير التزيت الذاتي إما عن طريق الزيت الموجود في المحامل أو عن طريق وجوده في تركيب المادة كمزيئات صلبة، مثل الغرافيت أو الكبريتات أو نتريد البورون أو البولييمرات..إلخ. تستطيع هذه المركبات تشكيل أغشية منفصلة على أسطح زوج الاحتكاك. ويحصر تأثير التزيت الذاتي في أجزاء المواد المسامية المتشربة بالزيت بأنه عند تسخين زوج الاحتكاك يزداد حجم الزيت بنسبة أكبر من حجم الهيكل. وبالنسبة يتسرب الزيت من المسام إلى سطح الاحتكاك ويزيته، أما عند تبريد العقد الاحتكاكية فإن الزيت يتسرب إلى داخل المسام تحت تأثير القوى الشعرية.

ومن الخصائص المطلوبة في المواد المقاومة للاحتكاك المصنعة بأسلوب ميتالورجيا المساحيق لحل المسائل التالية:

(١) ابتكار مواد جديدة تعمل في العقد الاحتكاكية بنظام التزيت الذاتي عندما لا يُسمح باستخدام سائل التزيت بسبب إتلاف المنتجات المصنعة بواسطتها، مثل (المواد الغذائية، و المواد النسيجية، و مواد الطباعة وغيرها).

(٢) استبدال الخلائط الغالية المصبوبة أو المصنعة بالطرائق التقليدية ذات الأساس النحاسي مثل (البرونز أو النحاس الأصفر) أو الببابايت، بخلائط أرخص منها مثل الخلائط ذات الأساس الحديدي.

٣) استخدام أساليب التحضير التكنولوجية الاقتصادية، يزيد الوثوقية للعقد الاحتكاكية، ويحسن الخواص المطلوبة.

تصنف مواد المساحيق المقاومة للاحتكاك المستخدمة في تصنيع عناصر العقد الاحتكاكية مثل: (المحامل المسامية الانزلاقية، أو جلب المحامل أو طوق المكبس أو المحامل الدفعية وغيرها)، إما بحسب التركيب و إما بحسب الخصائص.

٤) ينقسم التصنيف حسب التركيب إلى: ١) مواد ذات الأساس النحاس أو الحديد أو النيكل أو الكوبالت أو الألمنيوم وغيرها من السبائك، ٢) مواد ذات الأساس المعادن الصعبة (الانصهار، ٣) المواد المعدنية الغرافيتية، ٤) مواد الاستناد الفولاذية ثقائية الطبقات المعدنية، ٥) مواد ذات الأساس الهياكل المعدنية المسامية.

٥) وينقسم التصنيف حسب الخصائص إلى: ١) مواد تعمل عند وجود سائل التزييت، ٢) مواد تعمل في ظروف التزييت المحدود، ٣) مواد تعمل عند التزييت الذاتي، ٤) مواد تعمل بدون تزييت في الهواء، ٥) مواد تعمل في الوسيط المخلخل من الهواء أو في وسط من الغازات الخاملة، ٦) مواد تعمل عند درجات حرارة مرتفعة، ٧) مواد تعمل عند سرعة انزلاق كبيرة، ٨) مواد تعمل في وسط مائي أو وسط كيميائي مؤكسد.

٨-٤-١-١ المحامل المسامية:

بدأ تصنيع المحامل المسامية في الولايات المتحدة الأمريكية منذ أربعينيات القرن الماضي، فبخلاف المنتجات السابقة التي كانت تصنع من المساحيق لارتفاع نقطة انصهارها كالتنغستين مثلاً الذي لا يمكن معالجته فوراً بواسطة الصهر، فإن المحامل المسامية تصنع بأسلوب ميتالورجيا المساحيق بفضل المزايا الخاصة التي تنجم عن هذا الأسلوب، من حيث بساطة التصنيع وإمكانية الحصول على منتجات جاهزة للاستخدام بعد عملية التدميج والتليد مباشرة، كما يمكن الإشارة إلى المحامل المسامية على أنها تعمل من دون ضجيج على خلاف المحامل الكروية. ورخص المساحيق الداخلة في صناعتها وهي متوفرة بشكل كبير بالمقارنة مع مواد تصنيع المحامل التقليدية.

أ- المحامل المسامية ذات القاعدة النحاسية:

تصنع الغالبية العظمى من هذه المحامل من القصدير/البرونز 90/10، التي تسمى بالمحامل المسامية ذات القاعدة النحاسية. التي تعتبر من المحامل الجيدة عندما يدور عليها عمود الفولاذ، لخواصها المقاومة للاحتكاك ومقاومتها للتآكل وناقليتها الجيدة للحرارة. ومن الخصائص الهامة المطلوبة في هذه المحامل:

١- كمية الزيت، التي تقرر مدى العمر النافع للمحمل.

٢- المتانة أو المقاومة، أي الحفاظ على الخواص الميكانيكية المطلوبة.

ومن الملاحظ أن هاتين الخاصيتين متعارضتان، لأنه كلما ازدادت المسامية أي كلما كان محتوى الزيت أكبر، كانت المتانة أقل. والجدول (٨-٣) يبين القيم النموذجية المطلوبة في البرونز 90/10. ومن الملاحظ أيضاً أنه ليس ضرورياً أن يكون المحتوى الزيتي مساوياً بالضبط للمسامية. إلا أنه يتعلق كثيراً بالمسامية.

لقد كانت المحامل المسامية تصنع في البداية من البرونز، وكانت تسمى بالمحامل البرونزية، المركبة من النحاس الكهروليتي النقي ومسحوق القصدير، المنتج بواسطة التذيرير بالهواء air atomization، تضغط هذه المخاليط المتكونة من النحاس/قصدير ثم تلبد، ومن المعروف أن مثل هذه الخلطات تبدي زيادة في الأبعاد عندما يتم تليدها بطريقة عادية. والبعد الأكثر أهمية هو نصف القطر، ويبين الشكل (٨-٩) التغيرات التي تحدث أثناء التليد، إذ إن القياسات التي تم أخذها كانت بعد تبريد العينات من درجة حرارة التليد إلى درجة حرارة الوسط المحيط.

ويمكن رؤية أن بعض النمو قد حدث عند درجات حرارة متتالية نسبياً، إلا أنه عند نحو 800°C حدث نمو مفاجئ. ويعزى هذا إلى وجود تفاعل بين مادتين غير متطابقتي الانصهار عند درجة حرارة 798°C التي يتشكل فيها طور سائل غني بعنصر القصدير. وعند ارتفاع درجة الحرارة أكثر فإن التقلص المتوقع يبدأ في الحدوث. ويمكن استخدام تغيير درجة حرارة التليد كوسيلة للتحكم في الأبعاد النهائية

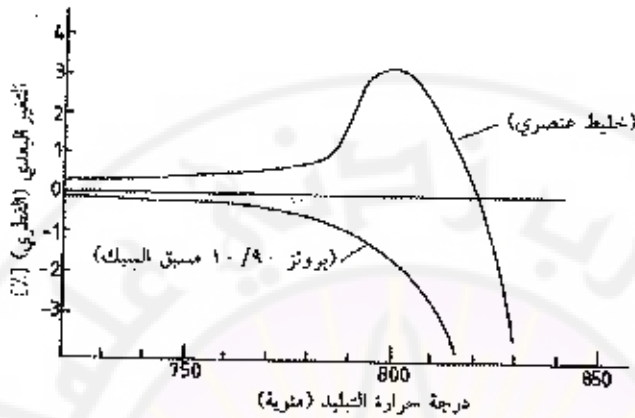
ضمن حنود معينة، لأن تخفيض درجة الحرارة لعملية التليد يقلل المئانة، بينما زيادة درجة حرارة التليد يزيد من تشويه السطح و خشونته. كما يمكن الإشارة أن درجة الحرارة ليست هي العامل الوحيد الذي يؤثر في تغير الأبعاد. فحجم حبيبات المسحوق لها تأثير بالغ الأهمية، فكلما كان المسحوق أنعم كان النمو في الأبعاد أقل. وهذا يمكن أيضاً استخدامه كأداة للتحكم في الأبعاد ولكن ضمن قيود محددة، فإذا كانت المساحيق ناعمة فإن الإتمساكية (التدفق) سوف تؤثر عكسياً. ومن ثم يمكن قبل خلط مساحيق البرونز أن نستخدم بصورة منتظمة مساحيق أنعم للقصدير من المساحيق الأخرى لتنظيم تغير الأبعاد. كما أن الزمن التليد تأثيراً كبيراً، فكلما كان زمن الفرن أطول كان النمو أدنى، والأوضاع الفعلية للمنحنيات المبينة في الشكل (٨-٩) تطبق فقط على نظام تليد معين، حيث وجود تليد أبطأ سيخفض النروة في المنحني الخاص بالخليط العنصري للمساحيق ويزيد من التقلص والانتكاش في المادة المسبقة المسبك. وفي أية حالة، فإن تخفيض مستوى شريط الفرن (تقصيره) سيخفض معدل الإنتاج.

الجدول (٨-٣) القيم النموذجية المطلوبة للبرونز 90/10

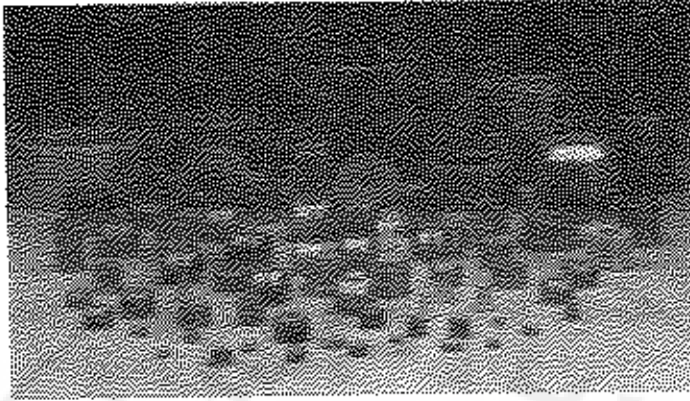
إجهاد الشد، MPa	التمساكية، %	الوزن النوعي، g/cm ³
55	31	5.8
62	29	6.0
76	25	6.3

ومن العوامل الأخرى المهمة المؤثرة في تغير الأبعاد كثافة المدمج. فكلما كانت كثافة المدمج أقل كان التقلص أكثر، أو أقل نمواً من المدمج الأكثر كثافة. ويتعلق مجال النمو في الأبعاد بوجود مادة الغرافيت المضافة بكمية تصل إلى نحو 2% لتوفير المزيد من التزيت. وأحياناً تصل نسبة الغرافيت المضافة إلى البرونز إلى نحو 5 - 6 % في بعض المحامل التي يكون فيها الدوران هادئاً (بلا ضجيج أو خبط) مطلباً بالغ الأهمية، مثل معدات إنتاج الصوت. ومن الطرق المهمة في التحكم بالأبعاد لتقليل النمو هي أن تكون الخلطة محتوية على نسبة مثوية عالية من البرونز المسبق المسبك. فكلما ازدادت النسبة المثوية أخذ النمو في التذني حتى يتم التقلص عند نقطة معينة.

وهكذا فإن بالإمكان توفير مخاليط من تلك التي لا تبدي أي تغيير في الأبعاد لدى القيام بعملية التلييد- ولذلك أطلق عليها مصطلح المخاليط غير النامية no-growth mixes -- ويمكننا باستخدام مثل هذه الخلطات أن يكون من الأسهل عمل محامل ثابتة الأبعاد.



الشكل (٨-٩) العلاقة بين الأبعاد النهائية ودرجة حرارة تلييد المحامل البرونزية وهناك مطلب مهم هو الحصول على المتانة المطلوبة، وكما ذكرنا آنفاً، فإن القوة المطلوبة والمتطلب الآخر، وهو المحتوى الزيتي العالي، أمران متعارضان. فالمتانة (القوة) تزداد نوعاً ما بالتشغيل على البارد أثناء عملية التحجيم sizing، ولكن التشويه الشديد الناتج عن ذلك يؤدي إلى غلق المسام. ويمكن الحصول على قوة أفضل عن طريق زيادة سماكة المنتج، ولكن هذا سيزيد التكلفة، ومما لا شك في على مدى العقود الماضية كان نحو تقليل التكلفة، و من ثمّ تقليل سماكة الجدران، خاصة في الأوقات التي تكون فيها تكلفة المعادن قد ارتفعت كثيراً، وخاصة القصدير الذي يعتبر من العناصر الاستراتيجية. ومن أجل الحصول على محامل ذات ظروف أقل حرجاً، كان التوجه إلى استخدام خلطات أخرى مثل: خلطة البرونز- الحديد، وخلطات النحاس- الحديد وغيرها، يمكن أن تعطي قوة تحمل أفضل من البرونز وحده.



الشكل (٨-١٠) بعض أنواع المحامل المسامية المصنعة بأسلوب ميتالورجيا المساحيق

ب- المحامل المسامية ذات القاعدة الحديدية:

تعتبر هذه المحامل الأكثر شيوعاً في الصناعة، لرخيص ثمنها ولاحترائها على إضافات مقاومة للاحتكاك وأخرى كعناصر تسبيك لزيادة المتانة. وتُحضّر من المواد ذات القاعدة الحديدية الكثير من المنتجات - المحامل الحديدية المسامية المنتشرة بسائل التزيت، خلأط الحديد- الغرافيت، خلأط الحديد- النحاس- الغرافيت... إلخ، ويبين الجدول (٨-٤) بعض خواص المحامل المسامية ذات القاعدة الحديدية، لبساطتها كمادة مقاومة للاحتكاك ذات بنية فريتية، أما مساميتها فتتراوح بين 15 - 30%، أما الشكل (٨-١١) فيبين علاقة الخواص الميكانيكية للمواد المقاومة للاحتكاك بالمسامية. ومن المواد الشائعة الاستخدام هي خلأط الحديد- الغرافيت. فعند احتوائها على 1.5% غرافيت يمكنها أن تعمل في وسط مزيّت عند إعطاء الزيت باستمرار أو العمل كمحامل ذاتية التزيت. . زيادة نسبة الغرافيت أعلى من 3% - 1.5 يؤدي إلى انفصاله في البنية على شكل غرافيت حر مما يحسن الخواص المقاومة للاحتكاك وخاصة عند وجود التزيت المستمر. أما زيادة محتوى الغرافيت أكثر من 3% فإنه يؤدي إلى تناقص في الخواص الميكانيكية بشكل كبير، وفي نفس الوقت يتناقص معامل الاحتكاك 1. لذلك تستخدم المواد ذات القاعدة الحديدية ذات محتوى كربون 5 - 7% كمحامل المسامية محدودة التزيت من أجل الحمولات النوعية (الإجهادات)

الصغيرة (حتى 5.0 - 6.0 MPa) وسرعات الانزلاق الصغيرة ($1 \cdot 10^{-2}$ m/s أي عندما يكون الدوران هادئاً بلا ضجيج. انظر الشكل (٨-١١).

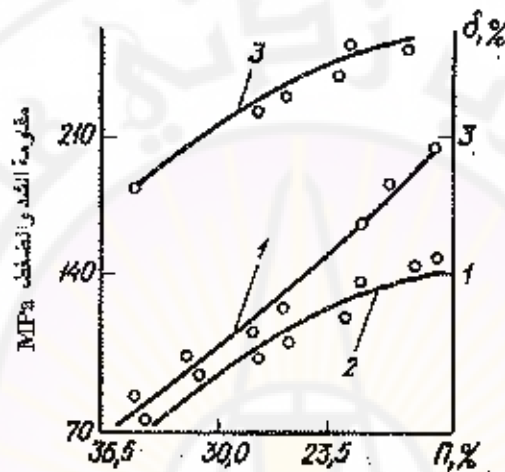
جدول (٨-٤) خواص المحامل الحديدية المسامية

الخواص المختلفة	القيمة
الكثافة γ , g/cm ³	5.1 - 6.6
مقاومة الشد σ_t , MPa	98 - 216
مقاومة الضغط σ_c , MPa	640 - 690
معامل المرونة E , GPa	75 - 145
القساوة HB, MPa	340 - 785
مقاومة الصدم a_k , J/cm ²	19 - 50
المطيلية بالتمديد للطور El , %	5 - 13
المقاومة الكهربائية النوعية $\rho \cdot 10^8$, $\Omega \cdot m$	22 - 25

ومن العوامل التي تؤثر في عمل زوج الاحتكاك بنية المادة للمحامل، ولكن في المحامل ذات القاعدة الحديدية فالعامل الأساسي الذي يؤثر في البنية هو الغرافيت. ويتوجب دراسة سلوكه كعنصر تسبيك ذي تأثير متبادل مع الحديد، يتشكل كمحلول جامد في الهيكل الشبكي للحديد γ يفصل عند التبريد إلى يوتكتويد وبرليت يتألف من المحلول الجامد α - فريت وسمنتايت. لذلك تغيير محتوى الكربون، درجة الحرارة، زمن التبريد وزمن التبريد يمكن أن يؤدي إلى تغيير البنية والخواص الميكانيكية والفيزيائية للمواد ذات القاعدة الحديدية. ونطمح دائماً في الحياة التطبيقية على الحصول على بنية برليتية بنسبة تصل إلى نحو 50%~. ويظهر الشكل (٨-١٢) بنية المواد الحديدية الغرافيتية المتكونة من البرليت الصفاتحي والفريت والغرافيت الحر بالإضافة إلى المسامات.

وتتراوح كمية للفريت في البنية بين 10 - 50%، وتكون البنية المحتوية على حبيبات ناعمة ومتجانسة للبرليت مع كمية قليلة من الفريت أقل من 10% وبعض الكمية من الغرافيت، ذات مقاومة أكبر للاحتكاك من البنية ذات الحبيبات الخشنة

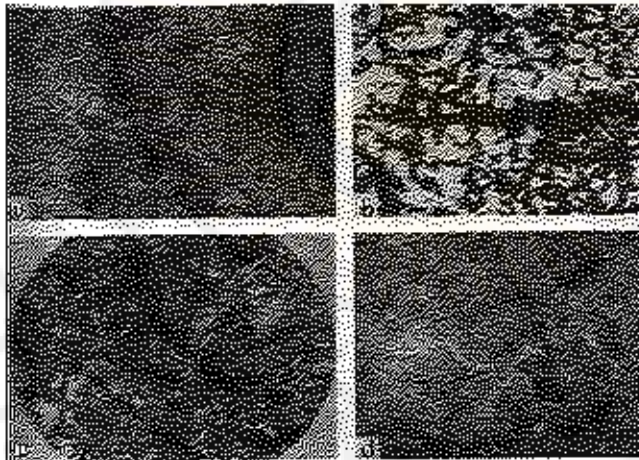
(الشكل ٨-١٢). بينما زيادة نسبة الفريت حتى 50% يتطلب استخدام كمية كبيرة من التزييت (الشكل ٨-١٢ b)، ووجود السماتيت في بنية الخلطة الحديدية الغرافيتية على شكل تجمعات كبيرة الحجم من السماتيت (الشكل ٨-١٢ c)، وعلى شكل شبكة وشوائب مستقلة من الغرافيت (الشكل ٨-١٢ d). وجود الغرافيت في الحالة الحرة غير ضار، و يسمح باستخدام المحامل ذاتية التزييت.



الشكل (٨-١١) علاقة الخواص الميكانيكية للمواد المقاومة للاحتكاك ذات القاعدة الحديدية بالمسامية، المنحني: 1- مقاومة الشد، 2- مقاومة الضغط، 3- الاستطالة النسبية بعد التحطم.

ويضاف النحاس والفسفور والكروم و المنغنيز وغيرها كعناصر تسبيك إلى المواد ذات القاعدة الحديدية مع وجود الغرافيت لتنظيم الخواص. حيث يذوب النحاس في الحديد مشكلاً محلولاً جامداً يتصف بمتانة أعلى من متانة الحديد. ولكن يجب ألا يتجاوز النحاس المضاف عن حد الإذابة للنحاس في الحديد، الذي يصل إلى 8.5% عند درجة حرارة 1094°C، لأن وجود النحاس الحر في البنية يخفض الخواص المقاومة للاحتكاك. وعادة يضاف النحاس إلى الخلطة الحديدية الغرافيتية بحدود 5% للمحافظة على أبعاد المنتجات بعد عملية التلبيد، كما يساعد وجود النحاس في هذه

الخلاط على عملية الغرفته، مما يقلل من عملية نزع الكربنه ويزيد من كمية البرليت في البنية. وتسبب الخلاط الحديدية الغرافيتية بالفسفور يسمح بزيادة مقاومة التشوه اللدن عند الاحتكاك، مما يقلل إمكانية انفلاق المسامات عند زيادة التحميل. ويؤثر الكربيت إيجابياً في الخواص الفيزيائية الميكانيكية وفي البنية، مما يساعد في زيادة مجال السرعات الانزلاقية والحمولات ويزيد من العمر الزمني للمحامل. ويمكن إضافة فلور الكالسيوم أو كلور الكالسيوم للمحامل المسامية ذات القاعدة الحديدية التي تعمل عند الاحتكاك الانزلاقي بلا زيت أو في الجو المخلخل من الهواء. ويمكن أن تستخدم أيضاً في تصنيع المحامل الانزلاقية، التي تعمل كزوج احتكاك عند درجات حرارة مرتفعة $(250 - 350)^{\circ}\text{C}$. أما عند المحامل التي تعمل في ظروف التحميل الكبير يمكن استخدام المحامل المسامية ذات القاعدة الحديدية، التي تركيبها الكيميائي: 0.8% كربون و 2.5% سيلكون و 3.5% كروم و (6 - 10)% موليبدنوم ونحو 2% نيكل، التي تستخدم كبديل عن المحامل البرونزية (90/10)، أي 90% نحاس و 10% قصدير.



الشكل (٨-١٢) بنية الخلاط الحديدية الغرافيتية

a) البنية البرليتية، b) البنية البرليتية- الفريتية المحتوية على غرافيت حر، c) البنية برليتية - فريتية مع شوائب من السمنتايت، d) البنية البرليتية المحتوية على سمنتايت على شكل شبكة.

عملية التشريب بالزيت:

وهي الخطوة الأخيرة من تصنيع المحامل المسامية، التي يتم فيها إدخال الزيت إلى داخل المسام. ويتم هذا عن طريق تحميل الأجزاء في سلة من الأسلاك أو الصفائح المثقبة، و يتم عندئذ غمسها في زيت التزليق الموجود في حاوية مفرغة من الهواء ومحكمة المد من الأعلى. وعندئذ يطبق التفريغ ويتم امتصاص الهواء تدريجياً من المسام لاستبداله بالزيت لدى إطلاق وإزالة التفريغ. وعندئذ تسحب السلة وتترك لتصفى. ومن الأهمية بمكان التخزين الإبقاء على المحامل المزينة بعيدة عن ملامسة المواد الماصة للزيت. وعلى سبيل المثال، لو وضعت المحامل على ورق تخطيط مربع فإن كمية الزيت ستسحب إلى الخارج. ومعظم المواصفات تدعو إلى الحد الأدنى من المحتوى الزيتي بـ 90% من المسامية المتصلة بالسطح للجلب المسامية ذات المسامية $II \geq 20\%$ ، وليس من الضروري استخدام تفريغ زائد لتحقيق أو حتى تجاوز هذا الرقم. ويتراوح معدل الزيت من نحو 15 إلى 30% من الحجم الإجمالي للمحمل. وتحدد نسبة التشريب بالزيت بالعلاقة التالية:

$$M = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (1-8)$$

حيث إن: m_1 - وزن القطعة قبل وبعد التشريب بالزيت، gr.

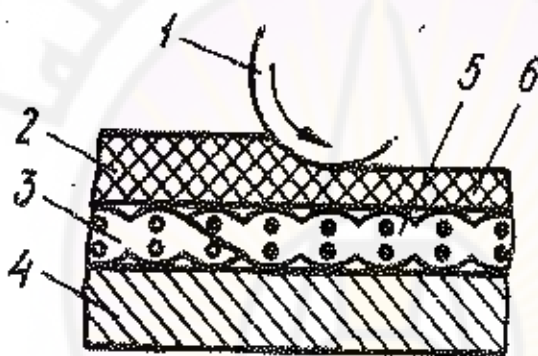
ويحسب معامل ملء المسامات بالزيت (المحتوى الزيتي) بالعلاقة التالية:

$$K = \frac{m_2 - m_1}{\rho \cdot V \cdot \pi} \times 100 \quad (2-8)$$

حيث إن: V - حجم العينة cm^3 ، ρ - كثافة الزيت gr/cm^3 ، π - مسامية القطعة.

ويستخدم عادة زيت معدني نقي خالي من الشوائب، ولتحسين خصائص عملية التزيت يضاف كلور البارافين أو حمض الستيرين بنسبة تتراوح بين 1 - 3%.

ويتم تشريب جلب المحامل ذات القاعدة النحاسية والحديد بالمواد البولييمرية مثل معجون فلور البلاستيك في حجرة مفرغة من الهواء عن طريق التحميل المتكرر للأجزاء (مع وجود فترات للتجفيف) في وعاء مملوء بمعجون الفلور بلاستيك، بحيث تُضغَط الأجزاء بواسطة دلفين بشكل مستمر على طبقة مسامية من البرونز، كما هو موضح في الشكل (٨-١٣). ثم تُعرض الأجزاء لعملية التسخين إلى درجة حرارة $330-380^{\circ}\text{C}$ وزمن ثبات يتراوح بين 1 - 2h في تيار من الأرجون من أجل عملية البلمرة للفلور بلاستيك. ثم تُعرض العينات إلى عملية أخرى ألا وهي المعايرة للوصول إلى سطح نظيف وأبعاد دقيقة.



الشكل (٨-١٣) مخطط التشريب المستمر للمسامات بمعجون فلور البلاستيك بطريقة الدلفنة
 ١- دلفين، ٢- طبقة من معجون فلور البلاستيك، ٣- طبقة مسامية من البرونز،
 ٤- قاعدة فولاذية، ٥- صفيحة مسامية من البرونز مشربة بالمعجون،
 ٦ - الطبقة السطحية للمعجون بعد عملية الدلفنة.

تستعمل المحامل ذاتية التزيت scff - lubricating في المحركات الكهربائية الصغيرة المستخدمة في العديد من الآلات المستخدمة في الأعمال التجارية والمنزلية، بالإضافة إلى السيارات وآلات النسيج.

٨-٤-١-٢ المرشحات Filters:

وهناك منتجات أخرى من هذا النوع على جانب كبير من الأهمية هي عناصر الترشيح Filters elements. التي تنتج بأسلوب ميتالورجيا المساحيق أيضاً، وهي تعتبر من

المواد المسامية النفوذة، حيث تتراوح المسامية فيها بين 60% - 20 وأكثر، و يمكن استعمالها كمرشحات لتنقية الهواء من الغازات السامة و تنقية السوائل من الجسيمات الصلبة أو من الزيوت والشوائب الأخرى... إلخ، أو استخدامها كمخمدات للصوت والاهتزازات. وتتمتع المرشحات بالسماوات التالية:

١) مسامية عالية مع مثانة ميكانيكية مقبولة. إذ تحدد المسامية إنتاجية المرشح، بينما يحدد شكل وحجم المسام دقة الترشيح.

٢) مقاومة تآكل وصمود حراري مقبول وخاصة عند استخدامها كمرشحات لتنقية الأوساط ذات درجات الحرارة المرتفعة.

٣) لدونة مرتفعة.

٤) الحفاظ على خواصها الميكانيكية لمدة طويلة، وسهولة في التنظيف.

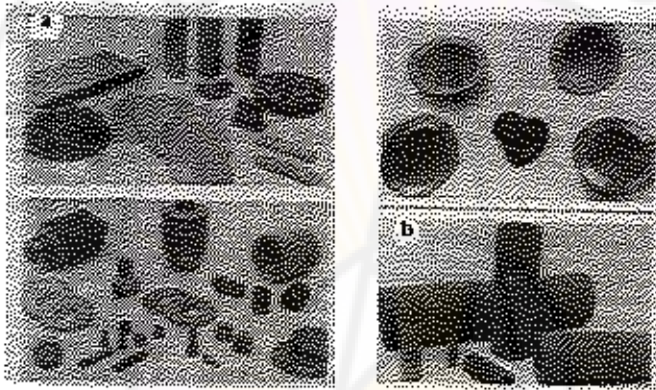
٥) سطح نوعي كبير للمسامات عند استخدامها كإلكترونيات (مهبط) لتخزين الطاقة الكهربائية والمكثفات.

تصنع عادة هذه المواد من مساحيق الفولاذ المقاوم للصدأ *stainless steel*، و التيتانيوم، و النيكل، و الحديد، و البرونز وبعض المواد الأخرى، وشكل المساحيق يمكن أن يكون كروياً وغير كروي. كما يمكن الإشارة إلى إمكانية تصنيع هذه المركبات من الألياف المعدنية. وأكثر المواد شيوعاً في الاستخدام كمرشحات هو البرونز والفولاذ الذي لا يصدأ، ولكن التيتانيوم يستخدم أيضاً إلى حد ما في ترشيح السوائل الأكالة كثيراً، وتستخدم صفائح النيكل المسامية في فصل نظائر اليورانيوم، إلا أن ذلك ليس ترشيحاً بالمعنى الدقيق، وذلك لأن التخصيب الذي يحدث في كل مرحلة يكون متواضعاً جداً، ويعتمد على مختلف معدلات انتشار النظيرين من خلال الحواجز المسامية، بدلاً من احتجاز أحدهما ومرور الآخر.

أ- المرشحات البرونزية:

تصنع هذه المرشحات عادة من حبيبات البرونز الكروية المنتجة بواسطة التذخير بالهواء، وأفضل النتائج يمكن الحصول عليها عندما تكون كل حبيبات من نفس القطر، ولكن هذا الأمر غير عملي، فلذلك يتم تحديد قطر الكرية الصغرى بالألا تكون

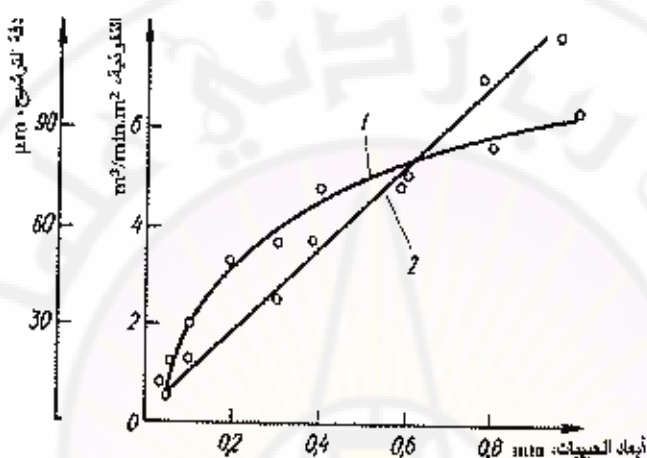
أصغر من ثلثي قطر أكبر كرية: $d_{small} \geq d_{big}$. وهناك طريقة أخرى في تصنيع المرشحات البرونزية، وهي تقطع قطع متساوية المحاور تقريباً من أسلاك النحاس، ومن ثم يتم تنويرها جزئياً بالصلقل في وعاء دوار أو بأي أسلوب ميكانيكي آخر. وبعد ذلك نطلى الذرات بالقصدير، الذي ينتشر في النحاس ليشكل البرونز عند التليد. ومن أجل عمل عنصر ترشيح يمكن أن يستخدم تليد المسحوق السائب، أي إن الذرات توضع في قالب ذي شكل مناسب مصنوع من الغرافيت أو الفولاذ الذي لا يصدأ، ويلد عند درجة حرارة تبلغ نحو 800°C ، أي قريبة من حد التصلد $solidus$ temperature. ويبين الشكل (٨-١٤) مجموعة من مرشحات البرونز الملبدة.



الشكل (٨-١٤) مجموعة من المرشحات (القلتر) الملبدة
و المصنعة من مسحوق البرونز (b) أو من مسحوق التيتانيوم (b)

أما الشكل (٤-٢) فيظهر صورة مجهرية للبرونز الكروي الملبد. إذ يؤثر شكل أي (كروية) الحبيبات وحجمها في خواص المواد المسامية، فلذلك يتم فصل الحبيبات المستخدمة إلى مجموعات بواسطة عملية التخييل (مجموعة يكون حجم الحبيبات فيها من 40 إلى 800 ميكرونًا) وتفرز الحبيبات التي حجمها أقل من 40 ميكرونًا، ويتم اختيار الحبيبات المطلوبة التي تؤمن المسامية الكبيرة المطلوبة لنفوذ أفضل للمرشحات، والشكل (٨-١٥) يبين علاقة نفوذية المرشحات ودقة الترشيح بحجم الحبيبات. ويمكن صناعة مرشح بالتليد لقطعتين معاً أو حجمين مختلفين من المسحوق

والموضوعة في طبقات منفصلة، بحيث يتم في البداية تعريض السائل المعد للترشيح أولاً لطبقة أكثر مسامية، تقوم بإزالة الجسيمات الصلبة الخشنة، ومن ثم لطبقة أخرى بممرات أصغر لإزالة الجسيمات الصلبة الأنعم. وهذا الأسلوب يزيد الفترة الزمنية لاستخدام المرشح قبل أن يسد ويصبح في حاجة إلى التنظيف بالاجتراف الخلفي back-washing.



الشكل (٨-١٥) علاقة نفوذية المرشح (1)

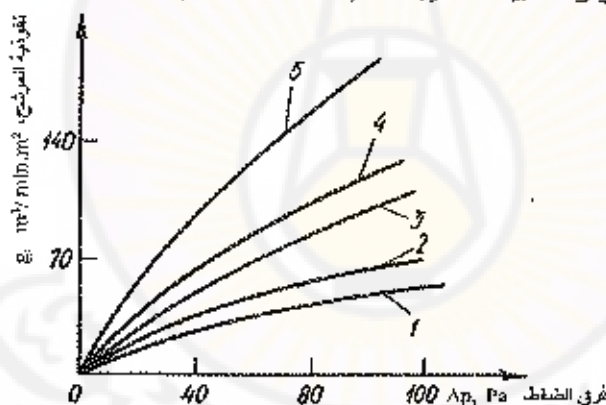
ودقة الترشيح (2) بالحجم الوسطي للمسحوق الكروي الشكل.

ب- المرشحات المصنعة من مساحيق غير كروية الشكل:

تصنع المرشحات أيضاً من مساحيق غير كروية ذات أشكال غير منتظمة مثل الجزيئات الغصنية (دندريتيه) أو الجزيئات حادة الزوايا، من أجل زيادة المسامية والنفاذية وزيادة المتانة. وعلى أن هذه الجزيئات ذات كثافة أقل من الجزيئات الكروية الشكل، تتميز بزيادة المسامية حتى 70%. وكانت في معظمها مصنوعة على شكل صفائح بأحد الأساليب التالية:

١- يخلط المسحوق مع رابط binder، ويفرد على السطح المستوي الذي يتم تليده عليه، ويكون بذلك الرابط قد احترق أولاً. وبعد ذلك يتم كبس الصفيحة الملبدة ثانية وإعادة تليدها لإكسابها قوة إضافية. وتضاف عند الضرورة عناصر مشكلة الفراغات

والمسامات إلى الخليط، وذلك من أجل زيادة مسامية المرشح، تذوب عند التلييد، تاركةً مكانها مسامات إضافية. وتغيير نسبة العناصر المساعدة في تشكيل المسامات والتحكم بحدود المسامية المطلوبة ونفوذية المرشحات مبينة في الشكل (٨-١٦). حيث تُستخدم المرشحات المصنعة من التيتانيوم لتنقية المغنيزيوم السائل وكلور التيتانيوم، التي تُصنع حسب التسلسل التالي: تحضير المزيج الذي يتألف من التيتانيوم مضاف إليه 5% من العناصر المساعدة في تشكيل المسامات مثل كربونات الأمونيوم المائية NH_4HCO_3 ومحلول الغليسرين في الغول (60% غول الإيثانول و 40% غليسرين)، يخلط هذا المزيج جيداً ثم يضغط بواسطة المكبس الهيدروليكي (200 - 400) MPa لتشكيل المدمج ثم يعرض لعملية التلييد في وسط محمي من الأرغون لمدة 6 - 7 ساعات. أثناء التلييد عند الوصول إلى درجة حرارة 400°C يتم تثبيت درجة الحرارة لمدة 2 - 1 ساعة ليتنوب وتتبخّر المادة المساعدة في تشكيل المسامات، ثم ترفع درجة الحرارة حتى درجة حرارة التلييد المطلوبة $(1100 - 1000)^\circ\text{C}$.



الشكل (٨-١٦) علاقة نفوذية المرشح المصنعة من الفولاذ الكروم نيكل بنسبة كربونات الأمونيوم المائية المضافة: المنحني 1-0%، 2-2%، 3-4%، 4-6%، 5-8%.

٢- ويتم تصنيع مرشحات ثنائية الطبقات من التيتانيوم ذي حبيبات غير منتظمة أيضاً، من أجل التنقية الدقيقة واستطاعة كبيرة للمرشح (نفوذية كبيرة)، بحيث يتم القيام بعملية التدميج على مرحلتين: الأولى - كبس طبقة من المسحوق ذي الحبيبات الكبيرة الحجم

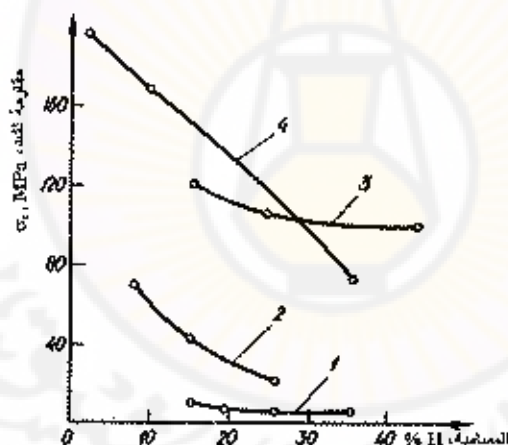
مباشرة، الثانية- إضافة المساحيق الدقيقة وكبسها أيضاً، ويتم تلبيدها في وسط محمي من الأرجون عند درجة حرارة 1000°C .

٣- أما المرشحات الأنبوبية الطويلة الشكل فيتم تصنيعها أيضاً من مساحيق منتظمة وتدمج بطريقة البثق بعد إضافة المواد الرابطة مثل صمغ النشاء أو مساحيق الكاوتشوك وغيرها. حيث يستخدم مسحوق التيتانيوم بنسبة 95% و 5% مواد رابطة، ثم يخلط المزيج ويجمع على شكل أنبوب في قالب بطريقة التدميج بالبثق عند ضغط $(100 - 150) \text{ MPa}$. ثم تجفف بواسطة الأشعة الحمراء أو غيرها من الطرق السريعة التجفيف ثم تعرض لعملية التليد في جو مفرغ من الهواء vacuum. يمكن الحصول بهذه الطريقة على مرشحات ذات مسامية 35 - 40% و ضغط غاز حتى 6 MPa. وهناك طريقة بسيطة لتصنيع المرشحات، فإذا كان المطلوب مرشحاً أسطوانياً الشكل، فإن الصفيحة الملبدة تشكل لتصبح أسطوانية الشكل بالقطر المطلوب، ومن ثم يتم لحامها طولياً.

٤- تصنيع المرشحات من ألياف مصنعة من المواد الصعبة الانصهار: يمكن استخدام الألياف في تصنيع المواد النفوذية التي تسمح بالحصول على مرشحات ذات مسامية حتى 90%. تستخدم المواد الأساسية على شكل ألياف يتراوح طولها بين (10 - 250) μm وقطر (4 - 65) μm . وتتلخص عملية تصنيع المرشحات بتشكيل المدمجات بصف الألياف على صفيحة ذات مسامات أو بترسيبها بواسطة سائل لزج، الذي نتخلص منه بالامتصاص عبر الصفيحة ذات المسامات. ثم تلبد المدمجات إلى درجة حرارة حسب نوع مادة الألياف. ومن الملاحظ أنه عند التليد يتم التخلص من الإجهادات الداخلية ومن إجهادات التشكيل المشكلة أثناء عملية التدميج. ويبين الشكل (١٧-١) علاقة متانة الشد لعينات مصنعة من مساحيق وأخرى من ألياف الحديد بالمسامية. حيث تبين المنحنيات أفضلية في مقاومة الشد للعينات المصنعة من المساحيق عند نقصان المسامية، بينما تكون مقاومة الشد أكبر في العينات المصنعة من الألياف عندما تكون المسامية أكبر. كما أن مقاومة الشد تكون أفضل في العينات الملبدة لزيادة الروابط بين الجزيئات، ويمكن ملاحظة أن متانة الشد للعينات المصنعة

من الألياف تتعلق بنسبة أقل بالمسامية من العينات المصنعة من المساحيق وخاصة عند زيادة المسامية فوق 30%.

تستخدم المرشحات المصنعة من مساحيق المواد الصعبة الانصهار للعمل في درجات الحرارة العالية. ومن الضروري عند تصنيعها حل مشكلتين أساسيتين: تأمين مسامية عالية، وتحقيق متانة مقبولة. وصعوبة حل هاتين المشكلتين يكمن في استخدام مساحيق غير نشطة وذات أشكال غير منتظمة للوصول إلى مسامية عالية، وعند التلبيد لا يمكن الحصول على متانة جيدة. ويتألف مخطط الحصول على المواد النفوذية من المدمجات الخضراء الصعبة الانصهار من تسلسل العمليات التالية: تحضير المزيج، ومن الضروري هنا خفض نشاط المساحيق على حساب تكورها أو إدخال عناصر مساعدة في تشكيل المسامات وتمزج بشكل جيد. ثم تدمج بالحقن و تلبيد، ثم تعرض لعملية إضافية بعد التلبيد وهي معالجة كيميائية-حرارية لرفع مقاومة الأكسدة عند درجة الحرارة العالية.



الشكل (٨-١٧) علاقة متانة الشد بالمسامية للمدمجات الخضراء (1, 2) والمليدة

(3, 4)، مصنعة من ألياف الحديد للمسام بواسطة احيق الحديد (2, 4)

ج- اختبار المرشحات:

هناك عدة اختبارات قياسية متوفرة للمرشحات حسب المواصفة العالمية ISO4003، بحيث يكون المرشح مشبعاً بالسائل ومغموساً فيه، ويتم ضغط الهواء بصورة متزايدة

تدريجياً على أحد جوانب المرشح، ويلاحظ الضغط الذي تبدأ فيه الفقائيع الناتجة عنه بالظهور. وقد تم حساب أكبر حجم للمسام بواسطة المعادلة التالية:

$$d = \frac{4\sigma}{p} \quad (3-8)$$

حيث إن: σ - التوتر السطحي لسائل الاختبار، و p - هي فرق الضغط. وهناك اختبار آخر يقرر مباشرة الإنفاذية permeability لسائل الاختبار، حيث يقاس معدل التدفق الحجمي عند فرق (هبوط) ضغط معين، وذلك حسب العلاقة التالية:

$$g = \frac{p}{\Delta p \cdot L} \quad (4-8)$$

حيث إن: V - حجم السائل المزاج، m^3 ، S - مساحة المرشح، m^2 ، τ - زمن الترشيح، min.

ومن ميزات المرشحات المسامية المصنعة بأسلوب ميتالورجيا المساحيق متانتها العالية، إذ تستطيع تحمل الضغط أثناء الترشيح (التقية) في مجال يصل إلى 18 MPa بالنسبة للمرشحات البيرونيكية ذات السماكة 5 mm، بينما يصل الضغط في المرشحات المصنعة من مساحيق الفولاذ المقاوم للصدأ حتى 50 MPa.

٨-٤-٣ الزرعات الجراحية Surgical Implants:

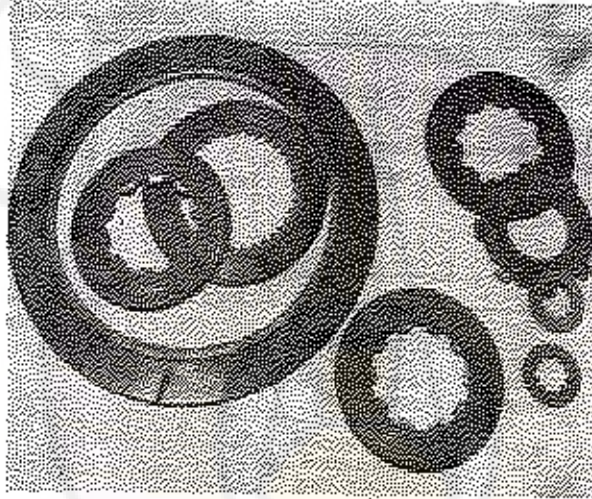
وهناك استخدام آخر لمواد ميتالورجيا المساحيق المسامية، هو الزرعات الجراحية، مثل مفصل الورك. وتُصنع هذه الأجزاء من المعادن المقاومة للتآكل المتلائمة مع الأنسجة الحية، كما وجد أنها إذا كانت مصنوعة بواسطة ميتالورجيا المساحيق وكانت مسامية، فإن النسيج العظمي سينمو بصورة فعلية إلى داخل مسام الجزء الصناعي المزروع، منتجاً مفصلاً قوياً ويفادى الحاجة إلى الإسمنت. وقد يكون الجزء المزروع برمته مصنوعاً بميتالورجيا المساحيق أو بصورة بنيلة من طبقة مسامية قد تم تليدها على سطح صلب، مثل جزء مصبوب، ويستخدم لهذا الغرض معدني التيتانيوم والتيتانيوم لمقاومتهما للأكسدة والتآكل في أحماض الجسم، ومتانتهم العالية وتلاؤمهما مع أنسجة الجسم.

٨-٤-٢ المواد الاحتكاكية Frictional materials:

وهي مواد ذات معامل احتكاك كبير لا يقل عن 0.2 عند العمل في ظروف الاحتكاك الجاف، ولا يقل عن 0.05 عند العمل في ظروف الاحتكاك المزييت، وتستطيع المحافظة عليه في درجات الحرارة المختلفة. وهي قليلة التآكل وجيدة الناقلية للحرارة، وتشكل هذه المواد فئة مهمة أيضاً من المواد المركبة في ميثالورجيا المساحيق، وهي عبارة عن لبوسات مكابح الخدمة الشاقة (التشغيل الدائم) heavy duty brake والقوابض التي تآلف من سبيج معدني - النحاس والبرونز أو النحاس الأصفر كقاعدة - والتي تآمر ويتدخل فيها embedded ذرات من مادة من نوع السيراميك - غالباً السيليكا. ومن الملميعي أن هذه الأخيرة توفر الاحتكاك بينما يعمل المعدن كبالوعة حرارية heat sink لتتصرف الحرارة. وفي بعض الأحيان قد تدخل بعض الإضافات مثل: الحديد والرصاص والغرافيت من أجل التعديل وتحسين الأداء. وتصنع معظم هذه المواد غالباً من مساحيق معدنية تضاف إليها مواد غير معدنية مثل الأميانت أو السيراميك، وتستعمل في صناعة أقراص الفصل والوصل وشكائم مكابح وسائط النقل وغيرها. وشروط عمل الأجزاء الاحتكاكية في السيارات الحديثة صعبة للغاية، إذ تصل السرعة البدائية للمكابح فيها إلى 50 m/sec ويصل الضغط فيها إلى 2.5 GPa عند الاحتكاك الجاف (دون تزييت)، بينما تصل السرعة إلى 100 m/sec ويصل الضغط إلى 7 GPa في الاحتكاك المزييت. ولذلك من الضروري أن تتصف هذه المواد بالميزات التالية:

- ١- معامل احتكاك كبير مع المحافظة عليه في درجات الحرارة المختلفة.
- ٢- مقاومة اهتزاز كبيرة وممتانة جيدة.
- ٣- ناقلية حرارية عالية.
- ٤- مقاومة كبيرة للتآكل (الامتصاص).
- ٥- مقاومة عالية ضد التآكل الكيميائي.

وإذا كانت هذه المواد تستخدم بصورة شائعة على شكل صفائح ذات مساحة سطحية واسعة ، فإنها شديدة الهشاشة والتقصص في حال تعرضها للضغط، كما أن أسلوب تصنيعها يختلف نوعاً ما عن ذلك الأسلوب المستخدم في المركبات الإنشائية. بالإضافة إلى ذلك، فلعل من حسن الحظ أن النواحي البعدية أي المتعلقة بالأبعاد أقل أهمية بكثير. جداً. تنقسم هذه المواد إلى عدة مجموعات منها: المواد التي تعمل في ظروف الاحتكاك الجاف، والمواد التي تعمل في ظروف الاحتكاك المزيق، ومواد مراكز الاحتكاك. ويبين الشكل (٨-١٨) بعض القطع الاحتكاكية المصنعة من المساحيق.



الشكل (٨-١٨) بعض الأجزاء المصنعة من مساحيق المواد الاحتكاكية

٨-٤-٢-١ المواد الاحتكاكية الجافة (الاحتكاك - جاف):

تصنع هذه المواد من الحديد (العنصر الأساس فيها - الحديد)، بالإضافة إلى مواد أخرى تسمى بالمواد الاحتكاكية ذات القاعدة الحديدية أو من النحاس أو البرونز (العنصر الأساس فيها - النحاس)، بالإضافة إلى مواد أخرى والتي تسمى بالمواد الاحتكاكية ذات القاعدة النحاسية. وتستخدم المواد ذات القاعدة الحديدية في شروط الخدمة لشاقة heavy duty مثل أقراص المكابح وأقراص الفصل والوصل للسيارات وفي القارنات، التي تتمتع بناقلية كبيرة للطاقة، و يمكن إضافة بعض العناصر

السبائك المعدنية إليها مثل (الكروم أو النيكل أو التانتاليم) بنسب قليلة، أو إضافة بعض المواد غير المعدنية مثل (الكبريت أو الغرافيت) من أجل التعديل أي تحسين الأداء. إلا أن هذه الخلطات لديها بعض العيوب، مثل عدم استقرار معامل الاحتكاك وعدم المحافظة على قيمته العالية و ميلها إلى الالتصاق بين زوج الاحتكاك، مما يؤدي إلى زيادة عزم الاحتكاك. و يمكن منع الالتصاق وزيادة الاستقرار في معامل الاحتكاك بزيادة نسبة الغرافيت أو الكبريت إلى نحو 20%، ولكن زيادة نسبة المواد غير المعدنية في الخليطة له أثر سلبي في خفض الخواص الميكانيكية وزيادة الهشاشة وإنفاص مقاومة الاحتكاك. مما يؤدي إلى البحث عن خلطات أخرى تحتوي على إضافات تزيد من مقاومة الاحتكاك مثل المواد السيراميكية ككربيد البورون B_4C أو كربيد السيلكون SiC ، بالإضافة إلى المزيّنات الصلبة مثل (الغرافيت، $FeSO_4$) التي تؤدي إلى زيادة معامل الاحتكاك واستقراره عند $f_{med} / f_{max} = 0.80$ وخواص ميكانيكية جيدة في درجات الحرارة العالية حتى $600^\circ C$. وبين الجدول (٨-٥) بعض المواد الاحتكاكية ذات القاعدة الحديدية أو القاعدة النحاسية المستخدمة في الدول المختلفة.

جدول (٨-٥) التركيب الكيميائي لبعض المواد الاحتكاكية ذات القاعدة الحديدية و النحاسية

المعدن %							بلد	
(إضافات أخرى)	سيميكون	MoS ₂	Sn	غرافيت	Cu	Se	المصنع	N
Ni-25, Cr-10, CuS-10	---	---	---	7	---	45	روسيا	1
Mn-6.5, BN-10, B ₄ C-10, SiC- 1...6	---	2-5	---	---	9-25	Bal	روسيا	2
MoSi ₂ -5...20, SiC-5	---	0 - 10	---	5-15	---	Bal	أمريكا	3
Ni -5, Mo - 5, W-5	---	---	---	---	---	60	ألمانيا	4
Pb -I, Sn - 1	---	---	---	5	9	84	اليابان	5
Pb -I, Sn - 1	---	---	8-10	6 - 8	68-76	3 - 5	روسيا	6
SiO ₂ , SiC, Al ₂ O ₃ , Si حتى 10	حتى 10	---	5-12	حتى 10	60-70	حتى 10	التشيك	7
Pb, SiO ₂ -5, Ti-2...10 حتى 20	---	حتى 20	---	5-15	50-80	حتى 20	أمريكا	8

9	روسيا	حتى 5	Ba I	1-9	6-10	0-6	—	Pb, SiO ₂ -5, Ti, V, Si, As - 2..10 حتى 10
---	-------	-------	---------	-----	------	-----	---	---

ومن الملاحظ في الجدول أن في تركيب المواد ذات القاعدة الحديدية من الضروري إضافة عنصر النحاس إليها لزيادة معامل الاحتكاك. غير أنه لا يوجد فقط المواد الاحتكاكية ذات القاعدة الحديدية، بل المواد الاحتكاكية ذات القاعدة النحاسية أو البرونزية مثل الخلائط التي تحتوي على النحاس و القصدير والرصاص والحديد والغرافيت، التي تمتلك معامل احتكاك يتراوح بين 0.16 - 0.32 واستقراراً جيداً له، ويهدف إدخال عنصر القصدير Sn إلى النحاس لتشكيل محلول جامد لعنصر القصدير في الهيكل الشبكي للنحاس يزيد من المتانة ويقلل الاهتراء. أما إضافة عنصر الحديد Fe فإنه يعمل على زيادة معامل الاحتكاك f، بينما إضافة الرصاص Pb والغرافيت C إلى الخليطة فإنهما يقومان بدور عمل المزيّنات الصلبة، كما يضاف أكسيد الألمنيوم أو أكسيد السليكون أو الأسبستوس لزيادة معامل الاحتكاك. وأحياناً تضاف بعض العناصر مثل التيتانيوم أو الفاناديوم أو الزرنيخ كبديل عن القصدير لمنع التآكل على حدود البلورات في الفولاذ.

٨-٢-٢ المواد الاحتكاكية المزيّنة (الاحتكاك - مزيّن):

تستخدم المواد ذات القاعدة النحاسية (برونز القصدير و برونز الألمنيوم) للعمل في ظروف الاحتكاك المزيّن لزوج الاحتكاك التي تكون فيها الحاضنة مصنّعة من الفولاذ، تستخدم هذه الخلائط في العقد الاحتكاكية عند الحمولات الثقيلة، وهي عبارة عن لبوسات مكابح الخدمة الشاقة heavy duty brake والقوابض clutches التي تتألف من نسيج معدني - النحاس والبرونز أو النحاس الأصفر كقاعدة - والتي تغمر وتضاف إليها ذرات من مادة سيراميكية مثل SiC وغيرها، ويوضح الجدول (٨-٦) التركيب الكيميائي لهذه المواد، أما برونز الألمنيوم فهو أرخص من برونز القصدير، وهو ذو ناقلية حرارية أعلى ومقاومة اهتراء أكبر.

ومن الخلطات ذات الانتشار الواسع التي تستخدم للاحتكاك الجاف والاحتكاك المزيت، هي المواد المحتوية على:

$C) (6-8) \% - Pb (7-9) \% - Sn (8-10) \% - Cu (68-76) \%$ ، و يكون لها معامل احتكاك عند التزييت في حدود $f = (0.04 - 0.07)$ ، ويصل الاهتراء فيها إلى $5 - 130) \mu m$ حسب ظروف العمل، ومن أجل زيادة معامل الاحتكاك يمكن إضافة مادة الأسبستوس أو البنتونيت أو أكسيد الألمنيوم أو أكسيد السليكون وغيرها من الإضافات الصلبة. ويتعلق معامل الاحتكاك للمواد المستخدمة في الاحتكاك المزيت بظروف عملها مثل (سرعة الانزلاق، كمية ونوع مادة التزييق) وبخصائصها الميكانيكية وبسطح طبقة الاحتكاك. ومن الطبيعي أن تعمل المواد التي تزيد من معامل الاحتكاك على توفير الاحتكاك الجيد بينما يعمل المعدن كالبوابة حرارية لتصرف الحرارة.

جدول (٨-١) التركيب الكيميائي لبعض خلطات المواد الاحتكاكية (الاحتكاك - مزيت)

N	بلد الصنع	المحتوى، %						الإضافات الأخرى
		Cu	Sn	غرافيت	Pb	SiO ₂	Fe	
1	روسيا	68-76	8-10	6-8	7-9	---	3-5	---
2	روسيا	73	9	4	---	---	6	بنتونيت - 2، أسبستوس - 2
3	أمريكا	برونز	73.8	3.5	---	9.7	10	SiC-3
4	ألمانيا	Bal.	4-8	25	---	---	5-15	Al ₂ O ₃ ، بافوت، أسبستوس - 5
5	بولونيا	60-75	5.8	4-7	0-10	3-4	7	Al ₂ O ₃ -3.4، أسبستوس - 3.4
6	روسيا	72	9	5	5-15	---	4	أسبستوس - 3

٨-٤-٢-٣ المواد الحاضنة للعقد الاحتكاكية:

يتعلق صمود وثبات عمل المساحيق المعدنية بالاختيار الصحيح للمواد الحاضنة للعقد الاحتكاكية. ومن المواد المستخدمة والأوسع الانتشار في هذا المجال هو الفولاذ الكربوني والفولاذ السبائكي المضاف إليه الكروم وحديد الزهر، وقليلاً ما يستخدم البرونز. إذ يستخدم الفولاذ في العقد الاحتكاكية التي تستخدم المواد الاحتكاكية ذات القاعدة النحاسية، أي في الأماكن ذات الأحمال الحرارية الصغيرة، التي يؤدي فيها ارتفاع درجة الحرارة إلى تشويه واعوجاج الأجزاء المستخدمة، و من ثم زيادة كمية الاهتراء. ولتحسين مقاومة الاهتراء يمكن استخدام الفولاذ ذي القساوة 40 - 50 HRC في العقد الاحتكاكية العاملة في ظروف الاحتكاك المزيّت. ومن الطبيعي زيادة محتوى الكربون حتى 0.65% - 0.50 للمواد الاحتكاكية ذات القاعدة البرونز عند العمل في العقد الاحتكاكية الفولاذية لزيادة معامل الاحتكاك. أما عند العمل في درجات الحرارة المرتفعة فلا بد من تعريض الفولاذ المستخدم في العقد الاحتكاكية إلى معالجة كيميائية-حرارية أو إلى طلاء محني انتشاري بالمواد صعبة الانصهار.

ومن الناحية الاقتصادية فيمكن استخدام العقد الاحتكاكية المصنعة من حديد الزهر ولا سيما حديد الزهر السبائكي أو حديد الزهر المرن ذي البنية الكروية للغرافيت لتمتعه بخواص ميكانيكية وتريبولوجية جيدة ولا سيما المتانة العالية ومعامل احتكاك مرتفع. ومن الأفضل استخدام عقد احتكاكية مصنعة بالكامل بأسلوب ميتالورجيا المساحيق أي تكون الحاضنة والقلب من المساحيق، كي نستطيع التحكم بالخواص المطلوبة، لإمكانية طرح منتجات ذات خواص مطلوبة من قبل المستهلكين مباشرة.

٨-٤-٢-٤ خصائص العناصر الداخلة في صناعة المواد الاحتكاكية:

تعتبر المواد الاحتكاكية من الخلطات غير المتجانسة heterogeneous في الخواص، لاحتوائها على عناصر معدنية وعناصر أخرى غير معدنية. وتعتبر المواد الاحتكاكية أيضاً من المواد المعاصرة، التي تنقسم إلى ثلاث مجموعات:

١- المجموعة الأولى وهي مجموعة العناصر الأساسية الداخلة في تركيب الخليطة مثل الحديد والنحاس، و يتعلق بها تشكيل الخواص الفيزيائية والميكانيكية بشكل مباشر.

٢- المجموعة الثانية: وهي مجموعة العناصر التي تؤدي وظيفة مادة التزبييت، والتي تضاف إلى الخليطة لمنع الالتصاق أو الاستعصاء وتقليل الاهتراء منها: المعادن السهلة الانصهار والغرافيت والسولفيديات ونتريد البورون.

٣- المجموعة الثالثة وهي مجموعة العناصر التي تؤدي وظيفة الإضافات الاحتكاكية، وذلك لزيادة مقاومة الاحتكاك من دون تشوه السطح وزيادة معامل الاحتكاك، وهي تختلف في خواصها عن العنصر الأساس الداخل في الخليطة في منع الالتصاق أو الاستعصاء بين زوج الاحتكاك. أما المتطلبات الأساسية من هذه المواد فهي:

(أ) يجب أن تؤدي الإضافات الاحتكاكية وظيفة تبليد أو ترطيب مادة الخليطة الأساسية أو تصنع معه قوة تماسك.

(ب) يجب أن يكون حجم الجزيئات المضافة مثالياً: دقيقاً (ناعماً) لتأمين الأداء الجيد قبل الانفصال عن المادة الحاضنة، وتأمين قدر كبير من التجانس بين البروزات والأسطح الاحتكاكية للحصول على مقاومة جيدة للاهتراء.

(ج) يجب أن تتمتع الإضافات الاحتكاكية بمتانة عالية أكبر من متانة المادة المحتكة كي لا تقوم المادة للمحتكة بدور حاك مما يؤدي إلى اهتراء حتى للمادة الحاضنة من دون انهيار المواد الاحتكاكية.

(د) يجب أن تتمتع مادة الإضافات بدرجة حرارة انصهار عالية، بحيث لا تتعرض للتحويل البوليمورفي (المتعدد الأشكال) Polymorphism عند تغير درجة الحرارة من درجة حرارة الغرفة إلى درجة حرارة التليد أو درجة حرارة التشغيل.

٨-٤-٢-٥ تدميج المواد الاحتكاكية:

تعتبر عملية التشكيل من العمليات الأساسية عند تحضير الأجزاء من المواد الاحتكاكية. إذ يتم الحصول على الأبعاد النهائية أثناء عملية التشكيل (الندمج)، التي تؤمن المتانة الميكانيكية المطلوبة للعمليات اللاحقة. ويستخدم لعملية الضغط نوعان من الخطأط: خليط يتم الحصول عليه بعد عملية المزج والتحييب مباشرة، بحيث تجري عملية التحييب عندما يُطلب تأمين سيوية عالية، ثم يتم تشكيل مجرى التزبييت أثناء

عملية ضغط بطانة الاحتكاك على القرص الفولاذي. ويستخدم لتجبيب الخليط محلول الغول (الكحول) البوليفينيلي بنسبة 10% في الماء، الذي يساعد في الحصول على خواص تكنولوجية جيدة ولا يؤثر في تركيب وخواص المدمجات. وبعد ذلك نقوم بمعادلة كمية الشحنة المطلوبة وزنياً أو حجمياً. ولكن يجب حساب كمية الشحنة المطلوبة قبل المعادلة بالعلاقة التالية:

$$G = V \cdot \gamma_c \cdot \theta \quad (5-8)$$

حيث إن:

V - حجم المشغولة، m^3 ، γ_c - الكثافة المكافئة للخليط المصمت، kg/m^3 ، θ - الكثافة النسبية للمشغولة الملبدة، %، ويستخدم لعملية الضغط قوالب تشكيل مصممة لهذا الغرض حسب شكل المشغولة، ومن الضروري هنا معرفة نسبة ارتفاع ملء القالب H إلى سماكة المدمج h الذي يسمى بمعامل ارتفاع الملء (التعبئة) K :

$$K = H / h \quad (6-8)$$

$$H = K \cdot h \quad (7-8)$$

$$K = \gamma_c / \gamma_a \quad (8-8)$$

حيث إن:

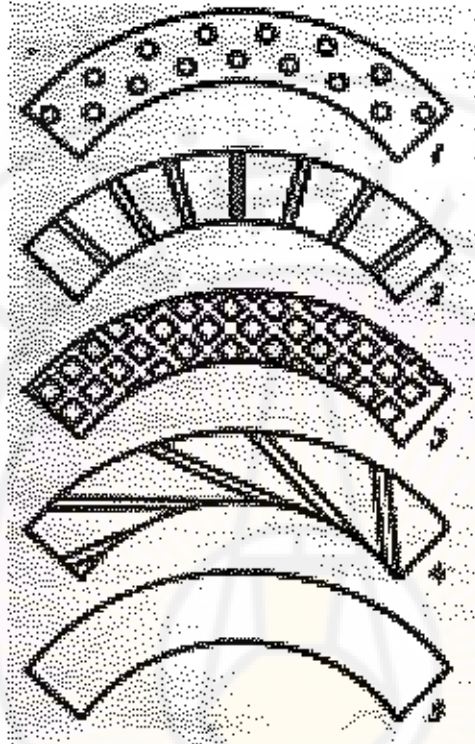
γ_a - الكثافة الظاهرية للخليط المسحوق (المسكوب)، g/cm^3 ، بينما γ_c - كثافة المدمج، g/cm^3 ، التي تحدد بالعلاقة التالية:

$$\gamma_c = (I - II) \cdot \gamma \quad (9-8)$$

حيث إن: γ - الكثافة الوسطية للخليط المعدني المصمت التي تحسب بالطريقة الجمعية بين العناصر الداخلة في الخلطة، g/cm^3 ، II - المسامية للمدمج. وعادة يكون معامل ارتفاع الملء (التعبئة) في حدود $3 \leq K \leq 5$. ويوجد عدة طرق لعملية التدميج والتشكيل:

- أ) ضغط البطانة الاحتكاكية ذات الشكل القرصي أو الكروي، التي لاحقاً تتوضع على الهيكل الفولاذي ثم نقوم بعملية التلييد.
- ب) ضغط البطانة القرصية الشكل أو الكروية مع تشكيل مجرى الزيت مباشرة عليها.
- ت) ضغط الطبقة الاحتكاكية السطحية من جهة أو من جهتين على الهيكل الفولاذي.

ث) ضغط المطبقة الاحتكاكية السطحية من جهة أو من جهتين مع تشكيل مجرى الزيت مباشرة عليها. ويوضح الشكل (٨-١٨) أنواع مجرى الزيت على الأقراص الاحتكاكية.



الشكل (٨-١٨) بعض أنواع مجرى الزيت على الأقراص الاحتكاكية ذات عزم احتكاكي قوي. (1 & 2) للجريان المتوسط، (3 & 4) للجريان العالي، (5) للجريان الضعيف

٨-٥ المواد الكهربائية **Electro technical materials**:

تنقسم إلى المواد الكهربائية جميع المواد الناقلة للكهرباء أو مواد أنصاف النواقل أو المواد المغناطيسية. والتي تستخدم على نطاق واسع في معظم الأجهزة والمعدات ذات الناقلة الكهربائية أو المغناطيسية سواء في المخططات الدائمة أم المؤقتة، أم في مواد التلامس الكهربائي أم الإلكترودات المستخدمة في عملية اللحام النثوني أم في

التشغيل الحثي، أم في عناصر أنصاف النواقل أم في وسائط التسخين للأفران وغيرها من الاستخدامات.

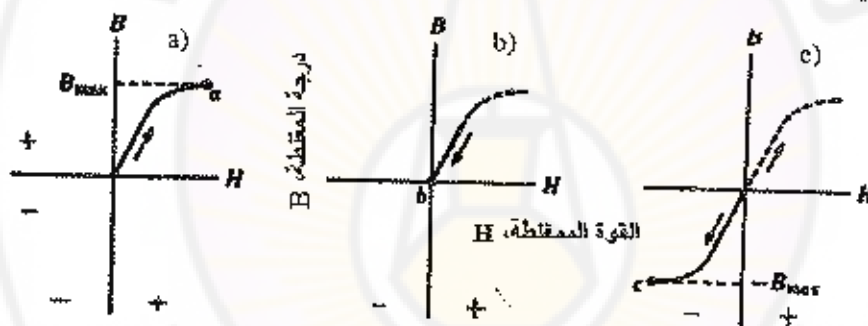
ومن المواد الشائعة الاستخدام والمصنعة بأسلوب ميتالورجيا المساحيق هي: المواد المغناطيسية ذات القاعدة المعدنية والمواد الفريتية، ومواد التلامس الكهربائي والإلكترونيات المصنعة من مساحيق المعادن الملونة، والمواد الصعبة الانصهار، ومواد أنصاف النواقل.

تستخدم المواد المغناطيسية بشكل كبير في الصناعات الكهربائية مثل: أجهزة القياس الكهرومغناطيسية، و أجهزة العلفانومتر، و العدادت، و أجهزة قياس السرعة ومخفضات السرعة، و أنابيب الأشعة الإلكترونية، و الأدوات الكهربائية، و الأجهزة الدقيقة، وغيرها... إلخ. ويمكن الحصول بواسطة أسلوب ميتالورجيا المساحيق على المغنطيسات اللينة وعلى المغنطيسات القاسية والمواد غير الناقلة للكهرباء والمواد الفريتية.... إلخ.

٨-٥-١ المغنطيسات اللينة Soft magnets:

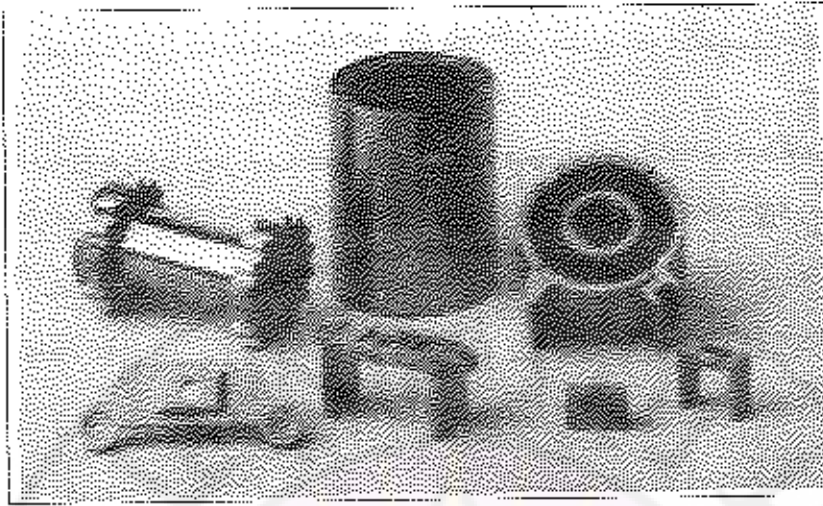
إن المسوّغ لصناعة المغنطيسات اللينة بواسطة ميتالورجيا المساحيق هو بصورة أساسية نفس التبرير الخاص بالأجزاء الإنشائية، ويعود بصورة رئيسية للحقيقة أن الأجزاء المختلفة يمكن كسها وتليدها للشكل والحجم المطلوبين مع فقدان في المادة الأساسية لا يتجاوز 5%، وهذه الميزة يمكن أن تكون أكبر فيما يتعلق بالمواد المغناطيسية، لأنها تكون بالغة اللبونة، وليس من السهل تشغيلها بصورة نظيفة. كما يمكن الإشارة إلى أن المغنطيسات التقليدية، تصنع من حزمة من صفائح (شرائح) المواد المصمتة، ولكن بسبب ظهور تيارات فوكو Fuccho والضياغ المغناطيسي الكبير. فإن عملية التصنيع تتطلب ورشة تصنيع كبيرة الحجم يعمل فيها متخصصون ذوو خبرات كبيرة في تصنيع وتجميع المغنطيسات. أضف إلى ذلك أن هناك فقداناً كبيراً في المادة الأساسية ناتجة عن عمليات التشغيل المختلفة التي تصل إلى (60 - 80)%.

وبالنظر إلى منحنى المغنطة (بين القوى المغنطة H ودرجة المغنطة B) شكل (٨-١٩) لمادة سهلة المغنطة نجد أنه بزيادة القوى المغنطة تزداد درجة المغنطة حتى حد معين لا تزداد بعده مهما ازدادت القوى المغنطة شكل (٨-١٩-أ) للمغناطيس الطري، وإذا رفعت القوى المغنطة تدريجياً شكل (٨-١٩-ب) نتج عن ذلك اضمحلال في درجة المغنطة حتى تصل إلى الصفر بزوال القوى المغنطة. وعند عكس القوى المغنطة فإنها تتجه نفس النهج السابق مع اختلاف في الاتجاه شكل (٨-١٩-ج) وهذه طبيعة المواد السهلة المغنطة (المغناطيس الطري) Soft magnet إذ إنها تطاوع المجال المغناطيسي الموجودة به دون أي تأخير Hysteresis وهذه المواد مناسبة في صناعة القلب الحديدي للمحولات الكهربائية التي تعتمد على تجميع على تجميع الخطوط المغناطيسية للمجالات المتغيرة، ومن ميزة هذه المواد أداء مهمتها دون مفاقد في الطاقة.



الشكل (٨-١٩) العلاقة بين القوى المغنطة H ودرجة المغنطة B في المغناطيس الطري وأكثر التركيبات شيوعاً هي: - الحديد الخالص. - الحديد مع إضافة السليكون بنسبة بحدود 3%. الحديد مع إضافة نحو 5% وفسفور، - سبيكة 50/50 نيكل/ حديد. - سبيكة (30 - 50)% كوبالت / حديد. - الحديد مع إضافة الألمنيوم بنسبة 12% والفسفور نحو 0,313%.

ويوضح الشكل (٨-٢٠) نماذج لبعض القطع المغناطيسية اللينة. بينما : ن الجدول (٨-٧) بعض الخواص المغناطيسية.



الشكل (٨-٢٠) بعض أجزاء المغناطيسات البنية

ويتم الحصول على أفضل الخواص المغناطيسية عندما يتم الإبقاء على مستوى الشوائب متدنياً، ولذلك السبب فقد استخدم مسحوق الحديد الكهروليتي بصورة مبدئية، إذ تصل نسبة الحديد إلى 99%. وعلى أية حال، فإن هذا المسحوق ياهض التكاليف، والآن مع توفر الأساليب الفنية فإن المسحوق المذرر الممتدني نسبة الشوائب الداخلية interstitial مثل الكربون والأكسجين والنيتروجين يمكن استخدامه مع النقص الطفيف في الأداء. فتتم إضافة السليكون على هيئة سليكون - حديدي بالغ النعومة في المسحوق، والفسفور كفسفور - حديدي. أما حديد النيكل فيكون على شكل مسحوق مذرر مسبق المسبك بصورة تامة. ويتم تدميج المسحوق في قوالب صلبة، أما عملية تلبيدها فتتم بنفس الطريقة المتبعة في إنتاج المركبات الإنشائية، ولكن درجات حرارة التلبيد تكون أعلى بكثير جداً من تلك المستخدمة في الأجزاء الإنشائية، مثلاً نحو 1300°C ، وغالباً ما يكون وسط التلبيد المستخدم هو الأمونيا أو الفراغ من أجل الحصول على تجانس تام للمركب.

أما الخواص المغناطيسية فيمكن الحصول عليها مع الكثافة العالية، أي إن للمسامية تأثيراً كبيراً في الخواص المغناطيسية، التي يجب أن لا تزيد على 2 - 3%. لأنه إذا

زادت المسامية على القيمة المطلوبة، فإن الخواص المغناطيسية للمواد المسحوقة تكون أدنى من الخواص المغناطيسية للمواد المصمتة. تستخدم المغنطيسات اللينة في النافلية المغناطيسية، وفي رؤوس الأقطاب المغناطيسية العاملة في الحقل المغناطيسي الدائم، وفي قلب المحول ذي الاستطاعة الصغيرة، وفي الهوائيات.

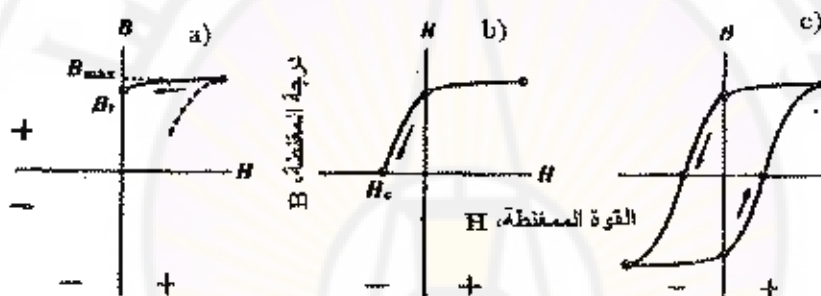
الجدول (٧-٨) الخواص المغناطيسية لبعض المغنطيسات اللينة

التركيب الكيميائي	الكثافة، $\gamma, g/cm^3$	الطاقة المغناطيسية المصاعدة، $(BH_{max}), kJ/m^3$	القوة للمغطة N, H kA/m	التأثير الكهرطيسي، B, T عند شدة المجال، $800, A/m$
99,95% Fe	7,2 - 7,5	26 - 63	56 - 96	1,25 - 1,40
Fe - 5%P	7,0 - 7,1	38 - 65	50 - 78	1,3 - 1,4
Fe - 3% Si	6,9	50 - 75	32 - 72	1,2 - 1,35
Fe - 6,5% Si	6,8	65 - 100	24 - 48	1,25 - 1,35
Fe - 50% Ni	7,7 - 8,1	32 - 58	52 - 90	1,38 - 1,54
Fe - 12% Al - 0,313 P	6,3 - 6,5	63 - 100	28 - 53	1,25 - 1,35

٨-٥-٢ المغنطيسات الدائمة Permanent magnets:

إن المغنطيسات الدائمة تمثل مجالاً من التكنولوجيا التي قد تطورت في الآونة الأخيرة بصورة أسرع وإلى مدى أبعد من غيرها في ميدان المواد، كما أن استخدام المغنطيسات قد اتسع وبصورة مذهلة. وعلى سبيل المثال لا الحصر، يوجد في كل بيت، في المتوسط، في الولايات المتحدة نحو 80 مغناطيساً، وعلى هذا فإن الأساليب الفنية للمسابح تأتي في مقدمة العديد من التطورات. ومن صفات المغنطيسات القاسية (المادة الأساسية في تصنيع المغنطيسات الدائمة) أنها تتمتع بقوة تحريضية كبيرة وتحريض متبقٍ يستعمل في تصنيع المغنطيسات الدائمة. وبالنظر إلى منحنى المغطة (بين القوى الممغطة II ودرجة المغطة B) شكل (٢١-٨) المغناطيس الدائم، فإن درجة المغطة تزداد بازدياد القوى الممغطة حتى حد التشبع B_{max} وإذا أزيلت القوى

الممغنطة تدريجياً حتى تصل إلى الصفر فإن درجة الممغنطة لا تتلاشى بل تبقى بعض المغناطيسية الباقية B_r ، ولإزالتها يجب تطبيق قوى مغناطيسية في الاتجاه المعاكس H_c حتى نقضي على المغناطيسية الباقية B_r ، وزيادة القوى الممغنطة في الاتجاه العكسي تصل المغناطيسية في الاتجاه العكسي الأول حتى حد التشبع B_{max} ، ومرة أخرى عند رفع القوى الممغنطة حتى الصفر تجد كذلك أن المغناطيسية تبقى بها الجزء B_r ، وللقضاء عليه يجب تطبيق قوى ممغنطة H_c ، أي إن عملية الممغنطة وفقدانها يصاحبها عملية التأخير Hysteresis الذي يصاحبه فقد في الطاقة ممثلاً بمساحة الحلقة التي يحصرها منحنى التأخير شكل (٨-٢١ c). والمواد التي لها هذه الخاصية لا تصلح للمحولات أو للمجالات المتغيرة، بل تصلح لصناعة الممغنطيسات الدائمة.



الشكل (٨-٢١) العلاقة بين القوى الممغنطة H ودرجة الممغنطة B في الممغنطيس الدائم وأول مادة مغناطيسية دائمة تم تسجيلها هي حجر المغناطيس Lodestone، وهو حديد مزدوج يتكون من $FeO - Fe_2O_3$ أو كم يطلق عليه الحديدوز (الحديد الفريثي) ferrous ferrite. ولقد كان حجر المغناطيس معروفاً منذ 3000 سنة. وفي خلال القرن الثامن عشر تم إنتاج الحديد المغناطيسي الصناعي في إنكلترا من برادة الحديد، فإذا تم مزج هذه المادة مع زيت بذر الكتان وتمت قولبته في الشكل المطلوب وبعد ذلك تم خبزه، فإنه يعطي ما وصف على أنه (ممغنطيسات بالغة القوة). ومما يدعو إلى الاهتمام، أن أسلوباً مشابهاً لذلك، ألا وهو تضمين حبيبات مغناطيسية قوية في نسيج عضوي organic matrix، قد احتل المقدمة في الأونة الأخيرة.

وعلى أية حال، فإن هناك تطوراً قد حصل في صناعة المغنطيسات الدائمة يرجع تاريخه إلى عام 1933م، وهو إنتاج ما يسمى مغنطيسات ألنيكو Alnico magnets ذات القاعدة الحديدية مع الألمنيوم والنيكل والكوبالت. وهناك عدة أصناف، يحتوي بعضها على النحاس. انظر الجدولين (8-8) و (8-9) اللذين يبينان التركيب الكيميائي والخواص للمواد المغناطيسية الدائمة ذات القاعدة الحديدية. وكانت هذه السبائك تصنع في أول الأمر عن طريق الصب، وما زال هذا متبعاً في معظم الأجزاء، ولكن هذه صلبة وبالأغة الهشاشة، ولذلك فإنها تحتاج إلى الطحن إلى حجم معين. وعلى هذا فإن أسلوب ميتالورجيا المساحيق بديل جذاب، إذ إن ملايين من مغنطيسات ألنيكو الملبدة يتم صنعها سنوياً، ومعظمها ذات أحجام صغيرة، والمكونات تطحن في مطاحن كروية ball mills، ويتم بعد ذلك تدميج الخليط وتليده في وسط من الهيدروجين الجاف عند درجة حرارة 1300°C أو أعلى.

وقد أدى البحث المتأني في أربعينيات القرن الماضي إلى الاهتمام بالمركبات الحديدية الفريتية ferrites، التي هي عبارة عن الأكاسيد المخلوطة وحديد الباريوم ذات الأساس $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ الذي يحتوي على 15% BaO و 85% Fe_2O_3 ، والتي تتمتع بمقاومة كهربائية كبيرة وبطاقة تحريضية مضاعفة (أو حاصل ضرب للطاقة $(BH)_{\text{max}}$ و تحسب من العلاقة التالية:

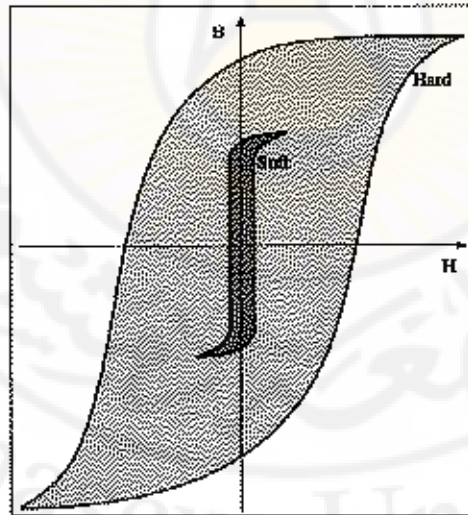
$$(BH)_{\text{max}} = B_r H_c / 4 \quad (10-8)$$

ومن أجل الحصول على الخواص المغناطيسية المطلوبة في المواد المغناطيسية القاسية يجب أن تكون ذات بنية غير متجانسة. تنقسم المواد الملبدة هذه إلى ثلاث مجموعات حسب التركيب:

- (١) المغنطيسات المكونة من الخلطات القاسية ذات النعومة العالية. مثال:
- $\text{Fe} - \text{Ni} - \text{Al} - \text{Co}$ وغيرها.
- (٢) المغنطيسات المكونة من مساحيق الحديد ومساحيق خلطات الكوبالت - الحديد الفائقة النعومة.

٢) المغنطيسات المكونة من مساحيق الخلائط ذات القاعدة الأرضية والعناصر النادرة. التي تشكل اتحاداً من النوع $RECo_5$ ، أما العناصر النادرة فهي: Ce, Y, La, Pr, Sm أو خلائطها.

وفي وقت لاحق حاز حديد السترونثيوم الفريت $strontium\ ferrite$ بسرعة حصة كبيرة في السوق تزيد على 50% حسب إحدى الإحصائيات. ويتم تصنيع هذه الأنواع بواسطة أسلوب ميتالورجيا المساحيق، وهي أرخص بكثير من مغنطيسات النيكو. وأحدث المغنطيسات المطورة التي تتمتع بأعلى طاقة متولدة BH_{max} هي أعلى بكثير من أي مادة أخرى، ويطلق على عليها اسم مغنطيسات كوبالت - والأكثرية النادرة $rare\text{-}earth\text{-}cobalt\ magnets$ وبشكل مختصر (RE-cobalt) وهذه الأكثرية النادرة عبارة عن أكاسيد لمجموعة العناصر المعدنية المستخدمة في صناعة هذه المغنطيسات. ولأن عناصر الأرض النادرة متماثلة جداً في تركيبها الكيميائي، فإنه ليس من السهل فصلها بعضها عن بعض، وكانت على مدى سنوات عديدة تقدم كمخلوط، يعرف بالاسم الألماني ميشميتال $Mischmetal$ ، إذ إنَّ العنصر الطاعني فيها هو السيريوم $cerium$. وفي الآونة الأخيرة أصبحت طرق فصلها بعضها عن بعض على نطاق تجاري متوافرة.



الشكل (٨-٢٢) مقارنة بين حجم وشكل الدورة التخلفية للمغنطيسات الصلبة واللينة

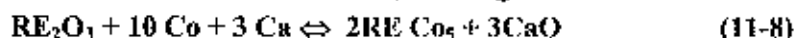
جدول (٨ - ٨) التركيب الكيميائي لبعض المغنطيسات الدائمة

التركيب الكيميائي، wt%						المادة
Fe	Pt	Al	Cu	Co	Ni	
Bal.	--	12 - 13,5	--	0 - 4	23 - 25	ألني
Bal.	--	8 - 10	0 - 4	3 - 13	17 - 24	ألنيكو
--	--	--	35	41	24	كوبالكو
Bal.	.....	8	3 - 4	23 - 24	13,5-18	مغنطيكو
--	18 - 22	.....		balance	---	كوباليت - بلاكين

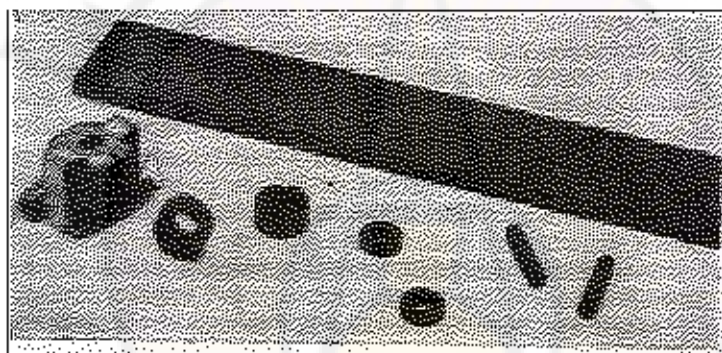
جدول (٩ - ٨) بعض خواص المغنطيسات الدائمة

الطاقة المغناطيسية المضاعفة (BH _{max}), kJ/m ³	القوة المغنطة H _c (kA/m) توتن	التحريض المثلي، T H _i , T	المادة
1	--	--	حجر المغناطيس lodestone
10 - 30	24 - 40	0,55 - 0,65	Alni
30 - 50	44 - 45	0,60 - 0,65	Alnico
160 - 180	120 - 140	0,60 - 0,75	Cunico
100 - 140	56 - 62	2,7 - 2,8	Cobalt-Platine
حتى 30	20 - 40	0,50 - 0,60	الحديد الفريتى Ferrites
حتى 250	72	0,92	الأثرية النادرة - RE cobalt

أما أسلوب التصنيع لهذه المغنطيسات فيتم باختزال الأتربة النادرة المخلوطة إما مع مسحوق الكوبالت و إما أكسيده مع الكالسيوم:



ويتم تصفية وإخراج Leached - out الكالسيوم وأكسيد الكالسيوم الزائد، تاركين خلطة الكوبالت - والأتربة النادرة كمسحوق. ويتم عندئذٍ تدميج هذا الخليط إذ تنتظم aligned هذه الحبيبات في حقل مغناطيسي، ثم يتم تدميجها ومعالجته حرارياً. وهناك بديل آخر، وهو القيام بغولبة المسحوق المخلوط مع الراتنجات الحرارية thermo-setting resin (أي التي تتصلد بالسخن) حسب الشكل المطلوب في حقل مغناطيسي، وبعد ذلك تسخن ليتم تجفيف وتصليد الراتنج.



الشكل (٨-٢٠) بعض أجزاء المغنطيسات الصلبة من الحديد الفريت

وأحد المعالم البارزة على طول الطريق قد تم الوصول إليه بواسطة مركبات السماريوم - والكوبالت Sm_2Co و SmCo_5 . وهذه عبارة عن مركبات معدنية متخلطة تبدي خواص مغناطيسية في الاتجاهات المختلفة anisotropy بصورة استثنائية رائعة، وإذا ما انتظمت بصورة متنامية، فإنها تعطي أعلى منتج طاقة لكل وحدة كتلة من أية مادة مغناطيسية دائمة معروفة - تقريباً خمسة أضعاف ما تعطيه مادة أليكو. ومع ذلك فقد تم تحقيق أعلى طاقة مضاعفة BH_{max} بالسبائك المحتوية على النيوديموم والحديد والكربون Fe-C-Nd . وعلى أثر تطور الأساليب العملية

بصورة تجارية لفصل الأتربة النادرة، فقد بذلت جهود وأبحاث مكثفة، خاصة في اليابان، أدت إلى تسجيل عدد كبير جداً من براءات الاختراعات، أكثر من 700 براءة اختراع مسجلة، تدعي ميزات خاصة في استخدام معادن الأتربة النادرة المستنقاة. وبما أن هناك عشرة من هذه الأنواع، فإن التوليفات والبدائل هائلة، ويكاد يكون من المؤكد أن نهاية الخط لم يتم الوصول إليها بعد.

ولقد كانت الزيادة الهائلة في القوة المغناطيسية الناجمة عن تطوير مغنطيسات معادن الأتربة النادرة عاملاً مهماً في جعل المعدات الكهربائية بالغة الدقة وتصغيرها إلى أبعد الحدود، كما فتحت الباب على مصراعيه لمجموعة من الاستخدامات بالغة الحداثة للمغنطيسات الدائمة.

وبما أن المغنطيسات الدائمة تتمتع بقوة مغناطيسية كبيرة وبتأثير كهربيسي متبقي، فإن مجال استخدامها واسع للغاية وخاصة: في أجهزة القياس الكهربائية، وفي العدادات، وفي الأسيلوغرافيا (رأسم التنبؤات)، وفي أجهزة التلفون، وفي المولدات الكهربائية، وفي القوابض المغناطيسية، وفي مكبرات الصوت، وفي الأجهزة الإلكترونية، وفي الأدوات الطبية، وفي البوصلات، إلخ...

٨-٥-٣ المواد المغناطيسية العازلة للكهرباء Dielectric:

وهي عبارة عن مزيج من المواد الفرومغناطيسية اللينة ومساحيق المواد القاسية (الدائمة) مع المواد العازلة للكهرباء كالزجاج المسائل أو الباكليت (الراتنج الصناعي) أو البوليستر وغيرها من الراتنجات. تتكون بنية هذه المواد من الجزيئات الفرومغناطيسية محاطة بالمادة العازلة للكهرباء. ومن خصائص هذه المواد:

i. الإنفاذية المغناطيسية الدائمة،

ii. المقاومة الكهربائية النوعية الكبيرة،

iii. الضياعات المنخفضة لتيارات فوكو الإعصارية و التخلّف المغناطيسي.

تستخدم المواد المغناطيسية العازلة في الصناعات الإلكترونية و الاتصالات اللاسلكية وفي صناعة محولات الترددات العالية، وفي الأجهزة الراديوية.. إلخ. أما طريقة تصنيع هذه القطع فيتم بأسلوب ميتالورجيا المساحيق عن طريق تسلسل العمليات

التالية: مزج المركبات الأساسية في الخلطات السيراميكية ذات الكريات السيراميكية أيضاً خلال 4 ساعات - التميع بالضغط يتراوح بين 200 - 2000 MPa - التلدين في وسط من الهيدروجين، و. من خلالها تزداد الإنفاذية المغناطيسية وملء المسامات بالراتنج - ثم التليد، بحيث تكون هذه المنتجات نهائية و لا تحتاج إلى أي عملية تشغيل إضافية أو معالجة حرارية. كما يمكن تصنيع مواد نصف مصنعة كصناعة الشرائط (الشرائح) المعدنية أو القضبان المستخدمة أجزاء معينة. وتكون مواد الأساس عبارة عن مساحيق خليطة الألنيوم والمادة الرابطة عبارة عن الراتنج الإيبوكسي، بحيث لا تزيد نسبتها على 25%، وبشكل أقل تستخدم المواد ذات القاعدة بيرمالوي والحديد الكربونيلي. والجدول (٨-١٠) يبين بعض خواص المواد المغناطيسية العازلة للكهرباء.

الجدول (٨-١٠) خواص بعض المواد المغناطيسية العازلة للكهرباء

المواد القرومغناطيسية		المؤشر
المغناطيسات اللينة (بيرمالوي)	المغناطيسات القاسية (التنيوم)	
-----	3800 - 4200	الطاقة للمغناطيسية للمصانعة (BH _{max}), kJ/m ³
81 85	46 47	القوة التحريضية للمغناطيسية (kA/m), N
1,40 - 1,42	0,58 - 0,59	التأثير الكهرومغناطيسي، مملاً، T عند شدة المجال، 800 A/m

٨-٥-٤ مواد التلامس الكهربائي Electrical contact materials:

تقوم معظم هذه المركبات على معدن ذي توصيل كهربائي عال جداً، وعادة تكون من الفضة أو النحاس. وبسبب كون هذه المواد لينة، وذات نقاط انصهار متدنية نوعاً ما ولا تشكل أكاسيد ثابتة جداً، فإنها تميل إلى الالتحام بعضها مع بعض بصورة فورية أثناء الاستخدام كملامسات وصل وقطع. أما إذا خلطت هذه المواد مع مواد مقاومة جيدة لحدوث القوس الكهربائي وللالتحام، فإننا نحصل على حلول أفضل. ومن بين

المواد المستخدمة هناك بعض الأكاسيد المعدنية وخاصة الكاديوم والقصدير، إلا أن الكاديوم لا يحظى بالقبول بسبب الأضرار الصحية المحتملة. كما يستخدم النيكل المعدني مع الفضة فقط و التتغستين أو المولبدنيوم بالإضافة إلى كربيداتها عبارة عن أقواس كهربائية شائعة الاستخدام. و تحضر مساحيق مواد التلامس الكهربائي بأحد الأسلوبين:

الأسلوب الأول: يمكن تصنيعها عن طريق مزج المكونات على شكل مساحيق بالتدريج بالضغط ومن ثم التليد خلال 3 - 4 h عند درجة حرارة مختلفة تتعلق بالتركيب الكيميائي؛ فمثلاً الملامسات ذات التركيب $Ag - W$ تتم عند درجة حرارة $1273^{\circ}K$ ، $Cu - W$ تتم عند $1373^{\circ}K$ ، $Ag - CdO$ ، $Ag - CuO$ ، $Ag - Ni$ تتم عند $1223^{\circ}K$ - $1173^{\circ}K$. ثم تعرض هذه المواد لضغط إضافي. وبما أن مادة الالتحام غير قابلة للانحلال في المعدن الأساس فإن خاصية التوصيل الكهربائي تبقى سليمة، ولكن يجب الإشارة إلى أن خاصية التوصيل الكهربائي للمركب المنتج تكون أقل من المعدن النقي.

أما الأسلوب الثاني: تحضر مواد التلامس من مركب واحد من مادة مقاومة للانصهار مثل التتغستين المولبدنيوم ثم يشرّب بمعدن منصهر بعد عملية التدريج بالضغط والتليد، أي نقوم بعملية تشريب أو تغلغل infiltration للمسام بالفضة المنصهرة أو بالنحاس، وهذا الأسلوب يؤدي إلى الحصول على خاصية توصيل كهربائي لا تختلف عن المعدن النقي. وحسب ظروف عمل هذه المواد يمكن تقسيمها إلى أربع مجموعات من مواد التلامس:

1. من أجل التيارات الكهربائية الضعيفة (ميلي أمبير)، المستخدمة في قطاع الاتصالات وفي الأجهزة اللاسلكية وغيرها.
2. من أجل فصل الدارة الكهربائية ذات التيار المستمر أو المتناوب حتى 15A.
3. للدارات الكهربائية ذات شدة تيار حتى 100 A و جهد يصل إلى 440 volt لإطفاء القوس.
4. الفواصل الهوائية أو الزيتية مخصصة للاستطاعة الكبيرة.

يجب أن تتصف مواد التلامس الكهربائي بالخصائص التالية:

- (أ) ذات ناقلية كهربائية وحرارية كبيرتين.
- (ب) ذات مقاومة انصهار ومقاومة تآكل واهتراء.
- (ت) ذات متانة ميكانيكية كبيرة عند درجة حرارة مختلفة.
- (ث) ذات تشغيل جيد.
- (ج) ذات استقرار كبير في التحات الكهربائي.
- (ح) ذات ثبات أثناء التلامس. ويبين الجدول (٨-١١) شدة التيار الحرج عند تشكيل القوس الكهربائي لبعض المواد.

وتقسم مساحيق مواد التلامس الكهربائي إلى ثلاث مجموعات:

- (١) المعادن والخلائط سهلة الانصهار ذات ناقلية كهربائية وحرارية كبيرتين.
- (٢) المعادن صعبة الانصهار Refractory materials ذات مقاومة تحات كبير.
- (٣) المعادن والاتحادات المدعمة بمواد تحسين التلامس الكهربائي.

الجدول (٨-١١) الشدة الحرجة للتيار (A) و الاهتراء عند تشكيل القوس لبعض المواد

المادة	الجهة الكهربائي				الاهتراء $\Delta m, mg/cm^2$
	25	50	110	220	
الغرافيت	---	5	0,7	0,1	0,0013
موليدنيوم	18	3	2,0	1,0	0,010
التانتالين	12,5	4	1,8	1,4	0,070
النيكل	---	1,2	1,0	0,7	0,020
الرماس	7,5	3	0,85	0,7	---
النحاس	---	1,3	0,90	0,5	0,045
الفضة	1,7	1,0	0,60	0,25	0,170
البرونز	---	0,7	0,4	0,3	---
الذهب	1,7	1,5	0,5	0,5	---
البلاتين	4,0	2,0	1,0	0,5	0,0130
البلاديوم	3,5	1,5	1,0	0,5	---
الحديد	---	1,5	1,0	0,5	---

٨-٦ المواد الحرارية Refractory materials:

وهي المواد التي تتحمل درجات الحرارة العالية عند العمل في ظروف الإجهادات الميكانيكية ودرجات الحرارة تتراوح بين 2000°C - 200°C ، وتختلف خواص هذه المواد باختلاف درجات الحرارة التي تعمل عندها. ومن المتطلبات الأساسية لهذه المواد العاملة في الوحدة الكهروحرارية للطائرات والصواريخ هي المتانة عند درجات الحرارة المرتفعة. و يجب أن تتمتع هذه المواد بـ:

- ١) تحمل درجات الحرارة المطلوبة.
 - ٢) المتانة العالية والمستقرة.
 - ٣) الاستقرار العالي ضد الصدمات الحرارية.
 - ٤) ناقلية حرارية لا تقل عن $17,3 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{K}$.
 - ٥) مقاومة عالية للتآكل والتحات.
 - ٦) سهولة التشغيل الميكانيكي والحراري دون التأثير في المتانة أو إضعافها.
- وتصنع هذه المواد من المعادن المقاومة للصدأ مثل التيتانيوم و المولبدنيوم و التيتانيوم والزركونيوم أو من خلاصاتها. ولتحديد خصائص المواد الحرارية هناك عاملان أساسيان:

١- حد الزحف: يفهم من حد الزحف هو الإجهاد الذي يؤدي إلى الانفعال عند درجة حرارة معينة وزمن اختبار معين، وتعطى بالمصطلح التالي: σ_{t/t_c} حيث: t - درجة حرارة الاختبار $^{\circ}\text{C}$ ، t_c - الاستطالة النسبية المحددة، %، τ - زمن الاختبار h . مثال: $\sigma_{0,5/100}^{700}$ - فهذا يعني أن الإجهاد الذي يؤدي إلى انفعال مقداره 0,5% خلال 100 ساعة، عند درجة حرارة مقدارها 700°C . ويعبر عن حد الزحف أيضاً بالسرعة ودرجة الحرارة التي تؤدي إلى الانفعال اللدن، وفي هذه الحالة يعبر عنها بالمصطلح التالي: σ_v^t - درجة حرارة التجربة $^{\circ}\text{C}$ ، v - سرعة الانفعال (% / h). مثال: $\sigma_{5.10^{-5}}^{600}$ - فهذا يعني أن الإجهاد الذي يؤدي إلى انفعال المادة بسرعة 5.10⁻⁵ % / h تكون عند درجة حرارة 600°C .

٢- حد المتانة: وهو عبارة عن المتانة الحديدية التي تتحملها المادة من دون الانهيار عند درجة حرارة وزمن اختبار. ويعبر عنه σ_t : (t- درجة حرارة الاختبار °C، τ - زمن الاختبار h)، مثال: σ_{100}^{700} - وهو عبارة عن الإجهاد الذي تتحملها المادة عند درجة الحرارة 700°C خلال 100 h من دون انهيار.

غير أن هذه الخصائص (σ_v , $\sigma_{1/2}$, σ_t) ليست دائماً كافية لتحديد مقاومة الحرارة للمادة. وغالباً ما تستخدم خصائص إضافية مثل مقاومة التآكل ومقاومة التآكل والصمود الحراري. ولمقارنة الصمود الحراري بين المواد المختلفة تستخدم النسبة بين درجة الحرارة العاملة إلى درجة حرارة الانصهار للخلات أو للمادة الأساس، التي تتراوح بين 0,9 0,5 انظر الجدول (٨-١٢).

الجدول (٨-١٢) درجة الحرارة العاملة للمواد الحرارية

الخلات الحرارية ذات الأساس	درجة حرارة انصهار الأساس °C	درجة الحرارة °C	النسبة بين درجة الحرارة العاملة
مفلزيوم	650	100 - 350	0,4 - 0,68
المنبروم	660	150 - 350	0,45 - 0,67
SAP	660	350 - 500	0,53 - 0,80
نيكايوم	1670	450 - 550	0,37 - 0,42
دجاس	1083	450 - 600	0,53 - 0,64
النيولاد القوي	1539	550 - 650	0,45 - 0,51
النيولاد الأوستيني	1539	650 - 850	0,51 - 0,62
الكوبالت	1495	800 - 900	0,60 - 0,69
النيكل	1455	850 - 1030	0,65 - 0,75
الكروم	1875	700 - 1150	0,45 - 0,66
النيوبيوم	2468	1100 - 1300	0,50 - 0,58
التيتانيوم	3000	1300 - 1650	0,48 - 0,59
التنتالوم	3380	1650 - 2200	0,53 - 0,68

تستخدم المواد الحرارية على نطاق واسع في الصناعة عند تصنيع الأجزاء والميكانيزمات العاملة تحت حمولة أو إجهاد عند درجات الحرارة المرتفعة، مثل مراحل البخار والعنفات الغازية ومحركات الاحتراق الداخلي. أما المواد الحرارية

الحديثة فهي عبارة عن مركبات متعددة، التي يمكن أن تتعرض لمختلف أنواع التشغيل أو المعالجة بهدف تحسين الخواص عند درجات الحرارة المرتفعة. ويمكن تقسيم المواد المقاومة للحرارة حسب تركيبها إلى: (١) مواد معدنية، (٢) مواد ذات القاعدة الفولاذية، (٣) مواد ذات قاعدة من مركبات مقاومة للانصهار، (٤) سراميت.

٨-٦-١ خصائص المواد الأساسية الداخلة في صناعة المواد الحرارية:

تستخدم مساحيق المعادن والسبائك والفولاذ السبائكي وكذلك خلطاتها المحضرة بطريقة التذير بالغاز أو التذير بواسطة الإلكترون الدوار في تصنيع المواد الحرارية. تتناقص المقاومة الحرارية للمساحيق المستخدمة عند وجود الشوائب فيها، لذلك من الضروري إجراء عملية تنقية من الشوائب، و نقوم بإسخال خليط إلى المزيج مثل خلطة الحديد إلى بعض المواد التي لديها ألفة للأكسجين. يستخدم في تحضير المواد الحرارية:

١- مساحيق خليطة الألمنيوم - منغنيز ، أو مساحيق خليطة الألمنيوم - تيتانيوم المحضرة بطريقة التذير بواسطة غاز الأزوت.

٢- مساحيق خلطة الفولاذ عالي السبائكية ذات الأساس الحديد المحضرة بطريقة الاختزال بواسطة هيدريد الكالسيوم. والعناصر السبائكية الأساسية في هذه الخلطة هي النيكل الذي يضاف بنسبة $Ni (20 - 1,5\%)$ والكروم بنسبة $Cr (32 - 16\%)$.

٣- مساحيق خلطة الكروم التي يحصل عليها بطريقة التذير بواسطة الإلكترون الدوار أو التذير بالبلازما.

و يتم مزج المساحيق في الخلطات المخروطة أو خلطات ذات الشكل V خلال 4 - 24 h وذلك حسب تركيب الخليط. وندمج في قالب مصنوعة من الفولاذ عند ضغط $600 - 700 \text{ MPa}$ ثم تليد عند درجة حرارة $1200 - 1300^\circ\text{C}$ في الفراغ أي إن الوسط يكون مخللاً من الهواء عند ضغط يتراوح بين $10 - 1 \text{ MPa}$ خلال زمن يتراوح بين 20 - 3 h. يؤثر زمن الثبات الحراري في خواص الخلطة وخاصة تجانس الخليط والكثافة. وبعد عملية التليد تعرض الملبدات إلى عملية ضغط إضافي

أو معالجة حرارية مثل التفسيرية عند درجة حرارة $1200^{\circ}\text{C} - 1150^{\circ}\text{C}$ ووسط التبريد يكون إما الماء و إما الهواء، ثم نقوم بعملية تعتيق، ثم تعرض لعملية التعتيق في الفرن لمدة 6 - 12 h عند درجة حرارة $950^{\circ}\text{C} - 900^{\circ}\text{C}$. تتم عملية التفسيرية والتعتيق في وسط خامل بهدف منع السطح في خلاط الألمنيوم والتيتانيوم من الحصول على الطور $\gamma' (\text{Al}, \text{Ti})$ أثناء التفسيرية، لأن الطور $\gamma' (\text{Al}, \text{Ti})$ المتشكل على السطح هو طور قاسي جداً.

وتستخدم في الحصول على منتجات مقاومة للحرارة لخلائط النيكل طرائق التدميج ذات الطاقة العالية للتشكيل مثل التدميج الديناميكي على الساخن أو التشكيل على الساخن بالبتق بحيث يتم دمج عمليتي التدميج و التليد بعضهما مع بعض. يتم سكب المساحيق الأساسية في حاوية مصنعة من الفولاذ وتعرض للاهتزاز حتى الوصول إلى كثافة نسبية $65\% - 70\%$ ثم يسحب الهواء من الحاوية وتغلق بشكل جيد ثم تعرض لأحد أنواع التدميج على الساخن المذكورة أعلاه.

ويمكن الحصول على مدمجات من خلاط التيتانيوم بطرائق مشابهة لطريقة الحصول على المدمجات من خلاط النيكل مع اختلاف بسيط. حيث إن ضغط التدميج المثالي يتراوح 800 MPa alloys -، أما عملية التليد فتتم في جو من الفراغ عند ضغط خلخلة $0.1 - 1 \text{ MPa}$ ودرجة حرارة $1250 - 1300^{\circ}\text{C}$ خلال زمن 4 - 6 h. وتعرض كل المدمجات المصنعة من خلاط التيتانيوم إلى عمليات لاحقة كالحدادة على البارد أو على الساخن، إذ تصل نسبة التشكيل إلى 35% عند الحدادة على البارد وتصل نسبة التشكيل إلى 80% عند الحدادة على الساخن عند درجة حرارة 1200°C .

٨ - ٦ - ٢ السبائك الفائقة Supper alloys :

تؤلف هذه السبائك عائلة من السبائك المصممة بصورة محددة لتطبيقات محامل الأحمال عند درجات حرارة مرتفعة، وهي أكثر شيوعاً في القسم الساخن من التوربينات الغازية وبصورة خاصة في محركات الطائرات. وفي التطوير هذه السبائك الفائقة من السبائك المشهورة المصنوعة من 80% نيكل و 10% كروم، و

يشار إليها بصورة شائعة باسم (نيكروم). وكانت هذه السبيكة لوقت طويل تستخدم في درجات الحرارة المرتفعة، مثل صناعة السيور الشبكية السلكية في أفران التليد وفي اللحام بالنحاس الأصفر. وفي أفران المعالجة الحرارية وفي الأدوات الكهربائية المنزلية. ومع تطور المحركات النفاثة فإن الطلب على منتجات مقاومة للحرارة المرتفعة تزايد بصورة تصاعدية مما شجع العلماء على البحث في تحسين خواص هذه الخلطات.

وقد تم الوصول إلى الخواص المحسنة بصورة رئيسية عن طريق إضافة نسبة مئوية صغيرة من الألمنيوم و التيتانيوم إلى هذه الخلطة، الأمر الذي أكسبها تقسية بالترسيب بواسطة تشكل مركبات معدنية متداخلة أو مختلطة وخاصة مع إضافة بعض العناصر الأخرى مثل المولبدنيوم والتنجستين واستبدال قسم من محتوى النيكل في السبيكة بعنصر الكوبالت لقليل التكلفة لارتفاع ثمن عنصر النيكل.

وتستخدم عادة في عملية إنتاج هذه المركبات مساحيق كروية الشكل، لأنها تتمتع بأعلى كثافة رص. ويستخدم في إنتاج هذه المساحيق إما التذير بواسطة غاز الأرجون و إما التذير بقوة الطرد المركزي بواسطة الإلكترود الدوار، إلا أنه من عيوب طريقة التذير بواسطة غاز الأرجون قد يشكل فقاعات داخل الحبيبات مما يؤدي إلى وجود انقطاعات صغيرة داخل المنتج عند تشكيل المدمج. وقد تم تجنب هذه المشكلة إلى حد بعيد باستبدال التذير بالغاز بالتذير بقوة الطرد المركزي عن طريق الإلكترود الدوار الذي قد ينصهر لدى اقترابه من الفراغ بواسطة حزمة إلكترونية أو بواسطة قوس البلازما، ولكن يجب اتخاذ الأسلوب العادي المتبع وهو القيام بتعبئة هذه المساحيق في أوعية مفرغة من الغاز يتم سدها بإحكام .

وبعد ذلك يتم القيام بكبسها تحت تأثير ضغوط متعاقبة من جميع الجهات على الساخن ومن ثم تنقل إلى عملية التشكيل بالثق على الساخن أو التدميج بالطرق التقليدية، إذ يتم تدميج هذه المنتجات عند ضغط $400 - 600 \text{ MPa}$ وتليدها عند درجة حرارة $1300 - 1450^\circ\text{C}$ في وسط من الهيدروجين. ومن ميزات هذه المنتجات أنها تستطيع مقاومة التآكل الغازي حتى درجة حرارة 1250°C لتشكيل طبقة من أكسيد الكروم

المستقر، ولكن من عيوب هذه المنتجات هو الهشاشة بسبب وجود الشوائب مثل الأكسجين والأزوت، لذلك الهدف الرئيسي هو زيادة اللدونة عن طريق الحصول على مساحيق دقيقة وخالية من الشوائب المذكورة.

٨-٧ المواد والسبائك ذات لاستعمالات الخاصة:

وهي كثيرة ومتنوعة، منها: عناصر الوقود في المفاعلات الذرية التي أساسها أكسيد اليورانيوم، ومبائنك البيريليوم المستخدمة في الصناعات الفضائية، وخلات بعض المواد المستخدمة في طب الأسنان، وغيرها.

٨-٧-١ المواد المستخدمة في المفاعلات الذرية:

يعتبر المفاعل الذري مولدًا للطاقة بشكل أساسي بمساعدة المعدات التي تعمل في المحطات الذرية، ويتألف من الأجزاء الرئيسية التالية:

١. المنطقة النشطة بما فيها العناصر الباعثة (المولدة) للحرارة والأنيبيب ذات دائرة نقل الحرارة، ويتطلب من أجل تحضير العناصر الباعثة للحرارة المواد التالية:

(أ) الوقود النووي المحتوي على النشطة لتشتيتها - U^{235} ، وكذلك U^{233} و Pu^{239} الناتجة في المفاعلات الذرية - اللازم لدائرة تفاعلات الانشطار للنظائر المشار إليها.
(ب) الوقود النووي لـ - U^{238} و Th^{232} - الذي يسمح باستعاضة واستكمال التفاعل لـ - Pu^{239} و U^{233} ...

(ت) منطقة نشطة من أجل المواد غير المنشطرة لأغلفة العناصر الباعثة للحرارة.

٢. امتصاص العناصر لتنظيم الاستطاعة و الأمان في المفاعل الذري.

٣. مبطئ لتخفيض سرعة انشطار النيوترونات بهدف زيادة سطح الانكسار للوقود النووي.

٤. عاكس النيوترونات خارج المنطقة النشطة لتشتيتها و تحويلها مرة ثانية إلى المنطقة النشطة.

٥. الحماية البيولوجية للمفاعل من أجل وقاية العاملين من الإشعاع.

وبين الشكل (٨-٢١) الرسم التخطيطي لأكثر المفاعلات الذرية شيوعاً، ويمكن تقسيم العناصر الباعثة (المولدة) للحرارة إلى الأنواع التالية: ذات الأساس وقود معدني (يورانيوم، بلوتونيوم، ثوريوم أو خلانطها)، ووقود سيراميكي (أكاسيد أو اتحادات بدون الأكسجين لليورانيوم أو البلوتونيوم)، أو وقود مشتمل وفيها يتوزع الوقود السيراميكي في المواد ذات القاعدة الإنشائية. ومن أجل تحضير الوقود المعدني للعناصر الباعثة (المولدة) للحرارة يستخدم اليورانيوم المحضر على شكل مسحوق بالطرائق المختلفة، كما هو موضح في الجدول (٨-١٣).

إن الحصول على معدن اليورانيوم أو الثوريوم على شكل مسحوق يتبعه ضغط وتلييد للقلب يسمح بتشكيل حبيبات ناعمة ذات بنية شبه نظائرية، تؤمن استقرار الأبعاد تحت تأثير الإشعاع في المنطقة النشطة. ويتم نظام التلييد في وسط مفرغ من الهواء عند درجة حرارة 1100°C و زمن ساعتين.

جدول (٨-١٣) طرائق تحضير الوقود المعدني

طريقة التحضير	مركبات اليورانيوم	صنوبر (الافترال)	$t, ^{\circ}\text{C}$	P, MPa	نوع المنتج
اختزال:		C	2000	0,1	U + UC
- ولكربون +	$\text{UO}_2, \text{U}_3\text{O}_8$	Mg	1250 - 1300	0,1	مسحوق
الحرارة	UO_2	Ca	1300	0,1	.....
	UO_3	Ca(H)_2	970	0,1	.....
- بالمعادن +	$\text{U}_3\text{O}_8, \text{UO}_2$	Na	2000	0,1	مصبوبة
الحرارة	$\text{UF}_6, \text{UCl}_2$	Ca	2200	0,1	.....
		Mg	1800	0,1	.....
تحليل كهربائي للمصهور	$\text{UCl}_3, \text{KUF}_5, \text{UF}_4$	.....	400 - 1200	....	مسحوق

٨-٧-٢ مواد امتصاص العناصر في المفاعلات الذرية:

تعتبر المواد المحتوية على الكاديوم أو الغافنيوم أو الفضة من المواد المنظمة في المفاعل الذري، التي تتمتع بخاصية النقاط النيترونيات الحرارية لنظائر البورون و الغادولينيوم و الأورونيوم و السماريوم.

يستخدم نظير البورون B^{10} على شكل اتحاد لـ كربيد البورون B_4C أو بوريدات العناصر الانتقالية. تحضر هذه الاتحادات أو الخلائط ذات القاعدة البورون بطريقة الكبس على الساخن للحصول على مدمجات على شكل أقراص كما هو مبين في الجدول (٨-١٤).

جدول (٨-١٤) نظام تدميج الأقراص على الساخن لبعض البوريدات في الخلاء

المركب	$t, ^\circ C$	P, MPa	τ, min	$\theta, \%$
B	2130	21,1	30	99
TiB ₂	2230	19,9	60	94 - 99
VB ₂	2130	21,6	40	92 - 94
HfB ₂	2230	12,3	45	88 - 94
ZrB ₂	2230	16,6	90	90 - 99,5
B ₄ C	2230	18,2	60	88 - 100
YB ₄	1930	20,7	50	95 - 100
DyB ₄	1930	20,6	20	90 - 95
YB ₆	2230	15,7	60	93 - 98
EuB ₆	2230	25,2	90	87 - 97
SmB ₆	2230	22,7	60	90 - 96
CaB ₆	2230	13,2	35	94 - 98
DyB ₄	1930	20,6	35	93 - 97
YB ₁₂	1980	20,6	10	80 - 90

أما الجدول (٨-١٥) فيبين ضغط التدميج المطبق لمنتجات المواد المختلفة:

الجدول (٨-١٥) ضغط التدميج للمنتجات المختلفة

التطبيقات	ضغط التدميج	
	tons/ in ²	MPa
المواد المصممة والمرشحات	3 - 5	40 - 70
المواد الحرارية والكربيدات	5 - 15	70 - 200
المحامل المصممة	10 - 25	146 - 350
أجزاء الآلات الحديدية والفولاذ	20 - 50	275 - 690
الأجزاء من النحاس عالي الكثافة والألومنيوم	18 - 20	250 - 275
الأجزاء من الحديد عالي الكثافة والفولاذ	50 - 120	690 - 1650

المصطلحات العلمية

- A -

Absorption	امتصاص
Abrasion	حك (بري)
Acetal resin	ريزين (راتنج) أسيتال
Acid insolubies	المواد غير القابلة للذوبان بالحمض
Activated sintering	التلبيد المنشط
Additions	إضافات
Adhesion	التصاق
Air drying	تجفيف بالهواء
Alloy	سبيكة
Alloying elements	عناصر السبك
Amorphous	غير متبلور
Anode metals	معادن أنودية
Apparent density	الكثافة الظاهرية
Apparent hardness	القساوة الظاهرية
Applied load	الحمل المطبق
Atomization	التذريق
Atmosphere	جو
Atomic size	حجم ذري
Austenite	أوستنيت

- B -

Ball milling	الطحن بالكرات
Bakelite	بيكاليت
Bath	حمام (مغسل)
Bending	انثناء - انحناء

Bearing	المحامل
Blast cleaning	تنظيف بالسفع
Blending	المزج
Bluing	نسخين بالزرقة
Bond strength	متانة الترابط
Boron fibers	ألياف البورون
Borides	البوريدات
Brass	النحاس الأصفر
Breaking load	حمل الكسر
Brinell hardness	قساوة (صلادة) برينل
Bronze	البرونز
Brushes (copper - carbon)	الفحومات (نحاس - كربون)
-C-	
Carbide (cemented)	الكربيد (مسمنت)
Carbon potential	جهد الكربون
Carbonyl	الكربونيل
Catalyst	مادة محفزة (مسرعة)
Cavity	نقر (تجويف)
Cements	الإسمنتات
Ceramics	مواد سيراميكية
Charge	شحنة
Chemical compound	مركب كيميائي
Chemical resistance	مقاومة كيميائية
Coating	طلاء (تغطية)
Coining	السك (النقش)

Cold iso-static compaction	التدميج المتماثل على البارد
Coldstream process	أسلوب التيار البارد
Comminution	السحق
Compact	المدمج
Compaction	التدميج
Compressibility	الانضغاطية
Compression stress	حمل الانضغاط
Compressive strength	مقاومة الضغط
Condensation	تكاثف
Constitution	تركيب (بنية)
Contacts	الملامسات
Core pin	دليل القالب
Creep	الزحف
Crushing strength	مقاومة الهصر
Cylinder lining	بطانة الأسطوانة
-D-	
De-burring	إزالة الزوائد
De-mixing	تفكك الخليط
Deflection	الانحراف
Degreasing	إزالة الشحوم
Density	كثافة
Densomat	جهاز قياس الكثافة
Deoxidation (Reduction)	اختزال
Diamond tool	العدد الماسية
Die for compaction	قالب التدميج

Dic- wall friction	الاحتكاك على جدار القالب
Dielectric	عازل للكهرباء
Diffusion	انتشار
Dimensional change on sintering	التغيير البعدي عند التلبيد
Dip Coating	طلاء بالغمس
Dipersion	تشتيت
Dipping	تغطيس - غمس
Dislocations	انخلاعات
Dissociation	تفكك
Dryer	مجفف
Ductility	مطيلية
-E-	
Ejection	لفظ أو إخراج
Elastic deformation	تشوه (انفعال) مرن
Electrical contacts	العلامسات الكهربائية
Electrode	الكتروود
Electrolytic copper	النحاس الكهروليتي
Electrolysis	التحليل الكهربائي
Elongation	الإستطالة
Endo- gas	الماص للغاز
Engineering alloys	سبائك هندسية
Environment	بيئة محيطة
Exfoliation	نقشر
Exo-gas	الطارد للغاز
Expantion	تمدد - اتساع

Explosion	تفجير
Extrusion	البتق

-F-

Failure	إخفاق - فشل
Fatigue strength	مقاومة التعب
Filters	المرشحا
Fisher sub- sieve sizer	معايير فيشر لقياس الأحجام ما دون المناخل
Flame treatment	معالجة باللهب
Flash	نقوء
Flowability	المسيوية
Flow meter	جهاز قياس السيوية
Foam	رغوي
Forging	تشكيل بالحدادة
Forming	تشكيل
Fretting corrosion	تآكل بالاحتكاك
Friction materials	مواد الاحتكاك
Fuel	وقود
Furance atmosphere	أجواء الفرن
Fusion	الانصهار

-G-

Gas atomization	التذيرير بالغاز
Gears	تروس
Grain	حببية
Granular structure	بنية حبيبية
Graphite	غرافيت
Grinding	تجليخ

Green density	الكثافة الخضراء
Growth on sintering	النمو أثناء التلبيد

-II-

Hall flowmeter	مقياس هول للتدفق
Hardmetal	المعدن الصلب
Hardneing	تقسية
Hardness	قساوة - صلادة
Heating	تسخين
Heat resistance	مقاومة الحرارة
Heat stability	استقرار حراري
Heavy alloy	السبائك الثقيلة
Heterogeneous	متغاير
High speed steel	فولاذ السرعة العالية
Homogenous	متجانس
Hot iso- static compaction	التدميج المتماثل الضغط على الساخن
Hot pressing	الضغط على الساخن
Hydraulic press	مكب هيدروليكي

-I-

Impact strength	مقاومة الصدم
Impregnation	التشريب
Impressing	طبع - ختم
Induction heating	تسخين بالحث (التحريض)
Inert gas	غاز خامل
Infiltration	تغلغل (ترشيح)
Infra- red heating	التسخين بالأشعة تحت الحمراء

Injection moulding	قولبة بالحقن
Injection nozzle	فوهة الحقن
Insulator	عازل
Interface	سطح فاصل
Internal lubricant	مزلق داخلي
Iron carbonyl	كربونيل الحديد
Iron powder production	إنتاج مسحوق الحديد
Iso- static compaction	التدميع المتماثل الضغط
Isotropy	توحد الخواص
Izod impact test	اختبار أيزود للصدم
-J-	
Jet moulding	قولبة بالثقف
Joining of sintered components	ربط المركبات الملبدة
-K-	
K- factor	معامل K
Kiss coating	تغطية (تكسية) بالملامسة
Krupp	أسلوب كروب (استخدام الكوبالت في ربط حبيبات كريد التفتستين)
-L-	
Lattice	شبكة
Lead	الرصاص
Length wise direction	اتجاه موازي للطول
Leme plate	لوح صفيح
Limestone	حجر جيرى
Liquid phase sintering	تلييد الطور السائل
Load	حمل - شحنة
Loose powder sintering	تلييد المسحوق السائب

Loss	فقدان - ضياع
Lubricant	زيت التزيت (التزليق)
Lubrication	التزيت

-M-

Machinability	قابلية التشغيل بالآلات
Machining of sintered parts	مكنة الأجزاء الملبدة
Magnetic materials	المواد المغناطيسية
Mechanical alloying	السبك الميكانيكي
Mechanical press	مكبس ميكانيكي
Mechanical properties	خواص ميكانيكية
Melting point	نقطة (درجة) الانصهار
Metastable	شبه مستقر
Mill	طاحونة
Mixers	الخلاطات
Mixing of powders	مزج المساحيق
Mixture	خليط
Modulus of elasticity	معامل المرونة
Moisture absorption	امتصاص الرطوبة
Molecular weight	الوزن الجزيئي
Molybdenum	موليبدينوم
Moulding compounds	مركبات القوالب
Moulding shrinkage	انكماش القوالب
Muffle furnace	فرن لافع (الهب)

-N-

Natural gas	غاز طبيعي
Necks	الأعناق

Nickel powder	مسحوق النيكل
Niobium	نيوبيوم
Nitriding	النتردة
No growth mixes	خلطات بدون نمو
Nozzle	فوهة

-O-

ODS materials	مواد التقوية بتقنيات الأكسيد
Oil absorption	امتصاص الزيت
Oil atomization	التنوير بالزيت
Oil retaining bearing	المحامل المحتفظة بالزيت
Optical pyrometer	بيرومتر ضوئي
Osmium	الأوسميوم
Oxidation	أكسدة

-P-

Paraffin wax	شمع البارافين
Particle size	حجم الحبيبات (الجزيئات)
Particle size distribution	توزيع حجم الحبيبات
Permeability	نفاذية
Pitting	نقر
Plastic deformation	تشوه لدن
Polishing	الصقل
Porosity	مسامية
Porous materials	المواد المسامية
Post sintering processes	عمليات ما بعد التليد
Powder apparent density	كثافة المسحوق الظاهرية
Powder bulk density	كثافة المسحوق الإجمالية

Powder manufacture	تصنيع المسحوق
Powder rolling	دلفنة المساحيق
Powder tap density	كثافة النقر للمساحيق
Precious metals	معادن ثمينة
Preheating	تسخين مسبق
Pressure forming	تشكيل بالضغط
Projection welding	اللحام النتوني
Protection	طريقة (أسلوب وقائية - حماية)
Prototype	النموذج الأصلي
Purity	نقاء
Pusher furnaces	أفران الدوافع

-R-

Radial crushing strength	مقاومة السحق القطرية
Radiation materials	المواد المشعة
Rate	معدل
Raw materials	المواد الأولية
Reaction	تفاعل
Reducing atmosphere	جو اختزال
Reduction solid state	الاختزال في حالة الصلابة
Reduction by hydrogen	الاختزال بالهيدروجين
Refine	تنعيم
Refractory metals	المعادن المقاومة للانصهار
Reinforcement	تقوية
Relative viscosity	لزوجة نسبية
Relief	خلوص

Resilience	رجوعية
Resins	راتجات
Rigidity	جسوءة
Roll forming	تشكيل بالدلاقيين
Roughness testing	أختبار الخشونة

-S-

Salt bath	حمام ملحي
SAP	مسحوق الألومنيوم الملبد (ساب)
Saturation	إشباع
Segregation	انفصال
Sieve size	مقياس المنخل
Sinter forging	تطريق بالتلبيد
Sintered parts	الأجزاء الملبدة
Sintering	التلبيد
Sintering atmospheres	أجواء التلبيد
Sizing	المعايرة
Shaping	شكل
Shear strength	مقاومة القص
Shrinkage allowance	الانكماش المسموح به
Slurry	ملاط
Softening	تليين
Solid state sintering	تلبيد حالة الصلابة
Solute	مادة مذابة
Solvent	مادة مذيبة
Spark sintering	التلبيد بالشرارة

Specification	مواصفات
Split- die process	أسلوب القالب المجزأ
Sponge powder	المسحوق الإسفنجي
Spring back	الارتداد المرن
Spray coating	إكساء بالبخ
Spray forming	تشكيل بالرش
Stainless steel	الفولاذ المقاوم للصدأ
Steam treatment	المعالجة بالبخار
Steel backed bearing	المحامل المدعمة بالفولاذ
Stiffness	صلابة
Strain	انفعال
Stress concentration	تركيز الإجهاد
Stress rupture	تمزق بالإجهاد
Structure	بنية
Super alloys	السبائك الفائقة
Swell	انتفاخ
-T-	
Tank	خوض - خزان
Tantalum	نتاليوم
Tempering	طبع - تطبيع
Tensile strength	مقاومة الشد
Titanium	تيتانيوم
Thermal diffuivity	انتشار حراري
Thermal stress	إجهاد حراري
Thermocouple	مزدوجة حرارية

Tolerance	تفاوت مسموح به
Tool design	تصميم الأدوات والعدد
Tool materials	مواد العدد
Toughness	متانة
Transverse rupture strength	مقاومة التمزق العرضية
Tungsten	التنغستين
Twisting	التواء
-U-	
Ultimate elongation	مطيلية قصوى
Uniaxial orientation	توجيه أحادي المحور
Urethane	يوريثان
-V-	
Vacuum forming	تشكيل بالتفريغ
Vacuum metallising	ترسيب معدني بالتفريغ
Valence	تكافؤ
Vaporization heat	حرارة التبخر
Vapour degreasing	إزالة الشحوم بالبخار
Vickers hardness	قساوة فيكرز
Viscosity	لزوجة
-W-	
Walking beam furnace	فرن الأذرع المتحركة
Water atomization	التذيرير بالماء
Water absorption	امتصاص الماء
Wear resistance	مقاومة الإهتراء
Welding	لحام

Wet- out rate معدل الرطوبة

Widia شبيه الماس

Working life عمر التشغيل

Wrought aluminium الألمنيوم المشكل

-Y-

Yield point نقطة الخضوع

Yield strength مقاومة الخضوع

Young's modulus معامل يونغ

-Z-

Zirconium الزركونيوم

المراجع العلمية

المراجع الأجنبية:

1. W.D.Jones: Fundamental Principles of Powder Metallurgy- London 1965- p405
2. Powder metal technologies and applications, vol.7 of , ASM metals Handbook, USA 1998, p2762
3. Lenel: Powder Metallurgy-Principles and Applications, Metal Powder Industries Federation, 1980, p33-44
4. P.W.Lee: "Press and sintered parts and thier applications", USA 1983
5. Y. Seki, H. Takigawa, and N. Kawai: Effect of Atomization Variables on Powder Characteristics, Met. Powder Rep., Jan 1990, p 38-40
6. S.A. Miller and R.S. Miller: Real Time Visualization of Close-Coupled Gas Atomization, Advances in Powder Metallurgy 1992, Vol 1, Metal Powder Industries Federation, 1992, p 113-125
7. S.M. Sheikhaliev and J.J. Dunkley: a Novel Internal Mixing Gas Atomizer for Fine Powder Production, Advances in Powder Metallurgy 1996, Vol 1, Metal Powder Industries Federation, 1996, p 161-170
8. H. Eifert and B. Günther: "New Products made from Ultrafine Metal Powders," Int. Conf. PM '94 (Paris), 1994
9. Z. Bartnik, P. Białucki, S. Kozerski and others: Improvements in Manufacturing Technology of Wear Resistant Plasma Sprayed Cr_2O Coatings, Thermal Spray: Int. Advances in Coatings Technology, ASM International, 1992, p 983-993
10. S.A. Miller and N.F. Levoy: Rotating Electrode Atomization for the Production of Fine Powders from Reactive Metals, 1997 International Conf. on Powder Metallurgy and Particulate Materials, p750-759
11. R. German: Powder Metallurgy of Iron and Steel, John Wiley & Sons, 1998
12. F. Chagnon and Y. Trudel: Effect of Compaction Temperature on the Sintered Properties of High Density P/M Materials, Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials-1995, Vol 2, p 106-126
13. Philips and H.S. Nayar: A Troubleshooting Guide for Sintering Furnace Atmospheres, Industrial Heating, Vol 64 (No.8), 1994, p 33-37
14. R. Tandon and R.M. German: Supersolidus-Transient Liquid Phase Sintering Using Superalloy Powders, Int. J. Powder Metall., Vol 30, 1994, p 435-443
15. O. Roman, I. Gabrilov: Powder metallurgy, - Minsk, 1986, p160

16. B. Ansiferov, T. Cherepanova, Structure of Sintered Steel,- Moscow, 1981, p110
17. S. Kiparisov, G.Lebenson: Powder Metallurgy,- Moscow, 1991, p432
18. G.Lebenson, V.Panov, Workshop Equipment's of Powder Metallurgy ,- Moscow, 1983, p264
19. E. Shvedkov, E. Denesinko, I. Kovenski: Powder metallurgy, Handbook,- Kiev1982, p270
20. A. Stepanchuk, I. Bilik, P. Poiko, Technology of Powder Metallurgy, -Kiev 1989, p415
21. P. Andreivskii: Powder Metallurgy Introduction,- Franze1988, p174
22. Y. Geguzin: Physical Sintering,- Moscow, 1984, p312
23. D. Karpinos, L. Tuchinski, L. Vishniakov: New Composites Materials, -Kiev1991, p319
24. V. Skorohod, S. Solonin: Physico- Metallurgy of Sintered Powder,- Moscow, 1984, p159
25. A. Epik, K. Paleha: New Materials of Powders and Composites,- Kiev 1989, p116
26. V. Shatta: Powder Metallurgy. Sintered and Coposites of Matrials,- Moscow, 1983, p520
27. L. Voroshnin and others: Chimico-heat treatments of metalloceramics materials,- Minsk1977, p272
28. S. Ermakov, N. Viaznikov: Powder Steel and Products,- Sanckt Peterburg 1990, p319
29. M. Balshin, S. Kiparisov: Fundamentals of Powder Metallurgy,- Moscow, 1978, p184
30. A. Stepanchuk: Natural of Phisico- chimistiry to achieve Powder Metals and alloys,- Kiev 1989, p184
31. V. Udavitsky: Porous of Composites Coating,- Moscow, 1991, p144
32. K. Paleha, A. Epik: Fundamentals of Phisico- chemistry Coating,- Kiev 1992, p224
33. A. Stepanchuk: Natural Pressing of Powder Metallurgy,- Kiev 1992, p176
34. I. Francevich, G. Gnesin, A. Kourdumov and others: Super hard Materials,- Kiev 1980, p296
35. D. Trenke, N. Müller, W. Rolshofen: Selective laser sintering of metal and ceramic compound structures,- EOS GmbH, Krailing, 2002
36. S. Feldbauer: Advances in Powder Metal Sintering Technology, Ph.D. Abbott Furnace Company St. Marys, PA 15857, 2000

37. R.L. ORBAN: New Research Directions in Powder Metallurgy,- Romanian Reports in Physics, Volume 56, No. 3, P. 505 - 516, 2004
38. A. Majeed: Effect of Mechanical and Tribological Properties of Boride Coating on Powder Materials based Iron, first International Engineering Science Conference, IESC-2008.- Aleppo2008
39. A. Majeed: Effect of Pulsed Laser Nd-YAG on Mechanical Properties of Ceramic Materials, 4th international francophone congress for advanced mechanics IFCAM04,- Aleppo2010
40. W. Callister, Materials Science and Engineering An Introduction,- USA 2000, p871
41. E. Klocke: Powder Metallurgy, Fraunhofer Institut Produktions technologische 2009
42. C. Barry, N. Grant: Ceramic Materials,-Springer 2007,p716
43. C. Tetinkaya, T. Findik, S. Özbilen: Characterisation of mechanically , www.elsevier.com/locate/jmatprotec 17-4 P11 gas atomized stainless steel powder,- materials and design 28(2007),p.266-271
44. B. Bhushan, Handbook of Nanotechnology,- Springer 2004,p1258
45. L. Sigl, P. Delarber: Static and fatigue properties of high strength PM- steels,- EURO PM2005, Prague 2005
46. L. Froyen: Aluminum Powder Metallurgy,- university of Leuven, Belgium 1994, TALAT lecture 1401,p26
47. V. Marinov: Manufacturing technology of Powder Metallurgy

المراجع العربية:

١. جوردون داوسون، ميتالورجيا المساحيق - الطريقة والمنتجات-- ترجمة د. ماهر حمدي صاحب،- جامعة الملك سعود ١٤٢٠هـ (٢٠٠٠م)، ص ٢٠١.
٢. د. عبدالله مجيد، دراسة الصلادة السطحية ومقاومة التآكل لطبقة البوراييد المتكون على الفولاذ والفولاذ المنتج من المساحيق،- مجلة جامعة الملك خالد ع ١٤٢٥، ١ (٢٠٠٤).
٣. د. عبالله مجيد، د. السيد القاضي، الخواص الميكانيكية لخامات نتريد السيلكون المعالجة بأشعة الليزر النبضي Nd-YAG،- مجلة جامعة الملك خالد ع ١٤٢٧، ٣ (٢٠٠٦).
٤. د. عبدالله مجيد، تأثير الطلاء الانتشاري بالكروم في الفولاذ المنتج من مواد المساحيق،- مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية، المجلد ٢٧- ع (٢٠١١).
٥. د. أحمد سالم الصباغ، الميتالورجيا الفيزيائية،- القاهرة ١٩٧٣، ص ٤٥٢.
٦. يو. لاختين، علم المعادن والمعالجة الحرارية،- موسكو ١٩٨٣، ص ٤٤٦.

اللجنة العلمية:

- أ.د. محمد سلامة
- أ.د. خليل عزيمة
- أ.د. عصام موسى

المدقق اللغوي:

- د. محمد قاسم

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات

