أفران الصهر (أفران المسبك) Melting Furnaces (Foundry Furnaces)

فرن الصهر عبارة عن معدة equipment يتكون في المعتاد من غلاف فولاذي سميك ومبطن بمادة مقاومة للحرارة. يستخدم الفرن لصهر ومعالجة منصهرات المعادن والسبائك وتهيئتها للصب بشكل مصبوبات Ingots أو مسبوكات Castings.

يعتمد اختيار الفرن المناسب لعملية الصهر على العوامل الآتية:

1- كلف الانشاء والتشغيل والصيانة (رأس المال المتاح).
2- درجة الحرارة المطلوبة.
3- كمية المنصهر المطلوبة ومعدل الصهر.
4- الملوثات والقوانين البيئية ومعالجة المخلفات.
5- جودة المنصهر المطلوبة.

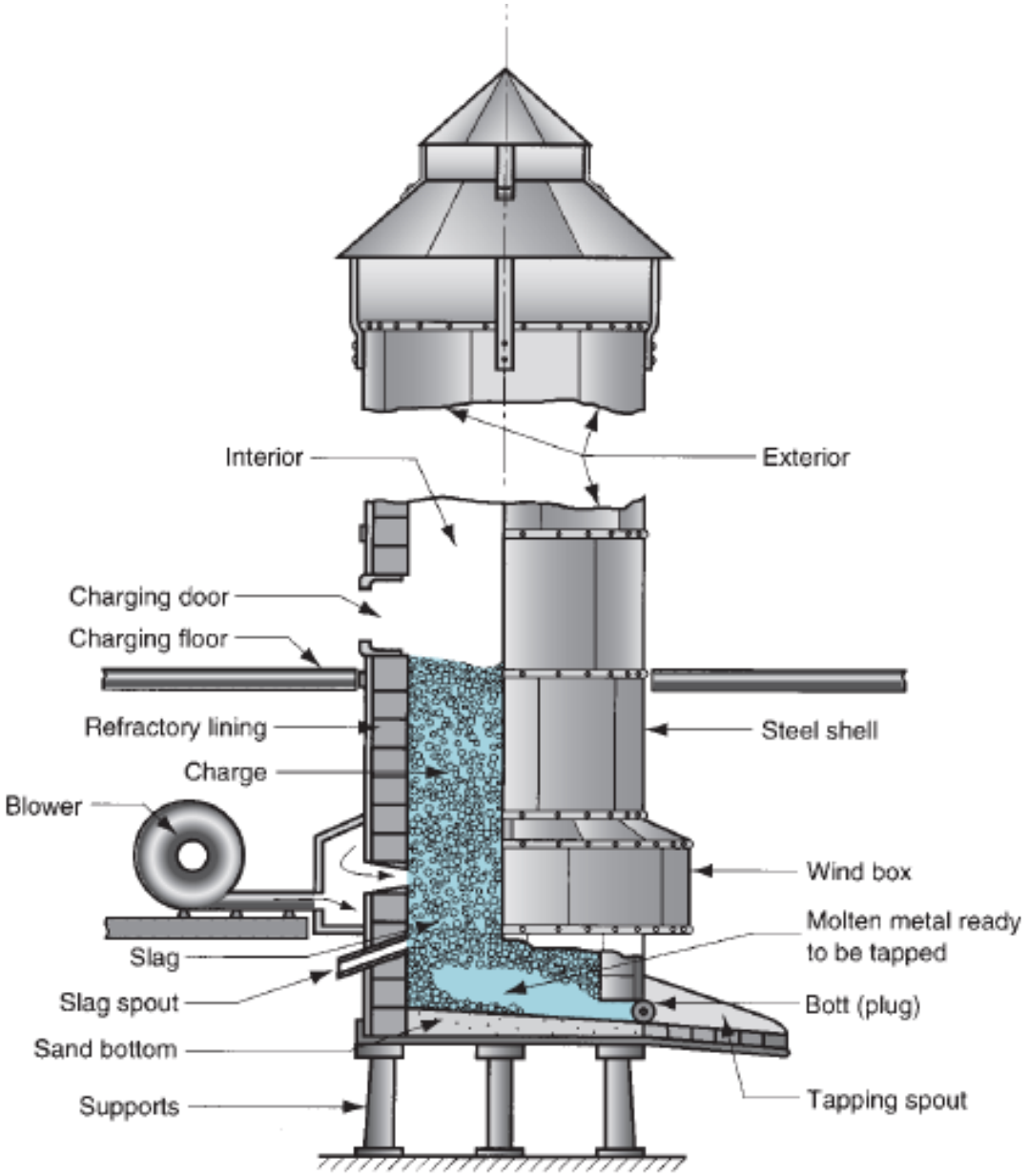
أما المواد المستخدمة في تبطين أفران الصهر فيجب أن تمتلك المواصفات الآتية:

1- مقاومة لدرجات الحرارة العالية.
2- مقاومة انضغاط عالية.
3- مقاومة بلى عالية.
4- مقاومة للصدمة الحرارية.
5- جساءة مناسبة.
6- ذات معامل تمدد حراري منخفض.
7- توصيل حراري منخفض.
8- خاملة تجاه المعدن المنصهر والخبث وغازات جو الفرن.

تقسم مواد التبطين من حيث كيميائيتها إلى مواد حامضية مثل السليكا SiO_2 ومواد قاعدية مثل أكاسيد الكالسيوم CaO والمغنيسيوم MgO والحجر الجيري $CaCO_3$ والدولومايت $CaCO_3.MgCO_3$ ومواد متعادلة مثل الكرافيت. من المهم معرفته هو أن مواد التبطين الحامضية أرخص من المواد القاعدية وأقل كلفاً للصيانة والاصلاح إلا إنها لا تسمح بتقليل نسب كل من الكبريت والفوسفور في الفولاذ وسبائكه. ومن المهم التأكد منه هو وجوب تطابق مادة البطانة والخبث من حيث الحامضية والقاعدية حفاظاً على البطانة نفسها من التآكل.

فيما يلي وصف لأهم الأفران المستخدمة في صهر المعادن والسبائك:

أولاً: فرن الدست Cupola



فرن الدست عبارة عن أسطوانة عمودية مصنوعة من غلاف فولاذي سميك ومبطنة بالطابوق الحراري كما موضح بالشكل أعلاه.

يستخدم فرن الدست أساسا في صهر حديد الزهر. تتكون شحنة الفرن من طبقات متعاقبة من حديد الغفل وخردة حديد الزهر وربما خردة الفولاذ والعناصر السبائكية المكملة إن تطلب الامر وفحم الكوك كوقود والحجر الجيري كمساعد صهر. يتم الشحن من خلال بوابة الشحن الواقعة عند منتصف عمود الفرن تقريباً.

شحن وتشغيل الفرن

قبل البدء بنفخ الهواء من خلال القصبات يتم تسخين الفرن وبعد وصول حرارة طبقات الشحنة الى الدرجة الحرارية المناسبة يبدأ نفخ الهواء. يتراوح سمك الكوك في كل طبقة بين 10 – 15 سم. أما كمية الصهيرة فتعتمد على نوعية الشحنة المعدنية والخردة. عند التشغيل يحترق الكوك مولدا الحرارة اللازمة لتسخين الشحنة النازلة وتفكيك الحجر الجيري وصهر الجزء المعدني من الشحنة والذي ينزل باستمرار الى البئر وتغطيه طبقة من الخبث السائل. بامتلاء البئر يتم سكب الخبث من فتحة خاصة به بينما يتم سكب المعدن السائل من فتحة أمامية ويتم تعويض الطبقات المستهلكة من الشحنة باستمرار من خلال فتحة الشحن.

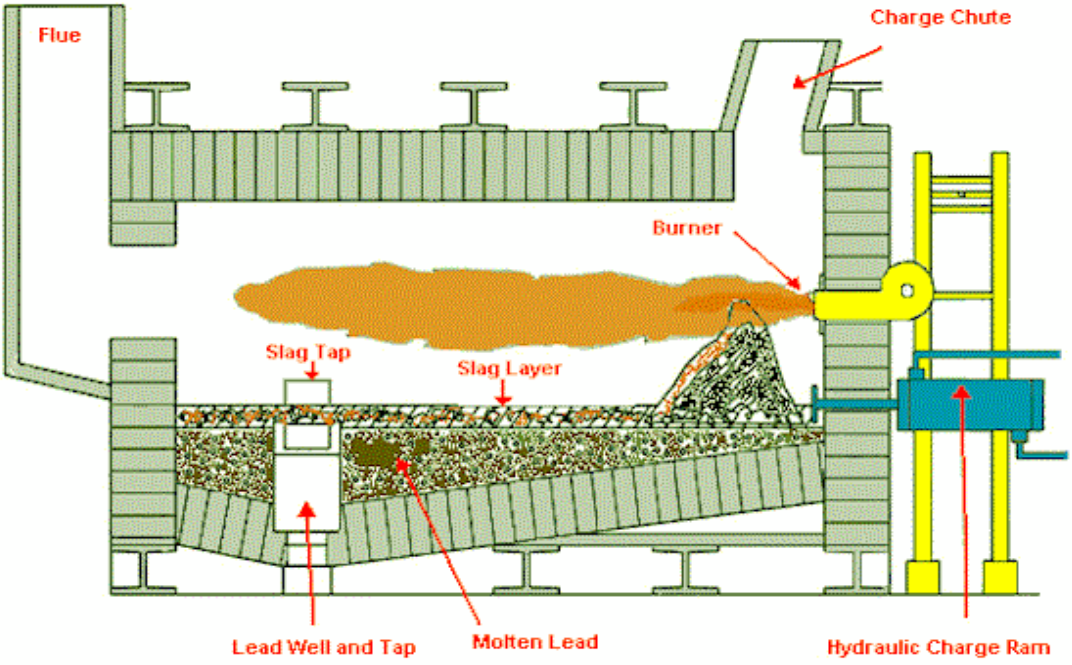
محاسن فرن الدست

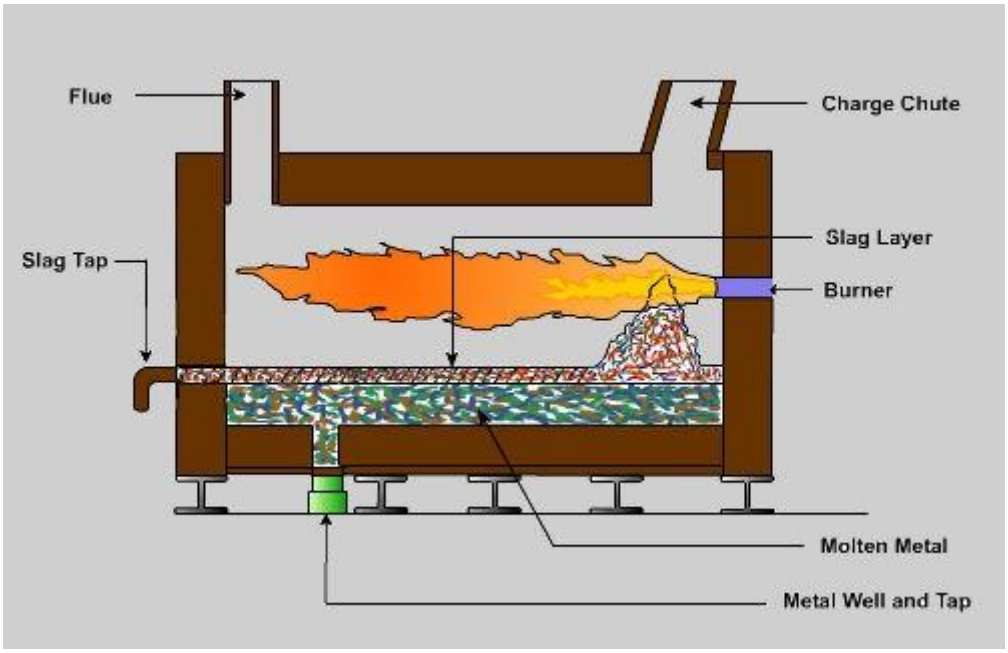
1- سهل الانشاء بكلف أقل من الافران الاخرى لنفس السعة وبكلف تشغيل اقتصادية.
2- سهل التشغيل.
3- يعمل باستخدام مدى واسع من المواد مثل خردة الفولاذ والحديد المتسخة أو المحتوية على الزيوت بدو التقليل من جودة المنصهر.
4- يلعب دورا كبيرا في اعادة تدوير المعادن.
5- الفرن الوحيد الذي يعمل بنظام الانتاج المستمر.
6- معدل صهر عالي.
7- يتطلب حيز أقل مما تتطلبه الافران الاخرى لنفس السعة.
8- كفاءة حرارية عالية.

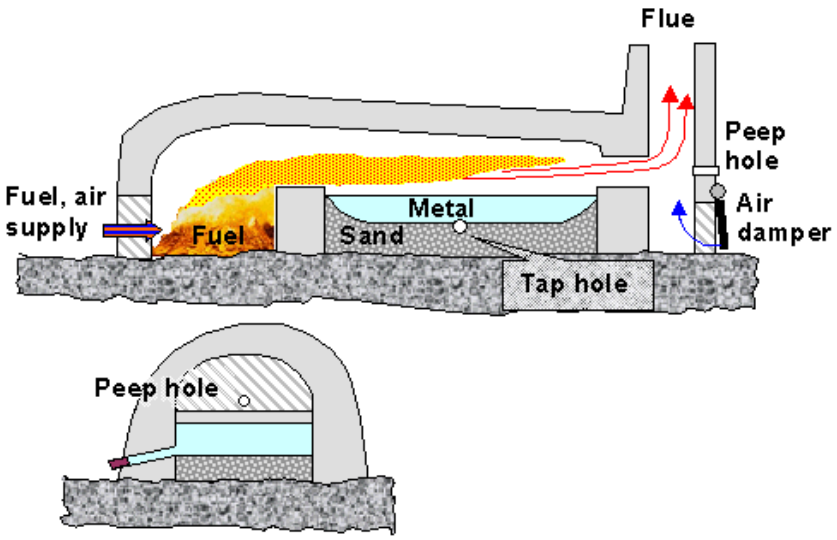
محددات فرن الدست

1- يحدث فقدان في عناصر مثل السليكون والمنغنيز ودخول عناصر مثل الكبريت والكربون نتيجة التماس المباشر بين الشحنة والكوك.
2- التحكم الدقيق في التركيب الكيمياوي غير ممكن.
3- التحكم الدقيق في درجة الحرارة غير ممكن.

Reverberatory Furnace ثانيا الفرن العاكس







يتكون الفرن العاكس من منخفض ضحل يمثل موقد الفرن ويحتوي على المعدن المراد صهره وجدران وسقف مع فتحتين جانبيتين لدخول الشعلة وخروج غازات العادم على التوالي كما موضح في الاشكال أعلاه. يسمى الفرن كذلك بالفرن الهوائي ويستخدم الفرن في الغالب لصهر الالمنيوم بسعة تصل الى 150 طن مع انه يستخدم لصهر النحاس وسبائكه والرصاص وغيرها. يتم توجيه شعلة كثيفة على ذلك المنخفض الحاوي على الشحنة لتقوم بتسخين جو الفرن علاوة على الجدران والسقف. بذلك لا يحدث تماس مباشر بين الوقود والمعدن. إن الفكرة الرئيسية للفرن العاكس هي استغلال الحرارة المنعكسة من سقف وجدران الفرن في صهر الشحنة. يعمل الفرن العاكس بنظام الدفعات.

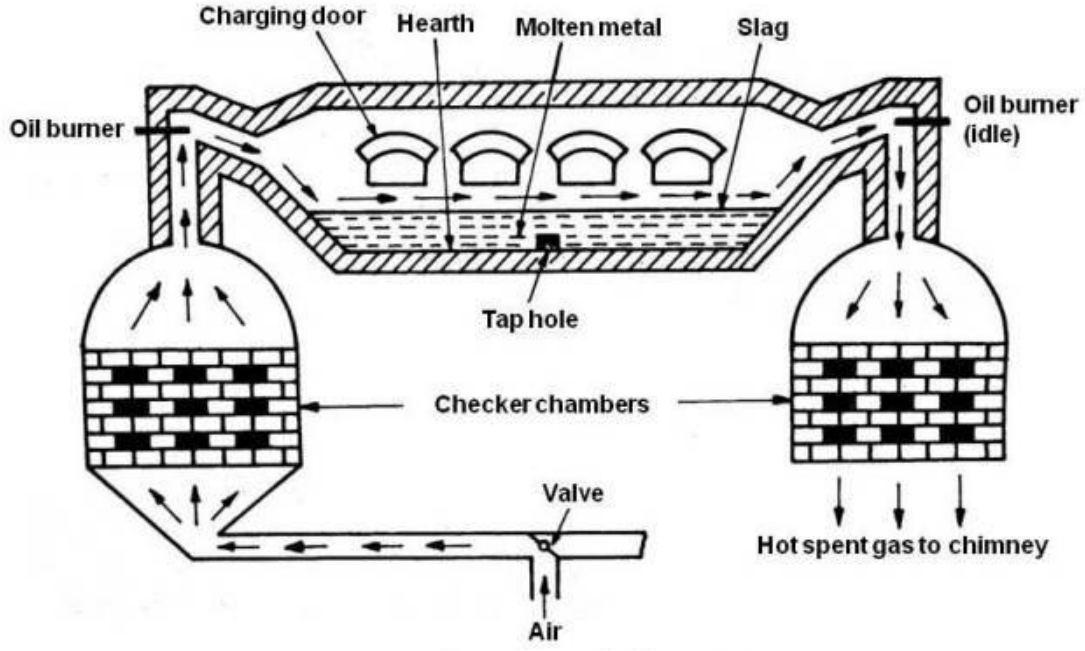
محاسن الفرن العاكس

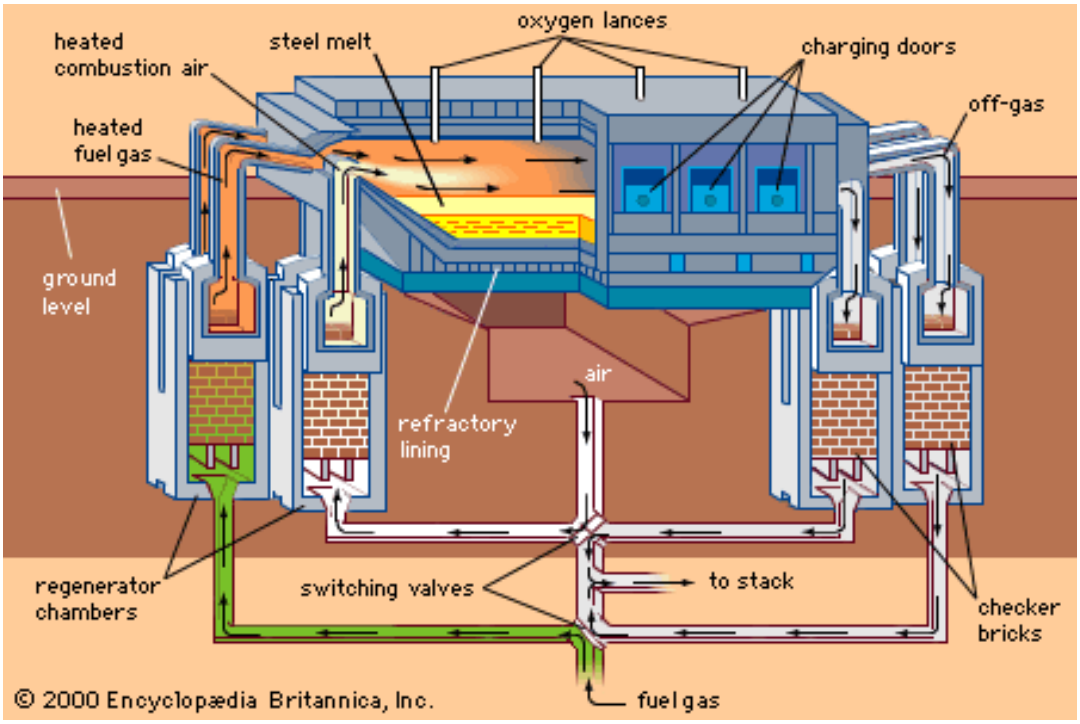
1- معدل صهر عالي.
2- كلف تشغيل وصيانة منخفضة نسبيا.
3- تسمح بالتحكم في التركيب الكيمياوي للمنصهر.
4- عدم وجود تماس مباشر بين الشعلة والمنصهر.
5- لا يوجد دخول لعناصر مثل الكبريت والكربون الى المنصهر.

محددات الفرن

1- يتطلب مساحة أرضية واسعة.
2- معدل تأكسد كبير لبعض العناصر السبائكية.
3- كفاءة حرارية منخفضة.
4- صعوبة التحكم في جو الفرن.
5- درجة الحرارة القصوى قليلة نسبياً.

ثالثاً: فرن الموقد المفتوح Open Hearth Furnace





يعمل الفرن بنظام الدفعات ويمثل نسخة مطورة من الفرن العاكس ويستخدم في إنتاج الفولاذ. يحتوي الفرن على مشعلين وحجرتين من الطابوق الحراري المربع ذو الممرات الضيقة

بينها عند كل جهة من جهتي الفرن. عندما يعمل مشعل الجهة الأولى يتم تمرير غازات العادم الساخنة على حجرة الطابوق الحراري للجهة الأخرى فيقوم الطابوق على امتصاص القدر الاكبر من حرارة الغازات. وبعدما تبرد حجرة المشعل الشغال يتم إطفاء الشعلة وتشغيل مشعل الجهة الثانية الذي يغذى بهواء ساخن قادم من حجرة الطابوق الساخن وهكذا يستمر العمل بالتناوب بين المشعلين والحجرتين كل 20 - 30 دقيقة تقريبا لتتحقق كفاءة حرارية عالية ودرجة حرارة عالية تكفي لصهر الفولاذ.

يشحن الفرن بخردة خفيفة مثل خردة الصفائح المعدنية والمركبات المقطعة وغيرها. وحالما تنصهر هذه الشحنة يتم شحن الخردة الثقيلة مثل خردة مخلفات البناء ومعامل الفولاذ علاوة على حديد الغفل (ناتج الفرن العالي). وحالما تنصهر الشحنة المعدنية يتم إضافة مساعدات الصهر مثل الحجر الجيري. يقوم أوكسجين أوكسيد الحديد والشوائب الاخرى بإزالة كربون حديد الغفل وقد يتم إضافة خام الحديد الى الشحنة لزيادة محتوى الاوكسجين. العملية أبطأ مما في محول بسمر وبذلك يتاح الوقت الكافي لأخذ نماذج للفحص والتحكم الجيد في التركيب الكيمياوي.

عندما يتحقق التركيب المطلوب للمنصهر نقوم بسكب الفولاذ من فتحة في جانب الموقد على شكل مصبوبات أو ينقل الى وحدات السباكة المستمرة. يتم بعدها قشط الخبث.

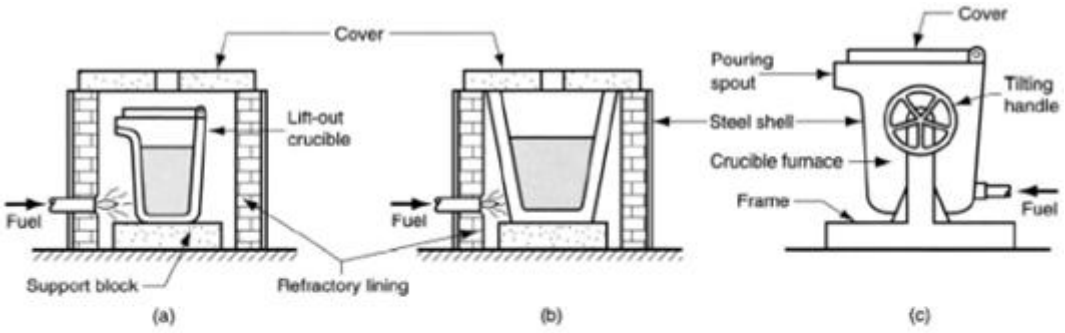
محاسن فرن الموقد المفتوح

1- درجة الحرارة القصوى عالية تكفي لصهر الفولاذ.
2- الكفاءة الحرارية عالية.
3- يمكن التحكم في التركيب الكيمياوي للمنصهر بشكل جيد.
4- سعة عالية ومعدل صهر كبير.

محددات فرن الموقد المفتوح

1- يتطلب مساحة أرضية واسعة.
2- صعوبة التحكم في جو الفرن.
3- كلف الانشاء عالية.
4- تعمل الافران ذات البطانة القاعدية على خردة وحديد غفل منخفض الجودة.

الأفران البوتقية Crucible Furnaces



Three types of crucible furnaces:

(a) lift-out crucible,

(b) stationary pot, from which molten metal must be ladled, and

(c) tilting-pot furnace

تعد الافران البوتقية من أقدم أفران صهر المعادن. يحتوي الفرن على حيز مكون غلاف فولاذي سميك مبطن الطابوق الحراري. يوضع داخل الحيز بوتقة مصنوعة من مادة مقاومة للحرارة مثل الكرافيت وكربيد السليكون SiC والالومينا Al_2O_3 والمغنيسيا MgO وغيرها. تشحن البوتقة بالمعدن المراد صهره والمضافات الضرورية. تستخدم الافران البوتقية عادة لصهر المعادن والسبائك غير الحديدية.

يتم تسخين الشحنة من خلال جدار البوتقة بالتوصيل. تعمل الافران البوتقية بالوقود الصلب أو السائل أو الغازي. وتستخدم لصهر دفعات صغيرة من الالمنيوم والنحاس وسبائكهما وكذلك المعادن ذات درجات الانصهار الواطئة كما يمكن استخدامها لصهر حديد الزهر. تتراوح سعة البوتقة من عدة كيلوغرامات إلى عدة مئات من الكيلوغرامات ويمكن أن تصل في بعض الانواع الى حوالي طن ونصف الطن. الشكل أعلاه يوضح أنواع مختلفة من الافران البوتقية.

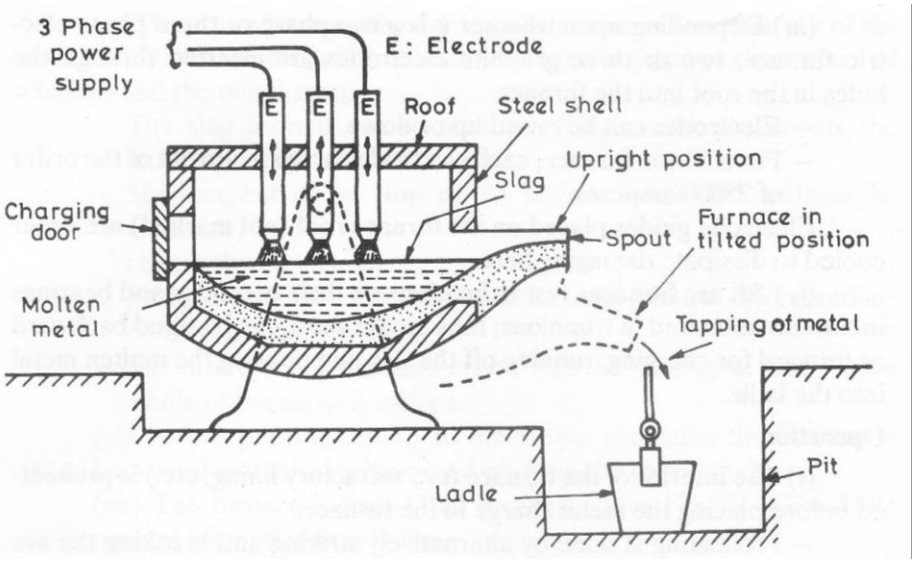
مزايا الافران البوتقية

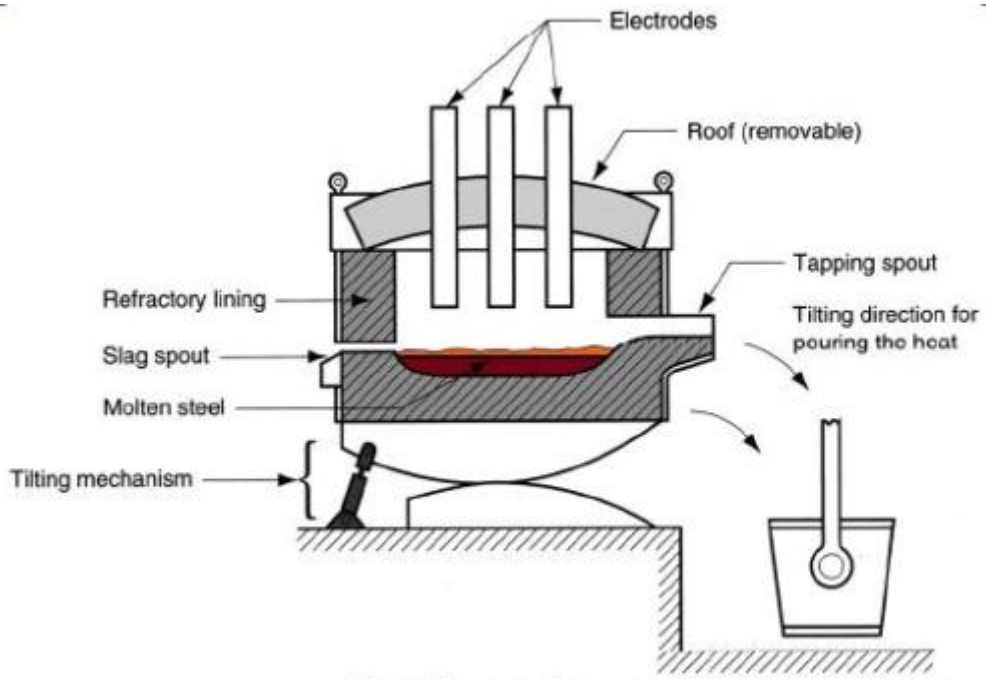
1- كلفة انشاء وصيانة منخفضة.
2- سهل التشغيل.
3- لا يوجد تماس بين الوقود والشحنة.
4- خسائر الاحتراق قليلة.
5- تعطي مرونة عالية في صهر أنواع مختلفة من المعادن والسبائك بنفس الفرن.
6- مساحة الارضية المطلوبة صغيرة.
7- امكانية التحكم في التركيب الكيمياوي للمنصهر.

محددات الافران البوتقية

1- سعة الفرن محدودة ومعدل الصهر واطئ.
2- درجة الحرارة القصوى منخفضة نسبياً.
3- الكفاءة الحرارية منخفضة جدا.
4- انبعاثات عالية.

خامساً: الافران الكهربائية القوسية Electric Arc Furnaces





Electric arc furnace for steelmaking

يتكون الفرن القوسي المباشر الموضح في الشكلين أعلاه من غلاف فولاذي سميك مبطن بمادة مقاومة للحرارة. نحصل على الحرارة اللازمة للصهر من خلال القوس الكهربائي الناشئ بين أقطاب كرافيتية والشحنة. تتراوح سعة الفرن من عدة كيلوغرامات في الانواع المختبرية الى ما يزيد عن 100 طن لكل دفعة (يمكن ان تصل السعة الى 400 طن) ويستخدم في انتاج الفولاذ عالي الجودة والفولاذ السبائكي. يحتوي الفرن على بوابة خلفية تستخدم لأضافة العناصر السبائكية وضخ الاوكسجين عند الحاجة ولازالة الخبث كما يحتوي على فتحة امامية لصب المعدن السائل. يمكن إمالة الفرن بكامله عند الصب.

أما الافران الكهربائة القوسية غير المباشرة فهي ذات شكل برميلي ونحصل على حرارة الصهر من القوس الناشئ بين قطبين كرافيتيين. تنتقل الحرارة الى الشحنة عن طريق الاشعاع. للفرن القابلية على الدوران بحوالي 180^{o} لتفادي التسخين الزائد للبطانة فوق مستوى المنصهرولزيادة كفاءة الصهر.

مزايا الافران الكهربائية القوسية المباشرة

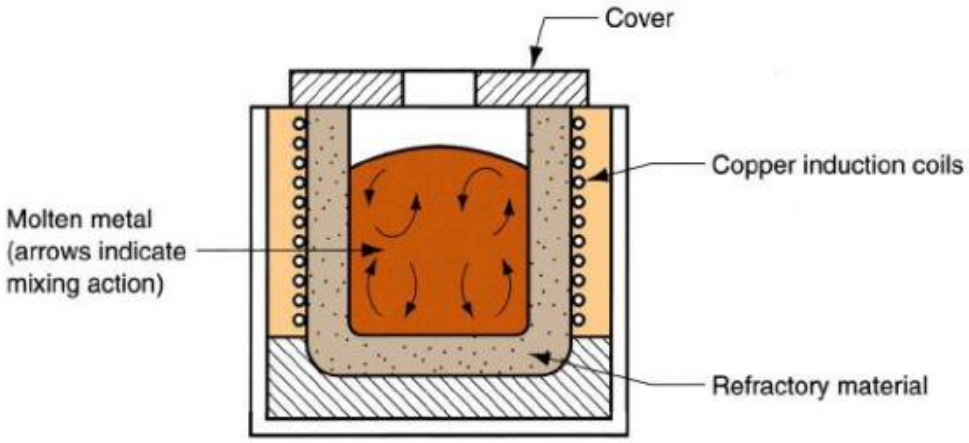
1- معدل صهر عالي.
2- درجة حرارة عالية.
3- تحكم دقيق جدا في التركيب الكيمياوي للمنصهر.
4- تحكم دقيق جدا في درجة الحرارة.

5- جودة عالية للمنتج.
6- كفاءة حرارية عالية.
7- خسائر التأكسد والاحتراق قليلة.
8- لا توجد انبعاثات خطرة.
9- امكانية التعامل مع خردة منخفضة الجودة.
10- امكانية التحكم في جو الفرن.

محددات الافران الكهربائية القوسية المباشرة

1- كلف التشغيل والاصلاح عالية.
2- يؤدي القوس المباشر بين الاقطاب والشحنة الى تسخين زائد للمنصهر.

سادساً: الافران الكهربائية الحثية Induction Furnaces



يتكون الفرن الكهربائي الحثي من انبوب نحاسي مبرد بالماء. يلف الانبوب حول بوتقة من مادة مقاومة للحرارة. يمرر خلال الملف النحاسي تيار كهربائي بفولتية عالية. ونتيجة لذلك يستحث تيار ثانوي عالي بفولتية منخفضة في معدن الشحنة. يقوم التيار المستحث بتسخين وصهر الشحنة.

مزايا الافران الكهربائية الحثية

1- سرعة صهر عالية.
2- تقوم القوى الكهرومغناطيسية بتقليب المنصهر وتحقيق تمازج ممتاز بين مكوناته.
3- لا توجد خسائر تأكسد واحتراق.
4- درجة حرارة عالية.

5- تحكم دقيق جدا في التركيب الكيمياوي للمنصهر.
6- تحكم دقيق جدا في درجة الحرارة.
7- جودة عالية جدا للمنتج.
8- لا توجد انبعاثات خطرة.
9- تحكم دقيق في جو الفرن.
10-الحيز المطلوب صغير.

محددات الافران الكهربائية الحثية

1- سعة الفرن قليلة بالمقارنة مع الافران القوسية المباشرة او افران الموقد المفتوح.
2- عادة ما يقتصر استخدامها على الخردة عالية الجودة.

انتاج الفولاذ في الفرن الكهربائي القوسي القاعدي

يتضمن انتاج الفولاذ قي الفرن الكهربائي القوسي القاعدي المراحل الاتية:

أولا: مرحلة الشحن Charging

الخطوة الاولى في اي دورة من دورات انتاج الفولاذ هي مرحلة الشحن التي يتم فيها رفع سقف الفرن والاقطاب الكرافيتية وتدويره الى جانب الفرن للسماح لرافعة الخردة بتفريغ حمولتها. وبعد اكتمال عملية الشحن يتم ارجاع السقف الى محله وانزال الاقطاب الى الاسفل لأنشاء القوس الكهربائي بين تلك الاقطاب والشحنة. وقد يتخلل ذلك اعادة عملية الشحن اعتمادا على كمية المنصهر المطلوبة على ان يكون عدد مرات الشحن أقل ما يمكن (2 – 3 مرات) لزيادة انتاجية الفرن وتقليل فقدان الطاقة.

ثانيا: مرحلة الصهر Melting

تتم عملية التسخين والصهر بانشاء قوس كهربائي بين الاقطاب الكرافيتية والخردة ومن ثم تتكون بركة من المعدن السائل أسفل كل قطب. وبتوسع هذه البرك واستمرار القوس بتجهيز الحرارة يكتمل انصهار الشحنة. وقد يتم تجهيز جزء من الحرارة الى الفرن في مرحلة الصهر من

خلال ضخ الاوكسجين أو الاوكسجين والوقود معا. وباكتمال عملية الصهر يؤخذ نموذج للتحليل الكيميائي وذلك لمعرفة الكميات اللازم اضافتها أو حرقها من عناصر السبيكة المطلوبة.

ثالثا: مرحلة الأكسدة Oxidizing Stage

يتم في هذه المرحلة أكسدة الزائد من الكربون والفوسفور والسليكون والمنغنيز. يتكون خبث هذه المرحلة في الاساس من CaO, MgO, CaF_2 و FeO أو خام الحديد أي خبث قاعدي مؤكسد. وقد يتم ضخ الاوسجين داخل المنصهر. يعمل FeO على زيادة كمية الاوكسجين في منصهر الحديد ليقوم بأكسدة كل من C, P, Mn, Si .

$$C + FeO = Fe + CO$$

$$Si + 2FeO = 2Fe + SiO_2$$

$$Mn + FeO = Fe + MnO$$

$$2P + 5FeO = 5Fe + P_2O_5$$

$$P_2O_5 + 3CaO = 3CaO.\ P_2O_5$$

يحترق اول اوكسيد الكربون جزئيا في جو الفرن.

$$CO + O_2 = CO_2$$

أما الاكاسيد المتكونة فتدخل الى الخبث.

إن فقاعات CO المتكونة تعمل على تقليب المنصهر بما يعرف بغليان الكربون وتساعد على الاسراع في اكسدة العناصر أعلاه. في نهاية لاالمرحلة يتم ازالة الخبث.

أهم العوامل المتحكمة في هذه المرحلة هي درجة الحرارة ومحتوى كل من $FeO, CaO, MnO, CaF_2,$

رابعا: مرحلة الاختزال وازالة الاوكسجين Reducing and Deoxidation Stage

تهدف هذه المرحلة الى تقليل نسبة الكبريت الى الحد المسموح به والتخلص من الاوكسجين المذاب في المنصهر وتتطلب تكوين خبث قاعدي مختزل باضافة كل من CaO, CaF_2, C or

CaC_2 مع إضافة سبائك فروسليكون وفرومنغنيزالى المنصهر كعناصر مزيلة للاوكسجين وقد يضاف الالمنيوم النقي لنفس الغرض وفق التفاعلات الآتية:

$Mn + O = MnO$

$Si + 2O = SiO_2$

$2Al + 3O = Al_2O_3$

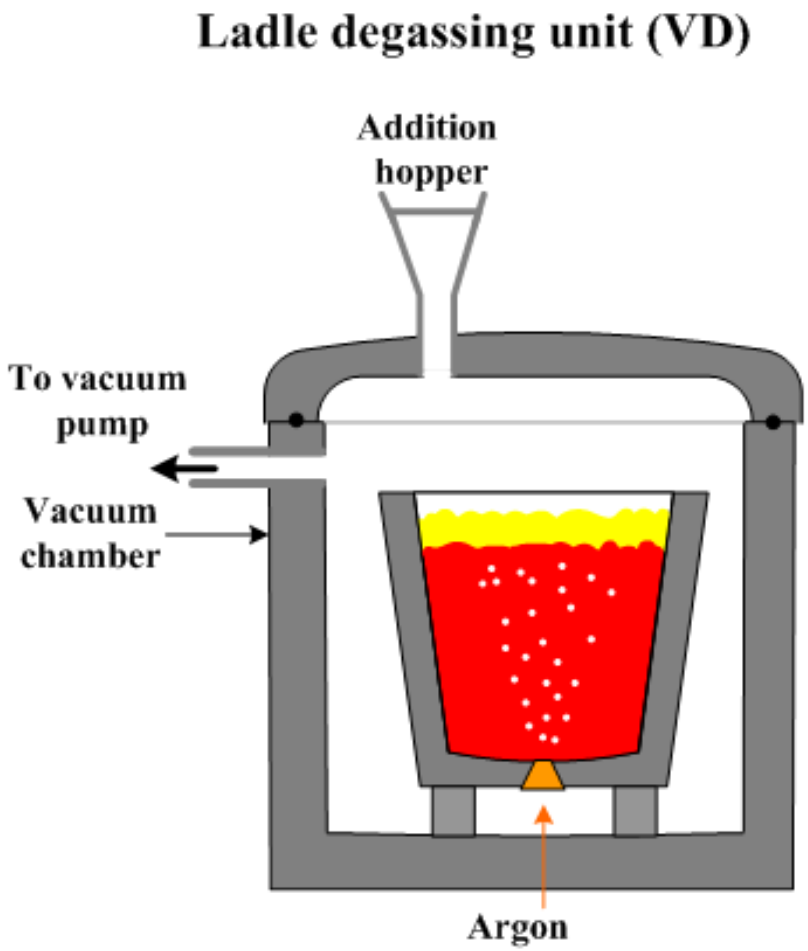
$S + CaO = CaS + O$

تدخل الاكاسيد والكبريتيد المتكونة الى الخبث.

وبعد اكتمال عملية ازالة الاوسجين المذاب يتم اضافة العناصر السبائكية المطلوبة مثل Cr, Ni, Mo, V ويتم بعد ذلك أزالة خبث المرحلة.

خامسا: مرحلة ازالة الغازات Degassing Stage

إحدى طرائق ازالة الغازات المذابة هي الطريقة المبينة في الشكل أدناه:



والتي يتم فيها وضع الدلو Ladle الحاوي على منصهر الفولاذ في حجرة مفرغة. يضخ غاز الاركون من خلال سدادة مسامية من مادة مقاومة للحرارة مثبتة في أسفل الدلو. وفي أعلى الحجرة يوجد قمع لاضافة العناصر السبائكية و/أو مكونات الخبث ان لزم الأمر.

وبفعل الفراغ يبدأ التفاعل الآتي:

$$C + O = CO$$

إن فقاعات CO المتكونة تعمل على تقليب المنصهر كما تقوم فقاعات الأركون بتعزيز هذا التقليب. إن عملية التقليب والخبث المضاف تعملان على إزالة فائقة للكبريت إن تطلب الأمر، كما تعمل فقاعات كل من الاركون واول اوكسيد الكربون على طفو وازالة متضمنات النتريدات وغاز النتروجين المذاب. علاوة علة ذلك فان العملية تقوم بازالة الهيدروجين والاوكسجين والكربون والكبريت والأكاسيد ومجانسة درجة حرارة المنصهر وتركيبه الكيمياوي.

صهر الالمنيوم ومعالجة المنصهر Remelting of Aluminum and Melt Treatment

يتم من خلال إعادة تدوير الألمنيوم اعادة استغلال الالمنيوم الخردة لإنتاج منتجات جديدة. وتعد العملية أقل تكلفة واستهلاكا للطاقة مقارنة بتحضير ألمنيوم جديدعن طريق التحليل الكهربائي لأوكسيد الألمنيوم Al_2O_3، والتي تحتاج إلى استخراج خام البوكسايت ومن ثم تنقيته باستخدام عملية باير. إن إعادة تدوير خردة الألمنيوم لا تتطلب سوى 5٪ من الطاقة المستخدمة في تصنيع الالمنيوم ولهذا السبب، فان ما يقرب من 31٪ من الألمنيوم المنتج في الولايات المتحدة يأتي من الخردة المعاد تدويرها.

تتضمن مصادر إعادة تدوير الألمنيوم: الطائرات، السيارات، الدراجات، القوارب، أجهزة الكومبيوتر، وتجهيزات المطابخ، المزاريب، الأسلاك والعديد من المنتجات الأخرى.

يأتي الالمنيوم في المرتبة الثانية بعد الحديد من حيث الانتاج والاستخدام العالمي بسبب الخصائص الفريدة التي يتميز بها ومن اهمها:

1- خفة وزنه.
2- سهولة صهره.
3- امتلاكه لنسبة عالية من المقاومة الى الوزن.
4- التوصيلية الحرارية والكهربائية العالية.
5- قابلية عالية على التشكيل.
6- قابلية على التسابك مع عدد من المعادن.
7- قابلية العديد من سبائكه على تحسين خواصها عن طريق المعاملات الحرارية.
8- المقاومة الممتازة للتآكل الجوي
9- وفرة خام البوكسايت الذي يستخلص منه الالمنيوم.

يعاني الالمنيوم المنصهر من وجود الهيدروجين المذاب الذي يتسبب في الحصول على منتج مسامي ضعيف الخواص ووجود المتضمنات وبخاصة الالومينا العالقة في المنصهر والتي تعمل هي الاخرى على اضعاف خواص منتجات الالمنيوم. لذا يجب معالجة المنصهر للتخلص منهما.

الهيدروجين المذاب

يدخل الهيدروجين المذاب الى الالمنيوم من خلال تفاعل منصهر الالمنيوم او المغنيسيوم ان وجد مع الرطوبة وكما يلي:

$$3H_2O + 2Al = Al_2O_3 + 6H$$

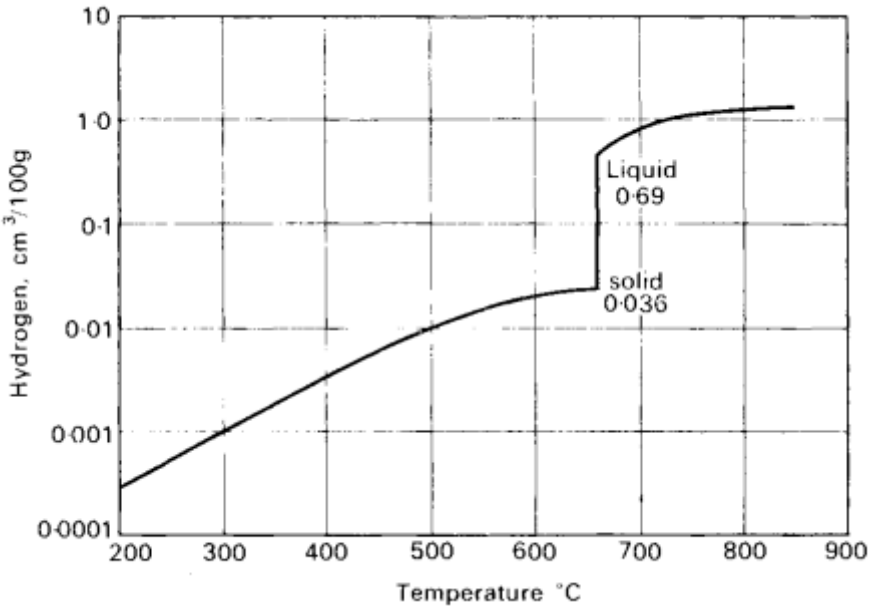
$H_2O + Mg = MgO + 2H$

المصدر الرئيسي للرطوبة هو جو الفرن ويمكن ان تأتي من مصادر اخرى منها:

- نواتج احتراق الوقود.
- الشحنة والبطانة والمعدات الرطبة.
- الشحوم والزيوت والاصباغ في الشحنة.

الطريقة الوحيدة لتقليل الهيدروجين الداخل من التفاعل مع رطوبة الجو هي تكوين قشرة من اوكسيد الالمنيوم فوق المنصهر.

يمكن للالمنيوم أن يذيب كميات كبيرة من الهيدروجين عند تحوله الى الحالة السائلة ففي حين انه يذيب 0.036 سم^3 لكل 100 غم من الالمنيوم في حالته الصلبة عند درجة حرارة 660 م^o فأنه يذيب 0.69 سم^3 لكل 100 غم من الالمنيوم في حالته السائلة عند نفس الدرجة الحرارية وكما مبين في الشكل أدناه.



طرائق ازالة الهيدروجين المذاب

1- المعاملة بالغازات Treatment with gases

تقسم المعاملة بالغازات الى المعاملة بالغازات الخاملة مثل الآركون والنيتروجين والمعاملة بالغازات النشطة مثل الكلورين والفلورين. يتم نفخ الغازات داخل المنصر فتتكون فقاعات غازية تنتقل من نقطة تكونها الى الاعلى خلال المنصهر. وبسبب الفرق في

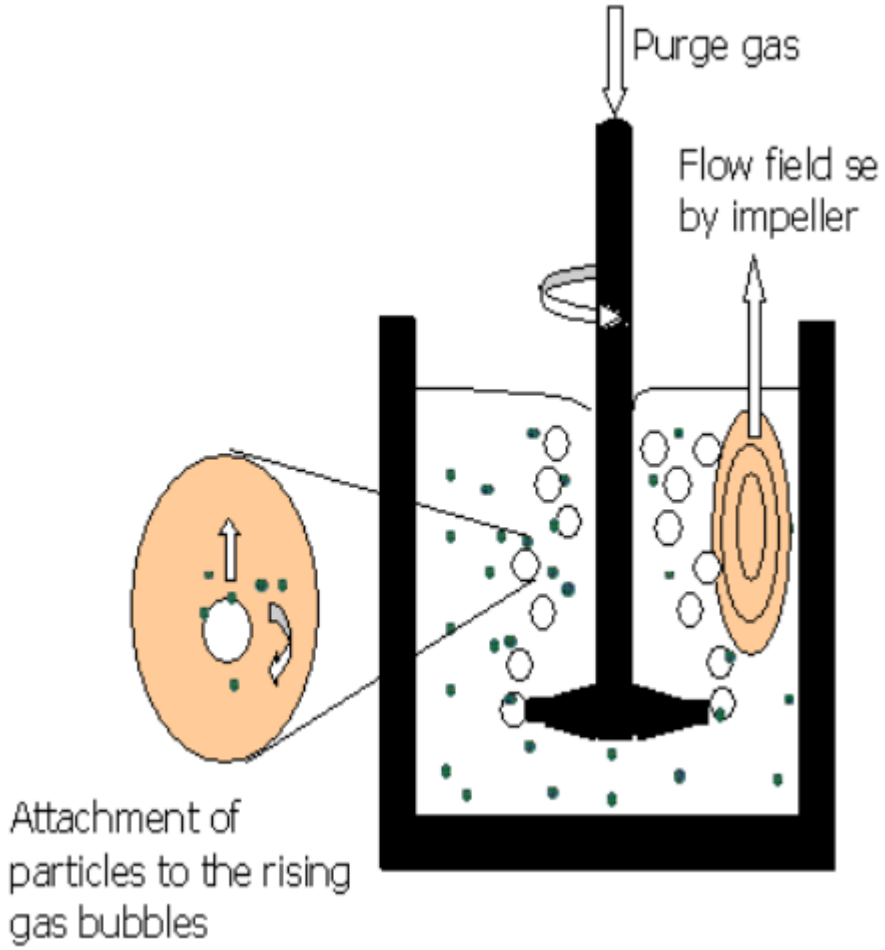
الضغط الجزئي للهيدروجين بين الفقاعة والمنصهر تنتشر ذرات الهيدروجين الى داخل الفقاعة الصاعدة حتى يتساوى الضغط الجزئي للهيدروجين بينهما او حتى تخرج من المنصهر الى جو الفرن. وباستمرار النفخ ينخفض مستوى الهيدروجين المذاب الى مستويات ضئيلة جدا.

إن الازالة بالغازات الخاملة تتطلب وقتا طويلا كما ان غاز الهيدروجين يتفاعل مع الالمنيوم عند الدرجات الحرارية التي تزيد عن 700 ^{o}م مكونا نتريد الالمنيوم AlN على شكل جسيمات عالقة وفي حالة وجود المغنيسيوم فانه، أي النتروجين، يتفاعل معه عند الدرجات الحرارية التي تزيد عن 670 ^{o}م مكونا نتريد المغنيسيوم Mg_3N_2 بشكل جسيمات عالقة ايضا.

أما نفخ غاز نشط مثل الكلور فأنه يتفاعل مع الالمنيوم السائل حسب المعادلة:

$$2Al + 3Cl_2 = 2AlCl_3$$

يتواجد $AlCl_3$ بحالة صلبة عند درجات الحرارة الاعتيادية ولكنه يتطاير فوق درجة حرارة 180 ^{o}م وبذلك يكون فقاعات صاعدة كما هي الحال مع الآركون ويقوم بأزالة الهيدروجين المذاب. إن فاعلية غاز الكلورين في الازالة تفوق فاعلية النتروجين إلا إنه غاز سام ويتسبب في فقدان أكبر بالالمنيوم وفي حالة وجود المغنيسيوم فانه يتفاعل مع الغاز بدلا من الالمنيوم ويمكن لفقدان المغنيسيوم ان يكون شديدا. الشكل أدناه يوضح طريقة ضخ الغازات بآلية التدوير لتحقيق التوزيع الأمثل لفقاعات الغاز وتصغير حجومها.



2- المعاملة بالكلوريدات Treatment with Chlorides

تقسم الكلوريدات التي يمكن استخدامها في ازالة الهيدروجين المذاب الى كلوريدات معدنية وكلوريدات عضوية. تتفاعل الكلوريدات المعدنية مع منصهر الامنيوم منتجة كلوريد الالمنيوم بشكل فقاعات ومعدن يدخل الى المنصهر كعنصر سبائكي مرغوب أو عنصر إشابة مضر. المعادلات التالية توضح التفاعلات المذكورة:

$$3ZnCl_2 + 2Al = 2AlCl_3 + 3Zn$$
$$3MgCl_2 + 2Al = 2AlCl_3 + 3Mg$$
$$3CuCl_2 + 2Al = 2AlCl_3 + 3Cu$$

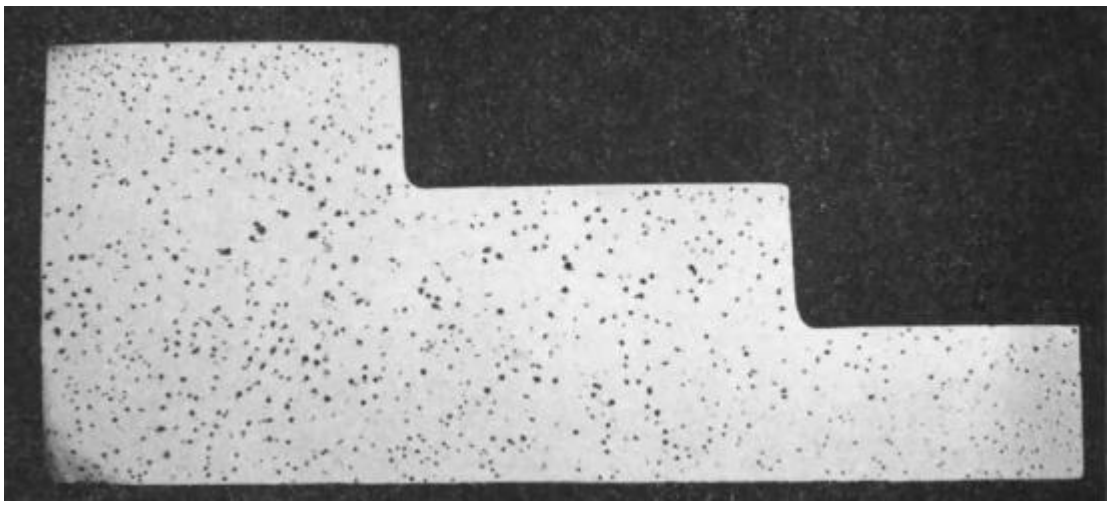
علاوة على امكانية قيام الكلوريدات المعدنية بادخال عناصر ضارة الى الالمنيوم فانها تمتص الماء بسرعة عالية كما انها ماصة للرطوبة التي بدخولها الى المنصهر تنتج الهيدروجين الذري المذاب.

أما الكلوريدات العضوية فقد نال كل من رابع كلوريد الكربون CCl_4 وهكساكلوروميثان C_2Cl_6 اهتماما كبيرا في ازالة الهيدروجين المذاب في منصهر الالمنيوم. بالنسبة CCl_4 فانه سائل في الحالة الاعتيادية ويواجه صعوبات في الاضافة كما

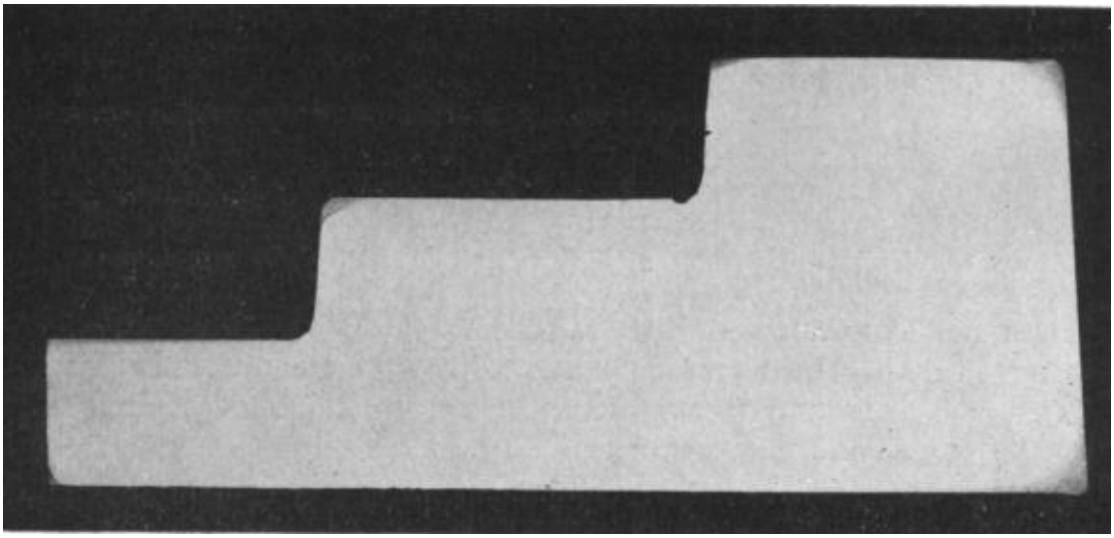
إن له أثر مسرطن ولم يتم استخدامه على نطاق تجاري. أما C_2Cl_6 فانه يلبي عمليا أغلب متطلبات ازالة الهيدروجين. يتواجد C_2Cl_6 بحالة صلبة عند الظروف الاعتيادية ولا يقوم بامتصاص الرطوبة ويتطاير (يتبخر) بدرجة حرارة 183 ^{o}م وكفوء في ازالة الهيدروجين ويستخدم على نطاق تجاري في العديد من البلدان. وبحقن C_2Cl_6 في منصهر الالمنيوم فان جزء من او كل التفاعلات الآتية تحدث:

$$Al + C_2Cl_6 = Al + C_2Cl_4 + Cl_2$$
$$2Al + 3Cl_2 = 2AlCl_3$$
$$Al + C_2Cl_4 = Al + CCl_4 + C$$
$$Al + CCl_4 = Al + Cl_2 + C$$
$$Al + C_2Cl_6(solid) = Al + C_2Cl_6\ (gaseous)$$

عند درجة حرارة 720 ^{o}م تقريبا فان 30% من C_2Cl_6 يتحلل بصورة غاز الكلور الذي يتفاعل مع الالمنيوم مكونا $AlCl_3$ الذي يتصاعد بشكل فقاعات تعمل على ازالة الهيدروجين. أن كل النواتج من التفاعلات أعلاه عدا الكربون تكون بصورة فقاعات غازية متصاعدة تزيل الهيدروجين. إن سهولة مناقلة C_2Cl_6 وسميته الواطئة وسهولة اضافته وفاعليته في ازالة الهيدروجين جعلت له قبولا لدى الكثير من منتجي الالمنيوم. يوضح الشكل أدناه مسبوكة المنيوم متدرجة المقطع قبل ازالة الهيدروجين مبينه مقدار المسامية المتكونة.



أما الشكل أدناه فيبين نفس المسبوكة ولكن بعد ازالة الهيدروجين باستخدام C_2Cl_6



3- المعاملة في الفراغ Treatment in a vacuum

يعتمد أساس عمل الطريقة على انخفاض ذوبانية الهيدروجين في المنصهر مع انخفاض أي من درجة الحرارة أو الضغط. وبناء على ذلك فأن تعرض المنصهر للفراغ سيدفع الهيدروجين على الخروج بصورة فقاعات غازية. إن تعقيد المعدات اللازمة والفترة الزمنية الطويلة المطلوبة للازالة تجعل طريقة المعاملة بالفراغ تقتصر على الاستخدامات البحثية، إلا إن الدمج بين طريقتي ضخ الغازات والمعاملة الفراغية في وقت واحد يعمل على الاسراع بعملية الازالة.

4- المعاملة بالموجات فوق السمعية Treatment with ultrasonic waves

في هذه الطريقة يتم تطبيق الموجات فوق السمعية على المنصهر مما يجعل ذرات الهيدروجين تصطدم وتتحد ببعضها لتكون جزيئات غازية تخرج من المنصهر بشكل فقاعات غازية. لم تجد الطريقة استخداما عمليا، ولكنها تعد طريقة فاعلة في ازالة الهيدروجين من المنصهرات ذات الكميات الصغيرة.

5- المعاملة بالمركبات والعناصر المكونة للهيدريدات Treatment with Compounds and Elements Forming Hydrides

في هذه الطريقة يتم إضافة مركبات أوعناصر لها القابلية على الاتحاد مع الهيدروجين المذاب وتكوين هيدريدات مستقرة. من هذه العناصر Zr, Ca, Na, Ti, Li . بعض هذه الهدريدات لا تذوب في الالمنيوم وتزال مع الخبث أو تبقى عالقة فيه. يعد

الزركونيوم من بين العناصر الفاعلة في إزالة الهيدروجين من منصهر الالمنيوم. يضاف الزركونيوم بصورة K_2ZrF_6 الذي يتفكك عند اضافته ليحرر الزركونيوم الذي يتفاعل مع كل من الالمنيوم والهيدروجين. يمكن ل 0.1g من Zr الاتحاد مع 18.4 cm^3 من الهيدروجين عند 700 $^oم$.

إزالة أوكسيد الألمنيوم والشوائب الاخرى The Removal of Aluminum and other Impurities

يتواجد أوكسيد الالمنيوم بصورة عالق في منصهر الالمنيوم رغم أن كثافته أعلى من كثافة المنصهر وذلك لطبيعته المسامية واستقطابه لذرات الهيدروجين. يمثل أوكسيد الالمنيوم الشائبة الرئيسية ويأتي من مصادر عدة منها:

- تفاعل الالمنيوم مع رطوبة الجو

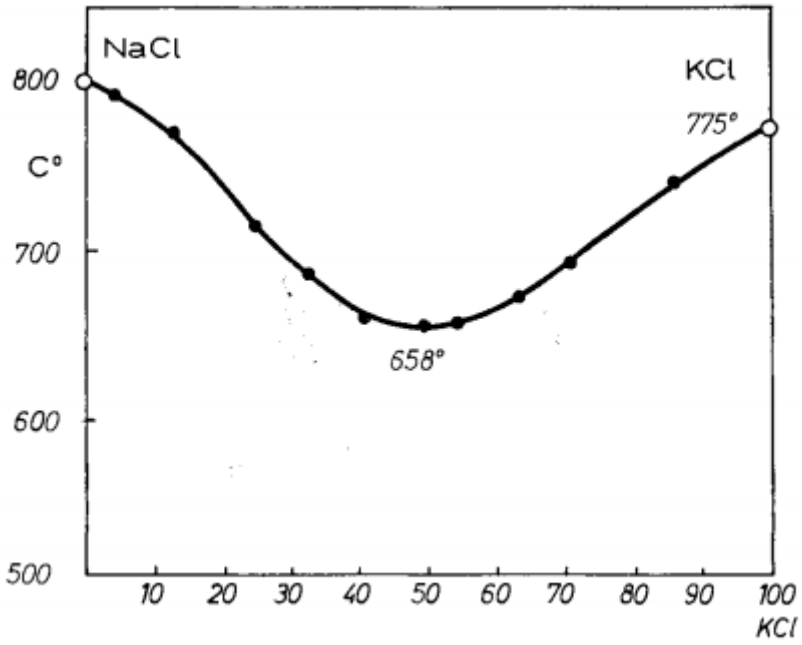
$$3H_2O + 2Al = Al_2O_3 + 6H$$

- تفاعل الالمنيوم مع رطوبة الشحنة والمعدات والبطانة
- اكاسيد الخردة نفسها
- تفاعل المنصهر مع أوكسجين الجو

ويكون الاوكسيد مستقرا جدا ولا يمكن اختزاله ضمن ظروف الصهر الاعتيادية. وللتخلص منه يتم اتباع عدة طرائق منها:

1- استخدام الصهيرة Flux

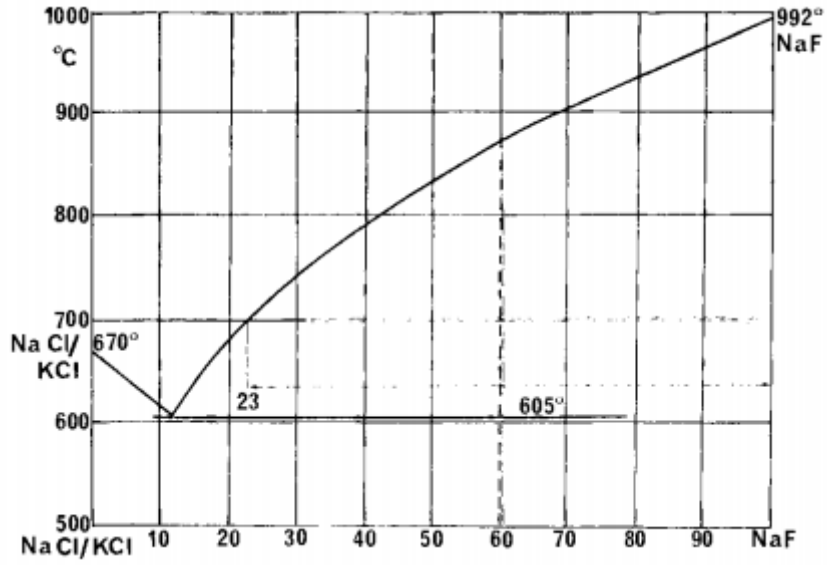
تقسم الصهيرة المستخدمة الى صهيرة خاملة passive flux وصهيرة نشطة active flux. تقوم الصهيرة الخاملة بحماية سطح الالمنيوم من الاكسدة ومنع تفاعله مع رطوبة الجو وذلك بتكوين خبث سائل. تتكون الصهيرة الخاملة من الخليط اليوتكتيكي من NaCl – KCl والذي ينصهر بدرجة حرارة 658 $^oم$. الشكل أدناه يمثل مخطط التوازن الحراري لهذا النظام.



إن فعل الازالة لهذه الصهيرة هو فعل ميكانيكيي إذ تقوم باختراق السطح البيني للالومينا مع منصهر الالمنيوم ومن ثم تنتزع الاوكسيد وتنقله من المنصهر الى الخبث الذي يسكب بعد ذلك.

أما الصهيرة النشطة فهي تحتوي على الفلوريدات ويكون لها فعلا كيميائيا إضافة الى الفعل الميكانيكي بالازالة إذ انها تتفاعل كيميائيا مع الالومينا. ولأن كثافة الصهيرة أقل من كثافة المنصهر فأنها تطفو ولذلك يستلزم الامر تحريك وتقليب المنصهر لحدوث التمازج وتحقيق إزالة فاعلة للالومينا.

يكون الخليط اليوتكتيكي المكون من (NaCl + KCl) 88% + 12%NaF والمبين في مخطط التوازن الحراري أدناه أساسا لأغلب أنواع الصهيرة.



ويمكن ان يحدث أحد التفاعلين أدناه لأزالة الألومينا:

$$4NaF + 2Al_2O_3 = 3NaAlO_2 + NaAlF_4$$

or

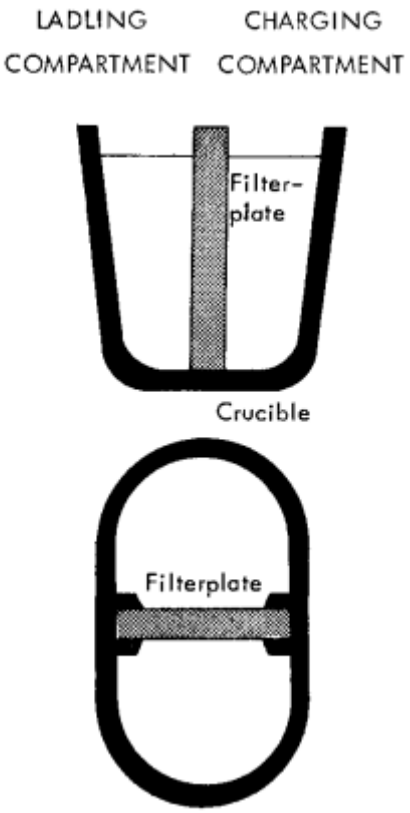
$$2NaF + Al_2O_3 = NaAlO_2 + NaAlOF_2$$

2- الترشيح Filtering

يتم في هذه الطريقة تنقية الالمنيوم من الالومينا والشوائب العالقة الاخرى عن طريق الترشيح باستخدام مواد ترشيح مناسبة وقد لاقت قبولا متزايدا. توجد اساليب ترشح عديدة منها:

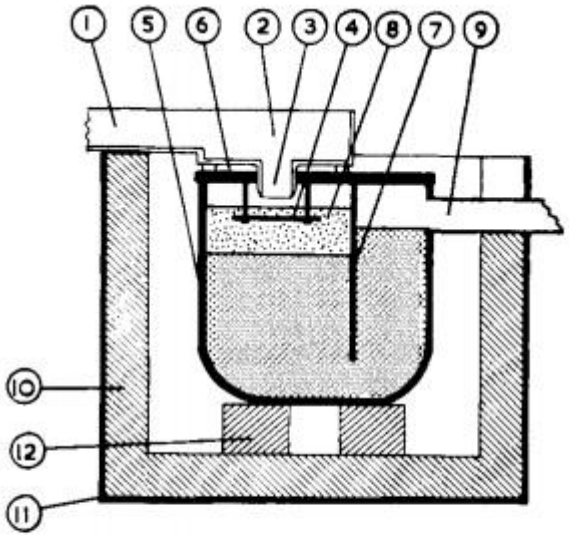
أ- مرشح مسامي Porous Filter

في هذه الطريقة يتم استخدام صفيحة مسامية من مادة مقاومة للحرارة تعمل على ترشيح المنصهر وتنقيته من العوالق. يتم تثبيت الصفيحة في بوتقة خاصة تقسم الحجرة الى قسمين أحدهما للشحن ولآخر للراشح. وعند التسخين المسبق للصفيحة فأن عملية الترشيح تنجز بشكل جيد ولا يتطلب الامر سوى ارتفاع head صغير لبدء الترشيح. الشكل أدناه يوضح العملية:



ب- الترشيح بالصهيرة Flux – Washing Process

في هذه الطريقة يتم امرار المنصهر المراد تنقيته من خلال طبقة من الصهيرة السائلة التي تقوم بقنص الالومينا والشوائب العالقة من المنصهر في أثناء مروره خلالها كما تقوم في ذات الوقت بأزالة الهيدروجين المستقطب داخل مسامات العوالق. تتكون الصهيرة من الكلوريدات والفلوريدات أي إن عملية الازالة تستند الى الفعلين الميكانيكي والكيميائي. والشكل أدناه يوضح عمل الطريقة:



1	Entry Launder	7	Plumbago Baffle
2	Tundish	8	Fluid Flux Layer
3	Downspout	9	Exit Launder
4	Circular Spreader Plate	10	Refractory Furnace Lining
5	Plumbago Crucible	11	Sheet Steel Retainer
6	Lid	12	Refractory Stool

ت- صوف الزجاج Glass Wool

تتم عملية الترشيح في هذه الطريقة بوضع قماش زجاجي في مجرى المعدن قبل دخوله الى تجويف القالب وقد أعطت الطريقة نتائج جيدة في عملية الترشيح والتنقية.

صهر النحاس ومعالجة المنصهر Copper Melting and Melt Treatment

يأتي النحاس في المرتبة الثالثة بعد الحديد والالمنيوم من حيث الانتاج والاستخدام العالمي. وقد احتل هذه المرتبة للخصائص المميزة له ومنها:

1- التوصيلية الممتازة للحرارة والكهربائية.
2- المقاومة العالية للتآكل.
3- قابلية التشكيل العالية.
4- قابلية التسابك مع عدد كبير من المعادن.
5- تعدد طرائق استخلاصه من الخامات وحتى من الخامات الفقيرة.

يمكن تقسيم الشوائب الموجودة في النحاس الى شوائب النحاس الاولي Primary copper والمتبقية بعد التنقية الالكتروليتية وشوائب خردة النحاس الثانوي Secondary copper غير المنقى الكتروليتيا. تنتج التنقية الالكتروليتية نحاسا بنقاوة لا تقل عن 99.995 wt. % Cu وتمثل الفضة والكبريت والنيكل والحديد أهم الشوائب. ليس لهذه العناصر تأثيرا مهما على خواص النحاس بسبب نسبها الضئيلة. أما الشوائب المهمة والحرجة في النحاس الالكتروليتي فهي الهيدروجين والاوكسجين علاوة على المتضمنات التي تدخل الى النحاس في اثناء اعادة الصهر والسباكة.

أما النحاس الثانوي فأن مسألة الشوائب أكثر تعقيداً إذ يوجد نوعان من الخردة وهي الخردة المصنفة Sorted Scrap وهي غالبا خردة نظيفة يمكن اعادة استخدامها بسهولة وبصورة مباشرة. أما النوع الآخر فهو الخردة القديمة والتي تتكون من سبائك مختلفة بل وحتى ممتزجة بمعادن ومواد أخرى. وعند الحاجة لأنتاج سبيكة نظيفة ومحددة التركيب من هذه الخردة فأن العناصر غير المرغوبة يجب أن تزال أو تقلل نسبها الى الحد المسموح به. تقسم الشوائب المتواجدة في هذا النوع من الخردة إلى:

1-العناصر الذائبة في المنصهر

وحيث ان النحاس من المعادن النبيلة فان معادن مثل Si, Al, Fe يمكن ازالتها بسهولة من منصهر النحاس عن طريق الاكسدة التفاضلية والوصول بنسبها الى قيم منخفضة جدا لا تبقي لها تأثيرا يذكر على خواص النحاس وقد تم تعزيز هذا الاسلوب باضافة خبث يمكنه الاتحاد بالاكاسيد المتكونة وازالتها من المنصهر. ويمكن لمعادن مثل الزنك والزرنيخ والانتيمون أن تزال عن طريق التبخر في جو مفرغ. أما المعادن الاخرى مثل النيكل والكوبلت والقصدير والرصاص فان استخدام خبث خاص بها هو الاسلوب الاكثر اقتصاديا في ازالتها. يتراوح محتوى الشوائب المعدنية المسموح بها في السبائك ذات الاستخدامات التقنية بين 0.03 wt. % و 0.05 wt. %

2-الغازات الذائبة في المنصهر

إن لدخول الغازات وبخاصة الاوكسجين والهيدروجين الى المنصهر اثر بالغ السلبية على خواص النحاس. لهذين الغازين قابلية عالية على الذوبان في منصهر النحاس. هذه الذوبانية تنخفض بشكل حاد في أثناء التجمد مما يؤدي الى تكوين الفقاعات (المسامية) في المنتج الصلب. يمكن للاوكسجين ان يكون Cu_2O عندما يزيد تواجدة عن حد الذوبانية.

$$4Cu + O_2 = 2Cu_2O$$

يتفاعل أوكسيد النحاس مباشرة مع الهيدروجين المتواجد في جو التلدين (جو الفرن) أو أجواء اللحام مكونا بخار الماء في أثناء ذلك. تدعى هذه الظاهرة بهشاشية الهيدروجين Hydrogen embrittlement

$$Cu_2O + H_2 = 2Cu + H_2O$$

في العديد من السبائك المستخدمة على نطاق تقني فان وجود الاوكسجين بمئات قليلة من ppm يكون مقبولا بينما في السبائك ذات النوعية الخاصة يجب تقليل محتوى الاوكسجين لأقل من 1ppm

يتم إزالة الهيدروجين بتأمين وفرة من الاوكسجين في المنصهر أي بتوفير اجواء مؤكسدة. وبعد ازالة الهيدروجين تتم معالجة المنصهر تحت ظروف مختزلة لازالة الاوكسجين المتبقي.

3-المتضمنات

ليس للمتضمنات الصلبة، مثل الاكاسيد والمركبات بين المعدنية تأثيرا على النحاس وسبائكه لأن الفرق الكبير بين كثافتها وكثافة النحاس المنصهر يجعلها تطفو فوق المنصهر (فمثلا كثافة النحاس عند درجة حرارة 1100 ^{o}م تبلغ 7.96 g/cm^3 بينما تبلغ كثافة الاوكسيد 5.25 g/cm^3) ومع ذلك وبالرغم من الفرق الكبير في الكثافة فان الجسيمات الصغيرة جدا (في حالة FeO الجسيمات التي يقل قطرها عن 10 µm تصعد خلال المنصهر ببطئ 0.59 m/h) اي انها تبقى عمليا عالقة في المنصهر وتقود الى مشاكل عند الحاجة الى انتاج أسلاك صغيرة جدا وكذلك في حالة انتاج رقائق النحاس. يتم ازالة الجسيمات الصلبة من منصهر النحاس عن طريق الترسيب أو الطفو أو الترشيح بمرشحات مسامية من الالومينا ومن كربيد السليكون.

السباكة Casting

تعرف السباكة بانها عملية صهر المعادن والسبائك ومعالجة المنصهر لضبط التركيب الكيمياوي والتخلص من الشوائب والمتضمنات والغازات الذائبة ومن ثم صب المنصهر في قالب مناسب بكل مصبوبة Ingot أو مسبوكة Casting .

عادة ما تزيد درجة حرارة الصب عن درجة حرارة الانصهار، ويسمى الفرق بينهما بفرط التسخين Super Heating . يعطى فرط التسخين من أجل تعويض الحرارة المفقودة في أثناء النقل وعند الصب في القوالب علاوة على الحاجة الى زيادة انسيابية المعدن السائل وبخاصة في المسبوكات ذات الممرات الضيقة والمقاطع الرقيقة. مع فوائد ولوازم فرط التسخين الا الفرط الزائد ينطوي على سلبيات عديدة منها احتراق عناصر سبائكية مفيدة وخسائر طاقة واستهلاك وقت وزيادة كلف.

المسبوكة: عبارة عن منتج نهائي يستخدم بعد السباكة مباشرة بعد قطع الزوائد أو بعد إجراء عمليات ضبط الابعاد والانهاء السطحي المطلوب.

المصبوبة: منتج وسطي ينقل الى عادة الى عمليات التشكيل المعدني لانتاج منتج نهائي او منتج وسطي آخر.

تقسم عمليات السباكة بشكل عام الى نوعين رئيسيين هما:

أولا: السباكة في القوالب المستهلكة **Expendable Mold Casting**

ثانيا: السباكة في القوالب الدائمية **Permanent Mold Casting**

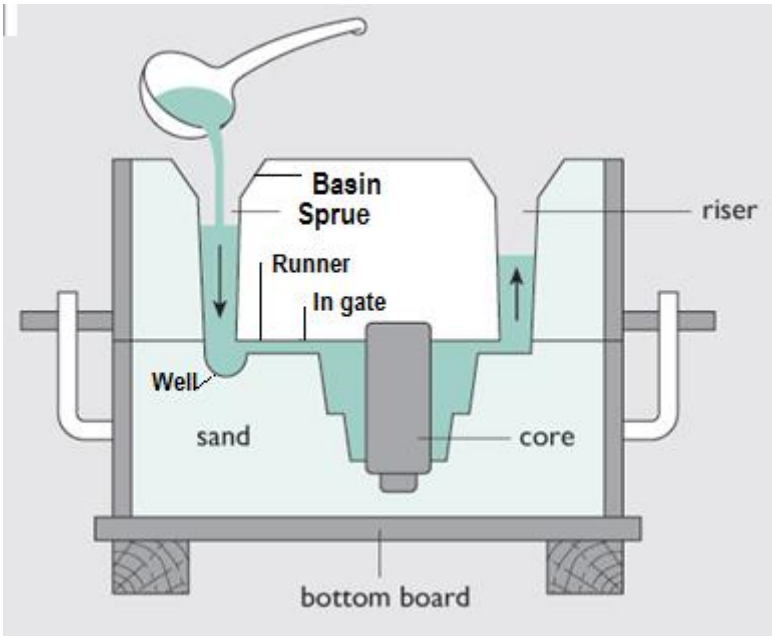
وفيما يلي شرح لعمليات السباكة ضمن النوعين أعلاه:

أولا: السباكة في القوالب المستهلكة

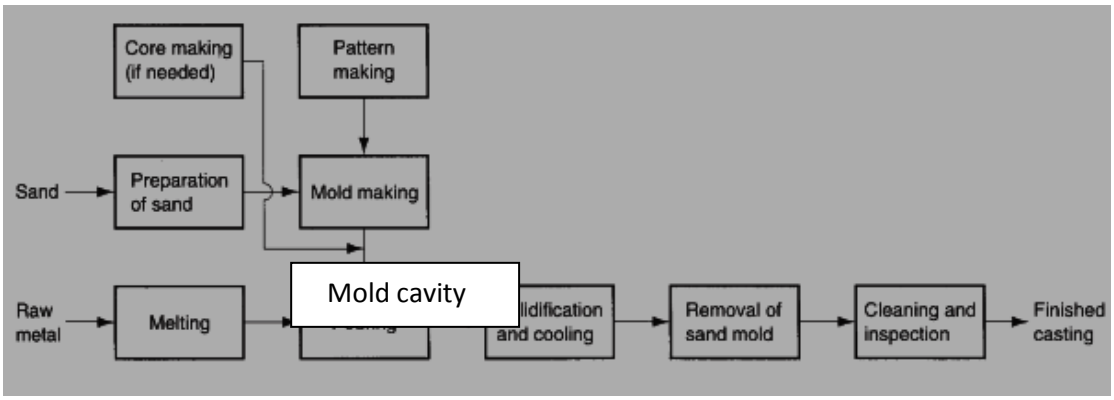
في هذا النوع من العمليات يتم تحطيم القالب لاستخراج المسبوكة منه أي الاحاجة لقالب جديد لكل مسبوكة تتضمن السباكة في القوالب المستهلكة أنوعا عديدة من عمليات السباكة منها:

1- السباكة الرملية **Sand Casting**

تتميز هذه الطريقة باستخدامها الرمل كمادة مقالبة. إن ما يزيد عن 70% من المسبوكات المعدنية يتم انتاجها عن طريق السباكة الرملية.



وفيما يلي مخطط يبين تتابع العمليات اللازمة لانتاج مسبوكة رملي:



محاسن السباكة الرملية

- يمكن عن طريقها انتاج كل انواع المسبوكات سواء الحديدية او غير الحديدية تقريبا.
- مرونة عالية في حجم ووزن المسبوكة اذ يمكن عن طريقها انتاج مسبوكات يتراوح وزنها من عشرات الغرامات الى ما يزيد عن 200 طن.
- مرونة عالية في التصميم اذ يمكن من خلالها انتاج مسبوكات بأي تفاصيل خارجية او داخلية وبلا محددات.
- يمكن استخدامها في الانتاج الكمي او في انتاج اعداد قليلة بل حتى قطعة واحدة.
- كلف منخفضة للعدد والادوات والمواد المطلوبة

محددات الطريقة

- اسطح المسبوكة اكثر خشونة من طرائق السباكة الاخرى.
- دقة منخفضة في الابعاد.
- تتطلب عمليات ومعالجات لاحقة.
- تتطلب سماحات تشغيل كبيرة.
- بنية بلورية خشنة.
- خصائص ميكانيكية أقل مما في الطرائق الاخرى.

رمال المقالبة

يتكون رمل المقالبة من الرمل والمادة الرابطة (الطين عادة) والماء. وفي بعض الاحيان يضاف الية مواد أخرى لتحسين المقاومة والانسيابية والتهشمية والمقاومة الحرارية وغيرها. يتكون رمل المقالبة النموذجي من خليط مكون من رمل مستعمل او جديد يحتوي على SiO_2 70% و 23% ماء و 7% طين.

على رمال المقالبة أن تمتلك الخصائص الآتية:

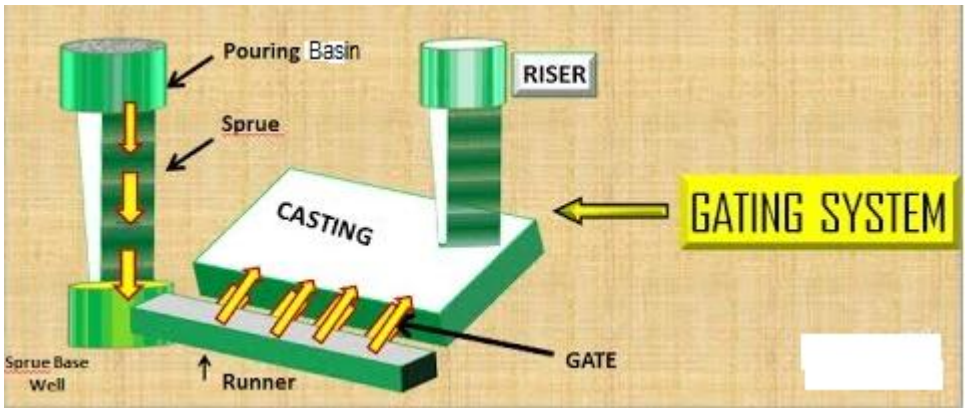
- ✓ المقاومة الحرارية Refractoriness وهي قابلية الرمل على تحمل الدرجات الحرارية العالية للمعن السائل بدون تحطم او تشوه.
- ✓ الانفاذية Permeability وهي قابلية الرمل على تصريف الغازات.
- ✓ الانسيابية Flowability وهي قابلية الرمل على الانسياب خلال التفاصيل المعقدة والزوايا الحادة وتحقيق كثافة متجانسة لكل القالب.
- ✓ التماسكية أو الترابط Cohesiveness (or bond) وهي قابلية حبيبات الرمل على الترابط والتماسك فيما بينها من خلال المواد الرابطة بعد اخراج النموذج.
- ✓ الالتصاقية Adhesiveness وهي قابلية الرمل على الالتصاق على سطح صندوق المقالبة بدون انهيار في اثناء النقل والمناولة.
- ✓ التهشمية Collapsibility وهي قابلية الرمل على التهشم وعدم الالتصاق الى سطح المسبوكة بعد التجمد والتبريد.
- ✓ الخمولية الكيميائية Chemical inertness ويقصد به عدم التفاعل مع المعدن السائل.
- ✓ الوفرة Availability وهي خاصية مهمة جدا اذ ان الطن الواحد من المعدن المصبوب يتطلب ثلاثة الى ستة اطنان رمل.

منظومة الصب Pouring System

يعود مصطلح منظومة الصب الى كل الممرات التي يمر خلالها المعدن المنصهر ليدخل الى تجويف القالب. تتكون منظومة الصب من الاجزاء الآتية:

- حوض الصب Pouring basin
- المصب Basin
- المجرى Runner
- المداخل Ingates
- المغذي Feeder

وكما مبين في الشكل أدناه:



وظائف منظومة الصب

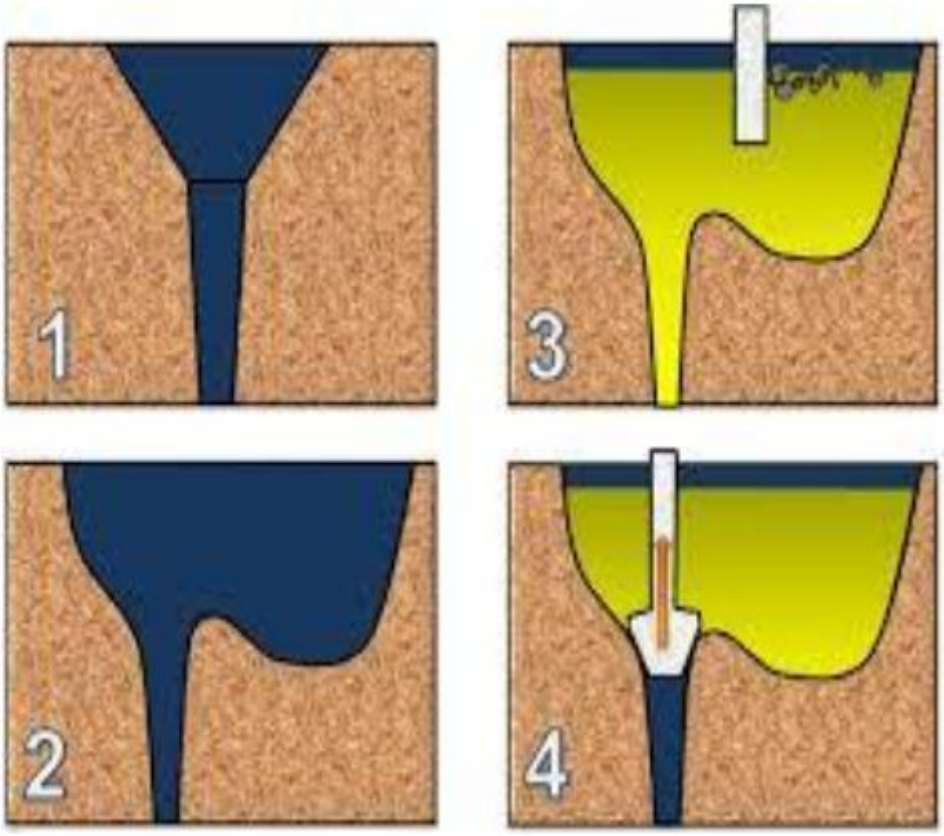
تهدف منظومة الصب الى الحصول على مسبوكة مضبوطة خالية من العيوب من خلال:

- ملئ تجويف القالب بأقصر وقت أي قبل بدء التجمد وبأقل فرط تسخين ممكن.
- انسياب المعدن بأقل اضطراب ممكن.
- منع دخول جسيمات الخبث وحبيبات الرمل والمواد الغريبة الى تجويف القالب.
- التحكم في معدل دخول المعدن المنصهر الى تجويف القالب.
- تحقيق انحدار حراري مرغوب.
- أن تكون المنظومة اقتصادية وسهلة التنفيذ والازالة بعد التجمد.

أما وظائف كل جزء من أجزاء منظومة الصب فهي كالآتي:

حوض الصب Pouring Basin (Cup)

- يسهل على العامل توجيه المعدن السائل من الدلو Ladle نحو المصب.
- تنظيم معدل جريان المعدن السائل.
- تقليل الاضطراب عند مدخل المصب.
- يساعد على فصل جسيمات الخبث والنفايات dross عن المعدن السائل.



المصب Sprue

- يقوم بتغذية المعدن السائل الى المجرى runner الذي يوصله بدوره الى المسبوكة من خلال المدخل.
- منع ذوبان الغازات في المعدن السائل وذلك بأعطاء المصب سلبة تجعله ممتلأ بالمعدن طيلة فترة الصب.

المجرى Runner

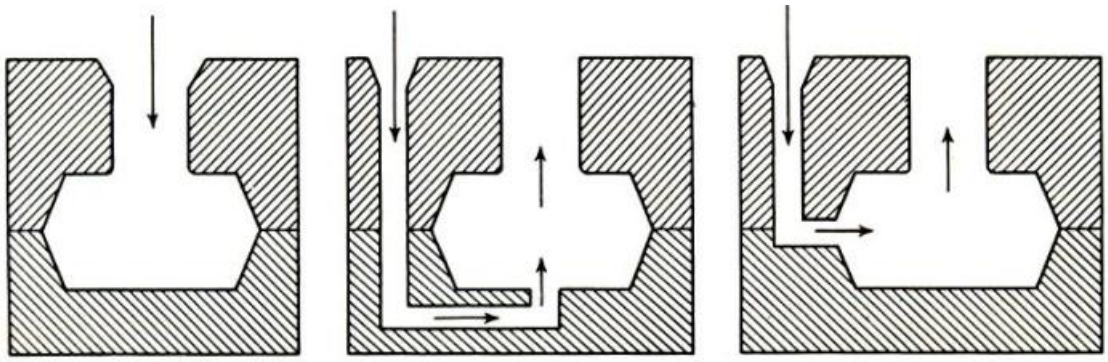
- يقوم بتحويل اتجاه جريان المعدن من الوضع العمودي الى الوضع الافقي ومن ثم ايصاله الى المدخل.

المدخل (المداخل) Gate (gates)

- يربط المجرى بتجويف القالب.

توجد هنالك ثلاثة أنواع من المداخل أو ثلاثة أساليب للصب هي:

- ❖ الصب من الاعلى (المجرى العلوي) (Top Pouring (Top Gate
- ❖ الصب من الاسفل (المجرى العلوي) (Bottom Pouring (Bottom Gate
- ❖ الصب الجانبي (المجرى الجانبي) (Side Pouring (Side Gate

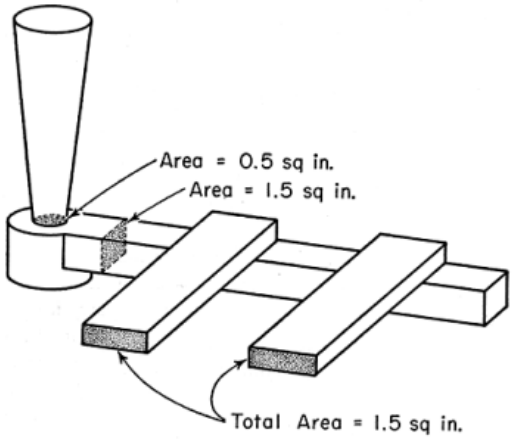


(a) Top pouring system, (b) Bottom pouring system, (c) Side pouring system

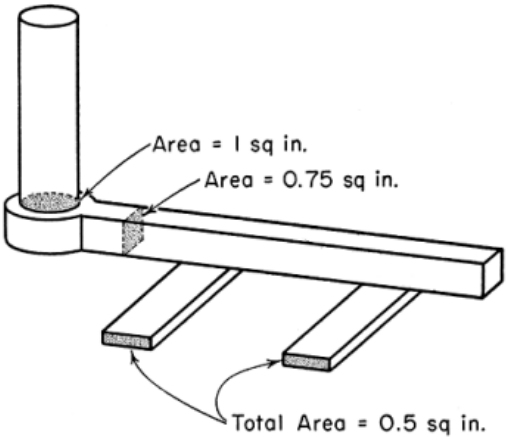
وفيما يلي مقارنة بين أسلوبي الصب من الأعلى والاسفل:

الصب من الاعلى	الصب من الاسفل
1-معدل صب أعلى	معدل صب أقل (الجريان عكس الجاذبية)
2-يتطلب انسيابية أقل	يتطلب انسيابية أعلى
3-تناثر شديد للمعدن وتعرية للقالب	يمنع تناثر لمعدن وتعرية للقالب
4-يصاحبه تأكسد للمعدن	تأكسد أقل
5-إضطراب شديد للمعدن	إضطراب أقل
6-انحدار حراري مفضل	انحدار حراري غيرمفضل

كما تقسم منظومة الصب الى منظومة انضغاطية Pressurized System وأخرى غير انضغاطية Unpressurized System وكما مبين في الشكل أدناه:



Unpressurized System



Pressurized System

وفيما يلي مقارنة بين المنظومتين:

المنظومة الانضغاطية	المنظومة غير الانضغاطية
1-يستخدم المدخل كخانق Choke	يستخدم مخرج المصب كخانق
2-تتزايد سرعة المعدن من المصب الى المجرى الى المدخل	تتناقص سرعة المعدن من المصب الى المجرى الى المدخل
3-يحدث اضطراب	يكون الاضطراب على أدناه
4-تبقى المنظومة ممتلئة نتيجة الضغط الخلفي	يصعب تحقيق ذلك إذ يتطلب عناية كبيرة بالتصميم
5-تتساوى سرعة الجريان في المداخل المتعددة	يصعب تحقيق ذلك
6-حجم منظومة الصب أصغر ومن ثم معامل انتفاع عالي	حجم منظومة الصب أكبر ومن ثم معامل انتفاع أوطأ

أما فيما يتعلق بحسابات منظومة الصب فسيتم تناولها لاحقا.

منظومة التغذية Feeding System

يعرف المغذي بأنه خزان للمعدن السائل وظيفته التعويض عن التقلص أو الانكماش Shrinkage الحاصل في المعدن أثناء التجمد. توجد قواعد عامة يجب مراعاتها عند تصميم منظومة التغذية وهي:

- ❖ أن يحقق الكفاية الحجمية.
- ❖ أن يحقق كفاية المدى.
- ❖ أن تكون نسبة الحجم الى المساحة السطحية اكبر ما يمكن.
- ❖ أن تكون مساحة التماس مع المسبوكة أقل ما يمكن.
- ❖ أن يشجع على الانجماد الاتجاهي وأن يكون آخر الاجزاء انجمادا.
- ❖ أن يوضع عند المقاطع السميكة.
- ❖ أن يكون عدد المغذيات أقل ما يمكن وحجومها أصغر ما يمكن.

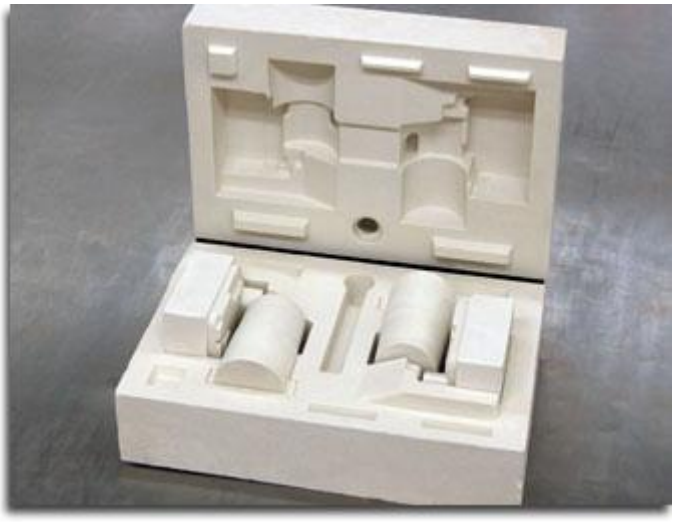
وحيث أن ما يتبقى من معدن في المغذي هو خسارة ويعد ضياعا في المعدن وتقليلا لعامل الانتفاع في عملية السباكة فإنه من الضروري بمكان زيادة كفاءة المغذي من خلال الاساليب الآتية:

- ❖ استخدام المواد العازلة لتقليل الخسائر الحرارية والاحتفاظ بالمعدن السائل في المغذي لفترة أطول.
- ❖ استخدام المواد الباعثة للحرارة لنفس الغرض أعلاه.
- ❖ استخدام القوس الكهربائي كمصدر للحرارة ولنفس الغرض أعلاه.
- ❖ استخدام المصقعات لتعجيل انجماد المسبوكة أو الاجزاء المراد انجمادها بسرعة.

أما حسابات منظومة التغذية فسيتم تناولها لاحقا.

2- السباكة في قوالب الجص Plaster Mold Casting

هذه الطريقة مماثلة لطريقة السباكة الرملية فيما عدا استخدام جص باريس كمادة مقالبة بدلا عن الرمل. تستخدم هذه الطريقة في انتاج الصمامات valves والتروس gears وأجزاء الاقفال lock components والعدد tooling.



محاسن الطريقة

- انهاء سطحي ممتاز.
- امكانية سباكة المقاطع الرقيقة.
- تنتج تفاصيل هندسية دقيقة.

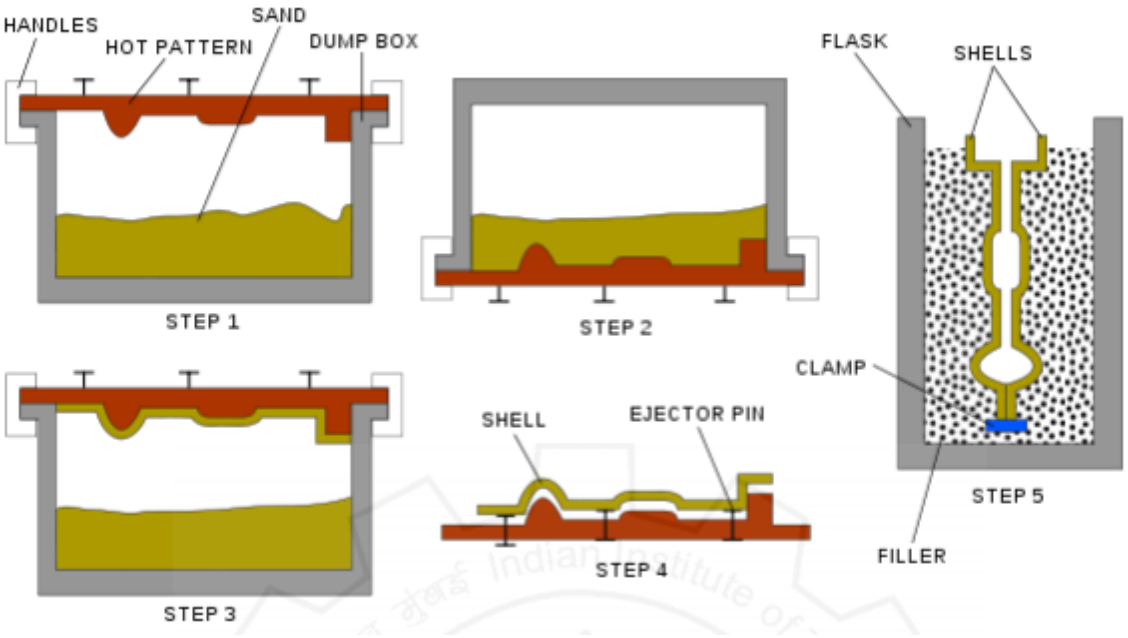
محددات الطريقة

- توجد محدودية للمعادن التي يمكن سباكتها بهذه الطريقة إذ إن قالب الجص لا يتحمل الدرجات الحرارية التي تزيد على 1200°م .
- معدل انتاج منخفض إذ يستغرق اعداد القالب وقتا طويلا.
- قالب الجص غير نفاذ للغازات.

3- سباكة القشرة Shell Molding

يستخدم في هذه الطريقة نموذجا من حديد الزهر الرمادي او الالمنيوم. يسخن النموذج بين 250 و 260 °م ، ثم يصب عليه خليط الرمل والمادة الراتنجية resin مثل الفينول فورمالديهايد. يقوم النموذج الساخن بصهر الراتنج الذي يعمل على ترابط حبيبات الرمل. وبعد فترة معينة يقلب النموذج والرمل فيتساقط الرمل الزائد وتبقى قشرة من الخليط ملتصقة بسطح النموذج بسمك 6 ملم تقريبا. تنزع القشرة من النموذج وتسخن لاكمال عملية التصلب. وبتجميع أجزاء القالب وتثبيتها ببعضها نحصل على تجويف القالب. هذه الطريقة نموذجية لانتاج مسبوكات الفولاذ التي يقل وزنها عن 10 كغم. الشكل أدناه يوضح خطوات السباكة بهذه الطريقة. من الاجزاء التي تنع بهذه الطريقة المتشعبات والصمامات

واذرع التوصيل واعمدة المرافق في محركات الاحتراق الداخلي والتروس والنخاسات وغيرها كثير.



Steps in shell molding

محاسن الطريقة

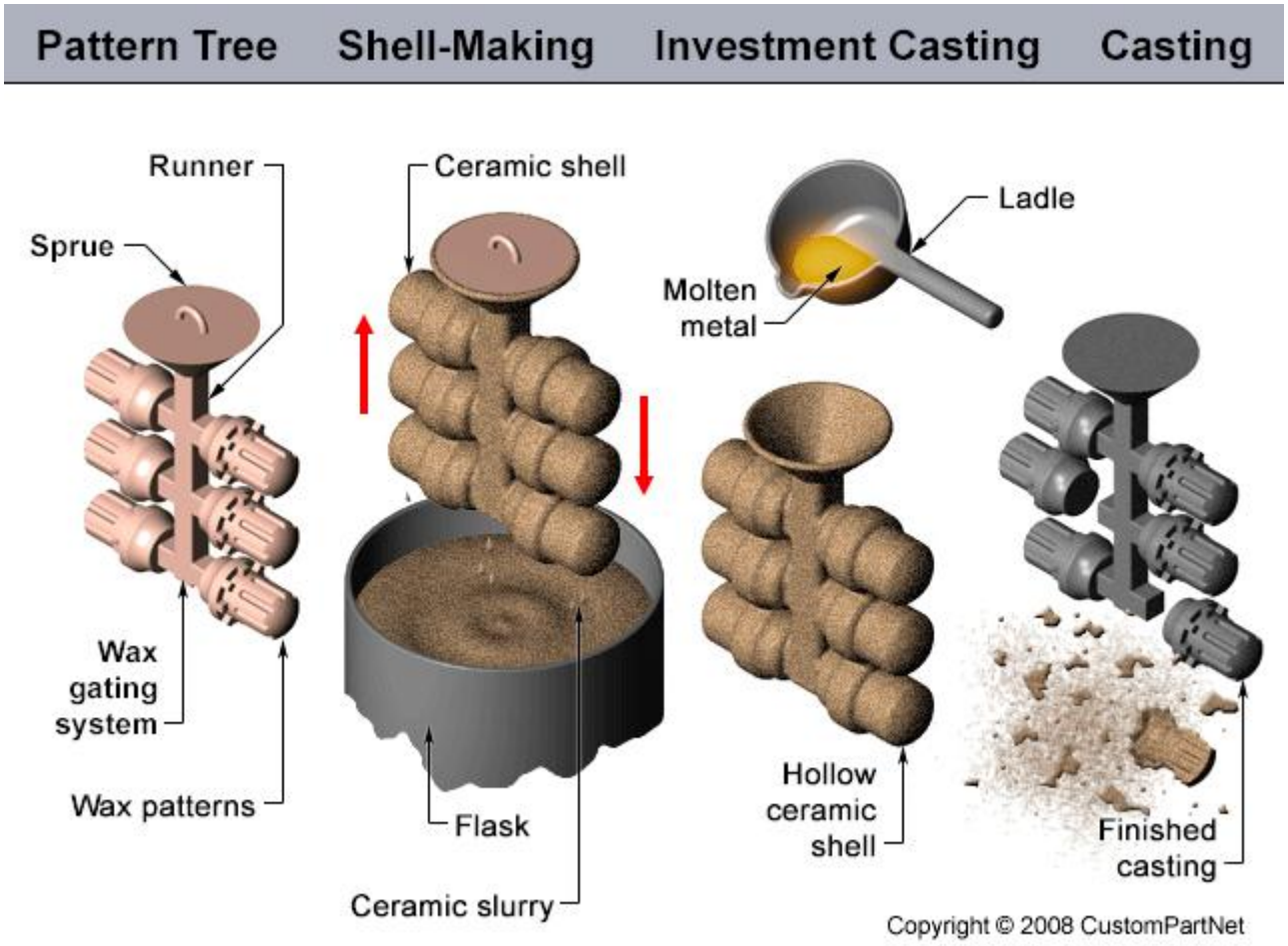
- إنهاء سطحي ممتاز
- دقة جيدة في الابعاد
- يمكن انتاج الاشكال المعقدة ذات الزوايا الحادة والرقيقة بهذه الطريقة.
- الحاجة الى عمليات التشغيل اللاحقة أقل مما في السباكة الرملية.
- تمتلك القشرة انفاذية عالية للغازات.
- إمكانية خزن القالب لفترة طويلة.

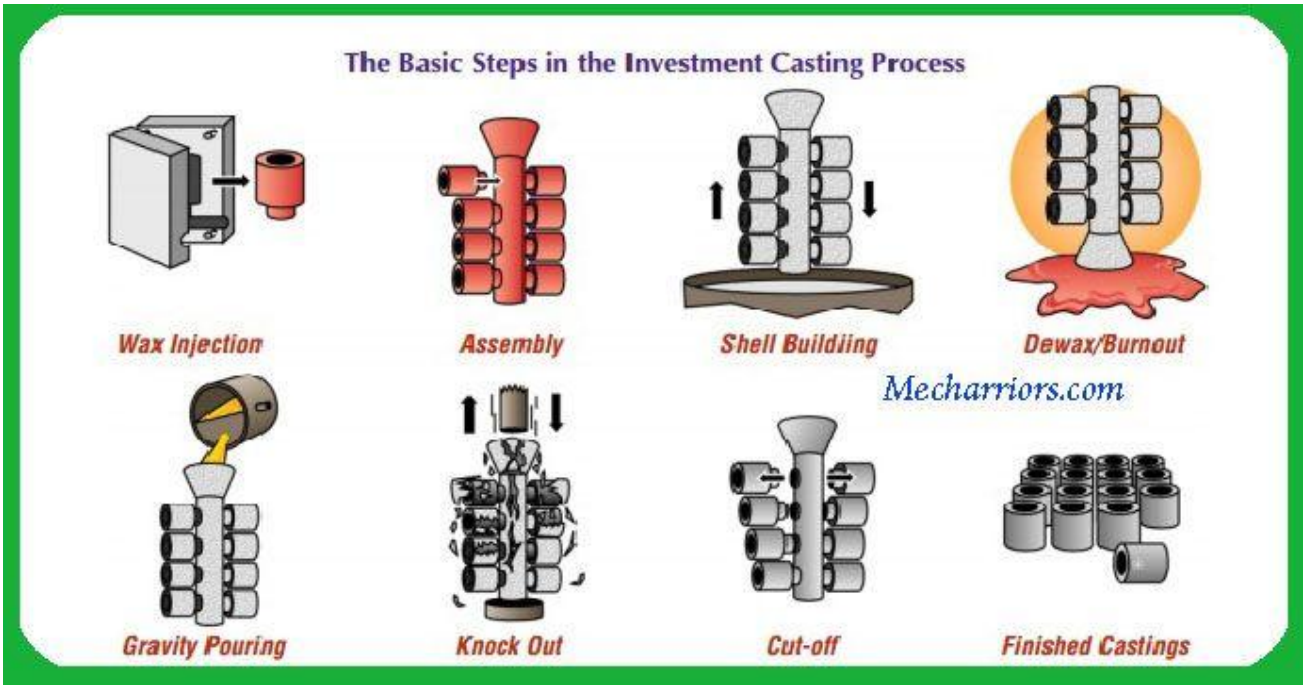
محددات الطريقة

- الكلف العالية للنموذج
- طول الفترة اللازمة لأعداد القالب

4- السباكة الدقيقة (السباكة بالشمع المفقود) Investment casting (lost wax casting)

يصنع النموذج في هذه الطريقة من الشمع wax ثم يتم تجميع عدد من هذه النماذج قد يصل الى 150 نموذج حول مصب واحد بما يشبه الشجرة. وبعد ذلك تغمر الشجرة في مادة سيراميكية مثل طحين السليكا او الالومينا عالقة في محلول سليكات الاثيل على شكل ملاط slurry فتتكوين قشرة على هذه الشجرة. ثم تسخن الشجرة في فرن وهي في وضع مقلوب وترفع درجة الحرارة بين 150 و 200 ^{o}م حتى ينصهر الشمع وينسكب من خلال المصب. ثم ترفع درجة الحرارة إلى 900 ^{o}م أو أعلى لتحسين الخواص الميكانيكية للقشرة. ثم تستخرج الشجرة من الفرن وتقلب. وعندئذ تصبح جاهزة لصب المعدن السائل. وبعد التجمد والتبريد تكسر القشرة لاستخراج المسبوكات. تستخدم الطريقة في صناعة الحلي وفي الاعمال الفنية ومثبتات الاسنان وفي صنع الريش التوربينية والتروس الصغيرة وغيرها. وفيما يلي خطوات طريقة السباكة بالشمع المفقود:





محاسن الطريقة

- تصلح لأنتاج مسبوكات بدرجة تعقيد عالية
- دقة جيدة في الابعاد
- نعومة سطحية جيدة
- لا حاجة لعمليات تشغيل لاحقة أو حاجة قليلة
- يمكن اعادة استخدام الشمع

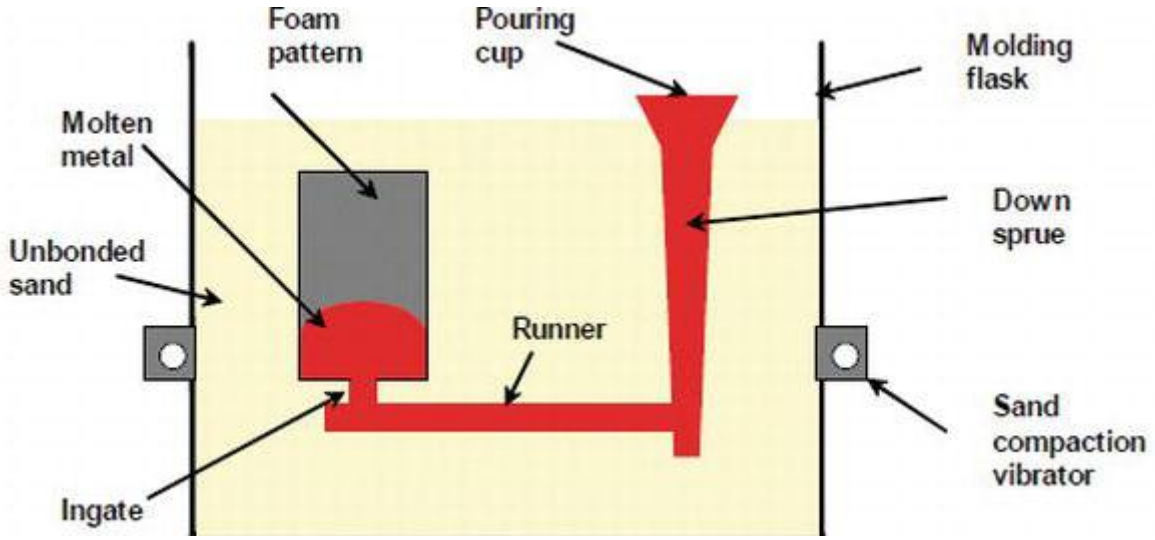
محددات الطريقة

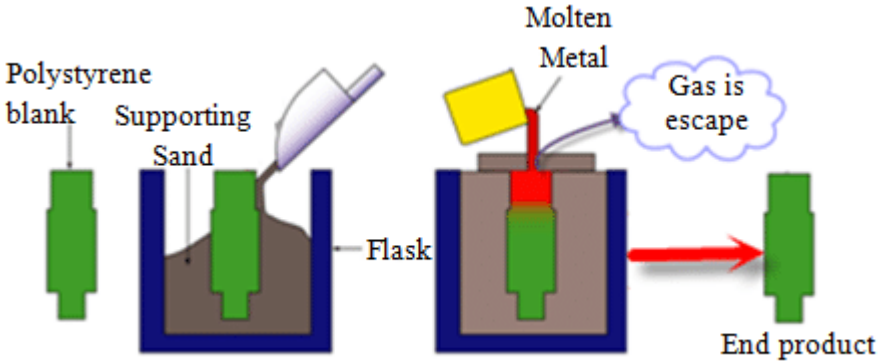
- طريقة مكلفة جدا
- تتطلب مهارة عالية للعاملين

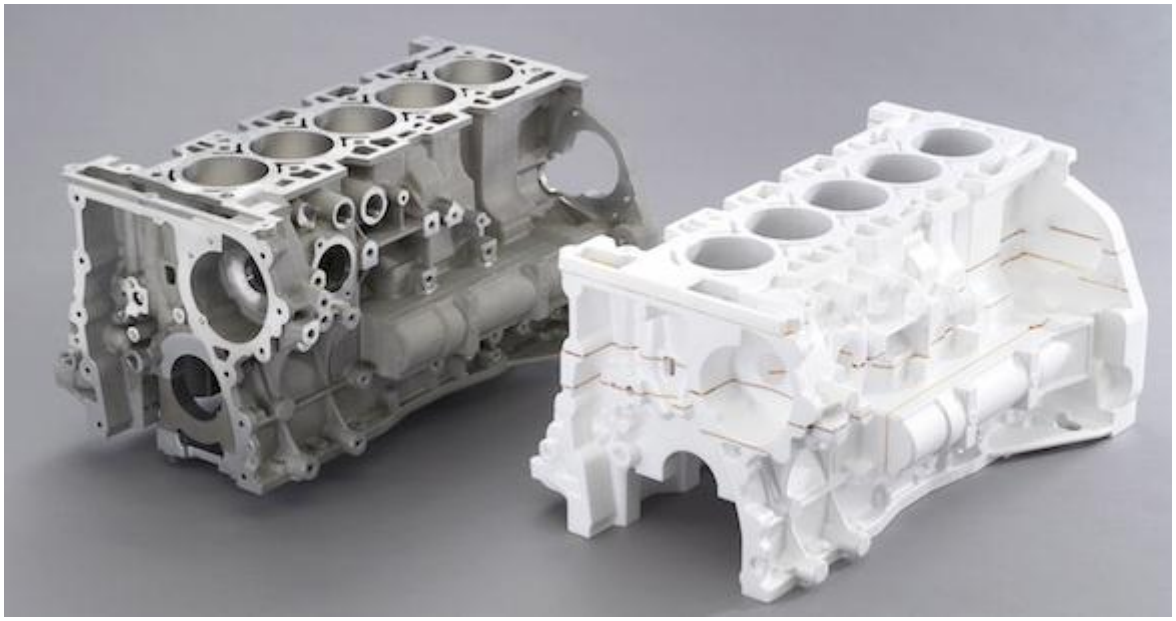
5- السباكة بالبوليسترين Polystyrene Casting

كما تسمى الطريقة بطريقة السباكة بالرغوة المفقودة lost foam casting حيث يتم فيها رص الرمل حول نموذج من البوليسترين. في هذه الطريقة لا يتم ازالة النموذج من القالب بل يترك داخل الرمل بكل تفاصيله التي تمثل منظومة صب ومنظومة تغذية مصنوعة من البوليسترين كذلك. وعند صب المعدن السائل يتبخر البوليسترين ليحل المعدن المنصهر محله. يمكن بهذه الطريقة تصنيع أنواع عديدة من المسبوكات وبحجوم مختلفة ومن معادن متنوعة كذلك.

من منتجات هذه الطريقة المحاور القلابة crankshafts ورؤوس الاسطوانات cylinder heads وكتلة الاسطوانات engine blocks والمتشعبات manifolds في محركات الاحتراق الداخلي وقواعد المكائن machine bases وغيرها.







محاسن الطريقة

- صندوق المقالبة المستخدم بسيط وغير مكلف
- يمكن عن طريقها انتاج مسبوكات معقدة جدا
- مناسبة تماما للانتاج النمطي الذي يتطلب انتاج اعداد كبيرة لنفس المسبوكة.
- العملية بذات نفسها غير مكلفة
- يمكن اتمتها بسهولة

محددات الطريقة

- المأخذ الرئيسي على الطريقة هو التكلفة العالية لقالب صنع نماذج البوليسترين

ثانيا: السباكة بالقوالب الدائمية Permanent mold casting

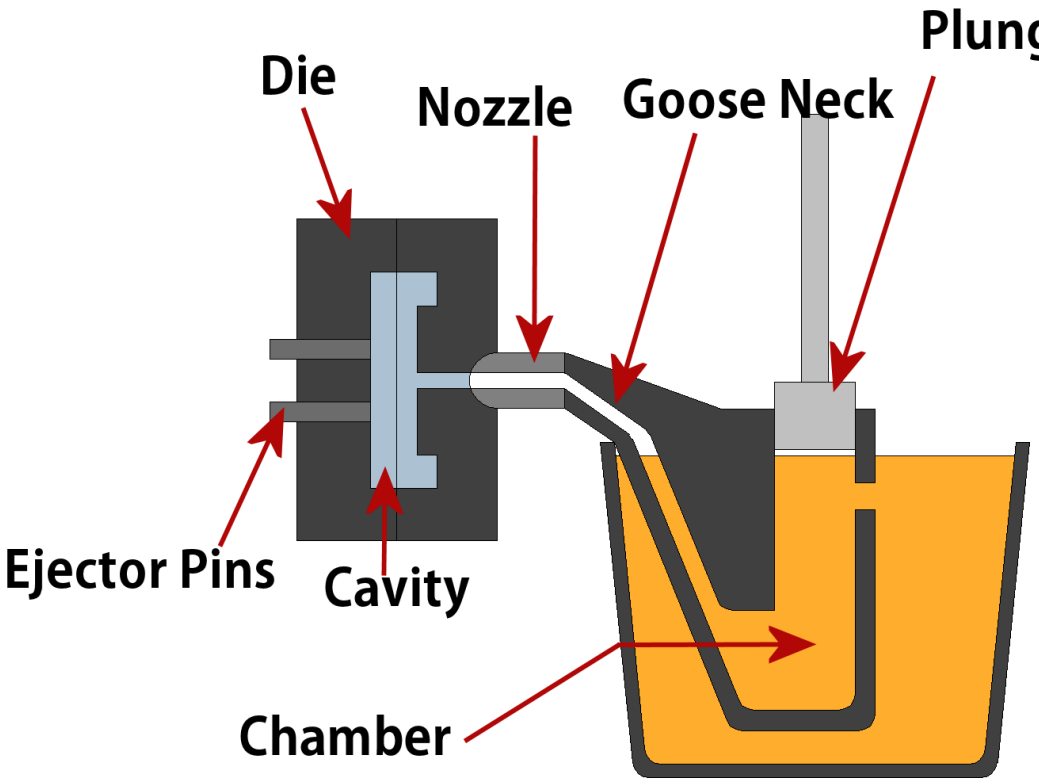
يقع ضمن هذا النوع من السباكة العمليات الآتية:

1- السباكة في القوالب تحت الضغط Pressure Die Casting

وتقسم إلى طريقتين هما:

أ- السباكة بالغرفة الساخنة **Hot chamber die casting**

في هذه الطريقة يتم صهر المعدن في حاوية container ملحقة بماكنة السباكة ويتم استخدام مكبس piston لحقن المعدن السائل بتأثير ضغط عالي داخل القالب. تسمى الطريقة أيضاً بطريقة عنق الأوزة Goose Neck نظراً لشكل وسيلة الحقن.



محاسن الطريقة:

- ❖ إنتاجية عالية (لغاية 500 قطعة في الساعة)
- ❖ دقة عالية في الأبعاد
- ❖ إنهاء سطحي جيد

المآخذ على الطريقة:

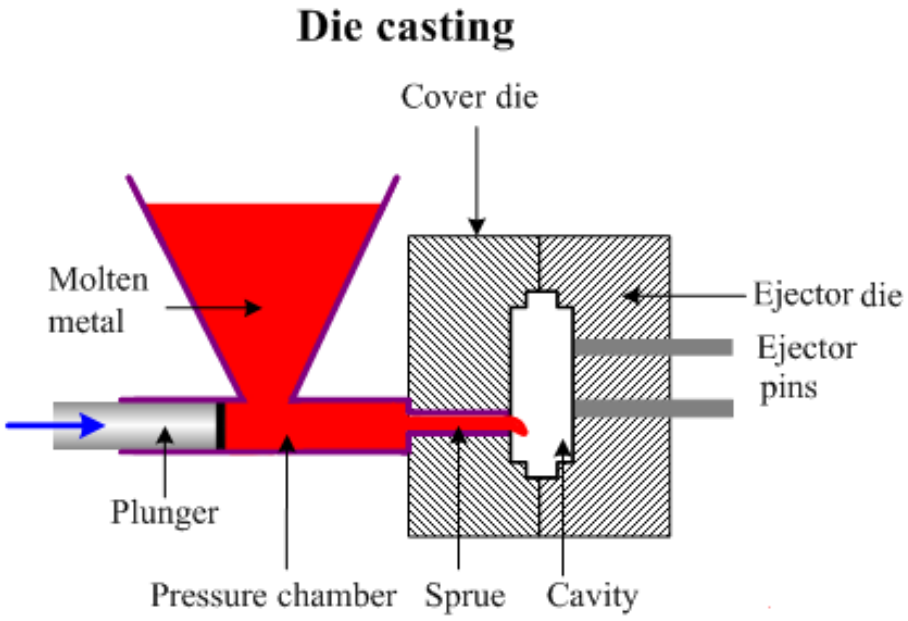
1- كلفة الأنشاء عالية.
2- منظومة الحقن مغمورة في المعدن المنصهر.
3- تستخدم للأشكال البسيطة فقط.

تستخدم الطريقة في الانتاج الواسع للمعادن والسبائك غير الحديدية ذات درجات الانصار الواطئة مثل الخارصين والقصدير والرصاص وبعض سبائك المغنيسيوم.

ب- السباكة في الغرفة الباردة Cold chamber die casting

في هذه الطريقة يتم تزويد المعدن السائل من حاوية صهر جانبية إلى داخل غرفة الحقن ومن ثم يستخدم مكبس لحقن المعدن بضغط عالي إلى داخل القالب.

تمتلك الطريقة نفس محاسن طريقة الغرفة الساخنة ولكن بإنتاجية أقل. تستخدم الطريقة في الانتاج الكمي للاشكال البسيطة من المعادن ذات درجات الانصهار الأعلى ومنها الالمنيوم والمغنيسيوم والبراص والفولاذ.

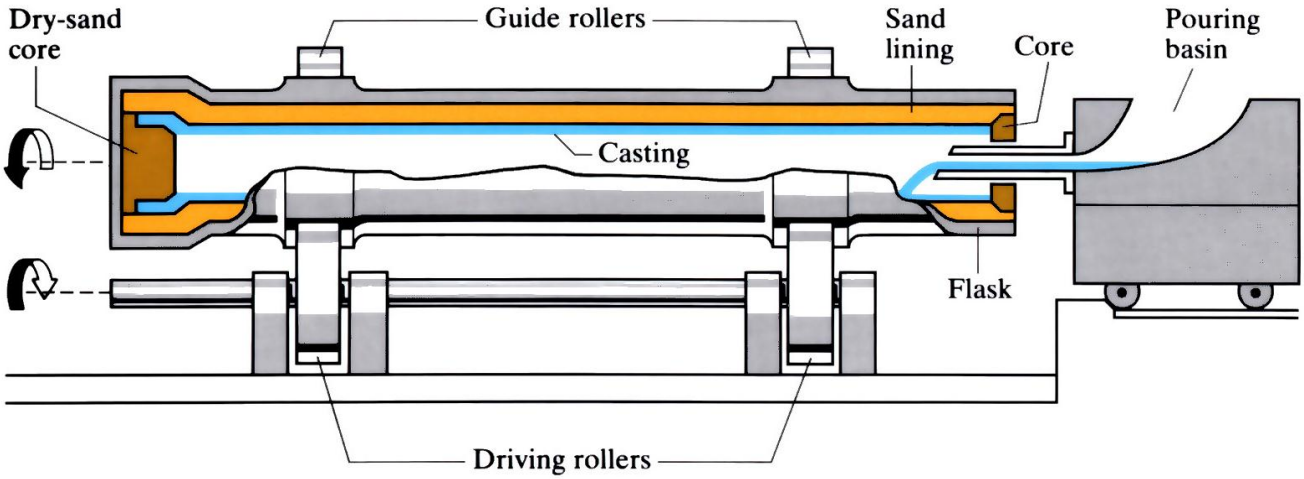


2- السباكة بالقوة الطاردة المركزية Centrifugal casting

يتم في هذه الطريقة صب المعدن السائل في قالب دوار لانتاج الاجزاء الانبوبية tubular مثل أنابيب الصرف الصحي وأنابيب الغاز وأنابيب ماء الشرب وكذلك حلقات المكابس وبطانات كتلة الاسطوانات في محركات الاحتراق الداخلي. يصنع القالب في هذه الطريقة من حديد الزهر والفولاذ والكرافيت.

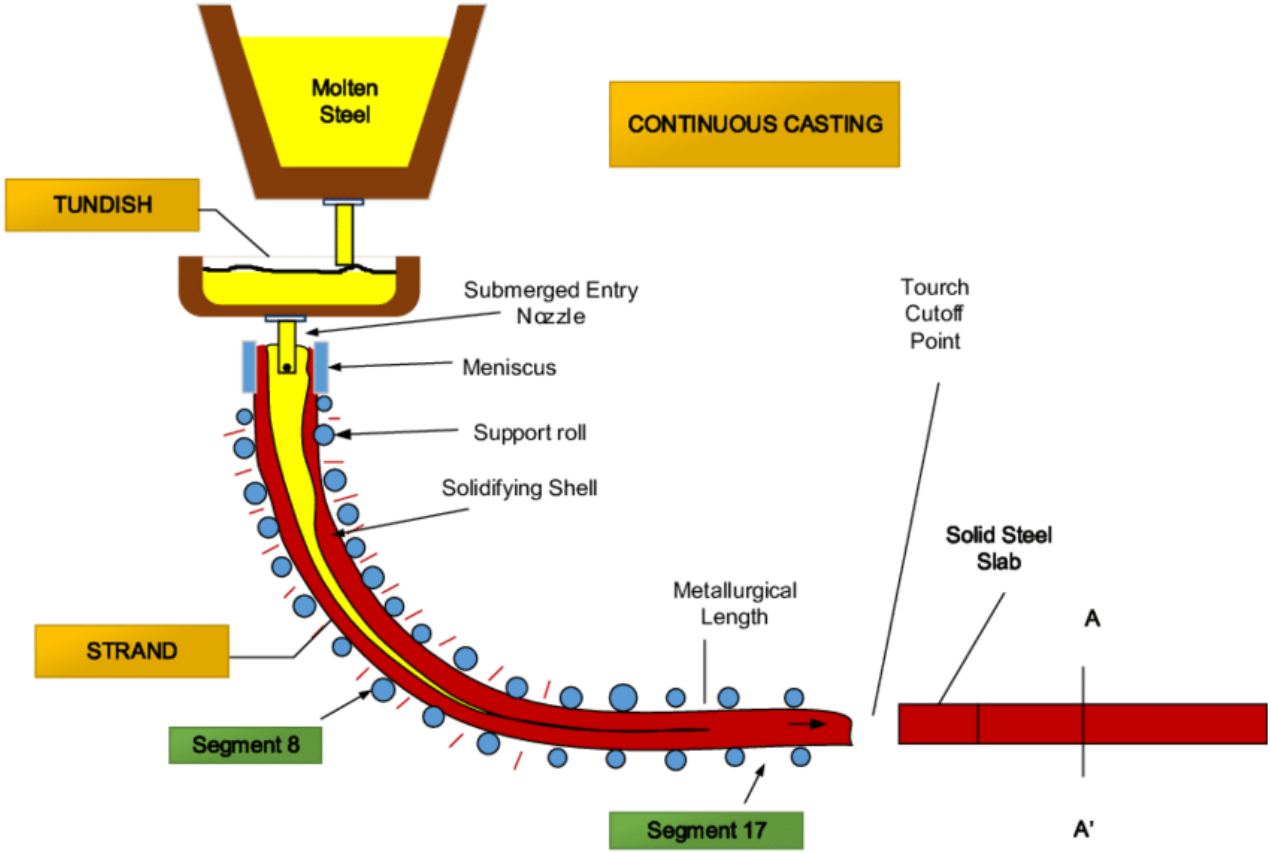
تمتاز منتجات الطريقة بما يلي:

1- الانجماد تحت تأثير الضغط العالي مما يعطي كثافة عالية.
2- تحقق انجماد اتجاهي من الخارج نحو الداخل مما يقلل المسامية.
3- التجمد السريع يعطي بنية مجهرية ناعمة.
4- لا حاجة للباب في إنتاج الاجزاء المجوفة.



3- السباكة المستمرة Continuous casting

تستخدم هذه الطريقة بشكل واسع في صناعة الفولاذ وتختلف عما سواها من طرائق السباكة الاخرى في عدم استخدام قالب بفجوة مغلقة أي إن القالب يكون مفتوحا من الجهتين. يتم صب المعدن في قالب نحاسي مبرد بالماء ليتم تجمد المعدن وخروجه من الجهة الاخرى من القالب بأشكال مناسبة لعمليات الدرفلة. تتضمن الطريقة الصب المستمر للمعدن السائل والنقل المباشر للمقاطع المنتجة إلى معامل الدرفة وهي ساخنة.



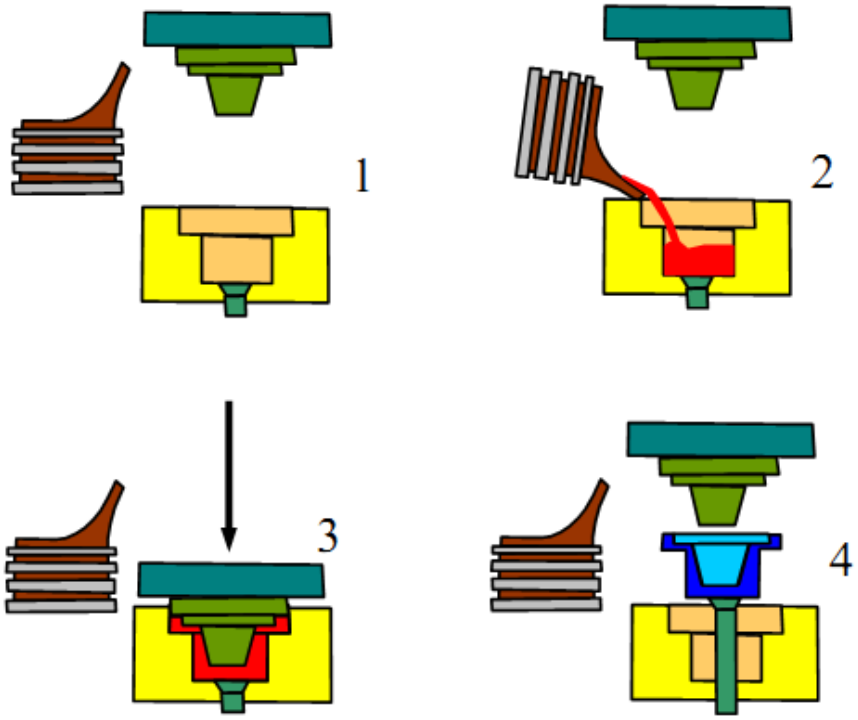
4- السباكة بالعصر Squeeze casting

تم تطوير السباكة بالعصر خلال الستينات من القرن الماضي وهي تتضمن صب المعدن السائل في قالب معدني وتسليط الضغط عليه حينما يتجمد نصفه تقريباً ويتحول إلى الحالة العجينية وبذلك تجمع بين السباكة والطرق (الحدادة).

في هذه الطريقة يتم إنتاج الاجزاء سواء كانت بسيطة أو معقدة بشكلها شبه النهائي بانهاء سطحي وتفاصيل سطحية دقيقة ومن منتجاتها عجلات السيارات automotive wheels ومكابس محركات الاحتراق الداخلي وجسم مدفع الهاون.

إن الضغط المسلط على المعدن يبقي على الغازات في صورتها الذائبة كما إنه يديم تماس المسبوكة مع جدار القالب المعدني مما يزيد من معدل التبريد وينتج بنية بلورية ناعمة ذات خواص ميكانيكية عالية.

تعطي الطريقة منتجا بصورته شبه النهائية من المعادن الحديدية وغير الحديدية وبدرجة تعقيد وتفاصيل سطحية عالية.

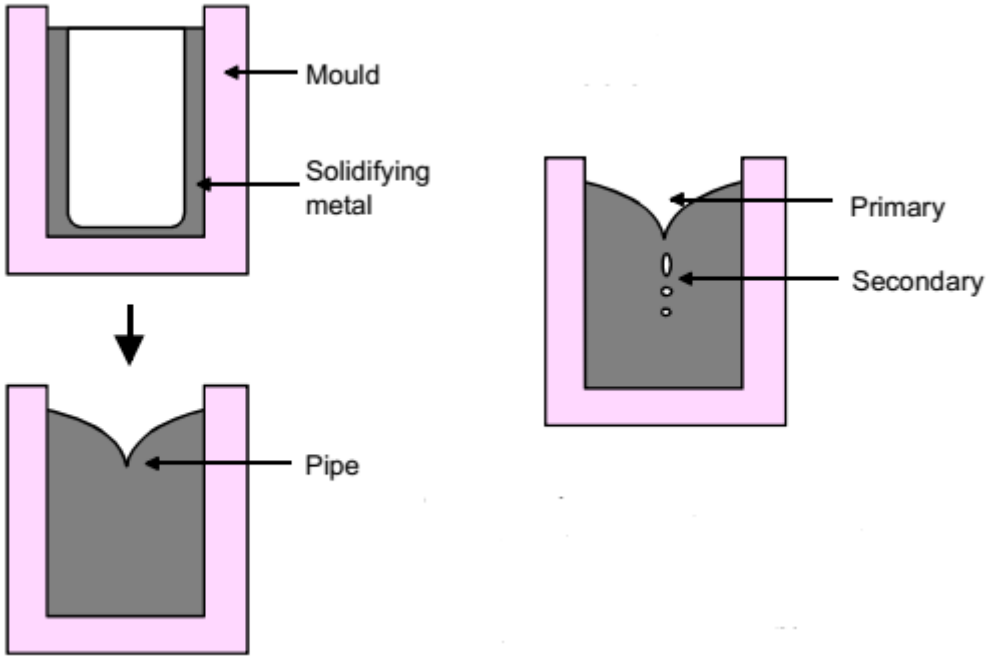


السباكة بالعصر

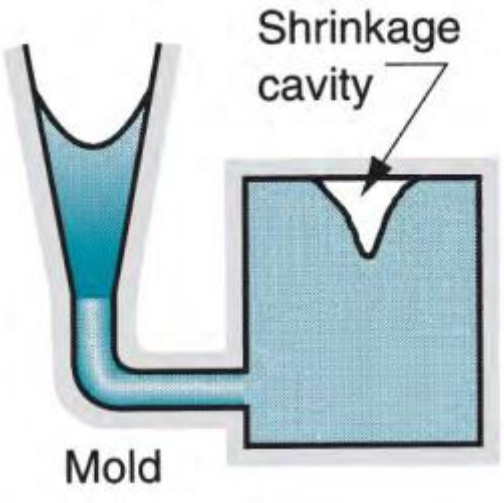
عيوب المصبوبات والمسبوكات Defects in Ingots and Castings

1- الفجوة الابتدائية والفجوة الثانوية Primary and Secondary Cavities

تسمى ايضا بالفجوة المخروطية والفجوة الانبوبية وتتكون بسبب التقلص الحاصل للمعدن في أثناء التجمد والذي قد يزيد في بعض الاحيان عن 7% بل يمكن أن يصل الى 10% من حجم المسبوكة او المصبوبة. تظهر هذه الفجوة في المغذي بالنسبة للمسبوكات أو الجزء العلوي بالنسبة للمصبوبات كما مبين في الشكل أدناه. تؤدي هذه الفجوة الى رفض المسبوكة لو امتدت من المغذي الى المسبوكة نفسها بينما تؤدي الى التقليل من الطول المفيد بالنسبة للمصبوبات (تقليل عامل الانتفاع). أما الفجوة الثانوية فتظهر في المصبوبات عادة بسبب تكون إتجاهين رئيسيين ومتعاكسين لانتقال الحرارة مما يتسبب في تكون إتجاهين رئيسيين ومتعاكسين للتجمد من الاعلى والاسفل. يتم معالجة العيب عن طريق منظومة تغذية صحيحة واجماد اتجاهي مفضل وكما مبين في الشكل نفسه.



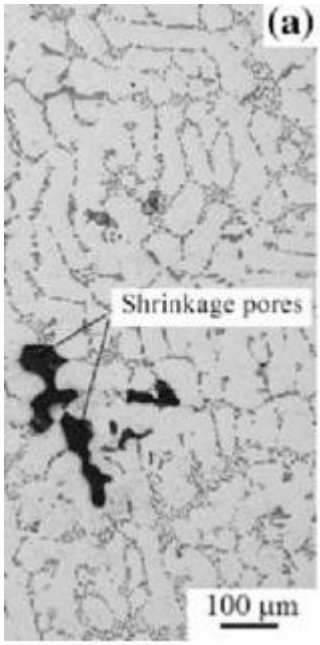
Primary and secondary pipe in ingots



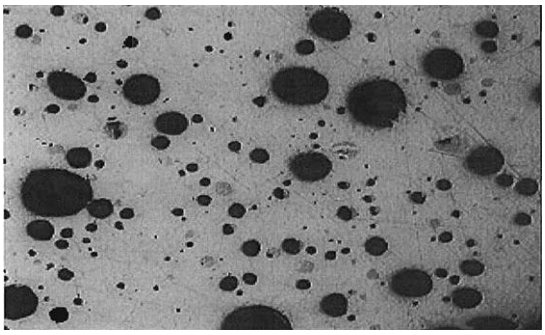
Primary cavity in castings

2- المسامية porosity

المسامية هي فراغات دقيقة تظهر بسبب التقلص في أثناء التجمد مع عدم امكانية او عدم فاعلية التغذية وبخاصة فس سبائك المحاليل الجامدة التي ترافقها بنية شجيرية أو بسبب انعزال الغازات المذابة مع عدم اتاحة الفرصة لخروجها وتظهر في هذه الحالة بصورة فراغات كروية الشكل كما مبين في الشكل أدناه



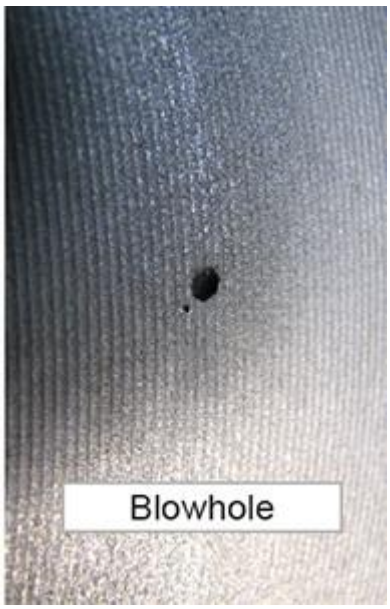
Shrinkage Porosity

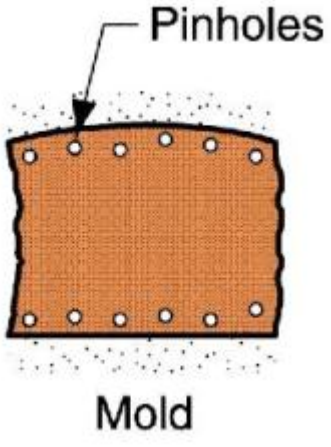


Gas Porosity

3- الجيوب الغازية وثقوب النفخ Gas Pockets and Blowholes

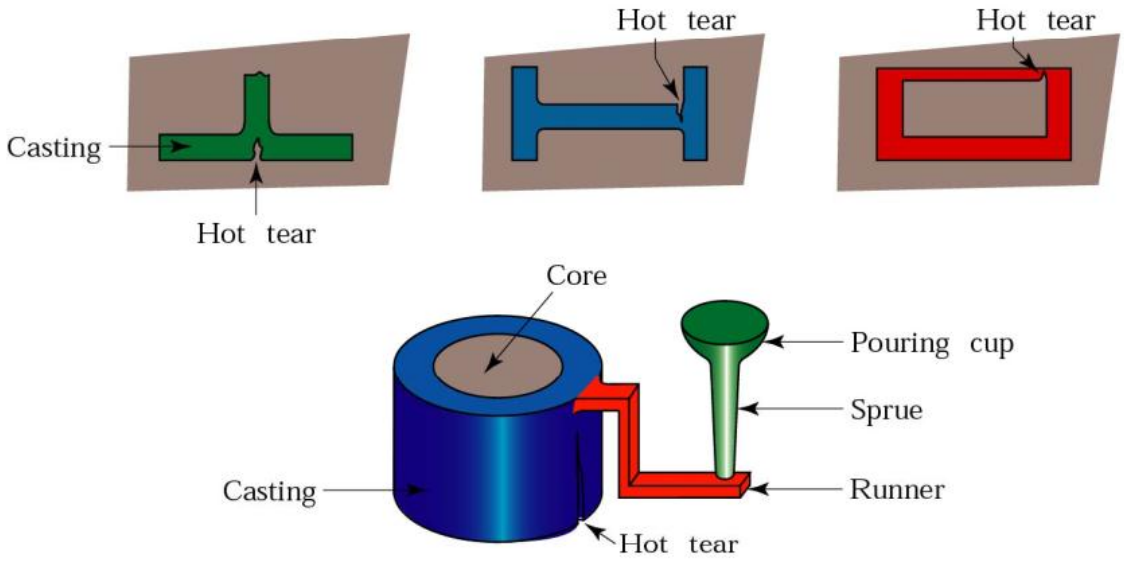
تتكون الجيوب الغازية عند تجمع مسامية الغازات مع بعضها لتتكون فجوة غازية كبيرة. أما ثقوب النفخ فهي ثقوب كروية ملساء تظهر على السطح عادة وقد تكون قريبة منه وتسمى هذه الثقوب بالثقوب المسمارية Pinholes عندما تكون صغيرة جدا تحت السطح. تتكون ثقوب النفخ والثقوب المسمارية بشكل رئيسي بسبب الغازات الابخرة والغازات المنبعثة من رمل المقالبة مع الانفاذية المنخفضة للقالب.





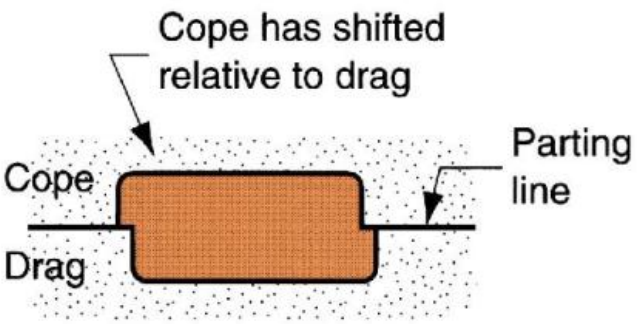
4- التمزقات الساخنة Hot Tears

هي شقوق داخلية أو خارجية تحدث بسبب التجمد السريع وتظهر بعد التجمد مباشرة مع التهشمية المنخفضة لرمل كل من القالب واللب. كما إن النسب العالية من الكبريت في الفولاذ تسهم في التمزقات الساخنة من خلال التقصفية الحارة.



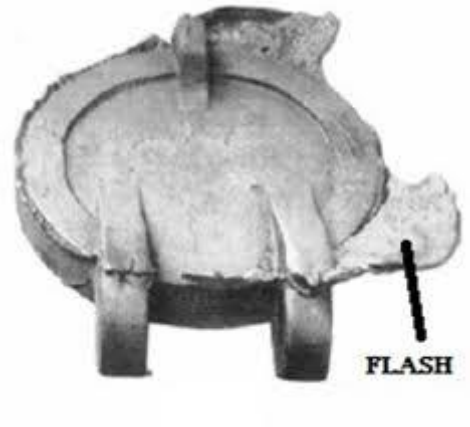
5- عدم التطابق Mismatch

هو إزاحة نسبية في المسبوكة عند خط الفصل بسبب تآكل مسامير تثبيت نصفي النموذج أو وجود رخاوة loose في مسامير تثبيت نصفي الصندوق.



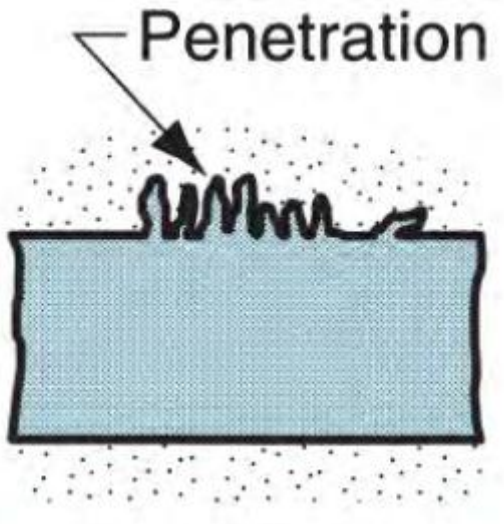
6- الزعنفة Fins

الزعنفة هي ومض معدني رقيق يحيط بالمسبوكة عند خط الفصل. تحدث الزعنفة بصورة رئيسية بسبب عدم التثبيت الصحيح لنصفي الصندوق مع بعضهما أو عدم تطابقهما بشكل صحيح.



7- التغلغل Penetration

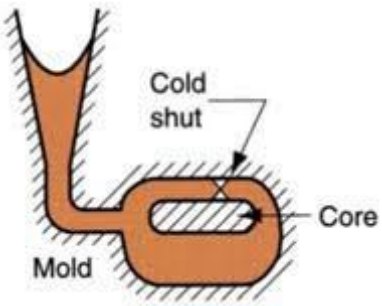
هو تغلغل المعدن السائل في سطح القالب الرملي ويظهر بصورة خشونة سطحية. يحدث التغلغل بسبب الانفاذية العالية جدا للرمل واستخدام حبيبات رمل خشنة أو دك ضعيف للقالب وكذلك المقاومة الضعيفة للقالب. كما إن الانسيابية العالية للمنصهر يمكن أن تتسبب في عيب التغلغل.



8- الانسدادات الباردة Cold Shuts

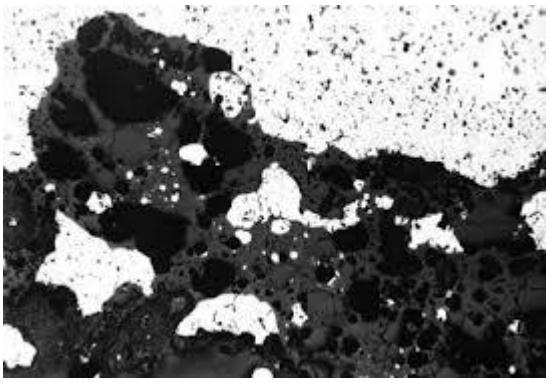
هو حدوث سطح فصل أو قطع في استمرارية المسبوكة بسبب التقاء مجريين من المعدن بانصهار غير تام لهما أو بسبب الصب البطئ أو الصب المتقطع وكذلك بسبب

الصب من درجات منخفضة. ويظهر بصورة تراكب في المعدن أو شقوق ذات نهايات كروية.

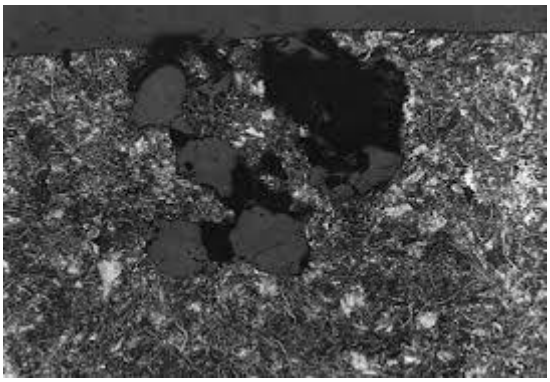


9- المتضمنات Inclusions

هي أية مواد غريبة تتواجد في المسبوكة مثل جسيمات الخبث أو حبيبات الرمل أو أوساخ أو غيرها.



Slag Inclusion



Sand Inclusion

10- الانعزال Segregation

هو تباين توزيع العناصر السبائكية وعناصر الاشابة في المسبوكات والمصبوبات ويسمى بالانعزال الدقيق Micro Segregation اذا كان التباين بين بلورة وأخرى مجاورة لها ويمكن التخلص منه عن طريق المجانسة Homogenization عند ردرجات حرارية عالية، بينما يسمى بالانعزال الكبير Macro Segregation إذا كان بين سطح المصبوبة ومركزها وبين أسفلها وأعلاها ولا يمكن التخلص من هذا النوع من الانعزال.

حسابات منظومة الصب Calculations of Pouring System

استنادا لاى نظرية برنولي Bernoulli's theorem التي تنص على إن مجموع الطاقات (head, pressure, kinetic, and friction) عند أي نقطتين في سائل جاري متساوية. ويمكن كتابة ذلك في الصيغة الآتية:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + F_1 = h_2 + \frac{p^2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + F_2 \quad (1)$$

Where:
h: head, cm (in)
p: pressure on the liquid, N/cm^2 (lb/in^2);
ρ : density; g/cm^3 (lbm/in^3);
v = flow velocity; cm/s (in/sec);
g = gravitational acceleration constant,981 cm/s/s (32.2x12= 386 in/sec/sec); and
F= head losses due to friction, cm (in).

وبأهمال خسائر الاحتكاك وبافتراض ان المنظومة تبقى عند الضغط الجوي، يمكن يمكن اختصار المعادلة (1) إلى:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2)$$

وبذلك يمكن ايجاد سرعة المعدن المنصهر عند قاعدة المصب Sprue (نقطة 2).
وباستخدام النقطة (2) كمستوى مرجعي عند قاعدة المصب، فأن الارتفاع head عند تلك النقطة يكون صفرا ($h_2=0$) و h1 سيمثل ارتفاع المصب. عند صب المعدن في حوض الصب Basin ويجري من المصب وهو ممتلئ، فأن السرعة عند أعلى نقطة ($v_1=0$) وبذلك يمكن تبسيط المعادلة (2) لتصبح:

$$h_1 = \frac{v_2^2}{2g}$$

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3)$$

Where:

v= the velocity of the liquid metal **at the base of the sprue**, cm/s (in/sec);
g= 981 cm/s/s (386 in/sec/sec); and
h = the height of the sprue, cm (in).

العلاقة الثانية المهمة والتي تستند اليها حسابات منظومة الصب هي قانون الاستمرارية continuity law والذي ينص بأن معدل الجريان الحجمي يبقى ثابتا خلال مجرى السائل:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (4)$$

Where:
Q = volumetric flow rate, cm_3/s (in^3/sec);
v = velocity as before;
A = cross sectional area of the liquid, cm^2 (in^2); and
the subscripts refer to any two points in the flow system.

ولهذا فأن أي زيادة في مساحة المقطع تنتج انخفاضا في السرعة والعكس بالعكس. بافتراض أن المجرى يكون أفقيا من قاعدة المصب الى تجويف القالب ويكون بذلك الارتفاع h هو نفسه الذي عند قاعدة المصب وهكذا فأن معدل الجريان الحجمي خلال المدخل gate وفي تجويف القالب يبقى مساويا vA عند قاعدة المصب. وتبعا لذلك يمكن تحديد الزمن اللازم لملئ تجويف القالب ذو الحجم V كما يلي:

$$T = V/Q \quad \text{or } V/A.v \quad (5)$$

Where:
T=mold filling time, s (sec);
V=volume of mold cavity, cm^3 (in^3);
Q= volume flow rate,
A= cross- sectional area of gate (area of sprue base or choke area),
v= velocity of liquid metal at the gate, as before.

يجب أن يكون زمن الملئ المبين في المعادلة (5) أقل زمن ملئ لأننا أهملنا خسائر الاحتكاك، أي إن زمن الملئ الحقيقي أطول من ذلك. ومن ثم يمكن حساب مساحة مقطع المدخل gate من العلاقة:

$$A = W/C\rho t\sqrt{2gh} \quad (3.6)$$

Where
W = casting weight,
C= flow efficiency factor (0.4-0.9) for various systems,
ρ= density of the metal,
t= pouring time

مثال (1):

جد سرعة المعدن عند قاعدة المصب ومعدل الجريان الحجمي وزمن ملئ القالب إذا علمت أن ارتفاع المصب هو 20 cm ومساحة مقطع قاعدته هي $2.5\ cm^2$ وأن حجم تجويف القالب هو $1560\ cm^3$

الحل:

Solution: (a) The velocity of the flowing metal at the base of the sprue is given by Eq. **(3):**

$$v = \sqrt{2gh} \qquad (3)$$

$$v = \sqrt{2(981)(20)} = 198.1\ \text{cm/s}$$

(b) The volumetric flow rate is

$$Q = (2.5\ \text{cm}^2)(198.1\ \text{cm/s}) = 495\ \text{cm}^3/\text{s}$$

(c) Time required to fill a mold cavity of **1560 cm³ at this flow rate**

$$T = 1560/495 = 3.2\text{s}$$

مثال (2):

يراد ملئ قالب أبعاده 60cm x 30 cm x 16 cm في سباكة رملية خلال مصب طوله 16 cm ، جد الزمن اللازم لملئ تجويف القالب إذا علمت أن مساحة مقطع المدخل هي $6\ cm^2$

الحل:

V = volume of mold
=60x30x16

=28800 cm^3

A= area of gate =6 cm^2
H = head =16 cm
vg= velocity of liquid metal of gate
=√2gh
= √2x981x16
= 177.2 cm/sec

T =time taken to fill up the mold

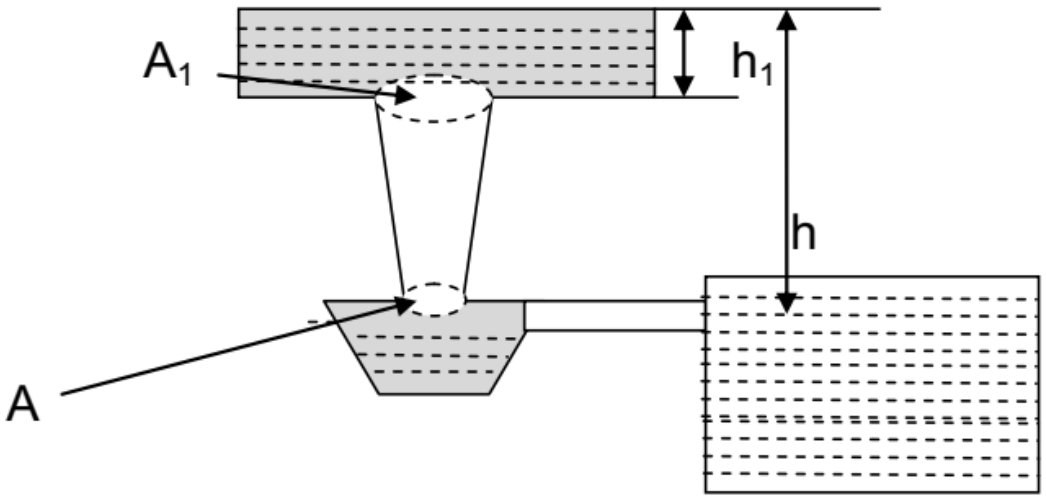
$$= \frac{V}{A.v} = \frac{28800}{6x177.2}$$

= 27 sec

يمكن للمصب ان يكون ذو مقطع دائري او مستطيل ويكون عادة ذو سلبة Taper ، لتجنب سحب الهواء، بحيث تكون مساحة مقطع قاعدة المصب أصغر من مساحة مقطع قمته وبذلك فأن القاعدة ستكون هي الخانق Choke . يمكن إيجاد مساحة قمة المصب A1 من العلاقة:

$$\frac{A1}{A} = \sqrt{\frac{h}{h1}} \quad (7)$$

Where:
A=is the choke area,
h= height of metal from top of the pouring basin to the bottom of the sprue,and
h1 =is the height from the top of the pouring basin to the top of the sprue



مثال (3):

مصب طوله 12 in وقطر قمته 5 in وارتفاع المعدن في حوض الصب هو 3 in ، جد مساحة مقطع قاعدة المصب إذا علمت أن معدل الجريان الحجمي هو 40 in^3/s ، هل المصب وفق هذه الابعاد سيسحب الهواء؟ إشرح ذلك؟

الحل:

سرعة المعدن عند قاعدة المص هي:

sprue (h = 12 in. = 1 ft)

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2(32.2)(1)}$$

or $v = 8.0$ ft/s $= 96$ in./s. For a flow rate of 40 in^3/s, the area needs to be

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{40 \text{ in}^3/\text{s}}{96 \text{ in./s}} = 0.417 \text{ in}^2$$

وفي حالة المصب دائري المقطع فأن قطر قاعدته سيكون 0.73 in وبمقارنة هذا القطر بالقطر الذي يستخرج من المعادلة (7) حيث إن:

h1 = 3 in., h = 15 in., and A1 = 19.6 in^2

$$\frac{A1}{A} = \sqrt{\frac{h}{h1}}$$

$$A = \frac{A1}{\sqrt{h/h1}} = \frac{19.6}{\sqrt{15/3}} = 8.8\ in^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi}.A} = 3.34\ in$$

وبهذا فإن قاعدة المصب (الخانق) سيقيد الجريان أكثر مما هو مطلوب أي أنه لا يسمح بسحب الهواء.

حسابات منظومة التغذية Calculations of Feeding System

المغذي عبارة عن خزان للمعدن السائل يقوم بالتعويض عن الانكماش الحاصل للمعدن السائل في أثناء التبريد من درجة حرارة الصب الى درجة حرارة التجمد علاوة على الانكماش الحاصل للمعدن في أثناء التحول من الحالة السائلة الى الحالة الصلبة. تجدر الاشارة إلى إن المغذي يقوم بالتعويض عن الانكماش الحاصل للمسبوكة والمغذي نفسه. علاوة على ذلك فأن مما يجب تذكره دائما هو عدم إمكانية الاستفادة من كل المعدن الموجود في المغذي إذ إن جزءً من هذا المعدن يتجمد في نفس الوقت الذي تتجمد فيه المسبوكة مما يقلل من كفاءة المغذي والتي تعطى بالعلاقة:

$$\eta\% = \frac{b\ Vc}{Vf}\ x\ 100 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

حيث إن:

η هي كفاءة المغذي

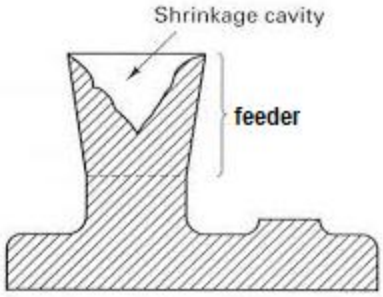
V_c هو حجم المسبوكة

V_f هو حجم المغذي

b هو التقلص الحجمي عند التجمد

وعند الحاجة الى رفع هذه الكفاءة يمكن اتباع أحد الاساليب التي أشرنا إليها سابقاً. تتضمن حسابات منظومة التغذية إيجاد حجم المغذي وعدد ومواقع المغذيات اللازمة لانتاج مسبوكة مضبوطة وبعبارة أخرى ايجاد حجم المغذي أو المغذيات ومسافة التغذية.

يقصد بالمسبوكة المضبوطة بأنها المسبوكة الخالية من عيوب الانكماش حسب التصوير الاشعاعي لها كما يجب أن يتم نقل كامل الفجوة الابتدائية الى المغذي وكما مبين في أدناه:



أولا: إيجاد حجم المغذي

إستناداً إلى قاعدة شفرينوف Chvorinov فأن زمن التجمد يعطى بالعلاقة:

$$t \alpha (\frac{V}{A})^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

حيث إن:

t هو زمن التجمد

V هو الحجم

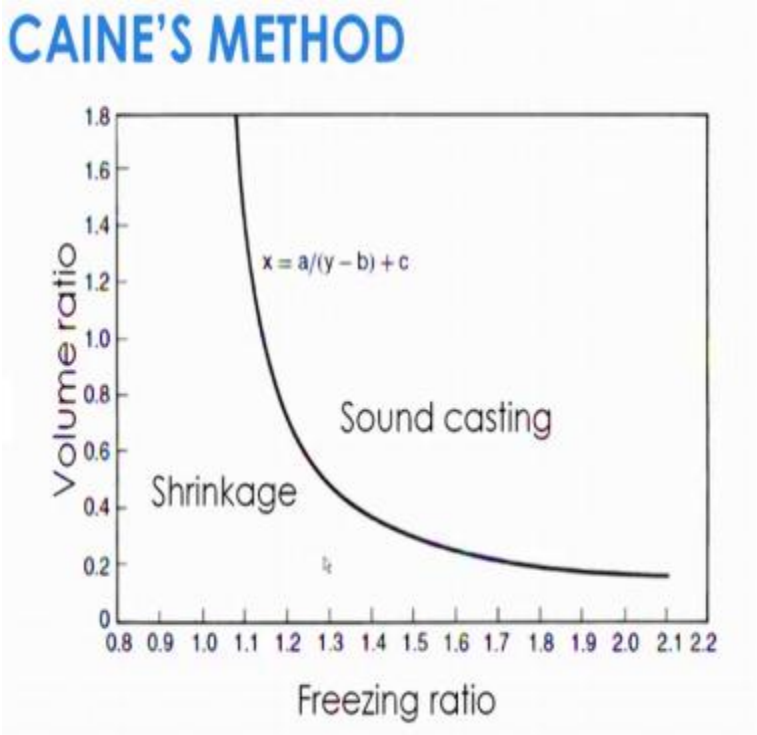
A هي المساحة السطحية

وحيث إن زمن تجمد المغذي يجب أن يكون أطول من زمن تجمد المسبوكة فأن:

$$(\frac{V}{A})_f > (\frac{V}{A})_c \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

واستناداً الى سلسلة التجارب العملية التي أجراها كايين Caine والتي حدد بموجبها الحد الفاصل بين منطقة المسبوكة المضبوطة والمسبوكة المعابة اعتمادا على نسبتي الحجم volume ratio

والتجمد freezing ratio المبينة في الشكل أدناه يمكن إيجاد حجم المغذي من العلاقة رقم (4) المبينة في أدناه:



$$X = \frac{a}{y-b} + c \text{ ..... (4)}$$

حيث إن:

X is the freezing ratio = $\frac{(\frac{A}{V})_c}{(\frac{A}{V})_f}$

a is the volume ratio = $\frac{V_f}{V_c}$

b is liquid to solid shrinkage

c is the relative freezing rate of riser and casting

وبأخذ قيم مناسبة للثوابت وكما يلي:

a = 0.1

c = 0.8

وإعطاء زمن تجمد المغذي أطول من زمن تجمد المسبوكة بمقدار 1.2 أي إن:

$t_f = 1.2\ t_c$

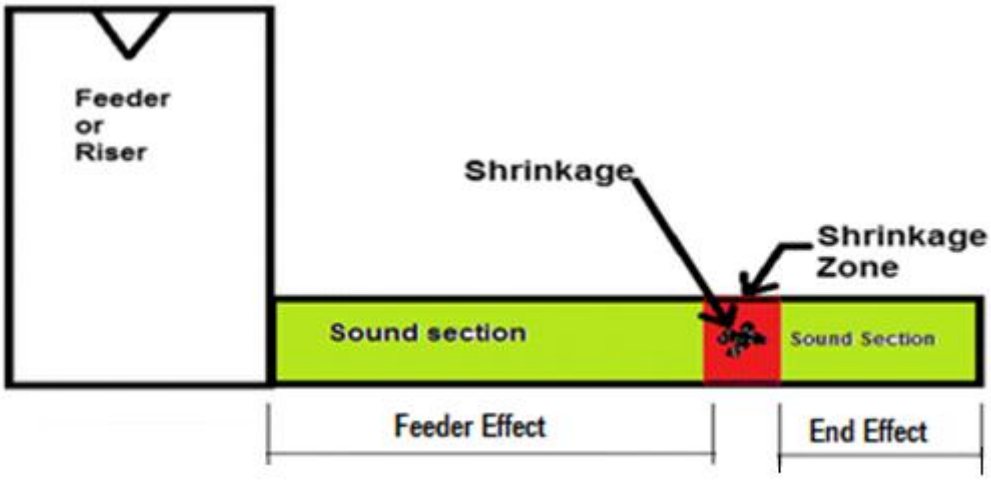
تأخذ العلاقة (4) الصيغة الآتية:

$$V_f = \frac{0.1\,Vc + 0.4\,b\,V_c}{0.4} \quad \text{..... (5)}$$

والتي يمكن من خلالها إيجاد حجم المغذي المناسب لانتاج مسبوكة مضبوطة.

ثانيا: إيجاد مسافة (مدى) التغذية Feeding Distance (Range) FD

يقصد بمسافة التغذية (FD) بالمسافة التي يمكن للمغذي أن يعوض انكماشها ومنع ظهور العيوب فيها أي المسافة التي يمكن للمغذي أن يجعلها مضبوطة. أما طول التغذية Feeding Length (FL) فأنه يمثل المسافة الحقيقية المطلوب تغذيها. وحينما يكون FD > FL فأن المسبوكة المنتجة ستكون مضبوطة والعكس صحيح أي عندما يكون FL > FD فأن المسبوكة المنتجة ستكون معابة وكما مبين في الشكل التوضيحي أدناه:



إذ يجب أن يكون طول المنطقة المعابة (المنطقة الحمراء) مساوياً للصفر وبعبارة أخرى فأن أكبر طول تغذية FL مسموح به يجب أن لا يتجاوز مسافة التغذية FD أي:

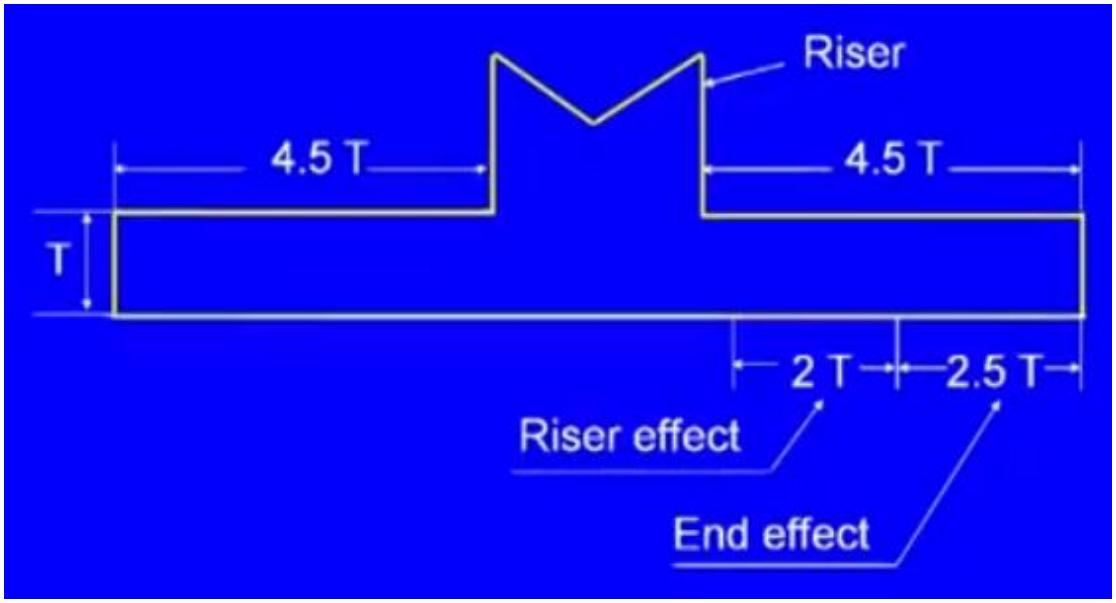
$$FL = FD$$

ولتحديد مسافة التغذية وكيفية حسابها ومن ثم تحديد عدد المغيات المطلوبة سنأخذ الحالتين أدناه:

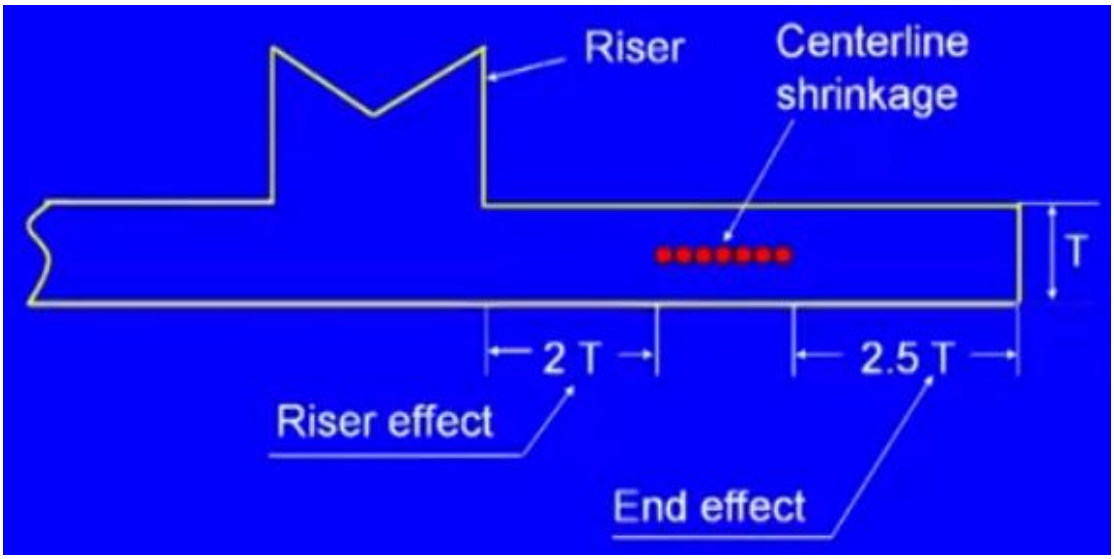
أ- مسبوكة بشكل صفيحة Plate

عند عدم استخدام مصقعات فأن أقصى مسافة تغذية FD ستمثل مجموع تأثير الطرف البالغ 2.5T وتأثير المغذي البالغ 2T حيث إن T يمثل سمك الصفيحة. أي إن:

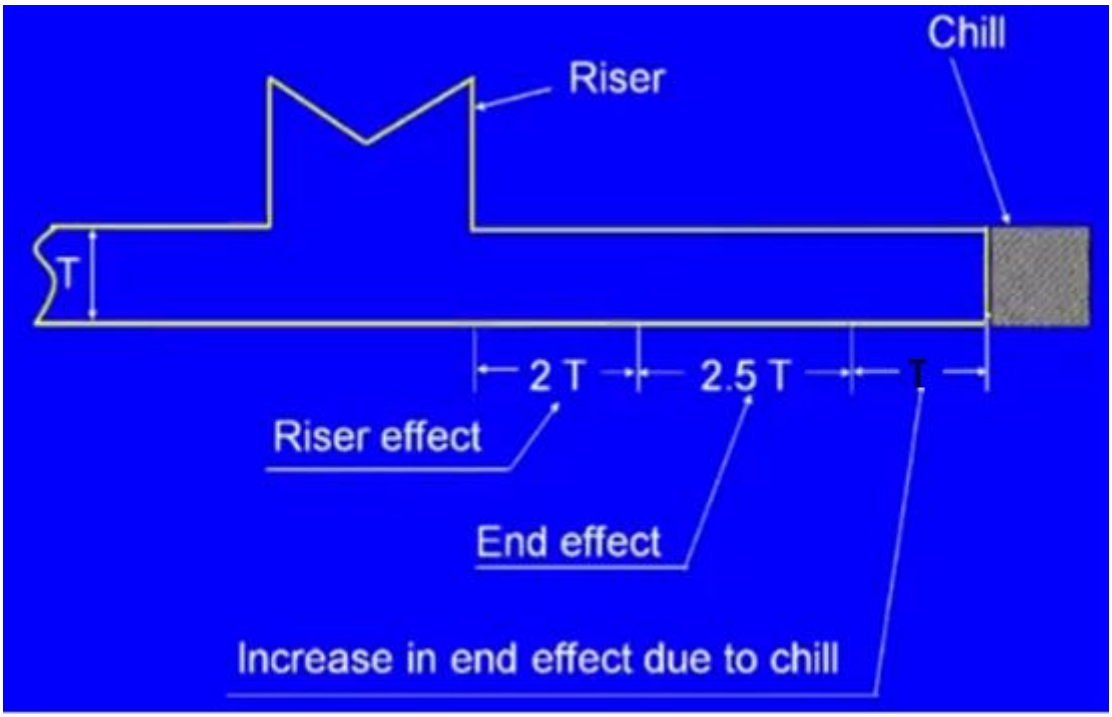
FD = 2.5T + 2T = 4.5 T



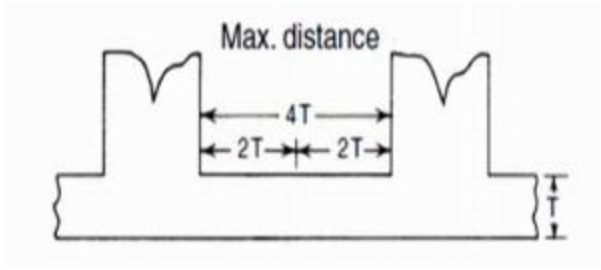
أما عندما لا يتحقق ذلك فتظهر مسامية انكماش على طول خط المركز كما مبين في الشكل أدناه.



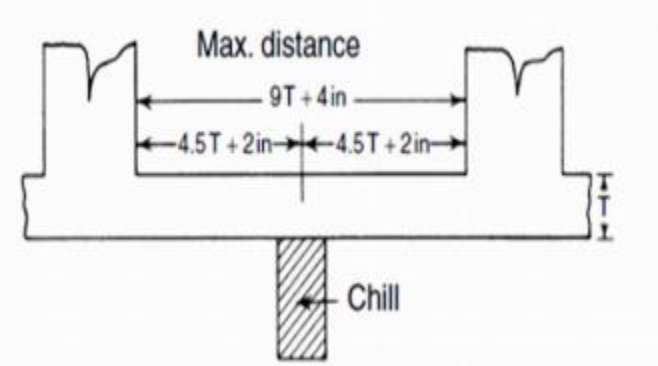
وفي هذه الحالة أي عندما يكون طول التغذية (المسافة المطلوب تغذيتها) أكبر من مسافة التغذية (المسافة التي يمكن تغذيتها فعلا) فأن الأمر يستلزم إما استخدام أكثر من مغذي أو زيادة مسافة التغذية باستخدام المصقعات الخارجية. وحيث أن من قواعد منظومات التغذية هو استخدام مغذيات بأقل عدد وأصغر حجم فأننا نلجأ أولا إلى استخدام مصقعات خارجية لزيادة مسافة التغذية إذ أن هذه المصقعات تزيد مسافة التغذية من الطرف بمقدار 2 إنج كما مبين في الشكل أدناه:



وفي حالة عدم كفايتها نلجأ إلى إضافة مغذي ثاني لنزيد من مسافة التغذية بمقدار 4T كما مبين في الشكل التالي:



وعند عدم كفاية ذلك نعود لاستخدام المصقعات عند طرفي الصفيحة كما بينا سابقاً أو بين المغذيين لزيادة مسافة التغذية بالمقدار المبين في الشكل التالي:

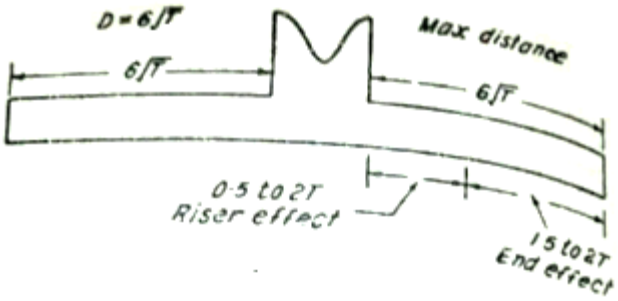


ونستمر بإضافة المصقعات أو زيادة عدد المغيات وحسب مسافة الزيادة المطلوبة.

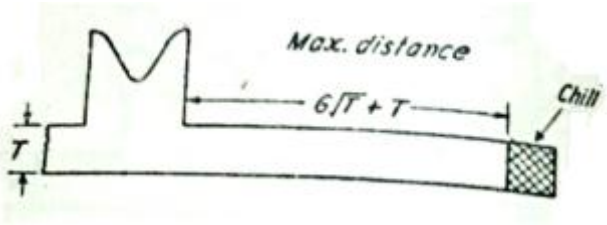
ب- مسبوكة بشكل عمود Rod

في العمود يكون بعدي مقطعه متقاربين بينما يكون البعد الثالث كبيرا. وفي هذه الحالة نتبع نفس الطريقة ونفس الخطوات التي اتبعناها في حالة مسبوكة بشكل صفيحة عدا مسافة التغذية التي يتم تحديدها وفق الاشكال المبينة في أدناه.

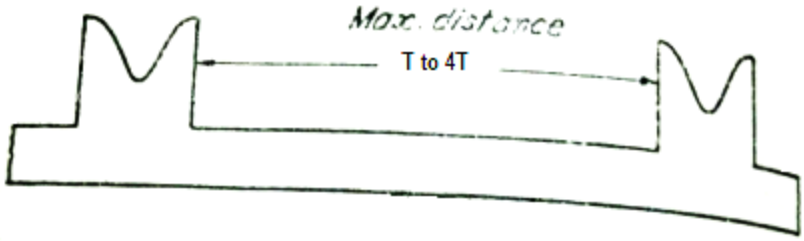
1- باستخدام مغذي واحد بدون استخدام مصقعات



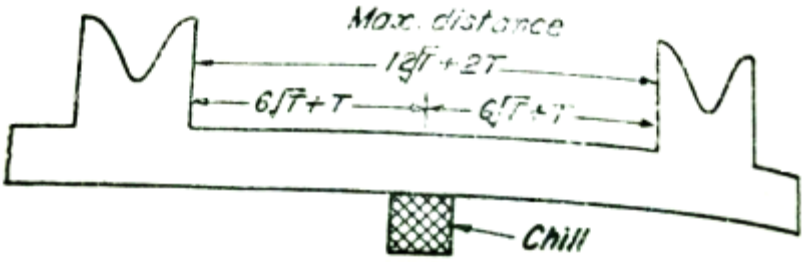
2- باستخدام مغذي مع استخدام مصقعات



3- باستخدام أكثر من مغذي بدون استخدام مصقعات



4- باستخدام أكثر من مغذي مع استخدام مصقعات

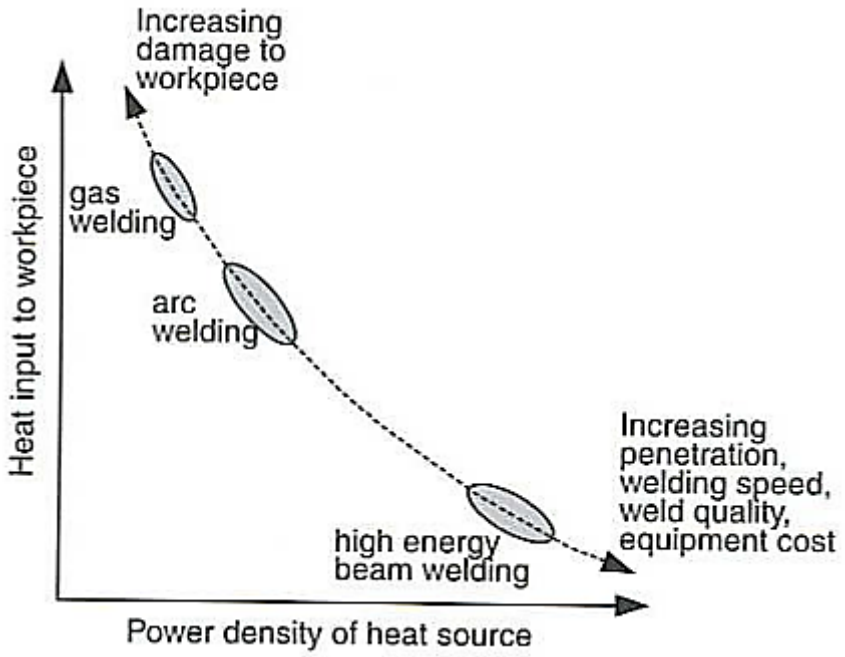


Welding اللحام

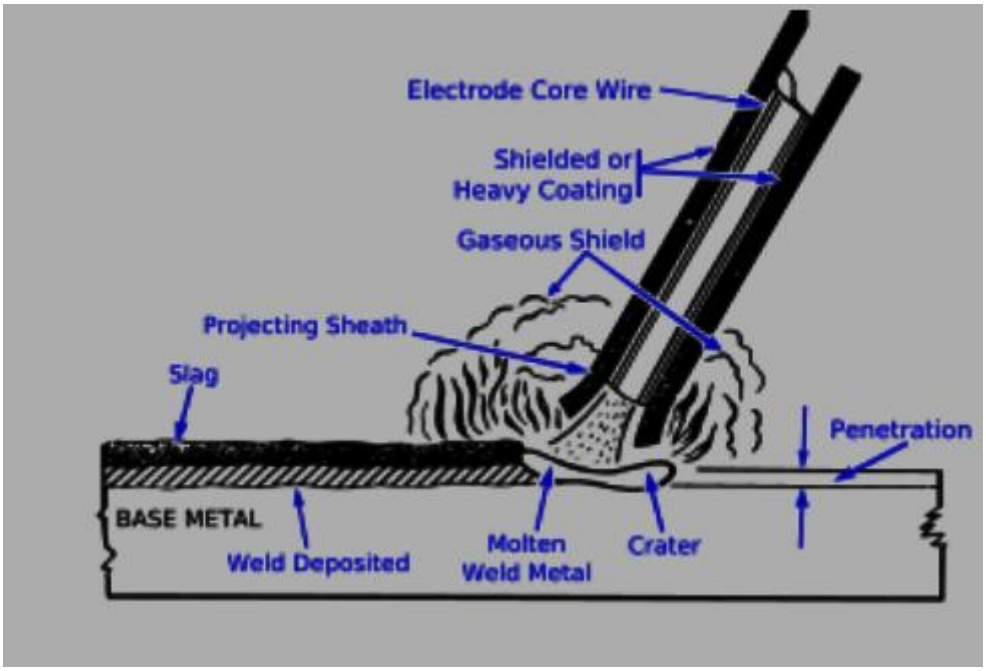
تعريفات Definitions

اللحام Welding: يعرف اللحام بأنه عملية من عمليات التصنيع التي يتم فيها ربط الاجزاء المعدنية مع بعضها بتطبيق الحرارة أو الضغط أو الاثنين معاً. يوجد عدد كبير من طرائق أو عمليات اللحام التي تستخدم في صنع الانابيب وأوعية الضغط والمراجل والخزانات وفي بناء الجسور وبناء السفن وفي صنع السيارات والقطارات والطائرات وفي صنع الاثاث المعدني وفي أعمال الصيانة والاصلاح وإعادة بناء الاجزاء البالية وعدد كبير جدا من الاعمال.

المنطقة المتأثرة بالحرارة Heat Affected Zone (HAZ): هي المنطقة المجاورة لمنطقة اللحام وتعرف بأنها المنطقة التي تتغير بنيتها المجهرية وخواصها بفعل حرارة اللحام. تجدر الاشارة إلى إن أغلب فشل الملحومات يحدث في هذه المنطقة. يزداد عرض هذه المنطقة بزيادة كمية الحرارة الداخلة التي تتناسب عكسيا مع التركيز الحراري لطريقة اللحام. يوضح الشكل أدناه العلاقة بين التركيز الحراري وكمية الحرارة الداخلة لمختلف طرائق اللحام.



عمق التغلغل Penetration: هو أقصى عمق انصهار مقاسا بصورة عمودية على سطح الجزء قبل اللحام. يزداد عمق اللحام بزيادة التركيز الحراري والعكس بالعكس. بزيادة عمق التغلغل ونقصان عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة تزداد جودة الملحومات. الشكل أدناه يوضح عمق اللحام في قطعة قيد اللحام بطريقة القطب المغلف.



معدن الاساس Base Metal: هي المنطقة المجاورة للمنطقة المتأثرة بالحرارة وتعرف بأنها المنطقة التي لا تتأثر بنيتها المجهرية وخواصها بفعل حرارة اللحام.

معدن الحشو Filler: هو المعدن المستخدم لملأ الفجوة بين الاجزاء لبمراد لحامها وتكوين الجسر الرابط بينهما. يكون بشكل عمود أو سلك منفصل كما في طرائق اللحام الغازية أو طريقة اللحام بالهيدروجين الذري أو طريقة لحام البلازما أو طرقة لحام تنكستن-غاز خامل وقد يكون جزء من الدائرة الكهربائية لعملية اللحام كما في طرائق اللحام بالقطب المغلف أو القوس المغمور أو طريقة لحام معدن-غاز خامل ويسمى في هذه الحالة بالقطب Electrode.

الصهيرة Flux: هي مادة تضاف الى منطقة اللحام بشكل حبيبات أو مسحوق أو سائل أو بصورة عجينية لتحقيق عدد من الاهداف الآتية:

1- لتكوين خبث سائل يحجب منطقة اللحام عن الجو المحيط.

2- لتنظيف منطقة اللحام بالاتحاد مع الشوائب ونقلها الى الخبث.

3- توليد غلاف غازي واقي لتكوين حجب إضافي عن الجو المحيط. يتم ذلك بأضافة مواد سليلوزية أو طحين الخشب أو القطن أو الفحم أو الحجر الجيري التي تولد غازات واقية مثل CO, CO_2, H_2, H_2O .

4- زيادة استقرارية القوس في حالة اللحام بالقطب المغلف إذ تضاف عناصر سهلة التأين مثل Na, K, Li مما يزيد من توصيلية القوس.

5- إزالة الأكاسيد التي يؤدي وجودها الى ضعف في وصلة اللحام. يتم ذلك بأضافة المنغنيز بشكل سبيكة Ferro-Mn والسليكون بشكل Ferro-Si المغنيسيوم بشكل سليكات أو معدن الالمنيوم.

6- إضافة العناصر السبائكية المطلوبة.

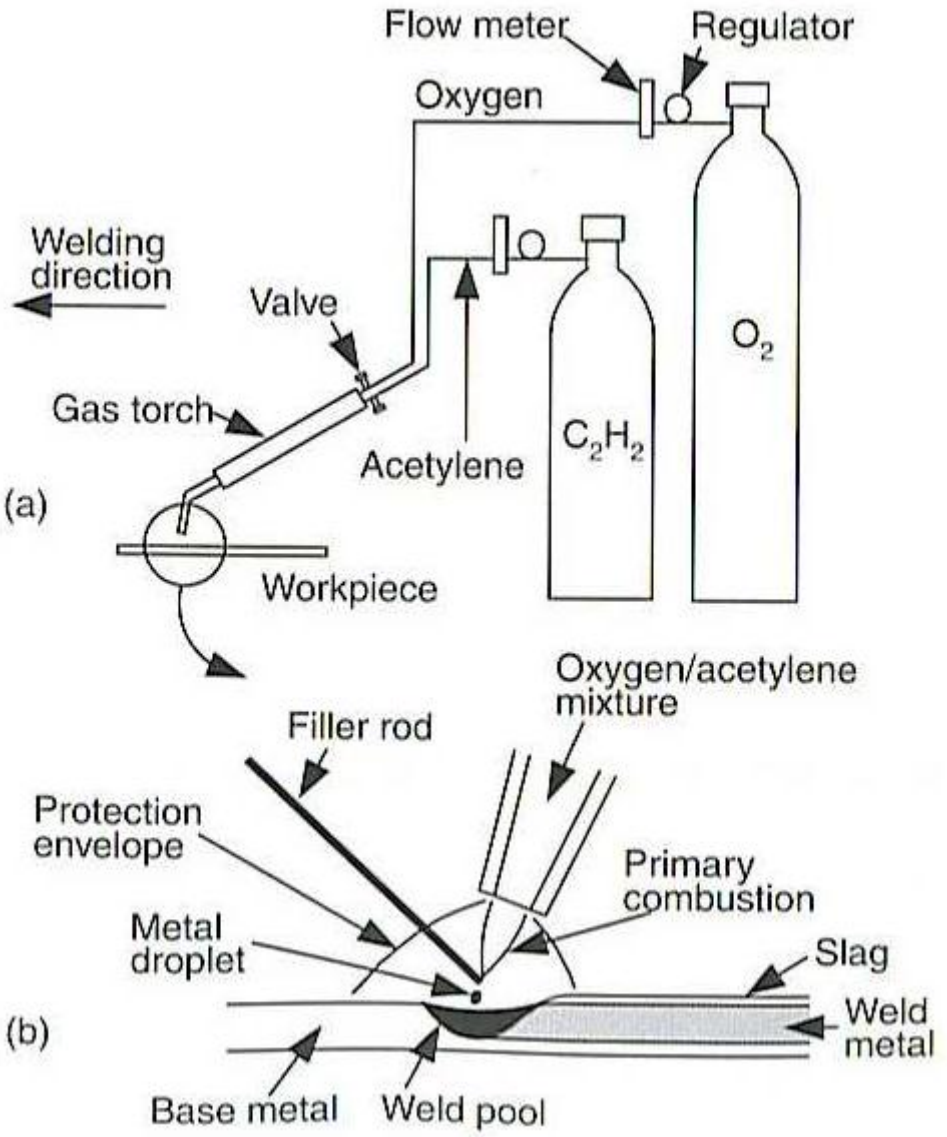
7- زيادة لزوجة الخبث والمعدن المنصهر لمنع تساقطها وبخاصة في اللحام فوق الرأس واللحام الافقي. يضاف لهذا الغرض TiO_2 Rutile .

8- تقليل معدل تبريد وصلة اللحام ومنع تأكسدها من خلال طبقة الخبث الصلب المغطية لها.

طرائق (عمليات) اللحام Welding Methods (Processes)

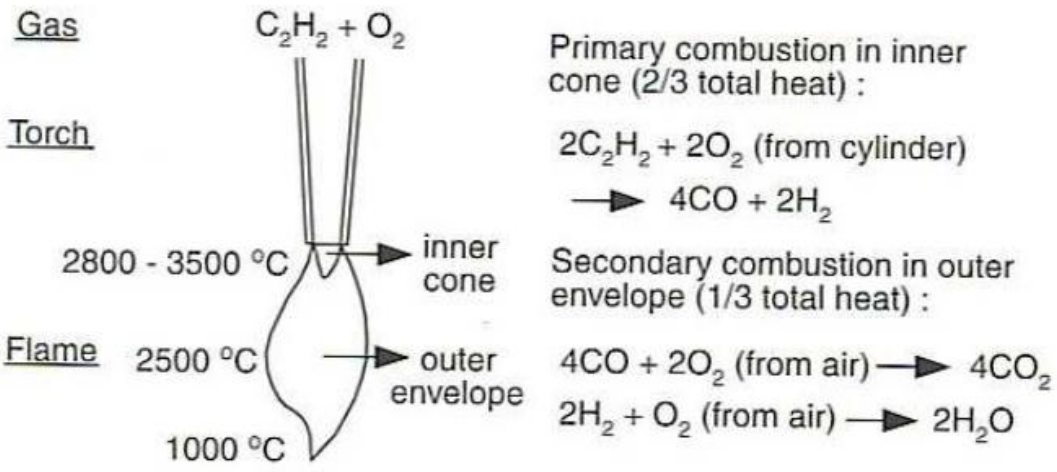
أولاً: طرائق اللحام الغازية Gas Welding Processes

في هذه الطرائق يتم الحصول على الحرارة اللازمة للحام من احتراق خليط من الاوكسجين ووقود غازي مثل الاستلين والهيدروجين والبروبان والغاز الطبيعي إلا إن أكثر هذه الطرائق شيوعا هي طريقة اللحام الأوكسي أستلينية Oxyacetylene المبينة في الشكل أدناه:



كيميائية العملية:

تتم عملية الاحتراق بمرحلتين، يتم في المرحلة الاولى احتراق جزئي للأستلين مع الاوكسجين القادم من القنينة الخاصة به ويحدث ذلك عند المخروط الداخلي. ينتج من هذا الاحتراق غازات CO, H_2 وحرارة. وبانتشار هذه الغازات خارجد المخروط الداخلي والتقائها مع أوكسجين الهواء الجوي تكتمل عملية الاحتراق ويظهر مخروط ثاني طويل. ينتج من هذا الاحتراق غازات $CO_2,$ H_2O وحرارة وكما موضح في الشكل أدناه.



أنواع الشعلات الأوكسي أستلينية Types of Oxyacetylene Flames

1- الشعلة المتعادلة Neutral Flame

نحصل على الشعلة المتعادلة من حرق كميات متساوية تقريبا من الاوكسجين والاستلين. تتكون هذه الشعلة من مخروط داخلي قصير تتولد عنده ثلثي الحرارة الكلية ومخروط خارجي طويل تتولد عنده ثلث الحرارة الكلية. سميت هذه الشعلة بالمتعادلة لعدم وجود أي تأثير كيميائي لها على معدن اللحام وتصل درجة حرارتها الى حوالي 3260 ^oC. تستخدم الشعلة المتعادلة في لحام أغلب المعادن والسبائك.

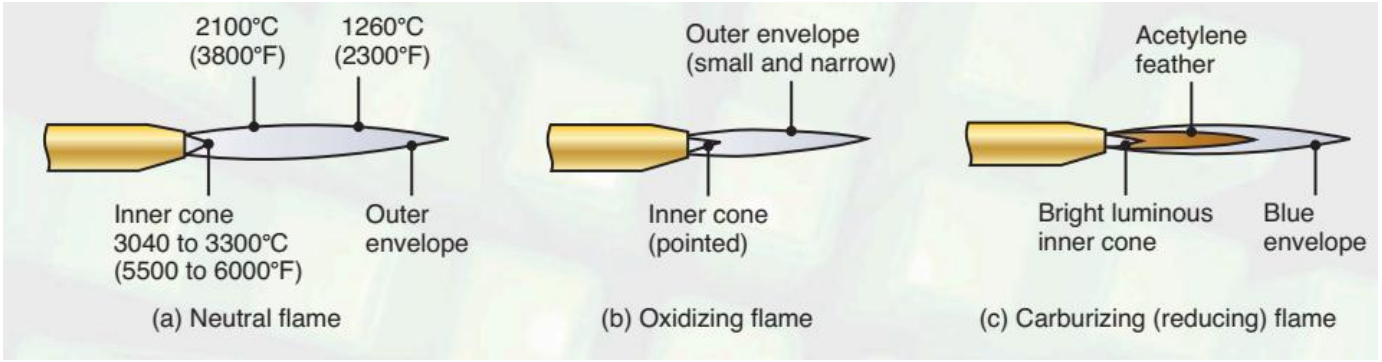
2- الشعلة المؤكسدة Oxidizing Flame

نحصل على الشعلة المؤكسدة بزيادة كمية الاوكسجين عما هي عليه في الشعلة المتعادلة. تعطي الشعلة المؤكسدة أعلى درجة حرارة من كل أنواع الشعلات إذ تصل إلى 2500 ^oC ولها فعل تأكسدي على كل من معدن اللحام السائل ومعدن قطع العمل الصلب. تستعمل الشعلة المؤكسدة في عمليات قطع المعادن بالاستفادة من درجة حرارتها العالية وفعلها التأكسدي الذي يزيد من سرعة عملية القطع كما تستخدم في لحام البرونز والبراص إذ إنها تمنع تطاير(تبخر) بعض العناصر السبائكية مثل الخارصين وذلك بتكوين غشاء واقي من Cu_2O فوق بركة اللحام.

3- الشعلة المختزلة Reducing Flame

نحصل على الشعلة المختزلة بزيادة كمية الاستلين عما هي عليه في الشعلة المتعادلة. تتميز الشعلة المختزلة بوجود ريشة أستلينية بيضاء تقع بين المخروطين الداخلي والخارجي وتعطي هذه الشعلة أقل درجة حرارة من بين الانواع الاخرى من الشعلات إذ تصل درجة حرارتها الى حوالي 3038 ^{o}C. لهذه الشعلة فعل إختزالي على المعدن السائل بواسطة الكربون الزائد. وعندما تكون الزيادة مفرطة في كمية الاستلين تتحول الشعلة من مختزلة إلى مكربنة. لذا يجب عدم استخدامها في لحام المعادن التي لها الميل لأذابة الكربون أو الاتحاد معه. تستخدم الشعلة المختزلة في لحام الالمنيوم وحديد الزهر والفولاذ عالي الكربون.

الشكل التالي يوضح أنواع الشعلات الأوكسي-أستلينية الثلاثة:



محاسن طريقة اللحام بالشعلة الأوكسي-أستلينية

1- المعدات بسيطة

2- المعدات منخفضة الكلفة

3- قابلية عالية على المناقلة

4- سهلة الصيانة والاصلاح

5- يقوم المخروط الخارجي بتوفير غلاف غازي واقي إذ يقوم كل من CO و H_2 باستهلاك الأوكسجين وحماية منطقة اللحام من التأكسد.

محددات طريقة اللحام بالشعلة الأوكسي-أستلينية

1- تركيز حراري منخفض

2- سرعة لحام بطيئة

3- كمية الحرارة الداخلة كبيرة

4- عمق تغلغل قليل

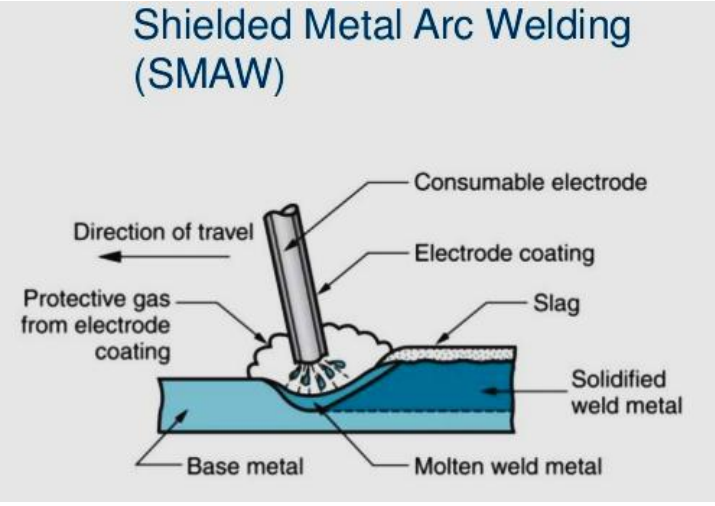
5- عرض كبير للمنطقة المتأثرة بالحرارة

6- عرضة عالية للتشوه

ثانياً: طرائق اللحام القوسية Arc Welding Processes

هي مجموعة من طرائق اللحام التي نحصل فيها على الحرارة اللازمة للانصهار من قوس كهربائي. والقوس الكهربائي هو حالة تفريغ كهربائي خلال فجوة بين قطبين نتيجة مرور التيار الكهربائي خلال الغازات المتأينة في تلك الفجوة، أي هو حالة تفريغ بلازما مرئية. يوجد هنالك عدد كبير من طرائق اللحام القوسية ولكنها بشكل عام تقسم الى الطرائق التي تستخدم الاقطاب المستهلكة مثل طريقة اللحام بالقطب المغلف وطريقة اللحام بالقوس المغمور وطريقة لحام معدن- غاز خامل MIG والطرائق المستخدمة لاقطاب غير مستهلكة مثل طريقة اللحام بقطب الكربون وطريقة لحام تنكستن- غاز خامل TIG وطريقة لحالم البلازما وغيرها. وفيما يلي شرح لعدد من طرائق اللحام القوسية:

1- طريقة اللحام بالقطب المغلف Shielded Metal Arc Welding (SMA)



الشكل أعلاه يوضح طريقة اللحام بالقطب المغلف والتي يتم فيها إنشاء قوس كهربائي بين قطب اللحام وقطعة العمل المراد لحامها. وحالما يتكون القوس تبدأ مقدمة القطب بالانصهار والاندماج مع المعدن المنصهر من حافات القطع المراد لحامها أي إن الطريقة هي طرقة لحام انصهارية. وبعد التجمد يتكون الجسر الرابط بين الاجزاء الملحومة. يغطى قطب اللحام بصهيرة مناسبة ولذلك سميت الطريقة بطريقة اللحام بالقطب المغلف.

تمتاز الطريقة مقارنة بطريقة اللحام الأوكسي-أستلينية بما يلي:

أ- تركيز حراري أعلى.

ب-سرعة أعلى لحركة اليد.

ت-عمق تغلغل أعلى.

ث-كمية الحرارة الداخلة أقل.

ج- عرض أقل للمنطقة المتأثرة بالحرارة.

ح- احتمالية التشوه أقل.

خ- الجودة أعلى.

ومما تجدر الاشارة اليه هو أن سرعة حركة اليد في طريقة اللحام بالقطب المغلف أعلى مما في طريقة اللحام الأوكسي-أستلينية إلا إن السرعة الاجمالية مقاسة بطول اللحام خلال دفعة العمل الواحدة تكون في طريقة اللحام الأوكسي-أستلينية أعلى. يعود السبب في ذلك إلى قصر طول القطب في طريقة اللحام بالقطب المغلف (350 ملم غالباً) مما يضطر العامل الى التوقف المستمر لاستبدال القطب.

بشكل عام يمكن استخدام هذه الطرقة لأغلب المعادن والسبائك إذ انها تمتاز علاوة على ما ذكر في إعلاه بما يلي:

أ- المعدات المستخدمة بسيطة ومنخفضة التكاليف.

ب- إمكانية المناقلة.

ت- تؤمن مرونة عالية في سمك الاجزاء الملحومة باستخدام نفس الماكنة.

ث-يمكن استخدامها في وضعيات اللحام كافة.

ومع كل المزايا أعلاه إلا إن على الطريقة عدد من المآخذ هي:

أ- تولد كمية كبيرة من الدخان والشرر.

ب- تتطلب عمليات تنظيف وإعداد مسبقة لحافات اللحام.

ت- الطريقة بطيئة نسبيا مقارنة مع العديد من طرائق اللحام الأخرى.

ث- تتطلب مهارة عالية للعاملين.

ج- غير مناسبة تماما في لحام المعادن النشطة كالالمنيوم والتيتانيوم.

القطبية Polarity

يتم اللحام عادة بقيم تيار عالية وفولتية واطئة لتأمين سلامة العاملين ويتم استخدام محولات Transformer لتحقيق ولكن بتيار متناوب أو استخدام معدلات تيار Rectifiers لنفس الغرض ولكن بتيار مستمر. في حالة استخدام التيار المتناوب تنعكس القطبية كل نصف دورة، أما في حالة التيار المستمر فأن القطبية ثابتة للقطب طيلة فترة اللحام ما لم يتم تغييرها. يؤثر كل من نوع التيار المستخدم والقطبية على كل من بركة اللحام المتكونة وطبيعة قطب اللحام المستخدم. وفيما يلي إيضاح لذلك:

أ- تيار مستمر – قطب سالب Direct Current Electrode Negative (DCEN) يتم في هذه الحالة ربط قطب اللحام إلى الطرف السالب من مصدر القدرة الكهربائية في حين يتم ربط قطعة العمل الى الطرف الموجب. تتميز هذه القطبية بما يلي:

1- يتولد ما يقرب من 30% من الحرارة عند قطب اللحام وحوالي 70% عند قطعة العمل. مما تجدر الاشارة إليه هو إنه عند استخدام أقطاب ذات غلاف سميك من الصهيرة فقد يتغير التوزيع الحراري المشار إليه كثيرا اعتمادا على نوع الصهيرة.

2- تحقق عمق تغلغل أكبر وعرض أقل للمنطقة المتأثرة بالحرارة.

3- تحقق سرعة لحام أعلى.

4- عمر أطول لقطب اللحام. لهذه الميزة أهمية كبيرة في طرائق اللحام التي تستخدم أقطاب غير مستهلكة.

5- ليس لها فعل تنظيفي للأكاسيد الموجودة على أسطح القطع المراد لحامها.

ب- تيار مستمر – قطب موجب Direct Current Electrode Positive (DCEP)

يتم في هذه الحالة ربط قطب اللحام إلى الطرف الموجب من مصدر القدرة الكهربائية في حين يتم ربط قطعة العمل الى الطرف السالب. تستخدم هذه القطبية في لحام تتميز هذه القطبية بما يلي:

1-يتولد ما يقرب من 70% من الحرارة عند قطب اللحام وحوالي 30% عند قطعة العمل مع أخذ الملاحظة المشار إليها سابقا في الاعتبار.

2- تحقق عمق تغلغل أقل وعرض أكبر للمنطقة المتأثرة بالحرارة.

3-لها فعل تنظيفي للأكاسيد الموجودة على أسطح القطع المراد لحامها.

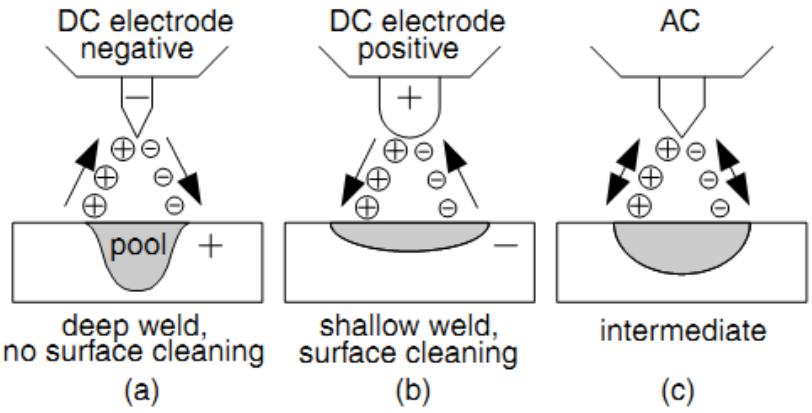
4-عمر أقصر لقطب اللحام.

5-سرعة لحام أقل.

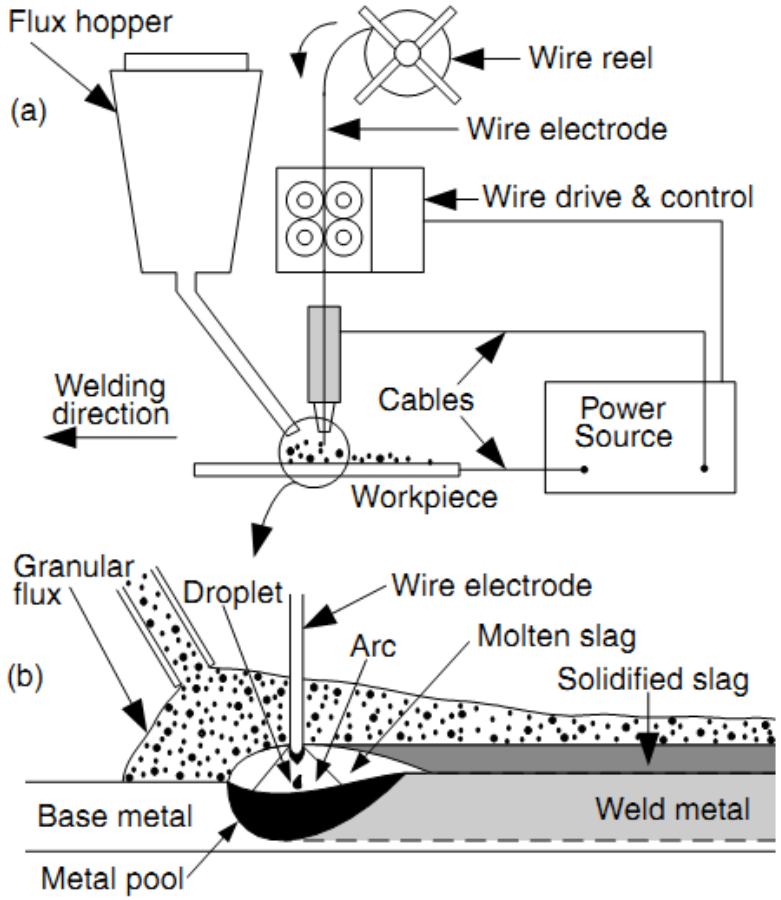
6--معدل ترسيب أعلى.

أما في حالة استخدام التيار المتناوب فتتحقق حالة من التوازن بين خصائص نوعي القطبية أعلاه.

الشكل أدناه يوضح تأير نوع التيار والقطبية في عمليات اللحام القوسية:



2- طريقة اللحام بالقوس المغمور Submerged Arc Welding (SAW)



هي طريقة لحام قوسية يتم انشاء القوس بين قطعة العمل وسلك مستهلك. سميت بطريقة اللحام بالقوس المغمور لأن القوس يكون محاطاً بالخبث السائل وحبيبات الصهيرة ويكون غير مرئيا في أثناء العمل كما مبين في الشكل أعلاه. يتم تجهيز حبيبات الصهيرة من خلال قمع يتحرك مع حركة العربة.

محاسن الطريقة

1- ينتج وصلات لحام نظيفة لوجود حجب جيد عن الجو المحيط علاوة على دور الخبث في تنظيف الوصلة من الشوائب.
2- تركيز حراري أعلى من الطرائق السابقة.
3- سرعة لحام أعلى نتيجة التركيز الحراري والطول غير المحدد لسلك اللحام والعمل الاوتوماتيكي للطريقة.
4- يمكن إضافة العناصر السبائكية المرغوبة والمعدن المترسب نفسه بشكل مسحوق مع الصهيرة لزيادة معدل الترسيب.
5- يمكن زيادة معدل الترسيب كذلك باستخدام اكثر من سلك بصورة متعاقبة.

6- يمكنها لحام سمك كبير بدون تهيئة الحافات لامكانية تحقيق عمق تغلغل أكبر يصل الى 12 ملم.
7- عرض أقل للمنطقة المتأثرة بالحرارة.
8- استهلاك أقل للصهيرة مع امكانية إعادة استخدام المتبقي.
9- انتظام عالي لخط اللحام.

10-عدم وجود تناثر للمعدن أو شرر أو دخان أو إشعاع.

11-احتمالية التشوهات منخفضة.

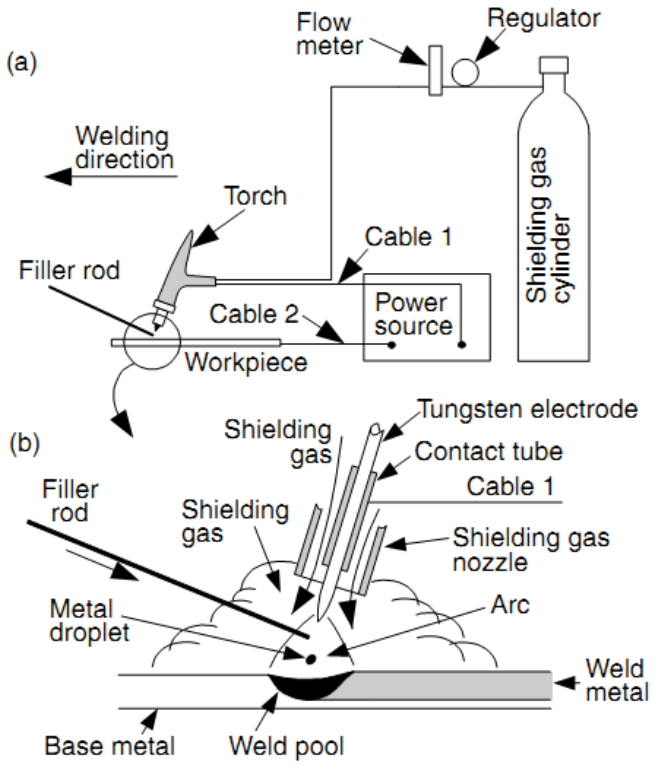
12- لا تتطلب مهارة عالية للعاملين.

محددات الطريقة

1- منطقة اللحام غير مرئية أي ليس للعامل تحكما فيها.
2- الطريقة محدودة للوضع المسطح غالبا.
3- محدودة للفولاذ والفولاذ اللاصدأي وبعض سبائك النيكل ولا تصلح في لحام معادن الالمنيوم والمغنيسيوم والخارصين وحديد الزهر.
4- توجد مخاطر صحية على العاملين من الصهيرة المتبقية.

3- طريقة لحام تنكستن-غاز خامل Tungsten-Inert Gas (TIG)

وتسمى كذلك اللحام القوسي بطريقة غاز- تنكستن Gas-Tungsten Arc Welding (GTAW) ويبين الشكل أدناه رسما توضيحيا للطريقة.



وهي طريقة لحام قوسية انصهارية يتم فيها الحصول على الحرارة اللازمة للانصهار من تكوين قوس بين قطب غير مستهلك من التنكستن وقطعة العمل مع استخدام معدن حشو بشكل سلك منفصل إن لزم الامر. يتم في هذه الطريقة ضخ غاز خامل مثل الآركون أو الهليوم الى منطقة اللحام للاحاطة بها وبالقوس وحمايتها من الجو المحيط. كما يتم تبريد قطب التنكستن بواسطة ماء تبريد يمر من خلال الانبوب النحاسي الذي يوصل الى مصدر القدرة الكهربائية في نفس الوقت في حين يتم وصل قطعة العمل الى الطرف الآخر من مصدر القدرة.

محاسن الطريقة

1- تستخدم قطب غير مستهلك أي عدم الحاجة لوقف العمل واستبدال القطب في طرائق اللحام بالقطب المستهلك.

2- لا حاجة لاستخدام الصهيرة.

3- حجب تام عن الجو المحيط.

4- رؤية ممتازة لمنطقة اللحام.

5- تنتج وصلات لحام بجودة عالية.

6- طريقة مناسبة تماما في لحام الصفائح الرقيقة.

7- تناثر المعدن قليل جدا او معدوم اعتمادا على درجة نظافة وصلة اللحام.

8- تصلح مع وضعيات اللحام كافة.

9- عرض قليل للمنطقة المتأثرة بالحرارة.

10- إحتمالية التشوه قليلة.

11- يمكن استخدامه في لحام جميع المعادن والسبائك.

محددات الطريقة

1- كلفة الانشاء الاولية عالية.

2- تعد طريقة لحام بطيئة بسبب معل الترسيب المنخفض لمعدن الحشو المنفصل عن القطب.

3- الطريقة معقدة وتتطلب مهارة عالية لدى العاملين.

4- الكلفة العالية للغاز الخامل.

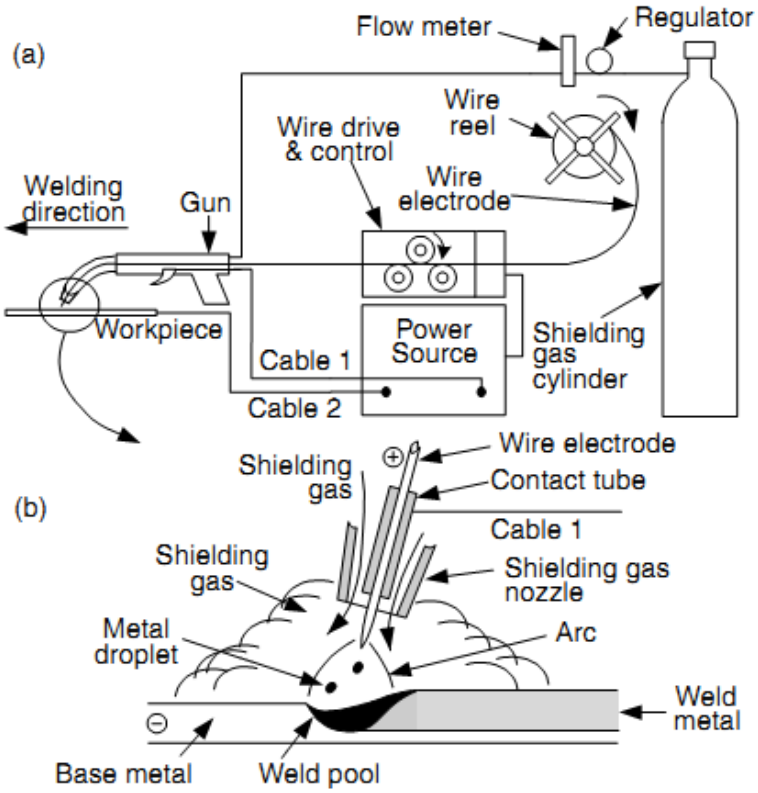
5- الحاجة الى تنظيف بدرجة عالية لوصلة اللحام.

6- الاشعاع فوق البنفسجي UV عالي جدا وله أثر سئ على العيون مما يتطلب تحوطات عالية.

7- توجد احتمالية التلوث من قطب التنكستن نفسه وكذلك من الهواء الجوي عند الخروج غي المقصود للسلك من الغلاف الغازي.

4- طريقة لحام معدن-غاز خامل Metal-Inert Gas (MIG)

تسمى أيضا اللحام بطريقة غاز- معدن Gas-Metal Arc Welding (GMA) وهي مشابهة تماما لطريقة لحام TIG مع استبدال قطب التنكستن بقطب معدني يمثل معدن الحشو ويغذى بصورة مستمرة وذاتية الى منطقة اللحام. ينشأ القوس في هذه الطريقة بين القطب المعدني وقطعة العمل. الشكل أدناه يبين رسما توضيحيا لطريقة لحام MIG:



محاسن الطريقة

1- سرعة لحام أعلى مما في طريقة لحام TIG وكذلك طريقة لحام SMAW .
2- مهارة العامل المطلوبة أقل.
3- حجب تام عن الجو المحيط.
4- رؤية ممتازة لمنطقة اللحام.
5- جودة عالية وعادة أعلى مما في طريقة لحام TIG.
6- عمق تغلغل أكبر مما في طريقة لحام TIG.
7- معدل ترسيب عالي.
8- لا حاجة للصهيرة.
9- لا حاجة للتنظيف عند الحاجة للحام بأكثر من تمريرة لعدم وجود خبث.
10- تستعمل لمدى واسع من المعادن والسبائك ضمنها الالمنيوم والمغنيسيوم والنيكل والفولاذ المقاوم للصدأ والصلب الكربوني.

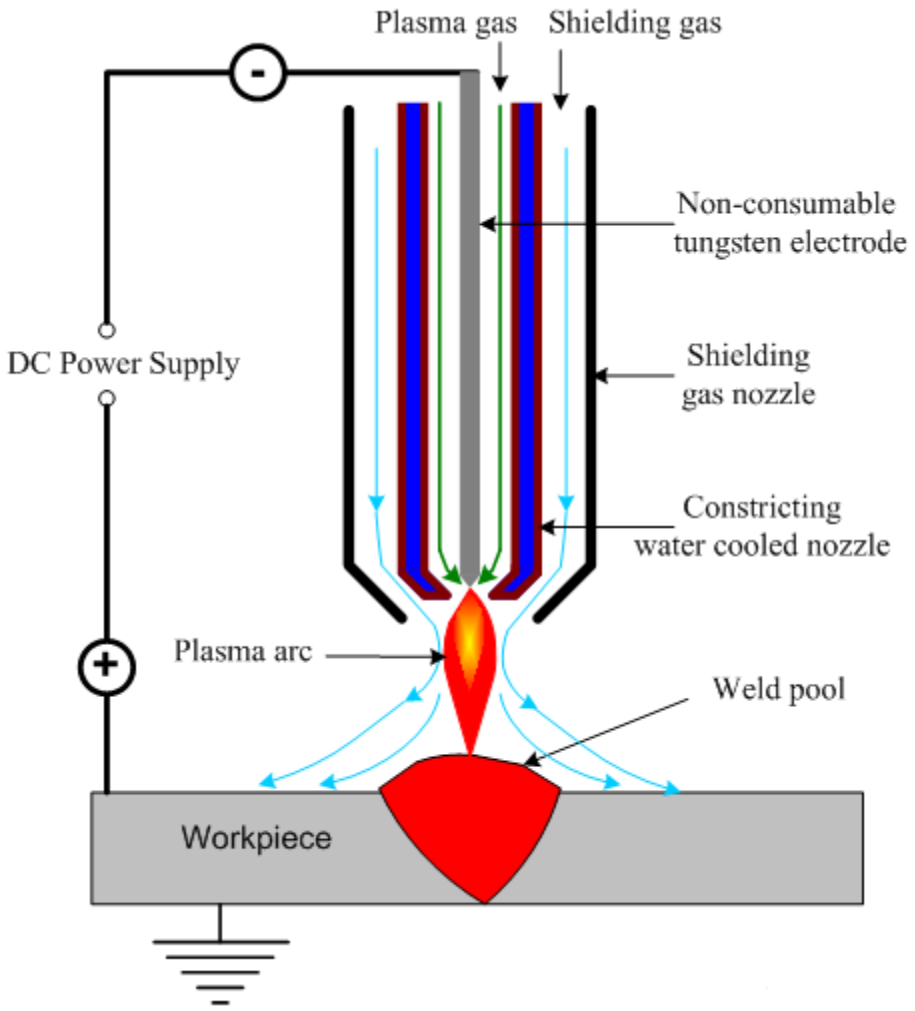
محددات الطريقة

1- كلفة الانشاء عالية وأعلى مما في طريقة لحام TIG.
2- كلف صيانة عالية.
3- غير مناسبة للحام في الهواء الطلق.

4- تأثير عالي للاشعاع.

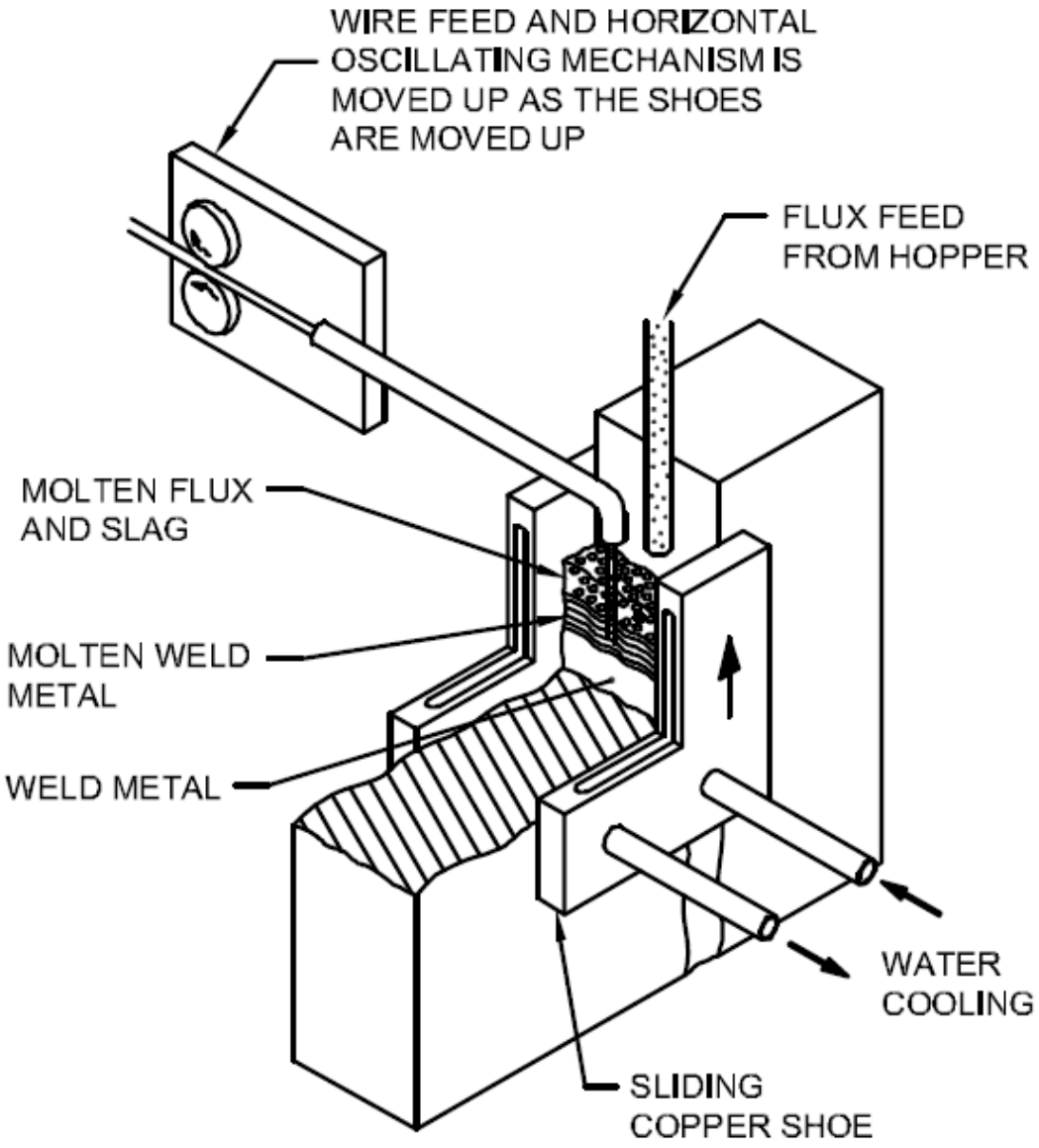
5- طريقة لحام البلازما Plasma Arc Welding (PAW)

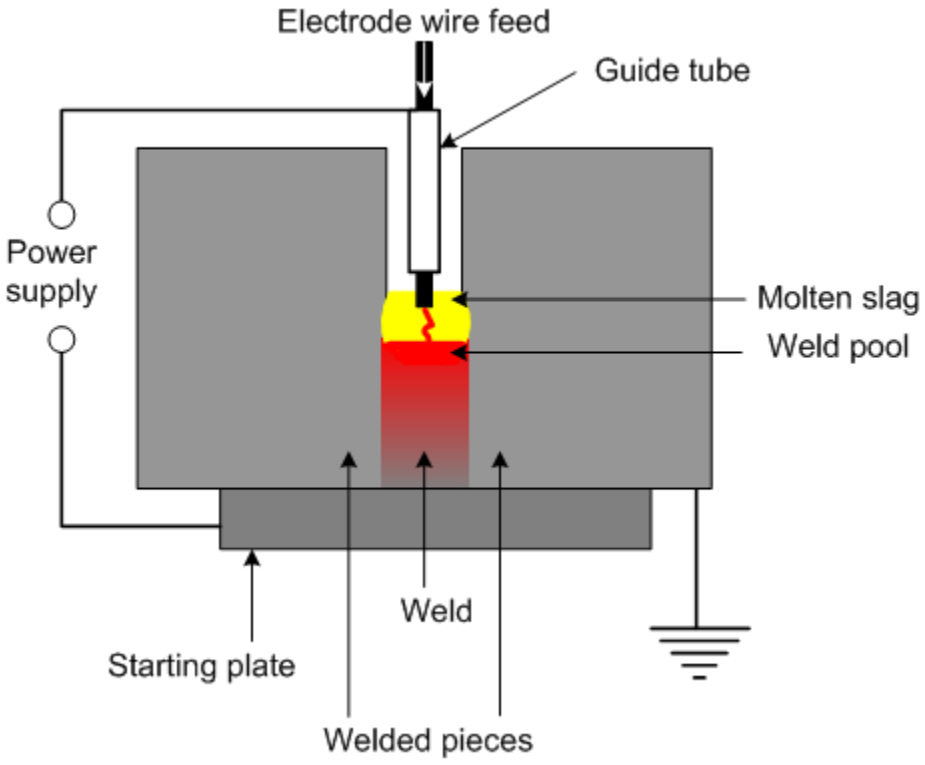
هي طريقة لحام قوسية يتم فيها إنشاء قوس ضيق بين قطب من التنكسن وقطعة العمل أي إن العملية مشابهة لطريقة لحام TIG إلا إن قطب التنكستن في طريقة لحام البلازما يكون مخبأً داخل فوهة الغاز التي يكون لها فعلا لاماً للقوس الناشئ مما يجعله ضيقا قليل الانتشار حتى مع الطول الكبير له. يتم في هذه العملية ضخ غاز خامل بضغط واطئ من خلال فوهة قطب التنكستن (غاز البلازما) وفي نفس الوقت يتم ضخ غاز خامل بضغط عالي من فوهة محيطة بفوهة القطب (غاز الحماية). الشكل أدناه يعطي رسما توضيحيا لطريقة لحام البلازما:



ثالثا: طريقة اللحام الكهروخبثي Electro-slag Welding (ESW)

في هذه الطريقة يتم أولا إنشاء قوس كهربائي بين قطب أو أقطاب اللحام وبين صفيحة بدء start Plate توضع أسفل الاجزاء المراد لحامها. يتم بعد ذلك إضافة مسحوق الصهيرة الذي يتحول الى الحالة السائلة بفعل حرارة القوس. عندها يتم إطفاء القوس والابقاء على مقدمة القطب او الاقطاب مغمورة في الخبث السائل المتكون. ولأن الخبث المستخدم موصل كهربائيا في حالته السائلة فأن التيار الكهربائي يستمر بالمرور وتستمر الحرارة بالتولد بسبب مقاومة الخبث لمرور التيار الكهربائي. تقوم الحرارة المتولدة بصهر حافات القطع المراد لحامها ومقدمة قطب أو أقطاب اللحام وتكوين بركة من المعدن السائل تعلوها طبقة من الخبث السائل. وبتجمد بركة المعدن السائل نحصل على الجسر الرابط بين قطع العمل. جدير ذكره أن هذه الطريقة تبدأ عملها بصورة طريقة لحام قوس كهربائي ثم تستمر كطريقة لحام مقاومة كهربائية. تستخدم الطريقة في بناء السفن والجسور وأوعية الخزن. الشكل أدناه يبين رسماً توضيحيا للطريقة.


WIRE FEED AND HORIZONTAL
OSCILLATING MECHANISM IS
MOVED UP AS THE SHOES
ARE MOVED UP
FLUX FEED
FROM HOPPER
MOLTEN FLUX
AND SLAG
MOLTEN WELD
METAL
WELD METAL
WATER
COOLING
SLIDING
COPPER SHOE



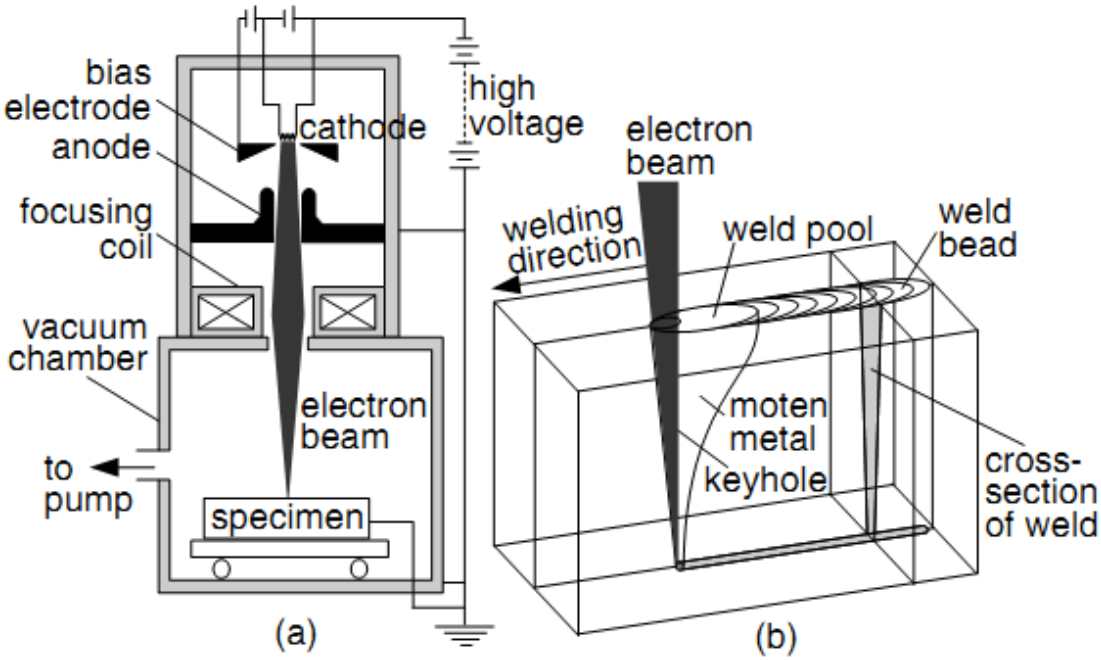
محاسن الطريقة

1- معدل ترسيب عالي جدا.
2- يتم انجاز العمل بتمريرة واحدة مهما كان سمك القطع المراد لحامها.
3- بركة اللحام معزولة عن الجو المحيط تماما بواسطة الخبث السائل الذي يقوم بتنقية قطرات معدن الحشو في أثناء نزولها من خلاله.
4- لا حاجة لاجراء تهيئة لحافات اللحام.
5- الاجهادات المتبقية والتشوه الحاصل قليل.
6- استهلاك قليل جدا للصهيرة مقارنة بطريقة اللحام بالقوس المغمور.
7- معدل التبريد بطئ جدا ولا يوجد خوف من التشققات الباردة.

محددات الطريقة

1- كلفة الانشاء عالية.
2- كمية الحرارة الداخلة كبيرة جدا وعرض المنطقة المتأثرة بالحرارة كبير.
3- ينتج حبيبات خشنة ذات جساءة منخفضة.
4- يقتصر استخدامها على وضع اللحام العمودي فقط.

رابعا: طريقة اللحام بالحزمة الالكترونيةElectron Beam Welding



في هذه الطريقة يتم صهر وربط المعادن عن طريق الحرارة المتولدة من اصطدام حزمة الكترونية بمنطقة اللحام وتحويل طاقتها الحركية الى حرارة. وكما يلاحظ في الشكل أعلاه يتم تسخين شعيرة معدنية (الكاثود) الى درجة الانبعاث الحراري thermionic temperature كي تبعث الالكترونات التي يتم تعجيلها بواسطة المجال الكهربائي بين المحياد bias السالب الموضوع اسفل الكاثود وقطب أنود موجب. يتم بعد ذلك تركيز الحزمة المارة من ثقب الانود بواسطة ملف كهرومغناطيسي لتصطدم المشغولة في نقطة ضيقة يتراوح قطرها بين 0.3 – 0.8 ملم. يمكن للحرارة الناتجة من هذه الحزمة أن تبخر المعدن وتكون ثقب نافذ keyhole يضمن تغلغل تام لكامل السمك وكما مبين في الشكل b أعلاه. تتطلب العملية العمل في حجرة مفرغة ويزداد تركيز الحزمة بزيادة الفراغ لأن الالكترونات تتشتت عند اصطدامها بجزيئات الهواء.

محاسن الطريقة

1- تركيز حراري عالي جدا.

2- عمق تغلغل كبير ولكامل السمك حتى مع الاجزاء كبيرة السمك.

3- سرعة لحام عالية.

4- كمية الحرارة الداخلة صغيرة جدا.

5- عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة صغير جدا.

6- امكانية لحام كل من المعادن النشطة والمعادن المقاومة للحرارة بهذه الطريقة.

7- امكانية استخدام الطريقة في لحام المعادن المختلفة أو لحام المعادن الى مواد غير معدنية.

محددات الطريقة

1- كلفة الانشاء عالية جدا.

2- الحاجة الى الفراغ.

3- توجد مخاطر انبعاثات الاشعة السينية.

4- فترة الاعداد طويلة.

خامسا: لحام المقاومة الكهربائية Electric Resistance Welding

تستخدم هذه الطرائق في لحام الصفائح المعدنية بإحداث انصهار جزئي عند نقاط التماس بين الصفائح باستغلال الحرارة المتولدة من تحويل الطاقة الكهربائية الى حرارة بسبب مقاومة المعادن لمرور التيار الكهربائي وكما مبين في العلاقة الآتية:

$$H = I^2 R t$$

حيث إن:

H هو كمية الحرارة المتولدة

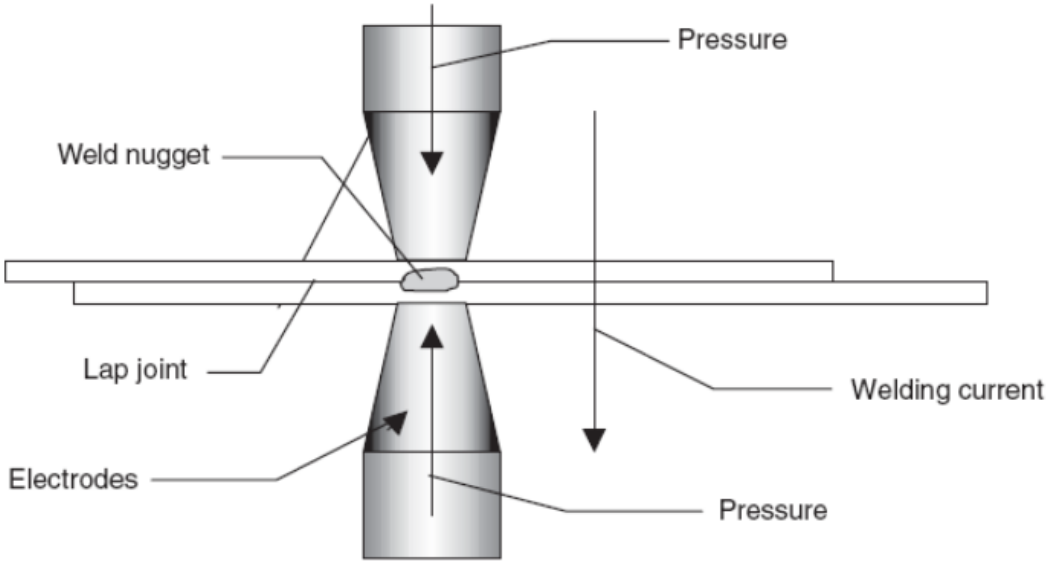
I هو التيار المار (أمبير)

R المقاومة الكهربائية (أوم)

t هي فترة مرور التيار (ثانية)

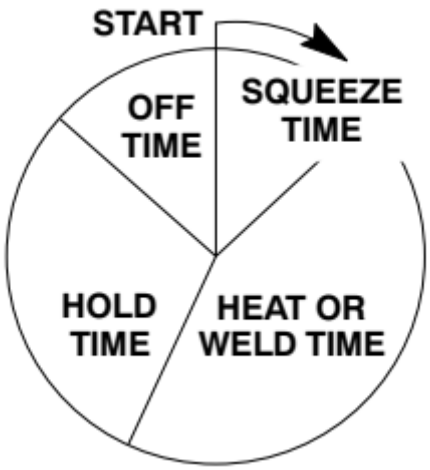
ومن طرائق لحام المقاومة الكهربائي ما يلي:

1- لحام النقطة Spot Welding



Principles of spot welding process.

هي طريقة لحام مقاومة كهربائية تستخدم في لحام صفيحتين متراكبتين أو أكثر، بعض الانابيب، بعض زعانف المبادلات الحرارية وغيرها. قبل البدء بعملية اللحام يجب تنظيف الاسطح المراد لحامها بشكل جيد من الاكاسيد والاوساخ والشحوم والزيوت والاصباغ وتستخدم بشكل واسع في صناعة أبدان السيارات والقطارات والطائرات والجرارات وعلى سبيل المثل يحتوي بدن السيارة على 3000 – 6000 نقطة لحام. يتم بعد ذلك اتباع الخطوات الآتية للحصول على نقطة لحام وكما مبين في الدورة أدناه:



أ- وضع الاجزاء المراد لحامها بين قطبي اللحام وتسليط ضغط مناسب وهو ما يعرف بفترة العصر Squeeze Time

ب- الابقاء على الضغط وإمرار تيار كهربائي مناسب وهو ما يعرف بفترة اللحام او التسخين Heat or Weld Time

ت- قطع التيار الكهربائي والابقاء على الضغط لحين حول التجمد وتحقق الربط بين الاجزاء وهو ما يعرف بفترة الانتظار Hold Time

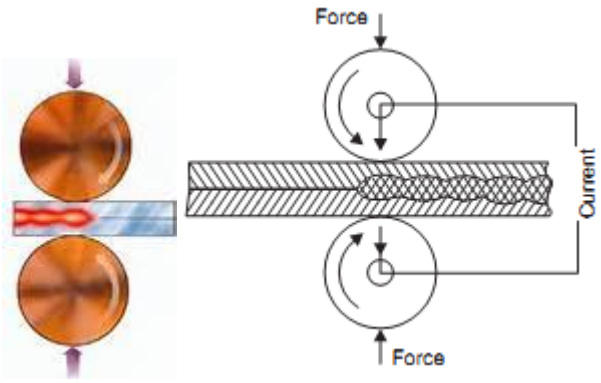
ث- إزالة الضغط والاعداد لنقطة جديدة وهو ما يعرف بفترة التوقف Off Time

عادة ما تصنع الاقطاب من النحاس وتبرد بالماء وعند امرار التيار الكهربائي يتم تسخين قطع اللحام عند نقطة التماس وبارتفاع درجة الحرارة تزداد المقاومة الكهربائية ويحدث انصهار جزئي عند تلك النقطة. جدير ذكره أن فترة مرور التيار الكهربائي قصيرة جدا ويمكن ان تكون عدة أجزاء من الألف من الثانية أما قيمة التيار الكهربائي فتتراوح بين 100 – 100000 أمبير. وبقطع التيار الكهربائي يتم التبريد والتجمد تحت الضغط وذلك بتبدد الحرارة خلال الاقطاب المبردة بالماء وكذلك خلال الاجزاء الملحومة.

عندما يتم توليد حرارة زائدة أو تسلط بسرعة عالية جدا أو عندما يكون الضغط واطئ جدا أو أن طبقة الطلاء سميكة جدا، في هذه الحالات منطقة الانصهار قد تمتد خارج القطع الملحومة وفي هذه الحالة تصبح نقطة اللحام أرق وذات مقاومة منخفضة.

عند لحام صفائح مختلفة السمك أو لحام صفائح من معادن مختلفة ذات توصيلية كهربائية وحرارية مختلفة. في هذه الحالات وللحصول على لحام متناسب في كلا القطعتين يتم التحكم في مساحة مقطع قمة القطب للتحكم في شدة التيار وبالتالي سمك الانصهار، إذ يتم استخدام قطب ذو مساحة مقطع قمة أصغر من جهة الصفيحة الأسمك أو من جهة الصفيحة ذات التوصيلية الأعلى.

2- اللحام الخطي (الدرزي) Seam Welding



اللحام الدرزي هو لحام مقاومة كهربائية ويمكن اعتباره لحام نقطي مستمر. يمكن للحام الدرزي أن يكون تناكبيا أو تراكبيا ويجرى بصورة أوتوماتيكية في المعتاد. الاقطاب المستخدمة في هذه الطريقة هي أقطاب نحاسية مبردة بالماء وعلى شكل أقراص دوارة كما مبين في الشكل أعلاه. إن الاسطح شبه المنصهرة تعصر مع بعضها عن طريق ضغط اللحام مكونة الرابطة بين السطحين. تمتاز وصلة اللحام الناتجة من اللحام الدرزي بتحملها العالي والناتج تسليط كل من الضغط والحرارة في آن واحد.

تستخدم هذه الطريقة من اللحام في انتاج انابيب الفولاذ ذات المقاطع الدائرية او المستطيلة وعلب المشروبات المصنوعة من الفولاذ.

عيوب اللحام Welding Defects

يمكن تعريف عيوب اللحام بأنها الانحرافات irregularities عن الحالة القياسية لمعدن اللحام بسبب طريقة اللحام الخاطئة أو المتغيرات غير الصحيحة للطريقة أو أخطاء العاملين أو عدم التوافق بين معدن الحشو ومعدن الاساس. يمكن للعيب أن يظهر ضمن معدن اللحام أو خارجه (في المنطقة المتأثرة بالحرارة) بعض العيوب تكون مقبولة عندما تكون ضمن الحدود المسموحة إلا إن عيوبا مثل الشقوق لا تقبل أبداً. تسهم المتغيرات غير الصحيحة بحوالي 41% من العيوب وتسهم أخطاء العامل بحوالي 32% منها وتسهم الطريقة غير الصحيحة بحوالي 12% ويسهم الاختيار الخاطئ لمواد الحشو بحوالي 10% وتسهم التهيئة غير الصحيحة لوصلة اللحام بحوالي 5% من هذه العيوب.

يمكن تقسيم عيوب اللحام إلى الانواع الآتية:

1- التشققات Cracking

تعد التشققات من أخطر العيوب وتؤدي الى رفض اللحام ولا تقبل بحال من الاحوال. تظهر الشقوق في معدن اللحام أو في المنطقة المتأثرة بالحرارة وتقسم إلى:

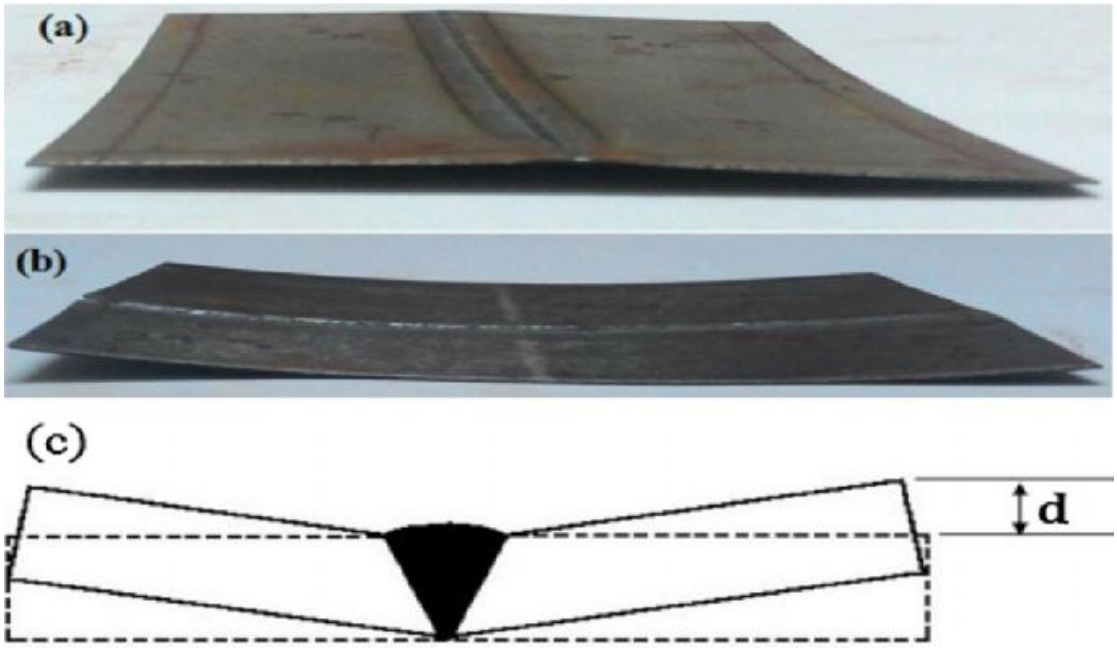
أ- تشققات ساخنة Hot Cracks وتحدث هذه الشقوق في أثناء تجمد معدن اللحام.

ب- تشققات باردة Cold Cracks وتظهر بعد اكتمال عملية اللحام وتبريد المعدن إلى درجة حرارة الغرفة عادة وتظهرهذه الشقوق بعد اللحام بساعات أو بأيام.

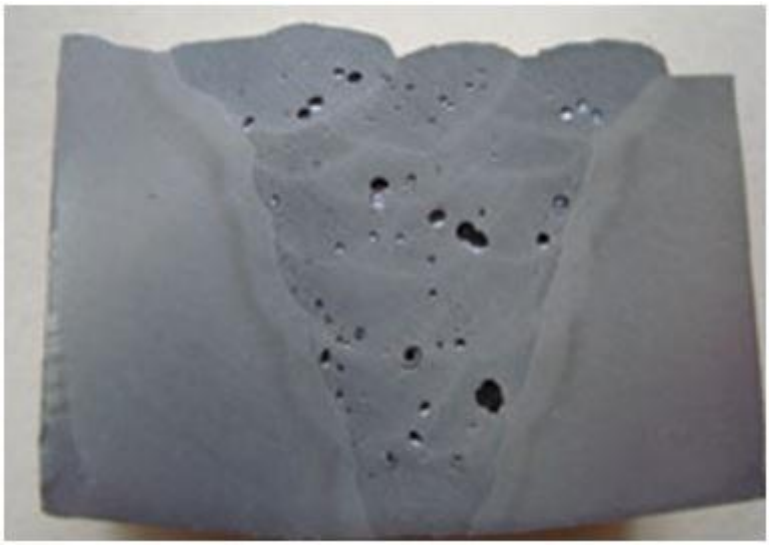
يمكن للشقوق أن تحدث بسبب الاجهادات المتبقية والناتجة من التمدد والتقلص المعاق والذي يسبب إجهادات حرارية، أو بسبب وجود نسب عالية من الكبريت والفوسفور والكربون، أواللحام في أجواء يكون الهيدروجين هو الغلاف الواقي، أو الهشاشية العالية للمعدن بل وحتى المطيلية المنخفضة له وكذلك الجساءة العالية لوصلة اللحام أي الاعاقة الكبيرة للتمدد والتقلص. الشكل أدناه يوضح أنواع التشققات المشار اليها.

2- التشوهات Distortions

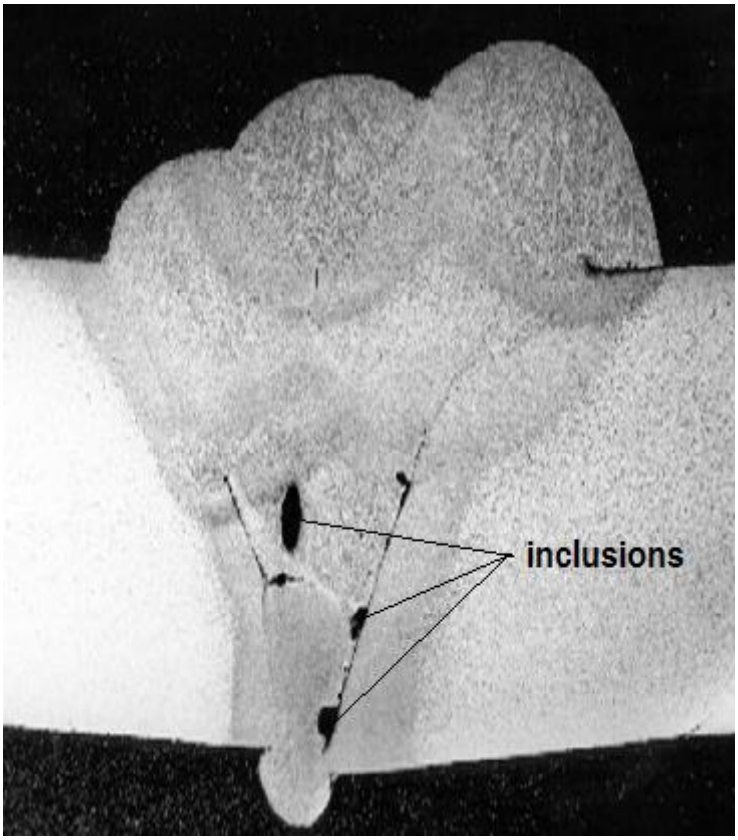
هي تغير الشكل والذي يحدث بسبب الاجهادات المتبقية، أو استعمال عدد كبير من التمريرات باستخدام اقطاب صغيرة، سرعة اللحام الواطئة، والمقاومة المنخفضة للمعدن. والشكل التالي يوضح هذا العيب:



3- المسامية Porosity وثقوب النفخ Blowholes وتتكون بسبب احتباس الغاز داخل معدن اللحام وانعزاله بصورة فقاعات صغيرة. تنتج المسامية من رطوبة الصهيرة أو معدن الاساس نفسه، ومن التنظيف غير التام لوصلة اللحام والمنطقة المحيطة بها من الاوساخ والاصباغ والشحوم والزيوت والصدأ، ومن سرعة اللحام العالية ومن الطول الكبير للقوس ومن التيار العالي جدا أو الواطئ جدا، وكما موضح في الشكل أدناه:

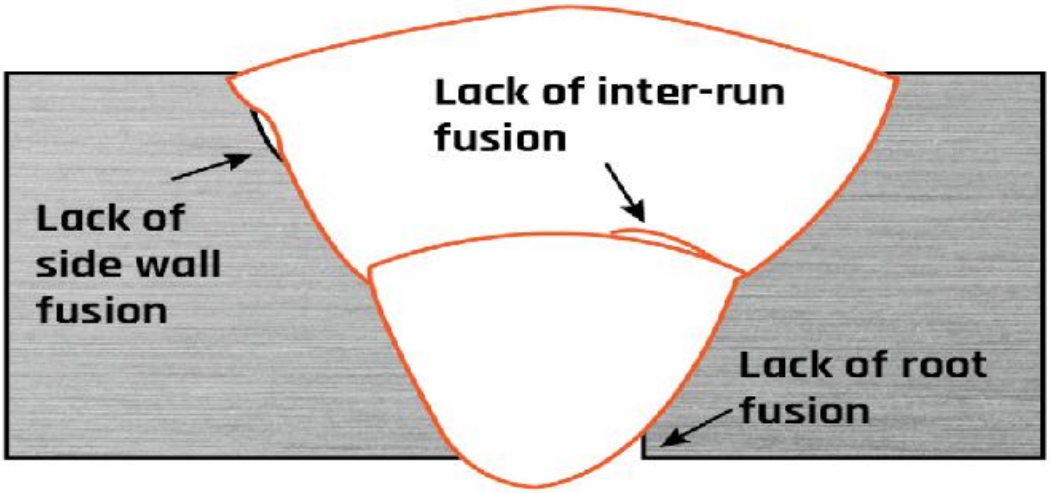


4- المتضمنات Inclusions وهي أية مواد غريبة يمكن ان تتواجد في منطقة اللحام وتعد جسيمات الخبث أكثر المتضمنات شيوعا في الملحومات وكما مبين في الشكل أدناه:

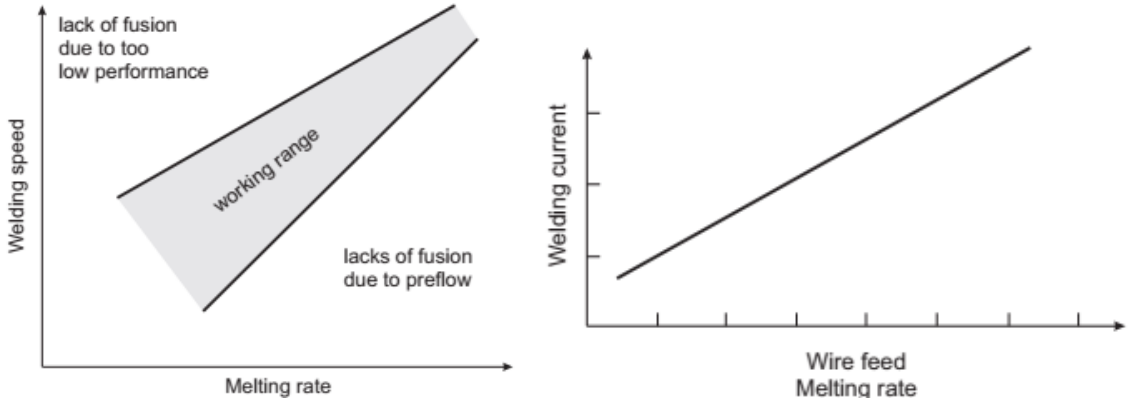


وتظهر المتضمنات بسبب التنظيف غير التام لخبث التمريرة السابقة في اللحام متعدد التمريرات، وسرعة اللحام العالية جدا، وتيار اللحام المنخفض جدا، والزاوية الصغيرة لوصلة اللحام، والقوس الطويل مع القطب كبير القطر.

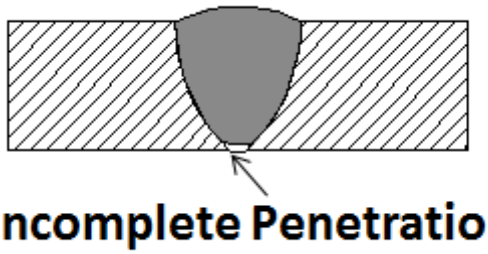
5- الانصهار غير المكتمل Incomplete Fusion ويعد من عيوب اللحام الخطرة والتي تسبب تركيز للاجهادات علاوة على ضعف مقاومة وصلة اللحام ويظهر هذا العيب عندما يكون هنالك نقص انصهار بين معدن اللحام والمعدن الاساس أو بين معدن اللحام للتمريرات المتعاقبة وكما موضح في الشكل التالي:



يظهر هذا العيب عندما تكون كمية الحرارة قليلة، وسرعة اللحام عالية وغير متناسبة مع معدل الانصهار، وعندما يكون معدل تغذية القطب عالية ولا تتناسب مع تيار اللحام وكما مبين في الاشكال أدناه:



6- التغلغل غير المكتمل Incomplete Penetration ويقصد به عدم ملئ الاخدود بين وصلتي العمل بالمعدن بصورة كاملة وبمعنى آخر عدم امتداد معدن اللحام الى كامل سمك القطع الملحومة أي عندما يكون عمق التغلغل أقل من سمك الاجزاء الملحومة وكما مبين في الشكل أدناه:



ينتج التغلغل غير المكتمل من كمية الحرارة الداخلة القليلة، وسرعة اللحام العالية والترسيب القليل للمعدن ، واستخدام أقطاب لحام بقطر كبير وتيار لحام قليل وطول قوس كبير، قطبية خاطئة في حالة اللحام بتيار مستمر، واستخدام وصلة لحام بجذر طويل.

7- تناثر المعدن Spatter وهو التصاق جسيمات من معدن اللحام على جانبي خط اللحام وينتج من تيار اللحام العالي جدا والفولتية المنخفضة جدا، وطول القوس الكبير جدا، ورطوبة الاقطاب والاجزء الملحومة والتنظيف غير الجيد لوصلة اللحام والمنطقة المجاورة لها والشكل التالي يوضح هذا العيب:

تشكيل المعادن Metal Forming

هو إحدى عمليات التصنيع التي يتم فيها تغيير شكل أو ابعاد الاجزاء المعدنية عن طريق التشكيل اللدن بوساطة قوى خارجية. وقبل الدخول في تفاصيل عمليات التشكيل المعدني وحساباتها يجدر بنا بيان بعض المفاهيم الاساسية وكما يلي:

الاجهاد Stress: هو المقاومة التي يبديها المعدن ضد القوى المؤثرة عليه ويعطى رياضيا بالعلاقة:

$$\sigma = F / A$$

حيث إن: σ هو الاجهاد و A هي مساحة المقطع

ويسمى الاجهاد بالاجهاد الهندسي عند القسمة على مساحة المقطع الاصلي والاجهاد الحقيقي عند القسمة على المساحة الآنية.

الانفعال Strain: هو الاستجابة التي يبديها المعدن للقوى المؤثرة عليه ويظهر بصورة تغير في الشكل أو الابعاد ويعطى الانفعال الهندسي رياضيا بالعلاقة:

$$e = \Delta L / L_o$$

بينما يعطى الانفعال الحقيقي رياضيا بالعلاقة:

$$\epsilon = \ln (L / L_o)$$

حيث إن L و L_o هما الطول النهائي والاصلي على التوالي.

التشكيل المرن Elastic Deformation: هو تشكيل مؤقت يزول أثره بزوال القوة المسلطة.

التشكيل اللدن Plastic Deformation: هو تشكيل دائم يبقى أثره حتى بعد زوال القوة المسلطة.

التشكيل اللدن المنتظم Uniform Plastic Deformation: هو التشكيل اللدن الذي يحدث بانتظام لكل المقطع قيد التشكيل وفي حالة اختبار الشد أحادي الاتجاه يبدأ من إجهاد الخضوع وينتهي عند إجهاد الشد الاقصى ويمثل المركبة المفيدة من التشكيل.

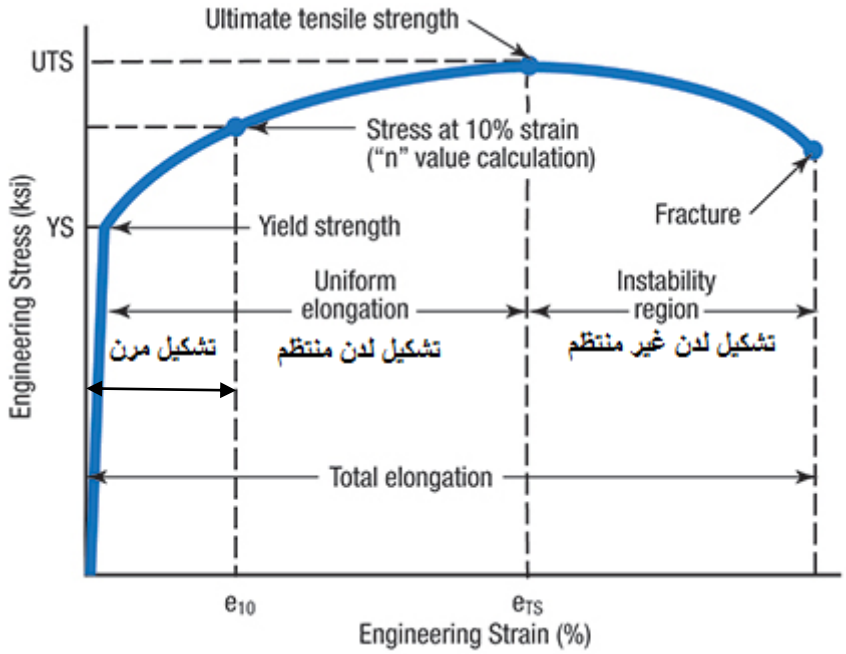
التشكيل اللدن غيرالمنتظم (الموضعي) Non-Uniform Plastic Deformation: هو التشكيل اللدن الذي يتمركز عند منطقة معينة من المقطع قيد التشكيل وفي حالة اختبار الشد أحادي الاتجاه يبدأ من إجهاد الشد الاقصى وينتهي عند إجهاد الكسر وتمثل بدايته بداية فشل عملية التشكيل.

المطيلية Ductility: هي معيار لقابلية المعدن على التشكيل اللدن قبل الكسر. وتعطى بالاستطالة النسبية أو التخفيض في مساحة المقطع من اختبار الشد أحادي الاتجاه.

$$elongation\% = \frac{\mathrm{L} - \mathrm{Lo}}{\mathrm{Lo}} \; X \; 100$$

$$reduction\ in\ C.S.A.\% = \frac{\mathrm{Ao} - \mathrm{A}}{\mathrm{Lo}} \; X \; 100$$

ويوضح منحنى الاجهاد – الانفعال المبين في أدناه المفاهيم المذكورة في أعلاه:



التشكيل المتجانس Homogeneous Deformation: هومركبة التشكيل التي ترتبط بالابعاد الاولية والنهائية للمعدن ولا علاقة لها بأي متغير آخر من متغيرات العملية وهو المركبة المفيدة من التشكيل.

التشكيل غيرالمتجانس (الفائض) Inhomogeneous (redundant) Deformation: هو مركبة التشكيل المرتبطة بالقص الماكروي والذي يرتبط بدوره بمتغيرات عملية التشكيل من درجة حرارة ومعدل انفعال ونسبة تشكيل وشكل عدة التشكيل وظروف الاحتكاك بين العدة والخامة. يعمل التشكيل غيرالمتجانس على استهلاك إضافي للطاقة وتشويه البنية المجهرية وعدم تجانس الخواص عبر المقطع.

التشكيل الساخن Hot Working (Forming): هو التشكيل الذي يتم عند درجات حرارية أعلى من درجة حرارة إعادة التبلور Recrystallization Temperature (T_r) بما يكفي لحدوث إعادة تبلور ديناميكية متزامنة مع التشكيل. عمليا تتحدد درجة حرارة التشكيل الساخن إما بدرجة حرارة الانصهار أو بالدرجة الحرارية التي يحدث عندها أكسدة كبيرة. تعطى درجة حرارة إعادة التبلور بحوالي 0.5 T_m حيث إن T_m هي درجة حرارة انصهار المعدن بالكلفن.

يتميز التشكيل الساخن بما يلي:

1- يتطلب تطبيق قوى أقل مما يتطلبه التشكيل البارد وذلك لأن أجهاد الخضوع يقل بزيادة درجة الحرارة.
2- حجم المكائن المطلوبة أصغر وبالتالي الطاقة المصروفة أقل.
3- نسبة التخفيض الممكنة أعلى من التشكيل البارد وذلك لزيادة كل من المطيلية وقابلية التشكيل بزيادة درجة الحرارة.
4- يعمل على التخلص من المسامية والانعزال الدقيق في المصبوبات وبالتالي يحسن الخواص الميكانيكية.
5- يمكن إنتاج أجزاء ذات حجوم كبيرة جدا بهذه الطريقة لأن أجهاد الانسياب Flow Stress ينخفض بارتفاع درجة الحرارة ويعرف اجهاد الانسياب بأنه أجهاد الخضوع الآني.
6- يعطي أسطحاً خشنة.
7- ينتج أجزاء غير دقيقة الابعاد.
8- يتطلب استخدام قوالب وعدد من سبائك خاصة عالية الكلف.
9- حصول بلى سريع في العدد والقوالب.
10- تحدث خسارة في المعدن بسبب التأكسد.

التشكيل البارد Cold Working (Forming): هو التشكيل الذي يتم عند درجات حرارية أقل من درجة حرارة إعادة التبلور Recrystallization Temperature (T_r). ويتميز التشكيل البارد بما يلي:

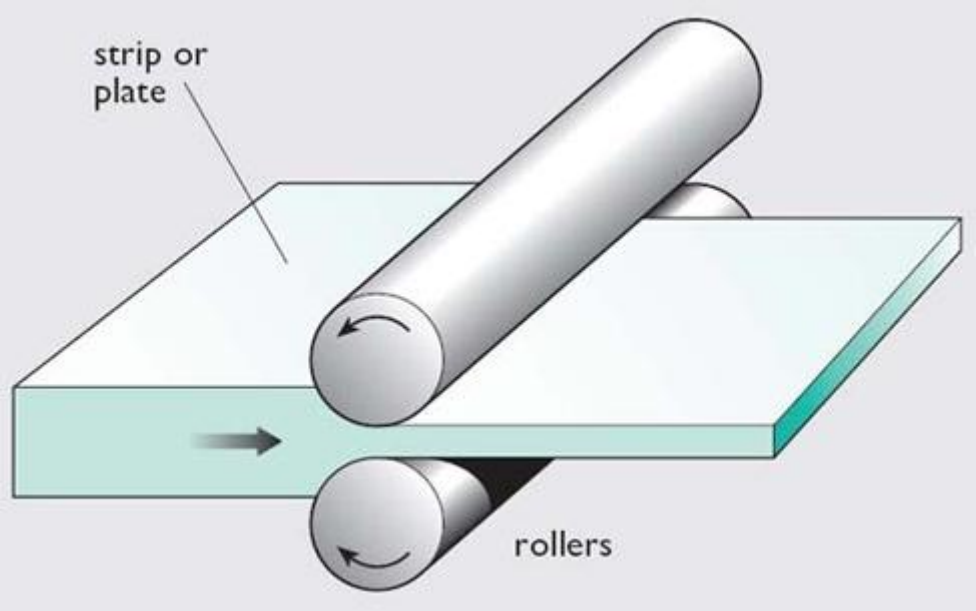
1- يكون مصحوبا بظاهرة الاصلاد الانفعالي وتعني الحاجة لزيادة القوى اللازمة للتشكيل مع زيادة لانفعال ويظهر أثره بصورة زيادة في الصلادة ومقاومة الشد ومقاومة الخضوع وانخفاض في المطيلية. وينتج ذلك كله من الزيادة في الكثافة الانخلاعية في أثناء التشكيل.
2- يحقق إنهاء سطحي جيد.
3- يعطي دقة عالية في الابعاد.

4- يوفر إمكانية التحكم في الخواص الميكانيكية وبخاصة الصلادة ومقاومة الشد ومقاومة الخضوع عن طريق الاصلاد الانفعالي.
5- يعطي خواصا اتجاهية تفيد في عمليات التشكيل اللاحقة فعلى سبيل المثال تؤمن الخواص الاتجاهية لصفائح الدرفلة نسب سحب عالية في السحب العميق.
6- يتطلب تطبيق قوى أعلى مما في التشكيل الساخن.
7- يتطلب استخدام مكائن بحجوم وجساءة وقدرات أعلى وبالتالي كلف أعلى.
8- انخفاض المطيلية بسبب الاصلاد الانفعالي.
9- نسبة التشكيل الممكنة في كل تمريرة أقل مما في التشكيل الساخن.
10- قد يتطلب عمليات تلدين وسطية.
11- ليست كل المعادن لها القابلية على التشكيل البارد.

وفي المعتاد تبدأ عمليات التشكيل عن طريق التشكيل الساخن لتحقيق أقصى تخفيض ممكن في المقطع وتنتهي بالتشكيل البارد لضبط الابعاد والحصول على الانهاء السطحي المطلوب وضبط الخواص الميكانيكية.

وفيما يلي وصف لعدد من عمليات التشكيل المعدني وحسابات القوى والقدرة المصاحبة لها:

أولاً: الدرفلة Rolling



الدرفلة هي عملية تشكيل انضغاطية يتم فيها تخفيض سمك الصفيحة عن طريق العصر بين درفيلين اسطوانيين يدوران باتجاهين متعاكسين. وهي واحدة من أهم عمليات التشكيل المعدني ويتم من خلالها تحويل المصبوبات الى منتجات وسطية أو نهائية مثل المقاطع الفولاذية المختلفة

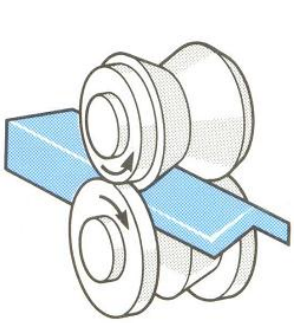
وصفائح أبدان السيارات والطائرات والسفن وصفائح علب العصائر والمشروبات الغازية وصفائح صنع الخزانات والاوعية والاثاث المعدني وغيرها كثير. تتراوح سعة مكائن الدرفلة من المكائن اليدوية الصغيرة الى مكائن بسعة الألاف من القدرة الحصانية.

نقاط جوهرية حول عمليات الدرفلة:

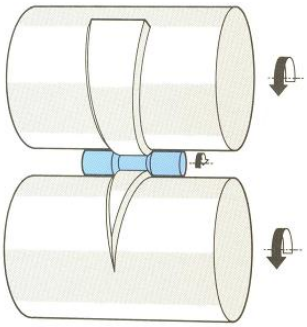
1- الدرفلة هي أوسع عمليات التشكيل المعدني استخداماً.
2- يتم سحب المعدن بين الدرفيلين بوساطة قوى الاحتكاك.
3- تعمل قوى الضغط المسلطة من قبل الدرفيلين على تخفيض السمك أو تغيير المقطع.
4- يعتمد شكل المنتج على شكل الفجوة بين الدرفيلين.
5- تصنع الدرافيل من حديد الزهر أو الفولاذ المنتج بالسباكة أو الفولاذ المنتج بالحدادة وذلك لأن العملية تتطلب مقاومة عالية ومقاومة بلى عالية.
6- عادة ما تكون درافيل التشكيل الساخن خشنة لزيادة إمكانية مسك الخامة وتكون درافيل التشكيل البارد صقيلة لتحقيق انهاء سطحي عالي في المنتج.
7- تؤدي الدرفلة الباردة إلى الحصول على بلورات طولية باتجاه الدرفلة.
8- عند المدخل تكون السرعة المحيطية للدرافيل أعلى من سرعة تقدم الشريحة مما يؤدي إلى سحب الشريحة إلى الداخل عندما يكفي الاحتكاك لذلك.
9- وفي منطقة التشكيل يقل السمك ويزداد الطول فتزداد سرعة تقدم الشريحة بين مدخل منطقة التشكيل ومخرجها.
10- بناءً على النقطتين أعلاه توجد هنالك نقطة تعادل Neutral Point بين مدخل منطقة التشكيل ومخرجها تتساوى عندها سرعة تقدم الشريحة مع السرعة المحيطية للدرافيل. عند نقطة التعادل هذه ينعكس اتجاه الاحتكاك.

تقسم الدرفلة إلى العمليات الآتية:

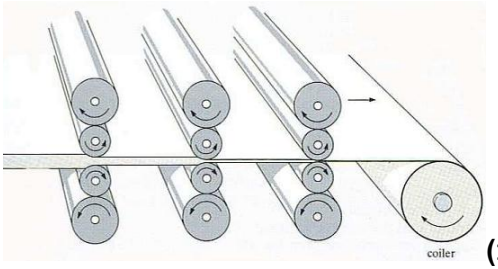
1- الدرفلة المستمرة Continuous Rolling
2- الدرفلة المستعرضة Transverse rolling
3- الدرفلة التشكيلية أو درفلة المقاطع Shaped rolling or section rolling
4- درفلة الحلقات Ring Rolling
5- درفلة المساحيق Powder Rolling
6- السباكة المستمرة والدرفلة الساخنة Continuous casting and hot rolling
7- درفلة الأسنان Thread Rolling



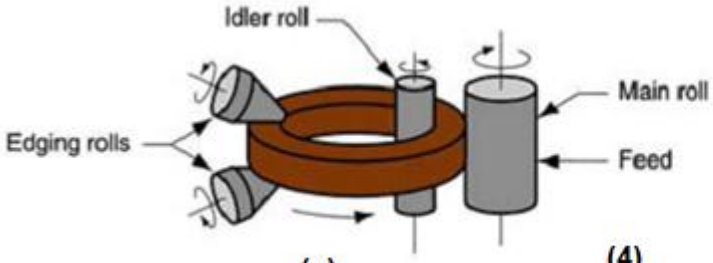
(3)



(2)

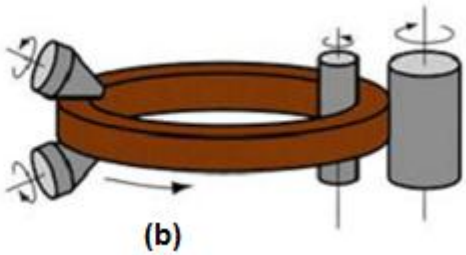

coiler

(1)

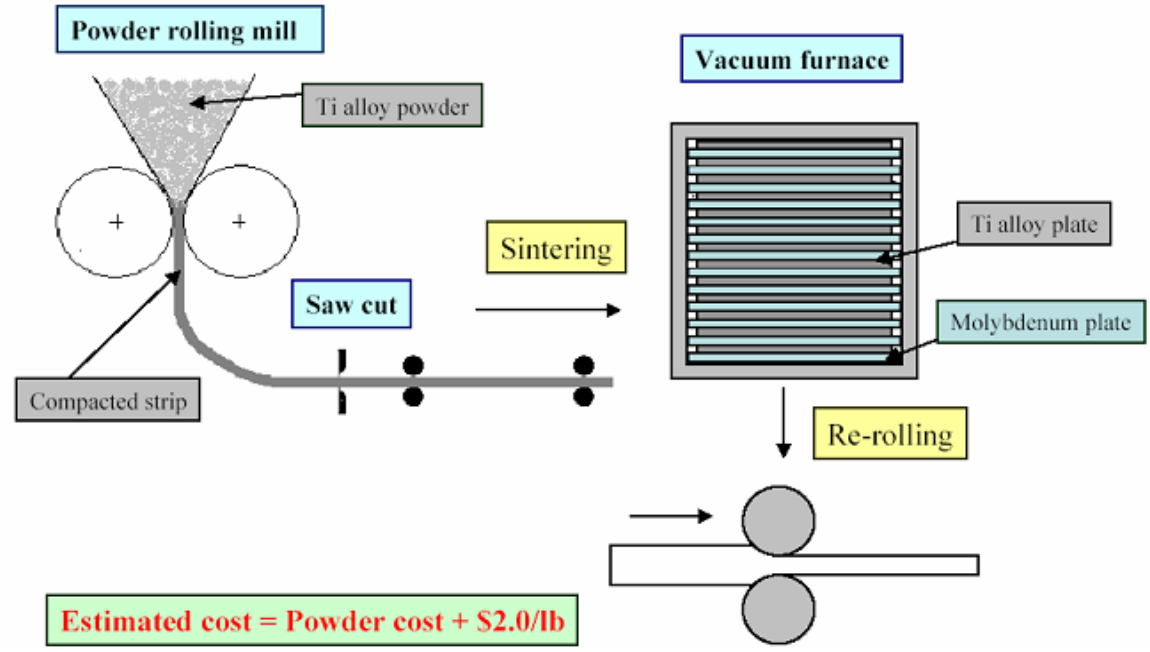

Idler roll
Main roll
Edging rolls
Feed

(a)

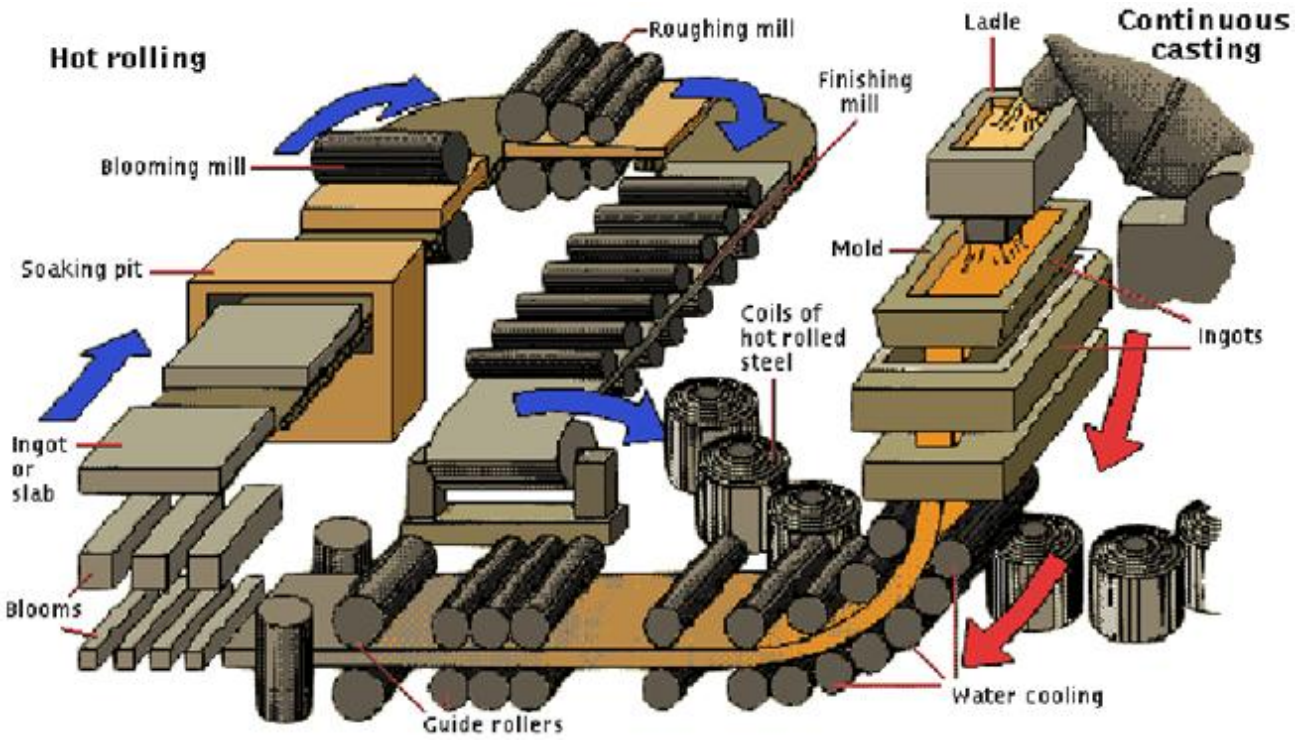
(4)



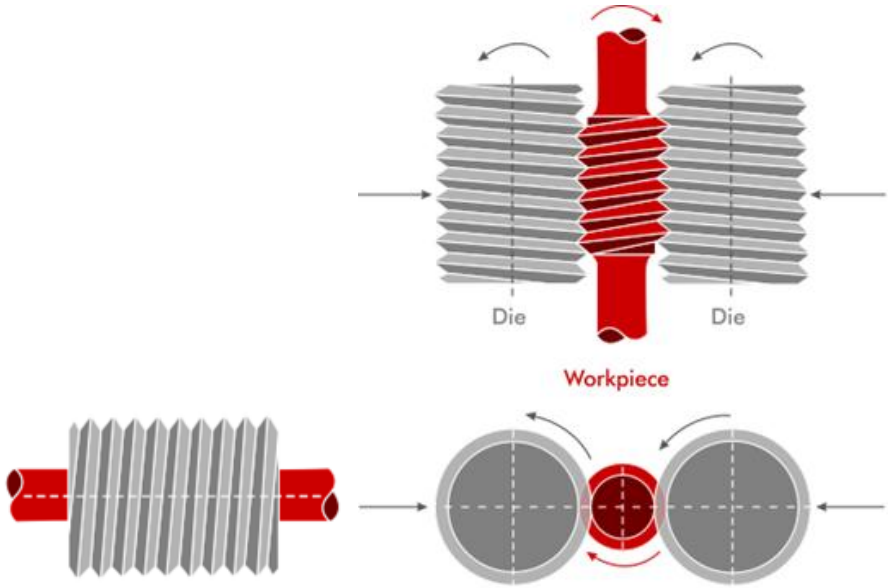
(b)


Powder rolling mill
Ti alloy powder
Vacuum furnace
Sintering
Saw cut
Ti alloy plate
Molybdenum plate
Compacted strip
Re-rolling
Estimated cost = Powder cost + $2.0/lb

(5)



(6)



(ا) العملية (6) (ب) البرغي الناتج

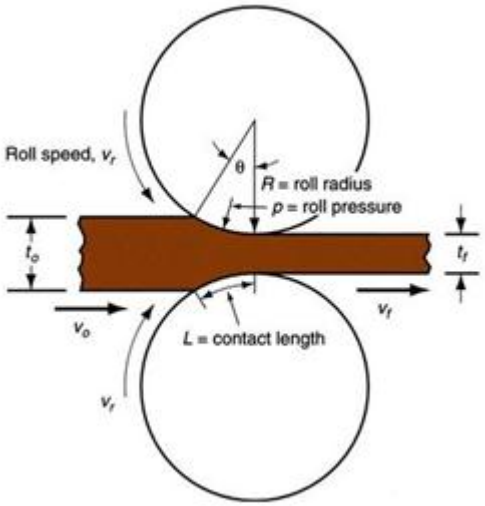
وسنتناول فيما يلي دراسة الدرفلة المسطحة Flat Rolling:

تبدأ الدرفلة المسطحة للفولاذ بتسخين المصبوبة الى 1200 °C ومن ثم الدرفلة إلى واحدة من الاشكال الوسطية الآتية:

1- Bloom بمقطع أبعاده 6 X 6 إنج أو أكبر وتستخدم كخامة وسطية لأنتاج الاشكال الانشائية.
2- Slab بمقطع أبعاده 10 X 1.5 إنج أو أكبر وتستخدم لأنتاج الصفائح والألواح والشرائح Sheets, Plates, Strips
3- Billet ب مقطعأبعاده 1.5 X 1.5 إنج أو أكبر وتستخدم في إنتاج الاعمدة والقضبان Rods and Bars

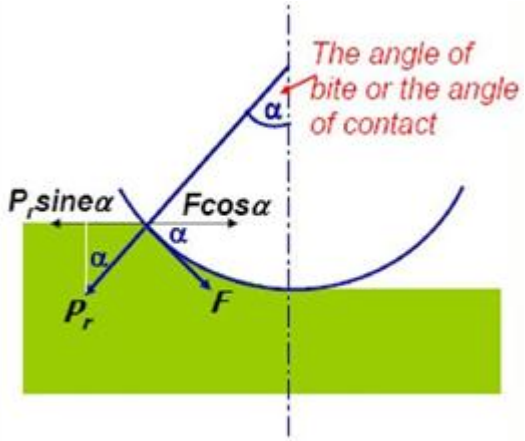
تحليل الدرفلة المسطحة Analysis of Flat Rolling

يبين الشكل الآتي مسقطاً أمامياً للدرفلة المسطحة مبيناً عليه سمك الصفيحة قبل وبعد الدرفلة وسرعة الدرافيل وسرعة الصفيحة.



R = roller radius
p = roll pressure
L = contact length
θ = contact angle
v_r = roll speed
t_o = initial plate thickness
t_f = final plate thickness
v_o = plate entry speed
v_f = plate exit speed

ومن أجل أن يتحقق مسك ودخول الصفيحة الى منطقة التشكيل بين الدرفيلين فإن المركبة الأفقية لقوة الاحتكاك (F Cos α) يجب أن تكون مساوية أو أكبر من المركبة الافقية للقوة العمودية المسلطة من قبل الدرفيل (P_r Sin α) ومن خلال هذا الشرط نتوصل لما يلي:



$$F\cos\alpha \geq P_r \sin\alpha$$

$$\frac{F}{P_r} \geq \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} \geq \tan\alpha$$

But we know $F = \mu P_r$

Therefore $\mu = \tan\alpha$

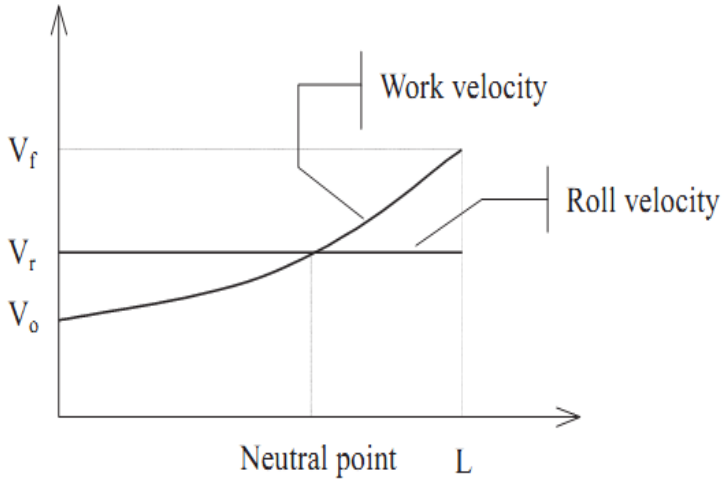
- If $\tan \alpha > \mu$, the workpiece cannot be drawn.
- If $\mu = 0$, rolling cannot occur.

خلال عملية الدرفلة وبالرجوع الى الملاحظات والاشكال السابقة يمكن التوصل الى النقاط الآتية:

1- تدخل الخامة في الفجوة بين الدرفيلين بسرعة V_o وتخرج بسرعة V_f . وحيث إن معدل التدفق الحجمي ثابت فأن V_f يجب أن تكون أكبر من V_o

2- السرعة السطحية للدرفيل V_r أكبر من V_o وأصغر من V_f وهذا يعني حدوث انزلاق بين الخامة والدرافيل.

3- وبما إن V_r تقع بين V_o و V_f لذا توجد نقطة واحدة فقط تتساوى فيها سرعتا الخامة والدرفيل ولا يوجد عندها إنزلاق أي لا توجد حركة نسبية (no slipping or no relative motion) بين الخامة والدرافيل. تسمى هذه النقطة بنقطة التعادل Neutral Point or no Slip Point المبينة في الشكل أدناه.



تمثل قاعدة ثبوت الحجم بالعلاقة:

$$t_o w_o L_o = t_f w_f L_f$$

ويمثل ثبوت التدفق الحجمي بالعلاقة:

$$t_o w_o v_o = t_f w_f v_f$$

ويعطى الانزلاق الامامي Forward Slip ،وهو مقدار الانزلاق بين الخامة والدرافيل، بالعلاقة:

$$s = \frac{v_f - v_r}{v_r}$$

حيث إن:

$$v_r = \frac{\pi DN}{1000} \quad \text{m/min}$$

Lo = initial plate length

Lf = final plate length

D = Roll diameter (m)

مثال1: شريحة بسمك 2 إنج وعرض 10 إنج وطول 12 قدم. يراد تقليل سمكها بثلاث مراحل خلال الدرفة الساخنة. يتم في كل مرحلة تقليل السمك إلى 75% من السمك السابق. ويتوقع أن يزيد العرض بحوالى 3% في كل مرحلة. جد طول وسرعة الشريحة الخارجة من المرحلة الثالثة إذا علمت أن سرعة الدرافيل هي نفسها للمراحل الثلاث وأن سرعة دخول الشريحة الى المرحلة الاولى هي 40 قدم/دقيقة.

الحل:

أ- إيجاد طول الشريحة الخارجة من المرحلة الثالثة

سمك الشريحة الخارجة من المرحلة الثالثة هو:

$t_f = (0.75)(0.75)(0.75)(2.0) = 0.844$ in.

وعرض الشريحة الخارجة من المرحلة الثالثة هو:

$w_f = (1.03)(1.03)(1.03)(10.0) = 10.927$ in.

وحسب فرضية ثبوت الحجم:

$$t_o w_o L_o = t_f w_f L_f$$

وبالتعويض في هذه العلاقة نجد طول الشريحة الخارجة من المرحلة الثالثة

$(2.0)(10.0)(12) = (0.844)(10.927)L_f$

$L_f = (2.0)(10.0)(12)/(0.844)(10.927) =$ **26.025 ft**

ب-إيجاد سرعة الشريحة الخارجة من المرحلة الثالثة:

بمعلومية ثبوت سرعة الدرافيل في المراحل الثلاثة وبتطبيق فرضية ثبوت التدفق الحجمي المعطى في العلاقة التالية يمكن ايجاد سرعة سرعة الشريحة الخارجة من المرحلة الثالثة:

$$t_o w_o v_o = t_f w_f v_f$$

$(2.0)(10.0)(40) = (0.844)(10.927)V_f$

$V_f = (2.0)(10.0)(40)/(0.844)(10.927) =$ **51.78 ft/min.**

إيجاد التخفيض الاقصى (maximum Reduction) في سمك الخامة

في الدرفلة المسطحة يتم عصر الخامة بين الدرفيلين وبذلك يحدث تقليل للسمك بمقدار يسمى تخفيض السمك draft (d). يعطى تخفيض السمك في المراحل المتعاقبة بالعلاقة:

$$d_1 = t_o - t_1$$

$$d_2 = t_1 - t_2$$

وهكذا. ويعطى التخفيض الكلي بعد مرور الشريحة بكل المراحل (التخفيض النهائي) بالعلاقة:

$$d = t_o - t_f$$

where
d: draft
t_o: starting thickness
t_f : final thickness

أما النسبة المئوية للتخفيض في السمك خلال المراحل المتعاقبة فيعطى بالعلاقة:

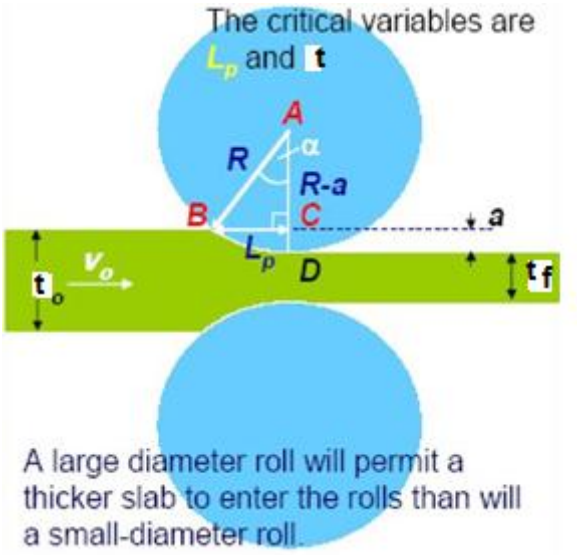
$$r_1 = \frac{t_o - t_1}{t_o} x100$$

$$r_2 = \frac{t_1 - t_2}{t_1} x100$$

وهكذا. وتعطى النسبة المئوية للتخفيض الكلي بعد مرور الشريحة بكل المراحل (نسبة التخفيض النهائية) بالعلاقة:

$$r = \frac{t_o - t_f}{t_o} x100$$

أما أقصى تخفيض ممكن في السمك d_{max} فيحسب كالآتي:



من المثلث ABC المبين في الشكل أعلاه نجد طول قوس التماس بين الدرفيل والصفيحة L_p:

$$R^2 = L_p^2 + (R-a)^2$$
$$L_p^2 = R^2 - (R^2 - 2Ra + a^2)$$
$$L_p^2 = 2Ra - a^2$$

وحيث إن a أصغر بكثير من R لذا يمكن إهمال a^2 وبذلك يصبح طول قوس التماس L_p :

$$L_p \approx \sqrt{2Ra} \approx \sqrt{R\Delta t}$$

Where $\Delta t = t_o - t_f = 2a$

وبالعودة الى المثلث ABC فأن:

$$\mu = \tan \propto = \frac{Lp}{R-a}$$

وبالتعويض عن L_p بما يساويه وإهمال قيمة a :

$$\mu = \tan \propto \approx \frac{\sqrt{R\Delta t}}{R-a} \approx \sqrt{\frac{\Delta t}{R}}$$

وبهذا نحصل على التخفيض الاقصى في السمك d_{max} :

$$d_{max} = \Delta h_{max} = \mu^2 R$$

Where:

d_{max} : maximum draft successful rolling per pass

μ : coefficient of friction

R : roll radius

وكما يلاحظ من المعادلة أعلاه إذا كان μ صفرا فأن d_{max} هو صفر أيضاً أي إن عملية الدرفلة غير ممكنة.

مثال 2: يراد تخفيض سمك شريحة من سمك 50 ملم الى سمك 25 ملم خلال تمريرات متعددة في منصة درفلة ثنائية، جد:

أ- أقل عدد ممكن من التمريرات.

ب-تخفيض السمك لكل تمريرة.

إذا علمت أن تخفيض السمك متساوي في كل التمريرات وأن قطر الدرفيل هو 700 ملم وأن معامل الاحتكاك بين الدرافيل والشريحة هو 0.15

الحل:

أ- إيجاد عدد التمريرات

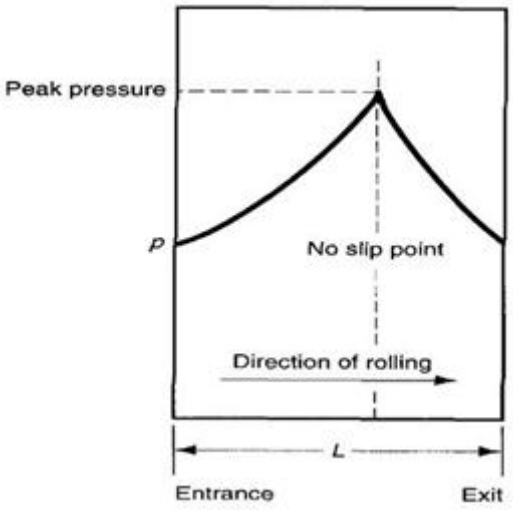
$$\text{number of passes} = \frac{t_o - t_f}{\mu^2 R} = \frac{(50-25)}{(0.15)^2(350)} = 3.17 = 4 \text{ passes}$$

ب-إيجاد تخفيض السمك في كل تمريرة

$$\text{Draft per pass} = \frac{t_o - t_f}{\text{number of passes}} = \frac{(50-25)}{4} = 6.25mm$$

إيجاد القوة والقدرة اللازمة في عملية الدرفلة

في عملية الدرفلة المسطحة يتغير ضغط الدرفيل P على طول قوس التماس حسب الشكل أدناه:



وبذلك يمكن إيجاد قوة الدرفلة F من العلاقة:

$$F = w\int_0^L p\,dL$$

$$\approx \bar{Y}\ wL$$

حيث إن: $\bar{Y}$ هو متوسط إجهاد الانسياب

W هو عرض الشريحة

K هو معامل المقاومة Strength Coefficient

n هو معامل الاصلاد الانفعالي

يستخرج متوسط إجهاد الانسياب من العلاقة:

$$\bar{Y} = \frac{K\varepsilon^n}{1+n}$$

حيث إن ε يمثل انفعال التشكيل اللدن والذي يتم إيجاده من العلاقة:

$$\varepsilon = \ln\frac{t_o}{t_f}$$

أما قدرة الدرفلة فتستخرج من العلاقة:

$$P = 2\pi NFL$$

Where:
P: Power (in J/s =Watt or in-lb/min)
N: Rolls rotational speed (RPM)
F: Roll Force
L: Contact length

من المعادلات السابقة نستنتج:

1- يقل طول التماس بين الدرفيل والشريحة بنقصان نصف قطر الدرفيل.
2- تتناسب قوة الدرفلة مع طول التماس ولذلك فأن تقليل نصف قطر الدرفيل يقلل قوة الدرفلة.
3- تعتمد قدرة الدرفلة على قوة الدرفلة وطول التماس ولذلك فأن تقليل نصف قطر الدرفيل يقلل قدرة الدرفلة.
4- تعتمد قدرة الدرفلة كذلك على السرعة الدورانية للدرفيل ولذلك فأن تقليل السرعة الدورانية سيقلل قدرة الدرفلة.

واجب بيتي 1: يراد تخفيض صفيحة عرضها 10 إنج من سمك 1 إنج إلى 0.8 إنج بتمريرة واحدة خلال منصة درفلة ثنائية. جد

أ- القوة اللازمة في عملية الدرفلة.
ب-القدرة اللازمة في عملية الدرفلة.

إذا علمت أن نصف قطر الدرفيل هو 20 إنج وأن سرعة الدرفيل هي 50 قدم/دقيقة وأن معامل المقاومة للمعدن $K=3500\ lb/in^2$ وأن معامل الاصلاد الانفعالي هو 0.2

الحل:

1- إيجاد قوة الدرفلة

$$\varepsilon = \ln \frac{t_o}{t_f}$$

$$= \ln \frac{1}{0.8} = 0.223$$

$$\bar{Y} = \frac{K\varepsilon^n}{1+n}$$

$$= \frac{3500*0.223^{0.2}}{1.2} = 2160.5 \frac{lb}{in^2}$$

$L_p = \sqrt{R\,\Delta t}$

$L_p = \sqrt{20 * 0.2} = 2\ in$

$F = \bar{Y}\ w\ L$

= 2160.5 * 10 * 2 = 43210 lb

2- إيجاد قدرة الدرفلة

$Vr = \pi\ D\ N$

$$N = \frac{50 * 12\ in/min}{3.14 * 40\ in}$$

= 4.78 rpm

$P = 2\pi NFL$

= 2 * 3.14 * 4.78 * 43210 * 2

= 2594190.1 in-lb/min

واجب بيتي 2: جد أقصى تخفيض ممكن في سمك لوح قدره 300mm باستخدم درافيل نصف قطر الواحد منها 300mm في حالة:

1-الدرفلة على البارد وفيها معامل الاحتكاك هو 0.08
2-الدرفلة على الساخن وفُيها معامل الاحتكاك هو 0.5

1- الدرفلة على البارد

$d_{max} = \mu^2 R$

= 0.08^2 * 300

= 1.92 mm

2- الدرفلة على الساخن

$d_{max} = \mu^2 R$

= 0.5^2 * 300

= 75 mm

واجب بيتي 3: احسب حمل الدرفلة اللازم لتقلُّل سمك صفيحة فولاذية بنسبة 3% .إذا علمت أن السمك الاولي للصفيحة هو 40mm وعرضها الاولي هو 760mm وأن قطر كل درفيل هو 900mm وأن متوسط إجهاد الانسياب هو 170MPa وأن معامل الاحتكاك بين الخامة والدرافيل هو 0.3 وأن الدرفلة تتم بحالة انفعال مستوي

$$r = 1 - \frac{t_f}{t_o}$$

$$0.3 = 1 - \frac{t_f}{40}$$

$$t_f = 28mm$$

$$\Delta t = 40 - 28 = 12mm$$

$$L_p = \sqrt{R\,\Delta t}$$

$$L_p = \sqrt{450 * 12}$$

$$L_p = 73.48mm$$

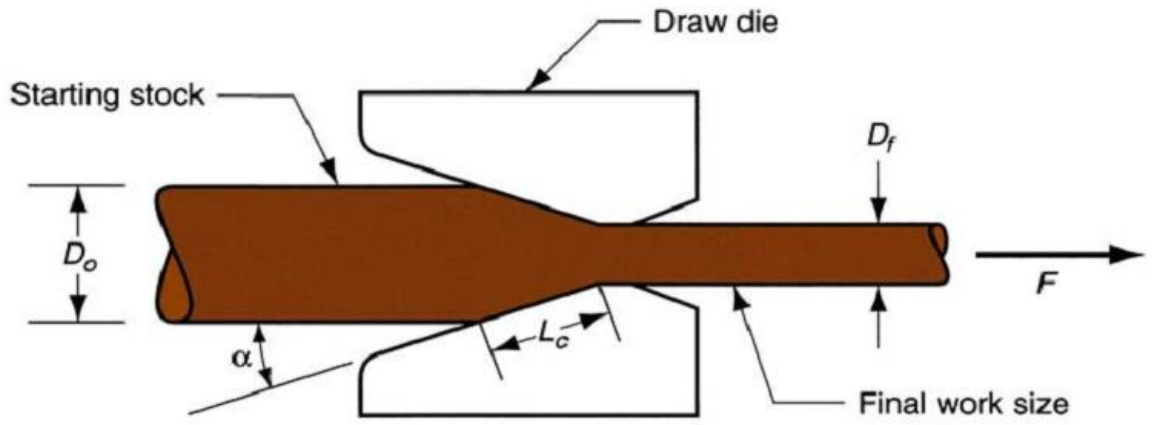
$$F = \bar{Y}\, w\, L$$

$$F = 170 * 760 * 73.48$$

$$F = 9.5\ MN$$

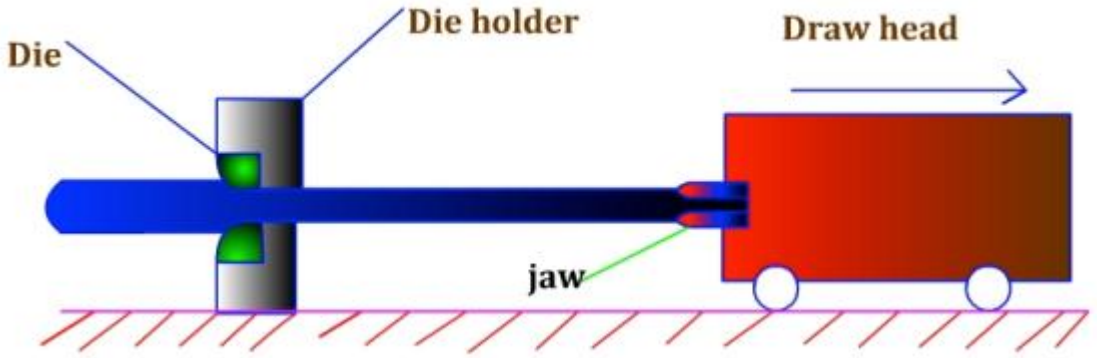
سحب الاسلاك والقضبان Wire and Rod Drawing

سحب الاسلاك هو إحدى عمليات التشكيل المعدني التي يتم خلالها تقليل المقطع عن طريق السحب خلال قالب أو سلسلة قوالب سحب كما مبين في الشكل أدناه. لهذه العملية تطبيقات عديدة منها أسلاك وقابلوات نقل القدرة الكهربائية، أسلاك صنع النوابض، أسلاك صنع الحبال السلكية، أسلاك صنع المسامير، أسلاك اللحام، أسلاك المناخل، قضبان البراغي والبراشيم وغيرها كثير. تجرى أغلب عمليات سحب الاسلاك على البارد مع إمكانية إجراؤها على الساخن.



wire drawing

في بداية العملية يتم تصغير مقدمة السلك عن طريق الحدادة أو البرادة أو الدرفلة أو غيرها بما يضمن دخوله من فتحة قالب السحب ليتم بعد ذلك مسك مقدمة السلك وسحبه خلال القالب بواسطة عربة مرتبطة إلى محرك كهربائي وكما مبين في الشكل أدناه.



يتم خلال العملية تقليل قطر السلك وزيادة طوله. وفي المعتاد يتطلب الامر استخدام أكثر من تمريرة للحصول على القطر النهائي. تتراوح نسبة التخفيض reduction في قطر السلك بين 15-25% للأسلاك ذات الاقطار الصغيرة وبين 20-45% للأسلاك ذات الاقطار الكبيرة ويمكن لسرعة السحب أن تصل الى 30 م/ثانية ويمكن لقطر السلك أن يخفض الى 0.03 ملم. على النطاق التجاري تبدأ عملية السحب باستخدام لفة سلك قطره 9 ملم منتج بالدرفلة الساخنة.

غالبا ما تحتاج عمليات سحب الاسلاك الى عمليات تخمير وسطية intermediate anneals تتم بين التمريرات للتخلص من آثار الاصلاد الانفعالي والسماح بعمليات سحب إضافية. وقد تجرى عملية تخمير بعد آخر تمريرة لأعطاء السلك أقصى مطيلية وتوصيلية كهربائية.

تجدر الاشارة أن العملية غير مقتصرة على المقاطع الدائرية بل يمكن استخدامها لانتاج أسلاك بمقاطع ذات أشكال مختلفة بشرط أن يكون المقطع صغيرا والكميات المطلوبة صغيرة جدا كي يمكن للعملية أن تكون بديلا عن الدرفلة من الجانب الاقتصادي.

وقد استخدم مصطلح سحب الاسلاك أو القضبان للأشارة الى حجم (قطر) الخامة المستخدمة الذي يكون في حالة سحب القضبان كبيرا وفي حالة سحب الاسلاك صغيرا ولا يوجد اتفاق حول الحد الفاصل بينهما بشكل دقيق، ولكن يمكن القول أن مصطلح سحب القضبان Rod Drawing يستخدم عندما يكون قطر الخامة أكبر من 7- 9 ملم وقد يصل إلى 20 ملم بينما يستخدم مصطلح سحب الاسلاك Wire Drawing عندما يكون القطر الداخل أقل من 7- 9 ملم. كما تجدر الاشارة إلى أن الاسلاك يمكن لفها حول بكرة في لفات بينما لا يمكن ذلك مع القضبان.

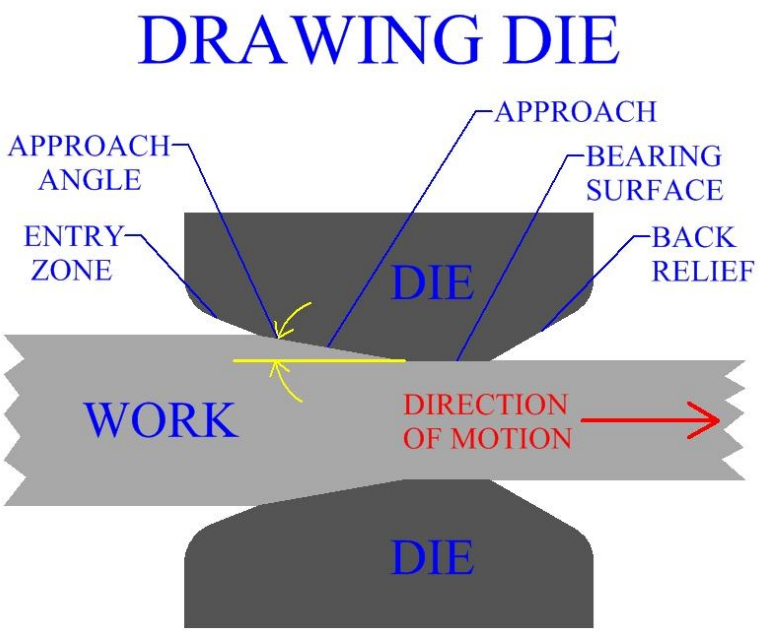
التزييت Lubrication

إن استخدام المزيتات ضروري جدا في عمليات السحب لتحقيق انهاء سطحي عالي وإطالة عمر قالب السحب. تستخدم طرائق مختلفة من التزييت منها:

1- التزييت الرطب Wet drawing وفيها يتم غمر القالب والسلك الداخل في حوض التزييت بالكامل.
2- التزييت الجاف Dry drawing وفيها يتم إمرار السلك في وعاء المزيت وتغطيته بطبقة من الزيت قبل دخوله الى قالب السحب.
3- المزيتات الصلبة Solid Lubricants وفيها يتم طلاء السلك أو القضيب بالصوابين أو بمعدن طري مثل النحاس (عند سحب أسلاك الفولاذ) لتعمل كمزيتات صلبة.

قوالب السحب Drawing Dies

تصنع قوالب السحب من الكربيدات المسمنتة أو من صلب العدة كما يمكن أن تصنع من الماس. تستخدم قوالب الماس في سحب الاسلاك ذات الاقطار الصغيرة جدا. يكون مدخل القالب ذو شكل ناقوسي ولا يوجد تماس بين الخامة والقالب في هذه المنطقة. يساعد الشكل الناقوسي لمدخل القالب على دخول الزيت إلى منطقة التشكيل كما يساعد على انسياب المعدن عند دخوله الى منطقة التشكيل بدون المرور بحافات حادة. يلي ذلك مقطع التقارب approach section ويمتلك شكلا مخروطيا تتراوح زاويته بين 15^{o} – 6 ويحدث التخفيض في القطر ضمن هذه المنطقة من القالب. يلي ذلك حيز القالب Die Land أو سطح الحمل Bearing Surface والذي يقوم بضبط دقة أبعاد مقطع السلك. أما المقطع الأخير من القالب فهو منطقة الخروج Exit Zone وهي منطقة ذات قطر متزايد بشكل تدريجي كما هو الحال مع منطقة الدخول. تعمل هذه المنطقة على الخروج السلس للسلك من القالب دون أن يتضرر من حافة القالب. الشكل أدناه يبين المقاطع المختلفة لقالب السحب:



تحليل عملية سحب الاسلاك والقضبان Analysis of wire and rod drawing

يعطى التخفيض في مساحة المقطع (r) بالعلاقة:

$$r = \frac{Ao - Af}{Ao} = 1 - \frac{Af}{Ao} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

$$\frac{Af}{Ao} = 1 - r$$

$$\varepsilon = ln\frac{Ao}{Af} = \ln\frac{lf}{lo} = \ln\frac{1}{1-r} \ldots\ldots\ldots (2)$$

واعتمادا على طريقة طاقة التشكيل المتجانس (أو طريقة الشغل المثالي والتي نفترض فيها استهلاك كل الشغل المصروف خارجيا في عملية التشكيل المتجانس أي تغيير الشكل أو الابعاد أي عدم وجود ضياع في الطاقة المصروفة)، يعطى إجهاد السحب (σ_{xa}) بالعلاقة:

$$\sigma_{xa} = \bar{Y} \ln\frac{A_o}{A_f} = \bar{Y} \ln\frac{1}{1-r} \ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

وبذلك تأخذ كل من قوة السحب المثالية (F_d) و شغل السحب المثالي (W_d) الصيغ الآتية:

$F_d = \sigma_{xa} \times A_a$ ..... (4)

$W_d = F_d \times L_f$ ..... (5)

حيث إن:

A_o و A_f هما مساحة المقطع الأولية والنهائية على التوالي.

ε هو الانفعال اللدن.

$\bar{Y}$ هو متوسط إجهاد الانسياب.

L_f هو طول السلك أو القضيب الناتج.

حساب أقصى تخفيض في مساحة المقطع للتمريرة الواحدة Calculation of the Maximum Reduction Per Pass

في معدن لدن تام اللدونة perfectly plastic material ولضمان عدم حدوث فشل في السلك أو القضيب فيجب أن يتحقق دائما:

$\sigma_{xa} \leq Y$

حيث إن Y هو إجهاد الخضوع

ومن ثم فأن أقصى تخفيض ممكن في مساحة المقطع يكون عندما:

$\sigma_{xa} = Y$

وبالربط مع المعادلة (3):

$$\sigma_{xa} = Y \ln\left(\frac{1}{1-r}\right) = Y$$

$$\ln\left(\frac{1}{1-r}\right) = 1$$

$r = 0.63$

أي إن أقصى تخفيض ممكن نظريا في مساحة خلال التمريرة الواحدة هو 63% في معدن تام اللدونة وعلى فرض انعدام الاحتكاك بين الخامة والقالب وعدم وجود تشكيل فائض.

أما في المعادن التي تتعرض الى الاصلاد الانفعالي Strain Hardening فيمكن إيجاد أقصى تخفيض ممكن في مساحة المقطع كما يلي:

ملاحظة: الاشتقاق غير مطلوب

$$\sigma_{xa} = \bar{Y}_f \ln\frac{A_o}{A_f} = \bar{Y}_f \ln\left(\frac{1}{1-r}\right)$$

ولتفادي الفشل في أثناء السحب فيجب أن يكون:

$\sigma_{xa} \le Y_f$

حيث إن Y_f هو إجهاد الانسياب Flow Stress أي إجهاد الخضوع الآني

يتحقق أقصى تخفيض عندما يكون $\sigma_{xa} = Y_f$ وبذلك يصبح :

$$\sigma_{xa} = \bar{Y}_f \ln\left(\frac{1}{1-r}\right) = Y_f$$

وحيث إن:

$$\bar{Y}_f = \frac{K\,\varepsilon^n}{n+1} \qquad and \qquad Y_f = K\,\varepsilon^n$$

فإن:

$$\left(\frac{K\varepsilon^n}{n+1}\right)\ln\left(\frac{1}{1-r}\right) = K\varepsilon^n$$

$$\ln\left(\frac{1}{1-r}\right) = n+1$$

$$\left(\frac{1}{1-r}\right) = e^{n+1}$$

$$r = 1 - e^{-(n+1)}$$

أي إن أقصى تخفيض ممكن للمقطع في كل تمريرة هو:

$$r_{max} = 1 - e^{-(n+1)} \quad \text{..... (6)}$$

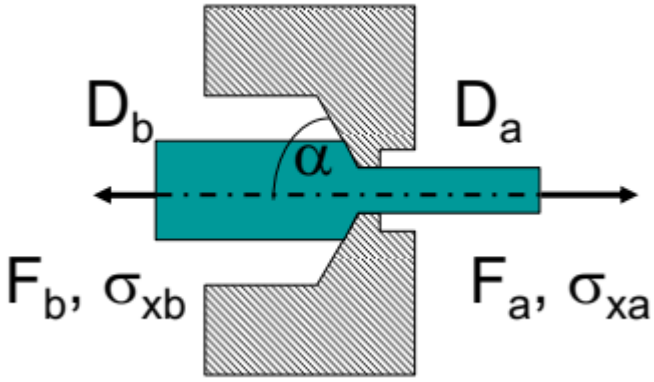
وهذه العلاقة بدورها تهمل تأثير الاحتكاك والتشكيل الفائض.

حساب إجهاد السحب وقوة السحب وشغل السحب في حالة وجود الاحتكاك

Calculation of Drawing Stress, Force, and Work with Friction Condition

باخذ شريحة ضمن منطقة التشكيل واتباع طريقة توازن القوى عليها يمكن إيجاد إجهاد السحب ومن ثم القوة والشغل والطاقة المطلوبة في عملية السحب وكما يلي:

ملاحظة: الاشتقاق غير مطلوب

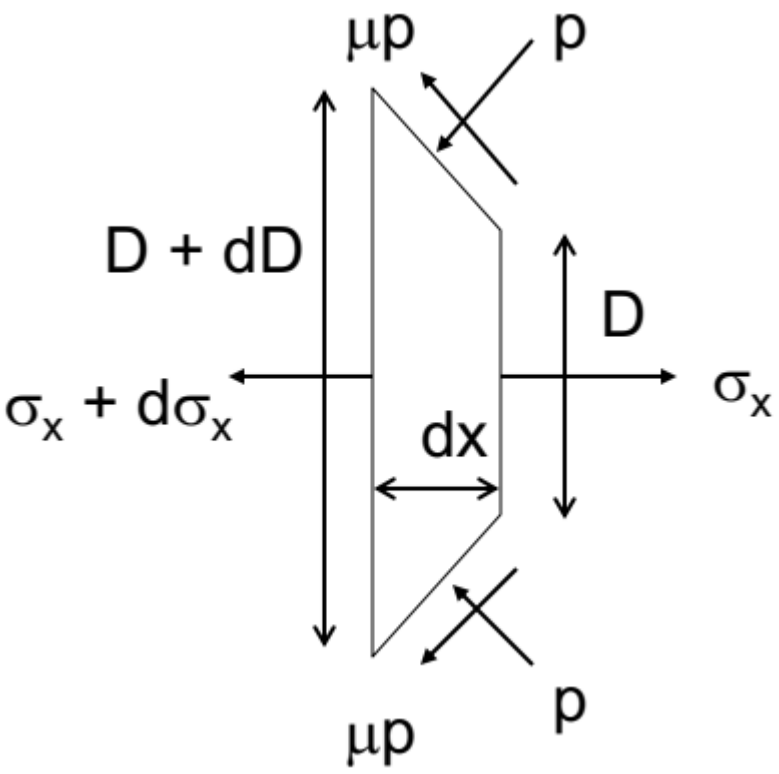


كما سبق فقد تم ايجاد التخفيض في مساحة المقطع من المعادلة (1) أدناه:

$$r = \frac{Ao - Af}{Ao} = 1 - \frac{Af}{Ao} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

$$r = 1 - (\frac{D_f}{D_o})^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

الشكل أدناه يمثل شريحة صغيرة ضمن منطقة والقوى المؤثرة عليها:



حيث إن:

P هو ضغط القالب

μ هو معامل الاحتكاك

D هو قطر السلك

dx هو عرض الشريحة

σ_X هو إجهاد السحب

بأخذ توازن القوى في الاتجاه الافقي:

$$(\boldsymbol{\sigma_x + d\sigma_x}).\frac{\boldsymbol{\pi}}{\boldsymbol{4}}\ (\boldsymbol{D + dD})^2 - \ \boldsymbol{\sigma_x}.\frac{\boldsymbol{\pi}}{\boldsymbol{4}}\ \boldsymbol{D^2} + \boldsymbol{P}\ \frac{\pi D.dx}{\cos\alpha}\ \sin\alpha + \mu P\ \frac{\pi D.dx}{\cos\alpha}\ \cos\alpha = 0$$

$$(\boldsymbol{\sigma_x + d\sigma_x})\ \frac{\boldsymbol{\pi}}{\boldsymbol{4}}\left(\boldsymbol{D^2} + 2DdD + dD^2\right) - \boldsymbol{\sigma_x}\frac{\boldsymbol{\pi}}{\boldsymbol{4}}\ \boldsymbol{D^2} + \boldsymbol{P}\ \frac{\pi Ddx}{\cos\alpha}\ \sin\alpha + \mu P\ \frac{\pi Ddx}{\cos\alpha}\ \cos\alpha = 0$$

وبالتبسيط وإهمال القيم الصغيرة ومن ثم القسمة على πD والضرب x 4 نحصل:

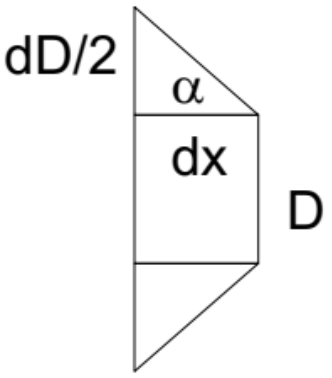
$$\frac{\pi}{4}\left[\left(\sigma_x D^2 + 2\sigma_x D dD + \sigma_x \cancel{dD^2}\right) + \left(d\sigma_x D^2 + 2d\sigma_x \cancel{D dD} + d\cancel{\sigma_x} dD^2\right)\right]$$

(small) (small) (small)

$$-\sigma_x \frac{\pi}{4} D^2 + p\frac{\pi D \cdot dx}{\cos\alpha}\sin\alpha + \mu p \frac{\pi D \cdot dx}{\cos\alpha}\cos\alpha = 0$$

$$2\sigma_x dD + d\sigma_x D + 4p\frac{dx}{\cos\alpha}\sin\alpha + 4\mu p\frac{dx}{\cos\alpha}\cos\alpha = 0$$

وبملاحظة أن:



Noting

$$\tan\alpha = \frac{dD/2}{dx} \qquad dx = \frac{dD}{2\tan\alpha}$$

فأن:

$$2\sigma_x dD + d\sigma_x D + 4P\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}\frac{dD}{2\tan\alpha} + 4\mu P\frac{\cos\alpha}{\cos\alpha}\frac{dD}{2\tan\alpha} = 0$$

$$2\sigma_x dD + d\sigma_x D + 2PdD + 2\mu P\frac{dD}{\tan\alpha} = 0$$

وأخيرا فأن توازن القوى بالاتجاه الافقي يعطي:

$$\mathbf{2\sigma_x . dD + D . d\sigma_x + 2\,P\left(1 + \frac{\mu}{tan\alpha}\right) . dD = 0 \ldots\ldots\ldots (8)}$$

وبحسب معيار تريسكا للخضوع فأن:

$$\sigma_x + p = 2\tau_{flow} = \sigma_{flow}$$

وبالتعويض في معادلة (8) عن $\mathbf{B = \frac{\mu}{tan\alpha}}$:

$$2\sigma_x . dD + D . d\sigma_x + 2\,P(\,1 + B\,) . dD = 0$$

وبالقسمة على dD :

$$2\sigma_x + \frac{D}{dD} . d\sigma_x + 2\,P(\,1 + B\,) = 0$$

$$\frac{dD}{D} = - \frac{d\sigma_x}{2\sigma_x + \,2\,P(\,1 + B\,)}$$

وبالتعويض عن:

$P = 2\,\tau_{flow} - \,\sigma_x$ نحصل:

$$\frac{dD}{D} = - \frac{d\sigma_x}{2\sigma_x + \,2\,\left(\,2\,\tau_{flow} - \,\sigma_x\right)(\,1 + B\,)}$$

$$\frac{dD}{D} = \frac{d\sigma_x}{2B\sigma_x - \,4\,\tau_{flow}\,(\,1 + B\,)}$$

وبأجراء التكامل:

$$\int_{D_f}^{D_o} \frac{dD}{D} = \int_{\sigma_{xa}}^{\sigma_{xb}} \frac{d\sigma_x}{2B\sigma_x - \,4\,\tau_{flow}\,(\,1 + B\,)}$$

يصبح إجهاد السحب:

$$\frac{\sigma_{xa}}{2\,\tau_{flow}} = \frac{1 + B}{B}\left[\,1 - \,(\frac{D_f}{D_o})^{2B}\,\right] + \frac{\sigma_{xb}}{2\,\tau_{flow}}\,(\frac{D_f}{D_o})^{2B}$$

حيث إن σ_{xb} هو إجهاد الشد الخلفي

وعند عدم وجود إجهاد شد خلفي والتعويض عن :

$$2\,\tau_{flow} = \bar{Y}$$

يأخذ إجهاد السحب النسبي الصيغة النهائية أدناه:

$$\frac{\sigma_{xa}}{\bar{Y}} = \frac{1 + B}{B}\left[\,1 - \,(\frac{D_f}{D_o})^{2B}\,\right] \ldots\ldots\ldots (\,9\,)$$

مثال 1: جد القوة اللازمة سلك من البراص قطره 3mm بأقصى نسبة تخفيض ممكن في مساحة المقطع في حالتي وجود الاحتكاك وانعدامه إذا علمت أن:

μ = 0.08, included angle (die angle 2α) = 10^{o} , $\bar{Y}$= 360 MPa

الحل:

1- في حالة عدم وجود احتكاك

$$\sigma_{xa} = \bar{Y} \ln\frac{A_o}{A_f} = \bar{Y} \ln\frac{1}{1-r} \dots\dots\dots\dots (3)$$

وحيث إن السحب يتم بأقصى تخفيض فأن:

$$\frac{\sigma_{xa}}{\bar{Y}} = 1 = \ln\frac{1}{1-r}$$

r = 0.63

$$r = 1 - (\frac{\boldsymbol{D_f}}{\boldsymbol{D_o}})^{\boldsymbol{2}}$$

$$0.63 = \boldsymbol{1} - \frac{\boldsymbol{D_f}^{\boldsymbol{2}}}{\boldsymbol{9}}$$

D_f = 1.82 mm

$$A_f = \frac{\pi D_f{}^2}{4} = \frac{\pi * 1.82^2}{4} = 2.6\ mm^2$$

$$F = \sigma_{xa} * A_f$$

$$F = 360 * 206 = 910\ N$$

2- في حالة وجود الاحتكاك

$$\frac{\boldsymbol{\sigma_{xa}}}{\bar{Y}} = \frac{1+B}{B}\left[1 - (\frac{D_f}{D_o})^{2B}\right] \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\boldsymbol{\sigma_{xa}}}{\bar{Y}} = \frac{1+B}{B}\left[1 - (1-r)^{B}\right]$$

$$B = \mu \cot\alpha = 0.08 * \cot 5 = 0.91$$

$$\frac{\boldsymbol{\sigma_{xa}}}{\bar{Y}} = 1 = \frac{1+0.91}{0.91}\left[1 - (1-r)^{0.91}\right]$$

r = 0.56

$$r = 1 - \left(\frac{\boldsymbol{D_f}}{\boldsymbol{D_o}}\right)^{\mathbf{2}}$$

$$0.56 = 1 - \frac{\boldsymbol{D_f}^{\mathbf{2}}}{\mathbf{9}}$$

D_f = 1.98 mm

$$A_f = \frac{\pi {D_f}^2}{4} = \frac{\pi * 1.98^2}{4} = 3.1\ mm^2$$

$$F = \sigma_{xa} * A_f$$

$$F = 360 * 3.1 = 1077\ N$$

أي إن القوة اللازمة للتغلب على الاحتكاك هي:

1077 – 910 = 167 N

مثال 2: جد قدرة المحرك الكهربائي لمنصة سحب عمود نحاسي دائري المقطع قطره 15mm بنسبة تخفيض في مساحة المقطع قدرها 40% في حالتي وجود الاحتكاك وانعدامه إذا علمت أن:

μ = 0.1, semi die angle (α) = 7^{o} , $\bar{Y}$= 250 MPa, V = 0.7 m/sec

الحل:

في حالة عدم وجود احتكاك

P = F * V, $F = \sigma_{xa} * A_f$

$$r = 1 - (\frac{\boldsymbol{D_f}}{\boldsymbol{D_o}})^{\mathbf{2}} = \mathbf{1} - \frac{A_f}{A_o}$$

$$0.4 = \mathbf{1} - \frac{A_f}{\frac{\pi * 15^2}{4}}$$

$$A_f = \mathbf{106}\ \boldsymbol{mm^2}$$

$$\sigma_{xa} = \bar{Y}\ \ln\frac{A_o}{A_f} = \bar{Y}\ \ln\frac{1}{1-r} \ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

$$\sigma_{xa} = \bar{Y}\ \ln\frac{1}{1-r} = 250 \ln\frac{1}{1-0.4} = 132.7\ MPa$$

$$F = \sigma_{xa} * A_f = 132.7 * 106 = 14.1\ KN$$

P = F * V = 14.1 * 0.7 = 9.87 KW

2- في حالة وجود الاحتكاك

$$B = \mu \cot\alpha = 0.1 * \cot 7 = 0.833$$

$$\frac{\boldsymbol{\sigma_{xa}}}{\bar{Y}} = \frac{1+B}{B}\ [\,1 - (\,1-r\,)^B\ ]$$

$$\frac{\boldsymbol{\sigma_{xa}}}{250} = \frac{1+0.833}{0.833}\ [\,1 - (\,1-0.4\,)^{0.833}\ ]$$

$$\sigma_{xa} = 190.5\ MPa$$

$$F = \sigma_{xa} * A_f = 190.5 * 106 = 20.2\ KN$$

P = F * V = 20.2 * 0.7 = 14.14 KW

أي إن القدرة اللازمة للتغلب عبى الاحتكاك هي:

14.14 – 9.87 = 4.27 KW

واجبات بيتية

واجب1: جد الشغل المطلوب لسحب سلك فولاذي قطره 3 mm بأقصى نسبة تخفيض ممكنة في مساحة المقطع العرضي إذا علمت أن زاوية قالب السحب = 14^o وأن معامل الاحتكاك = 0.06 وأن متوسط إجهاد الانسياب = 420 MPa وأن طول السلك الأصلي = 100 m

الحل

الشغل اللازم في عملية السحب **W** هو:

$W = F_a * L_f$

حيث إن F_a و L_f هما قوة السحب وطول السلك المنتج على التوالي.

أما قوة السحب فتحسب من العلاقة:

$F_a = \sigma_{xa} * A_f$

حيث إن σ_{xa} و A_f هما إجهاد السحب ومساحة مقطع السلك المنتج على التوالي.

يتطلب إيجاد قوة السحب إيجاد كل من σ_{xa} و A_f وحيث إن السحب يتم بأقصى نسبة تخفيض. لذا فإن:

$\sigma_{xa} = \bar{Y} = 420$ MPa

أما A_f فيتم حسابها من معرفة مساحة مقطع السلك الاصلي A_o ونسبة التخفيض في مساحة المقطع **r** والتي نجدها من العلاقة:

$$\frac{\boldsymbol{\sigma_{xa}}}{\bar{Y}} = 1 = \frac{1+B}{B}\left[1 - (1-r)^B\right]$$

$$B = \mu \cot\alpha = 0.06 * \cot 7 = 0.49$$

$$\frac{\boldsymbol{\sigma_{xa}}}{\bar{Y}} = 1 = \frac{1+0.49}{0.49}\left[1 - (1-r)^{0.49}\right]$$

$r = 0.557$

$$r = 1 - \left(\frac{D_f}{D_o}\right)^2 = 1 - \frac{A_f}{A_o}$$

$$r = 1 - \frac{A_f}{A_o}$$

$$0.557 = 1 - \frac{A_f}{7.07}$$

$A_f = 3.132\ mm^2$

بقي أن نجد طول السلك المنتج L_f من فرضية ثبوت الحجم وكما يلي:

$A_oL_o = A_fL_f$

$$L_f = \frac{A_o\, L_o}{A_f} = \frac{7.07 * 100}{3.132} = 225.734\, m$$

$F_a = \sigma_{xa} * A_f = 420 * 3.132 = 1315.44\ N$

$W = F_a * L_f = 1315.44 * 225.734 = 296939.533\ N.m$

إنتهى

واجب2: جد سرعة السحب لمنصة سحب الأسلاك إذا علمت أن قدرة المحرك الكهربائي للمنصة = 2 kW وأن القطر الابتدائي لسلك الألمنيوم المراد سحبه = 2.2 mm وأن السحب يتم بأقصى نسبة تخفيض ممكنة في مساحة المقطع العرضي من خلال قالب مخروطي زاويته 16^o بمعامل احتكاك مقداره 0.05 وأن متوسط إجهاد الانسياب للألمنيوم = 90Mpa

الحل

يتم إيجاد سرعة السحب من العلاقة:

$$P = F * \nu$$

حيث إن **P** و **v** هما قدرة المحرك الكهربائي وسرعة سحب السلك على التوالي.

وحيث أن قدرة المحرك الكهربائي معطاة. لذا لم يبق سوى حساب قوة السحب **F** من العلاقة:

$F_a = \sigma_{xa} * A_f$

وحيث أن السحب يتم بأقصى نسبة سحب فإن :

$\sigma_{xa} = \bar{Y} = 90\ MPa$

فما تبقى هو حساب A_f من العلاقة:

$$r = 1 - (\frac{D_f}{D_o})^2 = 1 - \frac{A_f}{A_o}$$

وحيث إن A_o يمكن حسابها، لذا بقي حساب نسبة التخفيض من العلاقة:

$$\frac{\sigma_{xa}}{\bar{Y}} = 1 = \frac{1+B}{B}\left[1 - (1-r)^B\right]$$

$$B = \mu \cot\alpha = 0.05 * \cot 8 = 0.356$$

$$\frac{\sigma_{xa}}{\bar{Y}} = 1 = \frac{1+0.356}{0.356}\left[1 - (1-r)^{0.356}\right]$$

r = 0.575

$$r = 1 - (\frac{D_f}{D_o})^2 = 1 - \frac{A_f}{A_o}$$

$$0.575 = 1 - \frac{A_f}{\frac{3.14 * 2.2^2}{4}}$$

$A_f = 1.615\ mm^2$

$F_a = 90\ MPa\ (N/mm^2) * 1.615\ mm^2 = 145.35\ N$

$P = F * v$

$$v = \frac{P}{F} = \frac{2000}{145.35} = 13.76\ m/s$$

إنتهى

واجب3: جد التخفيض الممكن في مساحة المقطع العرضي الذي تتيحه قدرة محرك منصة السحب البالغة 1kW عند سحب سلك فولاذي إلى قطر نهائي مقداره 0.5mm إذا علمت أن سرعة السحب = 15 m/s وأن زاوية قالب السحب = 12^o وأن معامل الاحتكاك = 0.03 وأن متوسط إجهاد الانسياب = 550 MPa

الحل

$$P = F * v$$

$$F = \frac{P}{v} = \frac{1000\ Watt\ (N.\frac{m}{s})}{15(m/s)} = 66.6N$$

$$\boldsymbol{\sigma_{xa}} = \frac{F}{A_f} = \frac{66.6}{\frac{3.14 * 0.5^2}{4}} = 339.363\ MPa$$

ولأن إجهاد السحب المحسوب هذا أكبر من مقاومة المادة ($\bar{Y}$)، لذلك لو تم تسليط هذا المقدار من الاجهاد سيحدث فشل في المعدن أي ينقطع السلك. ***في هذه الحالة نرجع إلى قاعدة أن أقصى إجهاد يمكن تسليطه يجب ان لا يزيد عن Y أي إن أجهاد السحب سيأخذ قيمته القصوى وهي 90MPa وسيكون السحب بأقصى تخفيض ممكن في مساحة المقطع وكما يلي:***

$$\frac{\boldsymbol{\sigma_{xa}}}{\bar{Y}} = 1 = \frac{1+B}{B}\ [\,1 - (\,1 - r\,)^B\ ]$$

$$B = \mu \cot \alpha = 0.03 * \cot 6 = 0.285$$

$$\frac{\boldsymbol{\sigma_{xa}}}{\bar{Y}} = 1 = \frac{1+0.285}{0.285}\ [\,1 - (\,1 - r\,)^{0.285}\ ]$$

r = 0.585

إنتهى

واجب4: جد الشغل اللازم لسحب سلك نحاسي وزنه 3 kg من قطر 1 mm إلى قطر 0.5 mm خلال قالب مخروطي زاويته 15^o إذا علمت أن:

$\bar{Y}$ = 240 MPa, μ = 0.08, ρ = 8.94 g/cm^3

الحل:

الشغل اللازم في عملية السحب **W** هو:

$W = F_a * L_f$

حيث إن **F_a** و **L_f** هما قوة السحب وطول السلك المنتج على التوالي.

يتم حساب **L_f** من فرضية ثبوت الحجم:

$A_oL_o = A_fL_f$ **or** $V_o = V_f$

حيث إن V_o و V_f هما الحجم الأصلي والنهائي على التوالي.

$$V_o = \frac{weight}{density} = \frac{3000\ g}{8.94\ g/cm^3} = 335.57\ cm^3$$

$$V_o = A_f L_f$$

$$A_f = \frac{3.14 * 0.5^2}{4} = 0.196\ mm^2 = 0.00196\ cm^2$$

$$L_f = \frac{V_o}{A_f} = \frac{335.57\ cm^3}{0.00196\ cm^2} = 171209\ cm = 1712\ m$$

أما قوة السحب فتحسب من العلاقة:

$F_a = \sigma_{xa} * A_f$

حيث إن σ_{xa} و A_f هما إجهاد السحب ومساحة مقطع السلك المنتج على التوالي.

يتطلب إيجاد قوة السحب إيجاد σ_{xa} .

$$r = 1 - (\frac{D_f}{D_o})^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

$$r = 1 - (\frac{0.5}{1})^2 = 0.75$$

وحيث إن أقصى نسبة تخفيض ممكنة في مساحة المقطع لا يمكن أن تزيد عن ***0.63*** حتى عند إهمال تأثير الاحتكاك والقص الماكروي، لذا لا يمكن التشكيل بهذه النسبة. ***و في هذه الحالة نذهب الى التشكيل بأقصى تخفيض ممكن والذي يتحقق عندما يكون $\sigma_{xa} = Y$ أي تصبح قيمة σ_{xa}*** هي:

$\boldsymbol{\sigma_{xa}} = \bar{Y} = 240$ MPa

وبذلك يمكن إيجاد قوة السحب:

$F_a = \sigma_{xa} * A_f = 240$ MPa $(N/mm^2) * 0.196\ mm^2 = 47.04$ N

وهكذا يمكن إيجاد الشغل:

$W = F_a * L_f$

= 47.04 * 1712

= 80532.5 N.m

إنتهى

مثال3: يراد سحب عمود مخمرمن الفولاذ المقاوم للصدأ من قطر 10mm الى قطر 8mm بسرعة سحب مقدارها 0.5m/s . إفرض أن خسائر الاحتكاك والشغل الفائض تمثل 40% من الشغل المثالي المصروف. جد القدرة اللازمة في عملية السحب هذه إذا علمت أن أس الاصلاد الانفعالي (n) Strain Hardening Exponent هو 0.3 وأن معامل الاصلاد الانفعالي Strain Hardening (strength) coefficient (K) هو 1300Mpa

الحل:

نحسب قيمة الانفعال اللدن ε المصاحب لعملية السحب (الانفعال الحقيقي) من المعادلة (2) أدناه:

$$\varepsilon = ln\frac{Ao}{Af} = \ln\frac{lf}{lo} = \ln\frac{1}{1-r} \dots\dots\dots (2)$$

$$\varepsilon = ln\frac{Ao}{Af} = ln\frac{{D_o}^2}{{D_f}^2} = ln\frac{10^2}{8^2} = 0.446$$

نحسب بعد ذلك متوسط إجهاد الانسياب $\bar{Y}$ من العلاقة:

$$\bar{Y} = \frac{K\,\varepsilon^n}{n+1}$$

$$\bar{Y} = \frac{1300 * 0.446^{0.3}}{0.3+1} = 785\ MPa$$

ثم نحسب إجهاد السحب σ_{xa} من العلاقة:

$$\sigma_{xa} = \bar{Y}\ln\frac{A_o}{A_f} = \bar{Y}\ln\frac{{D_o}^2}{{D_f}^2} = 785\ln\frac{100}{64} = 350.3\ Mpa$$

نجد بعد ذلك قوة السحب F_a من العلاقة:

$$F_a = \sigma_{xa} * A_f$$

$$F_a = 350.3 * \frac{3.14 * 8^2}{4} = 17599\ N$$

وأخيرا نجد القدرة P من العلاقة:

$$P = F * \nu$$

$$P = 17599 * 0.5 = 8799.5\ W$$

تمثل قيمة القدرة هذه القدرة المثالية أي القدرة اللازمة للتشكيل المتجانس فقط. وقد أعطى في المثال أن مجموع القدرة اللازمة للتغلب على الاحتكاك والقص الماكروي (التشكيل الفائض) يمثل 40% من القدرة المثالية. لذا تصبح القدرة الكلية (الحقيقية) المطلوبة هي:

8799.5 + 0.4 * 8799.5 = 12319.3 W = **12.32 KW**

إنتهى

مثال 4: جد إجهاد السحب اللازم لتخفيض مساحة مقطع عمود من الصلب المقاوم للصدأ قطره 10mm بمقدار 20% إذا علمت أن أس الاصلاد الانفعالي (Strain Hardening Exponent n) هو 0.3 وأن معامل الاصلاد الانفعالي (Strain Hardening (strength) coefficient K) هو 1300Mpa وأن زاوية القالب (2α) هي 12^o ومعامل الاحتكاك هو 0.09 . جد بعد ذلك قدرة المحرك الكهربائي اللازم لأنجاز عملية السحب إذا علمت أن سرعة السحب هي 3m/s.

الحل:

1- إيجاد إجهاد السحب

نجد قطر العمود المنتج D_f من العلاقة:

$$r = 1 - (\frac{D_f}{D_o})^2 = 1 - \frac{A_f}{A_o}$$

$$D_f = D_o * \sqrt{(1-r)} = 10 * \sqrt{0.8} = 8.944\ mm$$

ومن ثم نجد قيمة الانفعال اللدن ε المصاحب لعملية السحب (الانفعال الحقيقي) من المعادلة (2) أدناه:

$$\varepsilon = ln\frac{{D_o}^2}{{D_f}^2} = ln\frac{10^2}{8.89^2} = 0.235$$

نحسب بعد ذلك متوسط إجهاد الانسياب $\bar{Y}$ من العلاقة:

$$\bar{Y} = \frac{K\,\varepsilon^n}{n+1}$$

$$\bar{Y} = \frac{1300 * 0.235^{0.3}}{0.3+1} = 647.6\,MPa$$

نستخرج إجهاد السحب σ_{xa} من العلاقة:

$$\frac{\boldsymbol{\sigma_{xa}}}{\bar{Y}} = \frac{1+B}{B}\,[\,1 - (\,1-r\,)^B\,]$$

$$B = \mu\cot\alpha = 0.09 * \cot 6 = 0.856$$

$$\boldsymbol{\sigma_{xa}} = 647.6 * \frac{1+0.856}{0.856}\left[1-(1-0.2)^{0.856}\right] = 244.15MPa$$

2- إيجاد قدرة المحرك الكهربائي P

$$P = F * \nu$$

$$F_a = \boldsymbol{\sigma_{xa}} * \boldsymbol{A_f} = \mathbf{244.15} * \frac{\mathbf{3.14 * 8.944^2}}{\mathbf{4}} = \mathbf{15331.7\,N}$$

$$P = 15331.7 * 3 = 45995\ W = 45.995\ KW$$

إنتهى

مثال 5: جد القوة اللازمة لسحب سلك من قطر ابتدائي 2.5mm الى قطر نهائي 2mm خلال قالب مخروطي زاويته (2α) تساوي 15^o إذا علمت أن معامل الاحتكاك بين الخامة والقالب هو 0.07 وأن K=205MPa وأن n=0.2

الحل:

نحسب قيمة الانفعال اللدن ε المصاحب لعملية السحب (الانفعال الحقيقي) من المعادلة:

$$\varepsilon = ln\frac{{D_o}^2}{{D_f}^2} = ln\frac{2.5^2}{2^2} = 0.446$$

نحسب بعد ذلك متوسط إجهاد الانسياب $\bar{Y}$ من العلاقة:

$$\bar{Y} = \frac{K\,\varepsilon^n}{n+1}$$

$$\bar{Y} = \frac{205 * 0.446^{0.2}}{0.2+1} = 145.4\ MPa$$

نستخرج إجهاد السحب σ_{xa} من العلاقة:

$$\frac{\boldsymbol{\sigma_{xa}}}{\bar{Y}} = \frac{1+B}{B}\left[\,1 - \,(\,1-r\,)^B\,\right]$$

$$B = \mu\cot\alpha = \ 0.07 * \cot 7.5 = 0.532$$

$$r = 1 - (\frac{2}{2.5})^2 = 0.36$$

$$\boldsymbol{\sigma_{xa}} = 145.4 * \frac{1+0.532}{0.532}\left[1-(1-0.36)^{0.532}\right] = 88.5\ MPa$$

$$F_a = \boldsymbol{\sigma_{xa}} * \boldsymbol{A_f} = \mathbf{88.5} * \frac{\mathbf{3.14 * 2^2}}{\mathbf{4}} = \mathbf{277.9\ N}$$

إنتهى

مثال 6: جد عدد التمريرات اللازمة لأنتاج سلك نحاسي قطره 0.8mm من آخر قطره 2mm إذا علمت أن سرعة السحب هي 10m/s وقدرة المحرك الكهربائي لماكنة السحب هي 1.5KW ومتوسط إجهاد الانسياب هو 250MPa

الحل:

1- نجد أولا نسبة التخفيض r وفق القطر الابتدائي والنهائي لنتحقق إن كان بالامكان إنجاز السحب بتمريرة واحدة أم لا:

$$r = 1 - (\frac{D_f}{D_o})^2$$

$$r = 1 - (\frac{0.8}{2})^2 = 0.84$$

ولأن نسبة التخفيض أكبر من النسبة القصوى الممكنة وهي 0.63 لذا لا يمكن أن تتم عملية السحب بتمريرة واحدة.

2- نقوم بالتأكد من إن الاجهاد الذي تسلطه الماكنة لا يزيد عن مقاومة المادة وذلك بإيجاد أجهاد السحب σ_{xa} بحسب قدرة المحرك المتاحة ومقارنة ذلك بمقاومة المادة (متوسط إجهاد الانسياب $\bar{Y}$ والذي يساوي 250MPa) فإذا كان اجهاد السحب σ_{xa} الذي تسلطه الماكنة أقل من 250MPa فنستمر بالحسابات لأن مقاومة المادة أعلى من الاجهاد المسلط ولا يمكن للسلك أن ينقطع. أما إذا كان الاجهاد الذي تسلطه الماكنة σ_{xa} أعلى من 250MPa فلا يمكن للمادة أن تتحمل وسينقطع السلك. في هذه الحالة نذهب الى التشكيل بأقصى نسبة ممكنة أي نعتبر أن $\sigma_{xa} = \bar{Y} = 250$ MPa ونستمر بالحل وكما يلي.

نجد قوة السحب F التي تسلطها الماكنة من العلاقة:

$$P = F * \nu$$

$$F = \frac{1500}{10} = 150\ N$$

نجد إجهاد السحب σ_{xa} الذي تسلطه الماكنة من العلاقة:

$$\boldsymbol{\sigma_{xa}} = \frac{F_a}{A_o} = \frac{150}{\frac{3.14 * 0.8^2}{4}} = 298.6\ MPa$$

وبما إن الاجهاد الذي تسلطه الماكنة σ_{xa} أكبر من مقاومة المادة $\bar{Y}$ (متوسط إجهاد الانسياب) لذا فأن السلك لا يتحمل هذا الاجهاد وسينقطع وفي هذه الحالة نشكل بأقصى نسبة تشكيل تتحملها المادة وهي عندما يكون $\sigma_{xa} = \bar{Y} = 250$ MPa

نستخرج نسبة التخفيض المسموح بها وحيث أن المثال لا يشير الى الاحتكاك فسنجري الحسابات في حالة انعدام الاحتكاك وكما يلي:

$$\sigma_{xa} = \bar{Y} \ln\frac{A_o}{A_f} = \bar{Y} \ln\frac{1}{1-r} \dots\dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\sigma_{xa}}{\bar{Y}} = 1 = ln\frac{1}{1-r}$$

r = 0.63

نجد الآن عدد التمريرات وكما يلي:

1- نجد القطر الخارج من التمريرة الأولى D_{f1}:

$$r = 1 - (\frac{D_f}{D_o})^2$$

$$D_{f1} = D_o * \sqrt{(1-r)} = D_o * \sqrt{0.37} = 0.6083 * D_o$$

$$D_{f1} = 0.6083 * 2 = 1.2166\, mm$$

2- نجد القطر الخارج من التمريرة الثانية D_{f2}:

$$D_{f2} = 0.6083 * D_{f1} = 0.6083 * 1.2166 = 0.74\, mm$$

وحيث إن القطر الخارج من التمريرة الثانية D_{f2} أصغر من القطر المطلوب (0.8mm) .

لذا فأن عملية السحب هذه تحتاج الى تمريرتين

إنتهى

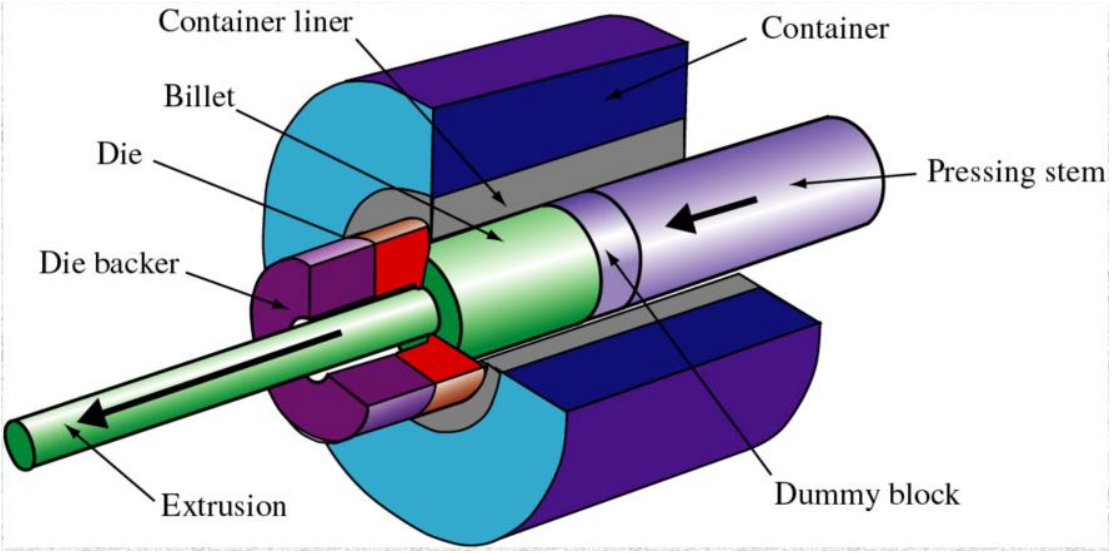
واجب بيتي 5: جد سرعة السحب لمنصة سحب الأسلاك إذا علمت أن قدرة المحرك الكهربائي للمنصة = 5 kW وأن القطر الابتدائي لسلك النحاس المراد سحبه = 2.5 mm وأن السحب يتم بأقصى نسبة تخفيض ممكنة في مساحة المقطع العرضي من خلال قالب مخروطي زاويته 10^o بمعامل احتكاك مقداره 0.03 وأن متوسط إجهاد الانسياب للنحاس = 250 MPa

واجب بيتي 6: جد التخفيض الممكن في مساحة المقطع العرضي الذي تتيحه قدرة محرك منصة السحب البالغة 1kW عند سحب سلك فولاذي إلى قطر نهائي مقداره 0.5mm إذا علمت أن سرعة السحب = 15 m/s وأن زاوية قالب السحب = 12^o وأن معامل الاحتكاك = 0.03 وأن متوسط إجهاد الانسياب = 550 MPa

واجب بيتي 7: جد الشغل الكلي المطلوب لسحب سلك فولاذي قطره 3ملم بأقصى نسبة تخفيض ممكنة في مساحة المقطع العرضي إذا علمت أن زاوية قالب السحب = 14^{o} وأن معامل الاحتكاك = 0.06 وأن متوسط إجهاد الانسياب =420 MPa وأن كثافة الفولاذ = 7.8 غم / سم^{3} وأن طول السلك الأصلي = 100 م.

البثق Extrusion

هو إحدى عمليات التشكيل المعدني التي يتم فيها إجبار المعدن على الانسياب خلال فتحة القالب للحصول على شكل المقطع المطلوب وكما مبين في الشكل أدناه:



يمكن إجراء عمليات البثق على البارد أو على الساخن وتمتاز عمليات البثق **بالمحاسن** الآتية:

1- إمكانية تحقيق نسب تشكيل عالية جدا لا تتحقق في باقي عمليات التشكيل وذلك لتحقق حالة إجهاد إنضغاطية ثلاثية الاتجاه في البثق.
2- إمكانية إنتاج مقاطع بأشكال عديدة ومتنوعة وبخاصة في عمليات البثق الساخن.
3- يتم تحسين الصلادة والمقاومة عند البثق على البارد.
4- دقة عالية في الابعاد وبخاصة في البثق البارد.
5- إمكانية أتمتة العملية بسهولة إذ إنها تتم بتمريرة واحدة.

6- السرعة والمرونة في تغيير القالب.

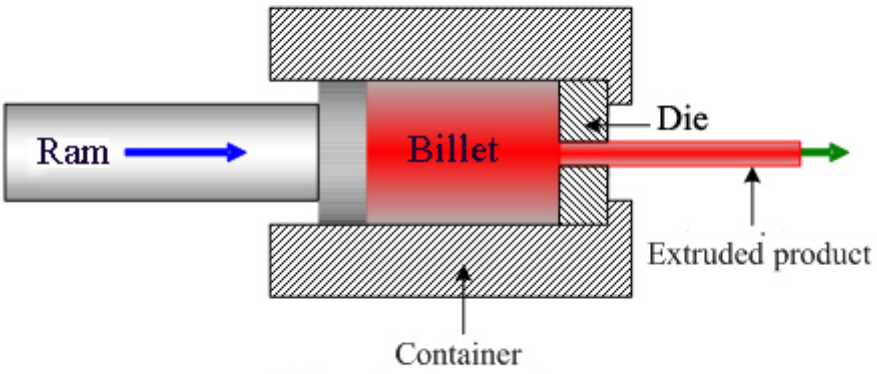
أما محددات البثق فتمثلها النقاط الآتية:

1- ضياع المعدن أعلى مما في عمليات الدرفلة.
2- وجود تباين في البنية والخواص عبر المقطع أعلى مما في عمليات التشكيل الأخرى.
3- عمر عدد البثق (القالب والحاوية وغيرها) أقصر مما في العمليات الأخرى بسبب الأجهادات العالية وسرع الانزلاق العالية.
4- الكلف العالية نسبيا لعدد البثق والتي تصنع من الصلب السبائكي عادة.
5- كلف الانتاج في البثق أعلى مقارنة بالعمليات الاخرى.

أنواع عمليات البثق Types of Extrusion Processes

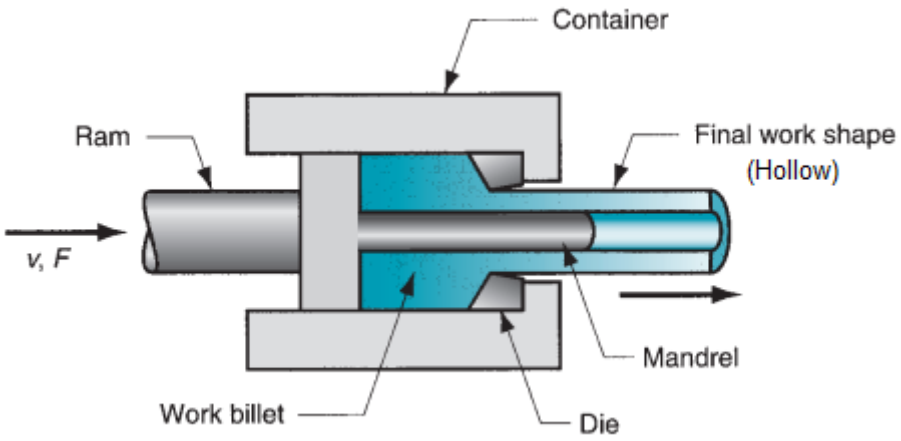
يمكن تقسيم عمليات البثق الى ما يلي:

1- البثق المباشر Direct Extrusion

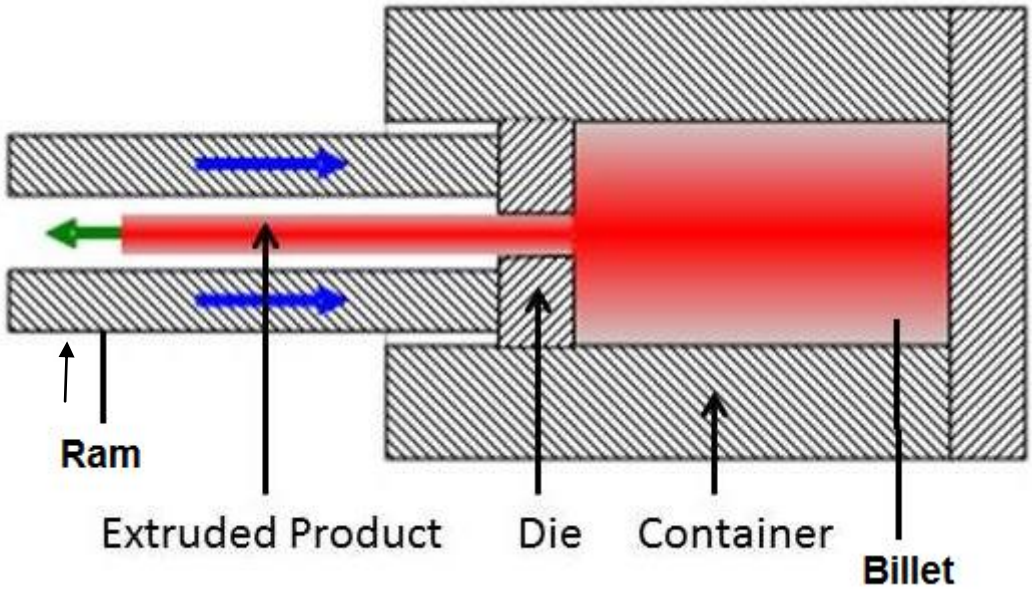


Direct Extrusion

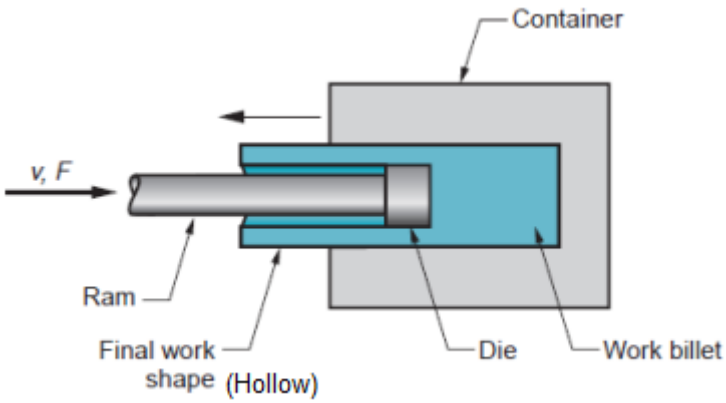
ويسمى كذلك بالبثق الامامي Forward Extrusion والمبين في الشكل أعلاه. إذ يتم وضع الخامة Billet في الحاوية Container ومن ثم تسليط الضغط بواسطة مدك Ram لأجبار المعدن على المرور من خلال فتحة القالب في الجهة الثانية من الحاوية، أي إن المعدن ينساب بنفس إتجاه القوة المسلطة. يمكن أن تكون منتجات البثق الامامي صلدة Solid كما في الشكل أعلاه أو مجوفة Hollow باستخدام قلب تشكيل Mandrel يقوم بتشكيل التجويف الداخلي كما في الشكل أدناه:



2- البثق غير المباشر Indirect Extrusion

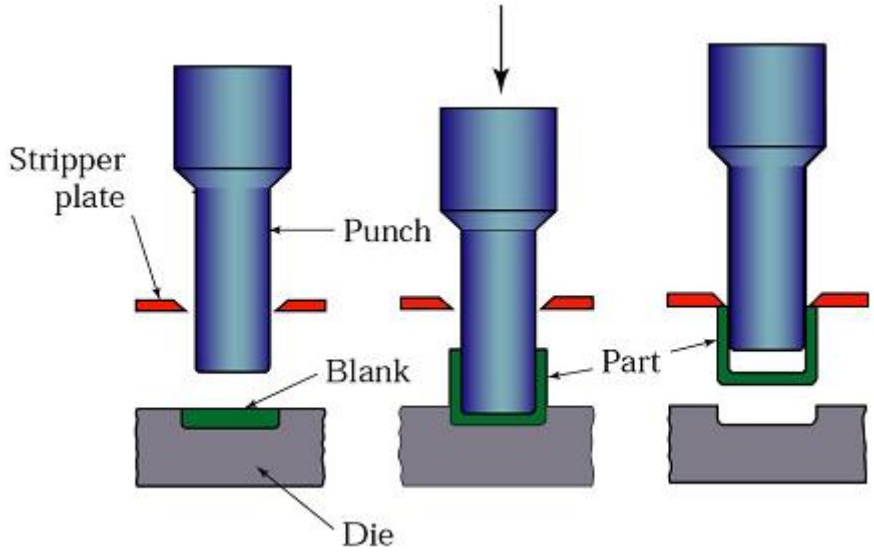


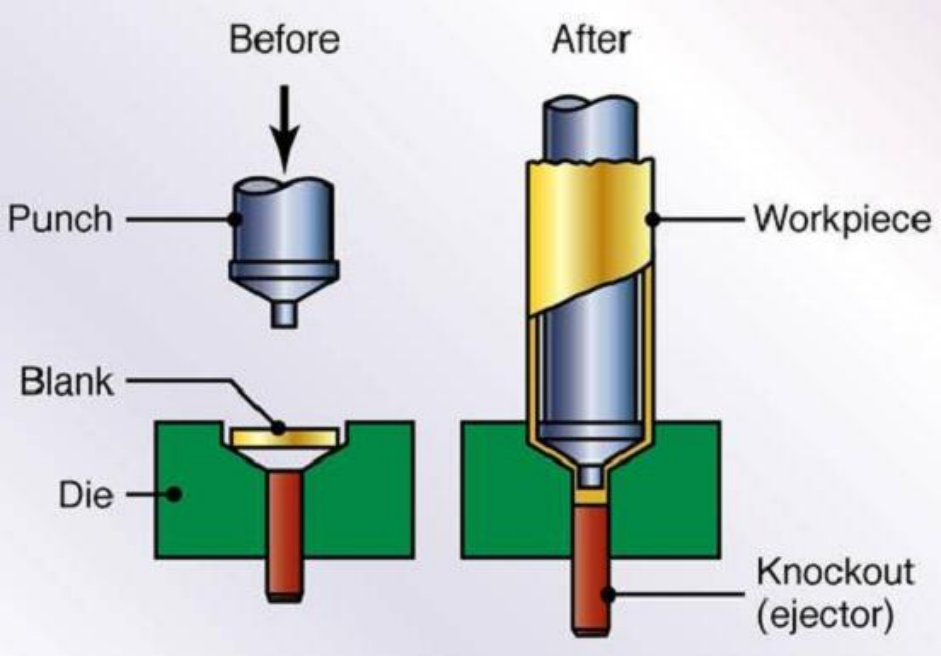
ويسمى كذلك بالبثق الخلفي Backward Extrusion أو البثق العكسي Reverse Extrusion ويتم في هذه العملية تثبيت القالب إلى المدك Ram ويتحرك بحركته التي تجبر المعدن على الانسياب من خلال فتحة القالب باتجاه معاكس لاتجاه القوة المسلطة. وحيث إنه لا توجد حركة نسبية بين الخامة والحاوية لذا لا يوجد احتكاك بينهما وبذلك يتطلب البثق غير المباشر تسليط قوى أقل مما في البثق المباشر بثبوت باقي المتغيرات. ومع إن القوة المطلوبة في البثق غير المباشر أقل إلا ان البثق المباشر هو الاكثر استخداما إذ إن استخدام مدك مجوف في البثق غير المباشر يضع محددات على أقصى قوة يمكن تسليطها ومن ثم أقصى نسبة تخفيض ممكنة كما إن صعوبة اسناد المنتج الخارج من القالب في البثق غير المباشر تضع محددات على انتشار استخدامه. يمكن للبثق غير المباشر كما في البثق المباشر أن ينتج أجزاء مجوفة كما مبين في الشكل التالي:



3- البثق الصدمي Impact Extrusion

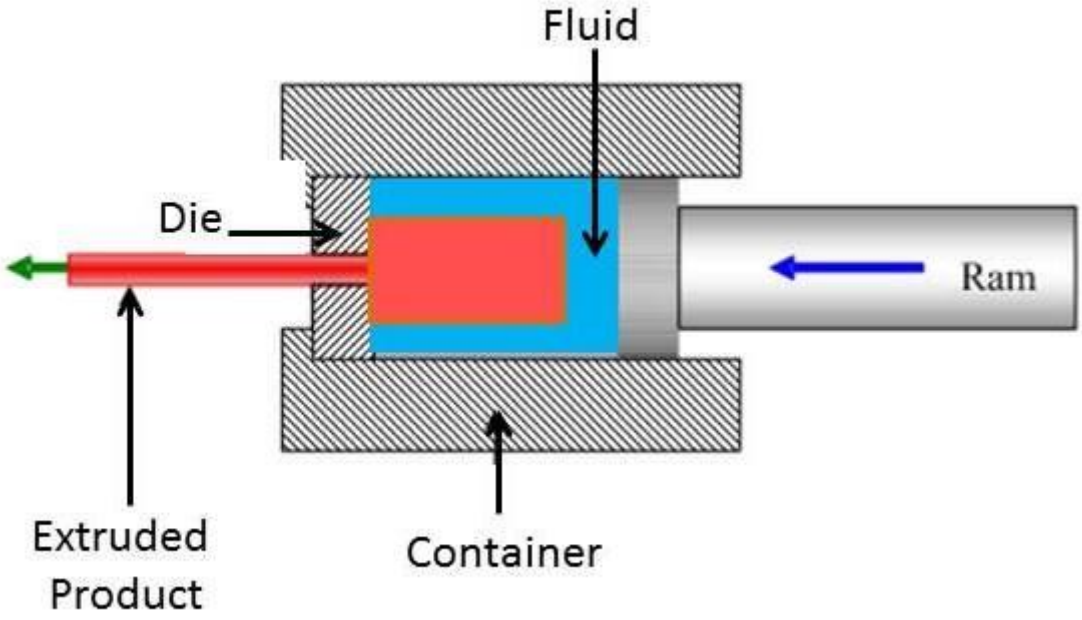
البثق الصدمي مشابه للبثق غير المباشر إلا إنه في حالة البثق الصدمي ينزل المدك أو الخرامة Punch بسرعة عالية على الخامة Blank وهي بشكل قرص عادة فينساب المعدن باتجاه معاكس لاتجاه نزول المدك أي حدوث بثق عكسي، وبانسيابه على سطح المدك ينتج مقطعا انبوبيا يعتمد طوله على سمك الخامة وسمك المنتج الذي يحدده الخلوص بين الخرامة والقالب. تستخدم هذه الطريقة في انتاج الاشكال الانبوبية القصيرة من المعادن الطرية مثل الالمنيوم والتي تستخدم في انتاج علب معاجين الاسنان والمراهم الطبية وغيرها. الشكل أدناه يوضح عملية البثق الصدمي:





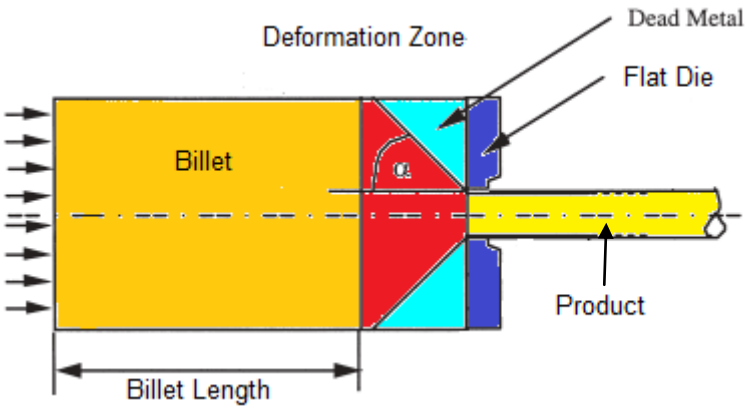
4- البثق الهيدروستاتيكي Hydrostatic Extrusion

في هذه الطريقة من البثق يتم وضع الخامة في حاوية مملوءة بمائع (زيت) وبتسليط ضغط على الزيت بوساطة عمود من إحدى جهتي الحاوية يتولد ضغطا هيدروستاتيكيا على الخامة التي تُجبر على الانسياب من فتحة القالب المثب على الجهة الاخرى من الحاوية مع طبقة مستمرة من الزيت تفصل بين القالب والمعدن قيد التشكيل وبذلك تنعدم خسائر الاحتكاك تقريبا وتقل خسائر القص الى ادناها (باستخدام قوالب ذات زوايا صغيرة) مع الحصول على اسطح فائقة النعومة. ومع المزايا التي يوفرها البثق الهيدروستاتيكي إلا إن الاستخدام الصناعي للعملية محدودا وذلك بسبب الحاجة الى معدات خاصة وطول فترة الاعداد وانخفاض معدلات الانتاج. الشكل التالي يوضح البثق الهيدروستاتيكي:

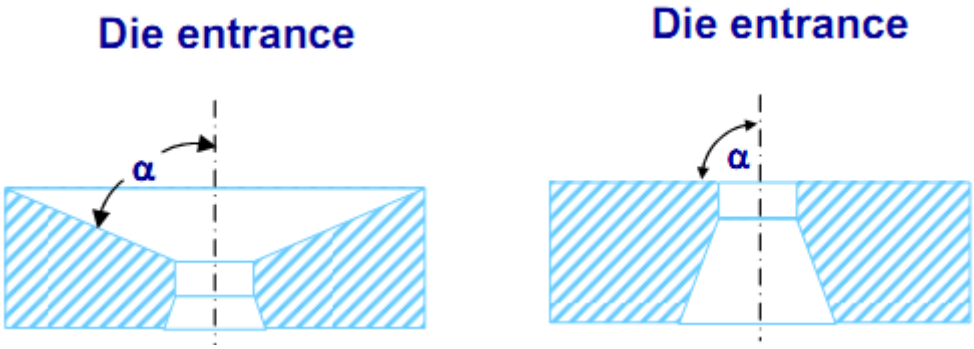


قوالب البثق Extrusion Dies

تصنع قوالب البثق من الصلب عالي السبائكية أو من المواد السيراميكية وتصنع القوالب المستخدمة صناعيا على شكلين هما القوالب مستوية الوجه Flat-faced Dies والقوالب المخروطية Conical Dies. تكون زاوية القالب (2α) في القوالب المستوية 180^{o} وفي القوالب المخروطية تتراوح نصف زاوية القالب (α) بين $45^{o} < \alpha < 60^{o}$. يمكن في القوالب المخروطية تحقيق موازنة بين خسائر القص الماكروي وخسائرالاحتكاك. ويتم ذلك من خلال التحكم في مقدار زاوية القالب. إذ إن الزوايا الصغيرة للقالب (قوالب طويلة) تقلل القص الماكروي وخسائر الطاقة المرافقة له وتُحسن تجانس خواص المعدن عبر المقطع ولكنها في نفس الوقت تزيد خسائر الاحتكاك في منطقة التشكيل بسبب زيادة مساحة التماس بين القالب والمعدن قيد التشكيل. والعكس صحيح عند زيادة زاوية القالب. أما في القوالب المستوية فأن المعدن يُكون لنفسه منطقة معدن ميت (معدن ثابت في محله) Dead Metal Zone بمقابل مدخل القالب يعمل بمثابة قالب ينساب المعدن قيد التشكيل عليه وكما مبين في الرسم التخطيطي أدناه.



الشكل التالي يبين نوعي القوالب المشار اليهما:

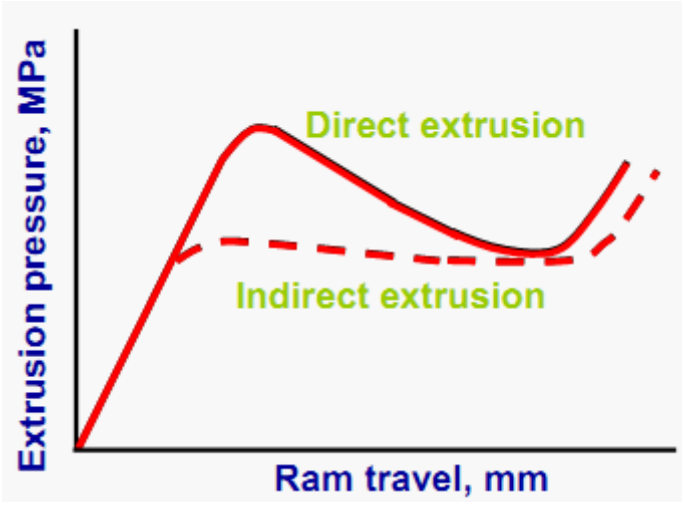


conical entrance angle die flat-faced die

تحليل عملية البثق Analysis of the extrusion process

1- منحنى الحمل – الازاحة أو منحنى الضغط – حركة المدك extrusion pressure vs. ram travel

يبين الشكل التالي منحنى ضغط البثق كدالة لحركة تقدم المدك في كل من البثق المباشر والبثق غير المباشر:



يلاحظ من المنحنى وجود ثلاث مناطق مميزة في سلوكها. تحدث في المرحلة الاولى زيادة سريعة في الضغط مع تقدم المدك. ولا يحدث في هذه المرحلة بثق في المعدن أي لا يدخل المعدن الى القالب ولكن يحدث تفلطح في الخامة داخل الحاوية ويقصد بذلك زيادة قطر الخامة لتقوم بملئ الحاوية أي يتطابق السطح الخارجي للخامة مع السطح الداخلي للحاوية. أما المرحلة الثانية فتتميز باستقرار قيمة الضغط عند قيمة ثابتة تقريبا في البثق غير المباشر وبتناقص مستمر في قيمة الضغط في البثق المباشر وهي الحالة المستقرة من البثق. يحدث تناقص في ضغط البثق المباشر مع تقدم المدك وذلك لأن طول الخامة يتناقص ومن ثم تتناقص مساحة التماس بين الخامة والحاوية فتتناقص تبعا لذلك القوة اللازمة للتغلب على الاحتكاك في منطقة الحاوية ومن ثم القوة الكلية اللازمة للبثق. ولا يحدث ذلك في البثق غير المباشر لعدم وجود حركة نسبية بين الخامة والحاوية كما مر بنا سابقا. أما في المرحلة الثالثة فتحدث زيادة متسارعة جدا في ضغط البثق مع تقدم المدك. يشير ذلك الى تغير جذري في نمط الانسياب ووصول عملية البثق الى نهايتها ووجوب وقف العملية.

2- نسبة البثق Extrusion Ratio (R)

هي النسبة بين مساحة المقطع الاصلي للخامة A_o قبل البثق على مساحة المقطع النهائي للمنتج A_f بعد البثق

$$R = \frac{A_o}{A_f} \quad \text{..... (1)}$$

إذ يتم في البثق عادة التعبير عن مقدار التشكيل بنسبة البثق R وليس نسبة التخفيض في مساحة المقطع العرضي r وذلك لتحقق نسب تشكيل عالية جدا في البثق لا يبقى معها معنى مناسب لنسبة التخفيض في المقطع r إذ يمكن لنسبة البثق R أن تصل الى نسب عالية جدا كما مبين في أدناه وذلك لتحقق حالة إجهاد انضغاطية ثلاثية الاتجاه ويمكن ربط كل من R و r بالعلاقة:

$$r = 1 - \frac{A_f}{A_o} \quad \text{and} \quad R = \frac{A_o}{A_f}$$

$$\text{so} \quad R = \frac{1}{(1-r)} \quad \text{..... (2)}$$

لاحظ أن R هي الانسب في التعبير عن التشكيل عند نسب التشكيل العالية وليس r فمثلا لنسبتي البثق R = 20:1 و 50:1 بدلالة R التي تبين بوضوح مدى الفرق في مقدار التشكيل بين الحالتين، ولو عبرنا عن التشكيل بدلالة r ولنفس النسب فأنها تعطي r = 0.95 و 0.98 على التوالي وكما يلاحظ فأن التعبير بدلالة r لا يشير الى الفرق الكبير بين الحالتين بل يعطي قيمتين متقاربتين.

3- ضغط البثق Extrusion Pressure (Pe)

هو حاصل قسمة قوة البثق على مساحة مقطع الخامة:

$$P = \frac{F}{A_o}$$

حيث إن:

F: هي قوة البثق

A_o: هي مساحة مقطع الخامة

ومما تجدر الاشارة إليه أن المهم هو أقصى ضغط تتطلبه العملية والذي يسمة بضغط الذروة Peak Pressure وليس ضغط الحالة المستقرة. توجد طرائق عديدة لحساب ضغط البثق وسنعتمد حاليا على طريقة الشغل المثالي التي تأخذ فقط التشكيل المتجانس بنظر الاعتبار وطريقة توازن القوى على شريحة صغيرة في منطقة التشكيل وبنفس الطريقة التي تم اعتمادها في سحب الاسلاك.

أ- طريقة الشغل المثالي Ideal Work Method

يعطى ضغط البثق في هذه الطريقة بالعلاقة التالية:

$$\sigma_{xb} = \bar{Y}\, ln\, R = \bar{Y}\, ln \frac{A_o}{A_f} = \bar{Y}\, ln \frac{{D_o}^2}{{D_f}^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

ب- طريقة توازن القوى على شريحة صغيرة ضمن منطقة التشغيل وبما إنها مماثلة تماما لحالة سحب الاسلاك والقضبان، لذا سنقتصر على المعادلة النهائية التالية:

$$\sigma_{xb} = \bar{Y} \left(\frac{1+B}{B}\right)(1 - R^B) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

ويمكن إعادة صياغة المعادلة (4) بالصورة الآتية:

$$\sigma_{xb} = \bar{Y} \left(\frac{1+B}{B}\right)\left[1 - \left(\frac{1}{1-r}\right)^B\right] \quad \ldots\ldots\ldots (5)$$

أو بالصيغة:

$$\sigma_{xb} = \bar{Y} \left(\frac{1+B}{B}\right)\left[1 - \left(\frac{D_o}{D_f}\right)^{2B}\right] \quad \ldots\ldots\ldots (6)$$

وذلك لأن:

$$R = \frac{1}{1-r}$$

And

$$R = \frac{A_o}{A_f} = \left(\frac{D_o}{D_f}\right)^2$$

حيث إن:

σ_{xb}: هو إجهاد البثق

$\bar{Y}$: هو متوسط إجهاد الانسياب

$B = \mu \cot\alpha$

بقي أن نشير الى ان ضغط البثق المستخرج من المعادلات (3-6) يمثل الضغط اللازم لعملية التشكيل داخل القالب فقط وهو نفسه يمثل الضغط الكلي تقريبا في حالة البثق غير المباشر. أما في حالة البثق المباشر فيضاف إليه الضغط اللازم للتغلب على الاحتكاك بين الخامة والحاوية والذي يعطى بالعلاقة الآتية:

$$P_f = \frac{4KL}{D_o}$$

$$K = \frac{\bar{Y}}{\sqrt{3}}$$

So,

$$P_f = \frac{4}{\sqrt{3}} * \frac{\bar{Y}\,L}{D_o} \dots\dots\dots\dots (7)$$

وبهذا يصبح الضغط الكلي اللازم في البثق المباشر:

$$P_e = \sigma_{xb} + P_f \dots\dots\dots\dots (8)$$

حيث إن:

P_f: الضغط اللازم للتغلب على الاحتكاك بين الخامة والحاوية

K: هو مقاومة القص Shear Strength

L: طول الخامة

أمثلة:

مثال1: بأهمال خسائر الاحتكاك والقص الماكروي (باتباع طريقة الشغل المثالي) جد القوة والقدرة اللازمة لبثق عمود من البراص طوله 300mm من قطر 150mm الى قطر 60mm بسرعة 0.01 m/s إذا علمت أن متوسط إجهاد الانسياب $\bar{Y}$ هو 206.84 MPa

الحل:

باعتماد طريقة الشغل المثالي التي تهمل خسائر الاحتكاك والقص الماكروي يعطى ضغط البثق بالعلاقة:

$$P = \sigma_{xb} = \bar{Y}\, ln\, R = \bar{Y}\, ln \frac{A_o}{A_f} = \bar{Y}\, ln \frac{{D_o}^2}{{D_f}^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

$$P = \sigma_{xb} = \bar{Y}\, ln \frac{{D_o}^2}{{D_f}^2} = 206.84\, ln \frac{150^2}{60^2} = 379.1\, MPa$$

نجد قوة البثق من العلاقة:

$$F = \sigma_{xb} * A_o = 379.1 * \frac{3.14 * 150^2}{4} = 6.7\ MN$$

ونجد قدرة البثق من العلاقة:

P = F * ν = 6.7 * 0.01 m/s = 67 KW

إنتهى

مثال 2: تم بثق المنيوم ذو نقاوة تجارية بسرعة 1m/min من قطر 10 cm الى قطر 5 cm ، بأهمال خسائر الاحتكاك والقص الماكروي جد القوة والقدرة اللازمة لأجراء العملية إذا علمت أن طول الخامة 25 cm وأن معامل الاحتكاك 0.1 وأن أس الاصلاد الانفعالي Strain Hardening Exponent (n) هو 0.25 وأن معامل الاصلاد الانفعالي strength coefficient (K) هو 140 MPa

الحل:

باعتماد طريقة الشغل المثالي التي تهمل خسائر الاحتكاك والقص الماكروي يعطى ضغط البثق بالعلاقة:

$$P = \sigma_{xb} = \bar{Y}\, ln\, R = \bar{Y}\, ln \frac{A_o}{A_f} = \bar{Y}\, ln \frac{{D_o}^2}{{D_f}^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

$$\varepsilon = ln \frac{Ao}{Af} = ln \frac{{D_o}^2}{{D_f}^2} = ln \frac{100^2}{50^2} = 1.386$$

$$\bar{Y} = \frac{K\, \varepsilon^n}{n+1}$$

$$\bar{Y} = \frac{140 * 1.386^{0.25}}{0.25+1} = 121.523\, MPa$$

$$P = \sigma_{xb} = \bar{Y}\, ln\frac{{D_o}^2}{{D_f}^2} = 121.523 \ln\frac{100^2}{50^2} = 168.467\ MPa$$

نجد قوة البثق من العلاقة:

$$F = \sigma_{xb} * A_o = 168.467 * \frac{3.14 * 100^2}{4} = 1.3225\ MN$$

ونجد قدرة البثق من العلاقة:

P = F * V = 1.3225 * 0.016 m/s = 22.04 KW

إنتهى

مثال3: مهملا القوة اللازمة للتغلب على قوى الاحتكاك بين الخامة والحاوية إحسب الحمل (القوة) اللازمة لبثق خامة من الالمنيوم من قطر 100mm الى قطر 40mm إذا علمت أن زاوية قالب البثق هي 90^o ومعامل الاحتكاك هو 0.2 وأن أس الاصلاد الانفعالي Strain Hardening Exponent (n) هو 0.283 وأن معامل المقاومة Strength Coefficient(K) هو 219 MPa

الحل:

تعطى قوة البثق بالعلاقة:

$F = \sigma_{xb} * A_o$

$$\varepsilon = ln\frac{Ao}{Af} = ln\frac{{D_o}^2}{{D_f}^2} = ln\frac{100^2}{40^2} = 1.833$$

نحسب بعد ذلك متوسط إجهاد الانسياب $\bar{Y}$ من العلاقة:

$$\bar{Y} = \frac{K\,\varepsilon^n}{n+1}$$

$$\bar{Y} = \frac{219 * 1.833^{0.283}}{0.283 + 1} = 202.625\ MPa$$

$$B = \mu \cot\alpha = 0.2 \cot 45 = 0.2$$

ثم نحسب ضغط البثق σ_{xb} من العلاقة:

$$\sigma_{xb} = \bar{Y}\left(\frac{1+B}{B}\right)\left[1 - \left(\frac{D_o}{D_f}\right)^{2B}\right] \ldots\ldots\ldots (6)$$

$$\sigma_{xb} = 202.625\left(\frac{1+0.2}{0.2}\right)\left[1 - \left(\frac{100}{40}\right)^{0.4}\right] = -538.212\ MPa$$

ملاحظة: الأشارة السالبة تشير إلى إجهاد إنضغاطي

$$F = \sigma_{xb} * Ao = 538.212 * \frac{3.14 * 100^2}{4} = 4.225\ MN$$

ملاحظة: هذه القيمة تمثل فقط قوة البثق ضمن منطقة التشكيل

إنتهى

مثال 4: جد قوة البثق وقدرة البثق اللازمة لبثق سبيكة ألمنيوم دائرية المقطع طولها 75 mm خلال قالب مخروطي زاويته 90^o بسرعة 40 mm/s من قطر 25 mm الى قطر 12.5 mm إذا علمت أن معامل الاحتكاك هو 0.15 وأن أس الاصلاد الانفعالي Strain Hardening Exponent (n) هو 0.25 وأن معامل المقاومة Strength Coefficient (K) هو 415 MPa ، مهملا القوة اللازمة للتغلب على قوى الاحتكاك بين الخامة والحاوية.

الحل:

$$\varepsilon = ln\frac{Ao}{Af} = ln\frac{D_o^{\,2}}{D_f^{\,2}} = ln\frac{25^2}{12.5^2} = 1.386$$

$$\bar{Y} = \frac{K\,\varepsilon^n}{n+1}$$

$$\bar{Y} = \frac{415 * 1.386^{0.25}}{0.25+1} = 360.23\ MPa$$

$$B = \mu\cot\alpha = 0.15\cot 45 = 0.15$$

نحسب ضغط البثق σ_{xb} (ضمن منطقة التشكيل) من العلاقة:

$$\sigma_{xb} = \bar{Y}\left(\frac{1+B}{B}\right)\left[1 - \left(\frac{D_o}{D_f}\right)^{2B}\right] \ldots\ldots\ldots (6)$$

$$\sigma_{xb} = 360.23\left(\frac{1+0.15}{0.15}\right)\left[1 - \left(\frac{25}{12.5}\right)^{0.3}\right] = -638.366\ MPa$$

وكما قلنا سابقا فأن الاشارة السالبة تشير الى حالة اجهاد انضغاطي

$$F = \sigma_{xb} * A_o = 638.366 * \frac{3.14 * 25^2}{4} = 313.198\ KN$$

أما القدرة اللازمة فنجدها من العلاقة:

P = F * V = 313.198 KN * 0.04 m/s = 12.53 KW

إنتهى

مثال5: جد قوة البثق وقدرة البثق اللازمة لبثق خامة فولاذية طولها 75mm خلال قالب مخروطي زاويته 75^o بسرعة 20 mm/s من قطر 35mm الى قطر 20mm إذا علمت أن معامل الاحتكاك هو 0.08 وأن أس الاصلاد الانفعالي (n) Strain Hardening Exponent هو 0.25 وأن معامل المقاومة (K) Strength Coefficient هو 600MPa ، مهملا القوة اللازمة للتغلب على قوى الاحتكاك بين الخامة والحاوية.

الحل:

$$\varepsilon = ln\frac{Ao}{Af} = ln\frac{{D_o}^2}{{D_f}^2} = ln\frac{35^2}{20^2} = 1.12$$

$$\bar{Y} = \frac{K\,\varepsilon^n}{n+1}$$

$$\bar{Y} = \frac{600 * 1.12^{0.25}}{0.25+1} = 493.794\ MPa$$

$$B = \mu \cot\alpha = 0.08 \cot 37.5 = 0.104$$

نحسب ضغط البثق σ_{xb} (ضمن منطقة التشكيل) من العلاقة:

$$\sigma_{xb} = \bar{Y}\left(\frac{1+B}{B}\right)\left[1 - \left(\frac{D_o}{D_f}\right)^{2B}\right] \ldots\ldots\ldots (6)$$

$$\sigma_{xb} = 493.794\left(\frac{1+0.104}{0.104}\right)\left[1 - \left(\frac{35}{20}\right)^{0.208}\right] = -647.077\ MPa$$

وكما قلنا سابقا فأن الاشارة السالبة تشير الى حالة اجهاد انضغاطي

$$F = \sigma_{xb} * A_o = 647.077 * \frac{3.14 * 35^2}{4} = 622.245\ KN$$

أما القدرة اللازمة فنجدها من العلاقة:

$P = F * V = 622.245\ KN * 0.02\ m/s = 12.445\ KW$

إنتهى

مثال6: جد القوة الكلية والقدرة الكلية اللازمة لبثق سبيكة المنيوم اسطوانية طولها 400mm من قطر 180mm الى قطر 60mm من خلال قالب مخروطي زاويته 90^o بسرعة بثق قدرها 60mm/s إذا علمت أن متوسط إجهاد الانسياب هو 235.4MPa وأن معامل الاحتكاك 0.15 آخذا في الاعتبار القوة اللازمة للتغلب على الاحتكاك بين الخامة والحاوية.

الحل:

$$B = \mu \cot\alpha = 0.15 \cot 45 = 0.15$$

نحسب ضغط البثق σ_{xb} (ضمن منطقة التشكيل) من العلاقة:

$$\sigma_{xb} = \bar{Y}\left(\frac{1+B}{B}\right)\left[1 - \left(\frac{D_o}{D_f}\right)^{2B}\right] \ldots\ldots\ldots (6)$$

$$\sigma_{xb} = 235.4\left(\frac{1+0.15}{0.15}\right)\left[1 - \left(\frac{180}{60}\right)^{0.3}\right] = 704.548\ MPa$$

ثم نحسب الضغط اللازم للتغلب على الاحتكاك بين الخامة والحاوية من العلاقة:

$$P_f = \frac{4}{\sqrt{3}} * \frac{\bar{Y}\, L}{D_o} \dots\dots\dots\dots (7)$$

$$P_f = \frac{4}{\sqrt{3}} * \frac{235.4 * 400}{180} = 1208.073\ MPa$$

وبهذا يمكن ايجاد ضغط البثق الكلي:

$$P_e = \sigma_{xb} + P_f \dots\dots\dots\dots (8)$$

$$P_e = 704.548 + 1208.073 = 1912.621\ MPa$$

وهكذا يمكن ايجاد القوة الكلية والقدرة الكلية اللازمة لعملية البثق:

$$F = P_e * A_o = 1912.621 * \frac{3.14 * 180^2}{4} = 48.65\ MN$$

أما القدرة اللازمة فنجدها من العلاقة:

P = F * V = 48.65 MN * 0.06 m/s = 2.919 MW

إنتهى

مثال7: تم بثق سبيكة المنيوم بسرعة 50 mm/s من قطر 150 mm الى قطر 50 mm ، جد القوة والقدرة الكلية اللازمة لأجراء العملية بضمنها القوة والقدرة الضرورية للتغلب على قوى الاحتكاك في الحاوية Container إذا علمت أن طول الخامة 300 mm وأن معامل الاحتكاك 0.1 وأن زاوية القالب 120^o وأن أس الاصلاد الانفعالي (n) Strain Hardening Exponent هو 0.15 وأن معامل الاصلاد الانفعالي (K) strength coefficient هو 200MPa

الحل:

$$\varepsilon = ln\frac{Ao}{Af} = ln\frac{{D_o}^2}{{D_f}^2} = ln\frac{150^2}{50^2} = 2.197$$

$$\bar{Y} = \frac{K\,\varepsilon^{n}}{n+1}$$

$$\bar{Y} = \frac{200 * 2.179^{0.15}}{0.15+1} = 195.466\ MPa$$

$$B = \mu \cot\alpha = 0.1 \cot 60 = 0.0577$$

نحسب ضغط البثق σ_{xb} (ضمن منطقة التشكيل) من العلاقة:

$$\sigma_{xb} = \bar{Y}\left(\frac{1+B}{B}\right)\left[1 - \left(\frac{D_o}{D_f}\right)^{2B}\right] \ldots\ldots\ldots (6)$$

$$\sigma_{xb} = 195.466\left(\frac{1+0.0577}{0.0577}\right)\left[1 - \left(\frac{150}{50}\right)^{0.1154}\right] = -484.32\ MPa$$

وكما قلنا سابقا فأن الاشارة السالبة تشير الى حالة اجهاد انضغاطي

ثم نحسب الضغط اللازم للتغلب على الاحتكاك بين الخامة والحاوية من العلاقة:

$$P_f = \frac{4}{\sqrt{3}} * \frac{\bar{Y}\,L}{D_o} \ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

$$P_f = \frac{4}{\sqrt{3}} * \frac{195.466 * 300}{150} = 902.82\ MPa$$

وبهذا يمكن ايجاد ضغط البثق الكلي:

$$P_e = \sigma_{xb} + P_f \ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

$$P_e = 484.32 + 902.82 = 1387.14\ MPa$$

وهكذا يمكن ايجاد القوة الكلية والقدرة الكلية اللازمة لعملية البثق:

$$F = P_e * A_o = 1387.14 * \frac{3.14 * 150^2}{4} = 24.5\ MN$$

أما القدرة اللازمة فنجدها من العلاقة:

$$P = F * V = 24.5\ MN * 0.05\ m/s = 1.225\ MW$$

إنتهى

واجب 1: بأهمال خسائر الاحتكاك والقص الماكروي (باتباع طريقة الشغل المثالي) جد القوة والقدرة اللازمة لبثق عمود بنسبة بثق قدرها 4 إذا علمت أن القطر الأصلي للعمود هو 30mm وأن البثق يجرى بسرعة 0.01 m/s وأن متوسط إجهاد الانسياب لمادة العمود $\bar{Y}$ هو 400MPa

واجب 2: جد القوة والقدرة اللازمة لبثق عمود قطرة الابتدائي 60mm بنسبة بثق قدرها 2.25 إذا علمت أن الطول الاصلي للخامة (L) هو 75mm وأن زاوية قالب البثق (2α) هي 120^{o} ومعامل الاحتكاك هو 0.1 وأن أس الاصلاد الانفعالي Strain Hardening Exponent (n) هو 0.18 وأن معامل الاصلاد الانفعالي strength coefficient (K) هو 414 MPa وأن البثق يتم بسرعة 0.008 m/s

واجب 3: بأهمال خسائر الاحتكاك والقص الماكروي (باتباع طريقة الشغل المثالي) جد القوة والقدرة اللازمة لبثق أنبوب دائري المقطع قطره الخارجي 40mm وقطر قلب التشكيل (mandrel) هو 20mm إذا علمت أن قطر الخامة هو 100mm وطولها 20mm . جد بعد ذلك طول الانبوب الناتج إذا علمت أن أس الاصلاد الانفعالي Strain Hardening Exponent (n) هو 0.1 وأن معامل الاصلاد الانفعالي strength coefficient (K) هو 100 Mpa وأن البثق يتم بسرعة 0.01 m/s

الحدادة Forging

الحدادة عبارة عن عملية تشكيل معدني باستخدام قوى انضغاطية موضعية. تتم عمليات الحدادة على الساخن أو الدافئ أو البارد إلا إن أغلب عمليات الحدادة تنجز على الساخن. ويتراوح وزن الاجزاء المنتجة عن طريق الحدادة من وزن يقل عن 1 كغم الى وزن يصل الى 170 طن. وعادة ما تتطلب الاجزاء المنتجة بالحدادة اجراء عمليات أضافية للحصول على الدقة والابعاد المطلوبة.

محاسن الحدادة Advantages of Forging

1- تعطي الحدادة أجزاء ذات جساءة Toughness أعلى من منتجات السباكة.
2- تعطي الحدادة أجزاء ذات مقاومة كلال Fatigue ومقاومة زحف Creep أعلى من منتجات السباكة وبصورة عامة خصائص ميكانيكية أعلى.
3- كلفة تشغيل أقل.
4- يمكن عن طريقها الحصول على أجزاء بأشكال مختلفة.

5- يتم عن طريق الحدادة الساخنة التخلص من الانعزال الدقيق والمسامية وتحسين البنية المجهرية.

محددات الحدادة Disadvantages of Forging

1- كلفة الانشاء الاولية عالية وبخاصة لمكابس الحدادة الكبيرة.
2- تتطلب عمليات الحدادة الساخنة عمليات إنهاء لاحقة.
3- لا يمكنها انتاج الاشكال المعقدة.
4- يكون الحجم الاقصى للمطروقة محددا بحجم (قدرة) المكبس.
5- لا يمكن استخدامها في تشكيل المعادن الهشة.

الحدادة على الساخن Hot Forging

هي العمليات التي تجرى فوق درجة حرارة إعادة التبلور. مقارنة مع الحدادة الباردة فإنها تمتاز بالمحاسن الآتية:

1- تتطلب تسليط قوى أقل بسبب انخفاض إجهاد الخضوع مع ارتفاع درجات الحرارة من ناحية وبسبب عدم حدوث إصلاد انفعالي من ناحية أخرى.
2- زيادة المطيلية بارتفاع درجة الحرارة مما يسمح بنسب تشكيل عالية.
3- التخلص من الانعزال الدقيق وتقليل المسامية أو التخلص منها بالتحام اسطحها.

ومع هذه المحاسن إلا إن الحدادة الساخنة تصاحبها العديد من المساوئ مقارنة بالحدادة الباردة منها:

1- حدوث تأكسد بنسب عالية.
2- دقة أقل في الابعاد.
3- خشونة سطحية عالية

الحدادة على البارد Cold Forging

وهي العمليات التي تجرى عند درجات حرارية أقل من درجة حرارة إعادة التبلور وهي في المعتاد عند درجة حرارة الغرفة أو قريبا منها. ومقارنة بالحدادة الساخنة فإن لها المحاسن الآتية:

1- عدم الحاجة للتسخين.
2- دقة أعلى في الابعاد ونعومة سطحية أعلى.

3- عدم وجود خسائر تأكسد.

ومع هذه المحاسن إلا إن لها العديد من المساوئ مقارنة بالحدادة الساخنة منها:

1- تتطلب تسليط قوى أعلى.
2- تتطلب مكائن بحجوم وقدرات أعلى.
3- مطيلية المعدن اقل وبالتالي نسبة التشكيل الممكنة أقل وقد تتطلب عمليات تخمير وسطية.
4- تعطي خواصاً اتجاهية وتنتج اجهادات متخلفة غير مرغوبة.

تصنيف عمليات الحدادة Classification of Forging Processes

أولاً: التصنيف حسب المعدات Classification by Equipment

تقسم عمليات الحدادة حسب المعدات المستخدمة الى نوعين هما:

1- الحدادة بالطرق أو الحدادة بالمطرقة الساقطة Forging Hammer or Drop Hammer
2- الحدادة بالضغط Press Forging

ثانياً: التصنيف حسب العملية Classification by Process

اعتمادا على نوع العملية يمكن تقسيم الحدادة الى ثلاثة أنواع هي:

1- الحدادة في القوالب المفتوحة Open-Die Forging
2- الحدادة في القوالب المغلقة Closed-Die Forging
3- الحدادة بلا ومض Flash less Forging

وفيما يلي شرح لهذه الانواع:

أولاً: التصنيف حسب المعدات Classification by Equipment

1- الحدادة بالطرق أو الحدادة بالمطرقة الساقطة Forging Hammer or Drop Hammer

في هذه الطريقة يكون القالب السفلي ثابتا ومستندا على سندان، أما القالب العلوي فيتصل بالمدك Ram ولهما معا إمكانية الصعود المستمر والنزول المفاجئ أي الطرق عن طريق واحدة من ثلاث أساليب هي:

أ- مطرقة اللوح Board Hammer

في هذه الطريقة يتصل المدك والقالب العلوي بلوح خشبي صلد. يتم مسك اللوح الخشبي بين درفيلين يدوران باتجاهين متعاكسين وبفعل الاحتكاك بين اللوح الخشبي

والدرفيلين يصعد اللوح ومعه المدك والقالب العلوي إلى الاعلى. وعند الوصول الى أعلى نقطة في شوط الصعود يتم تحرير اللوح وذلك بابتعاد الدرفيلين عنه فيسقط بفعل الجاذبية ويوجه ضربة Blow الى الخامة. ويمكن للمطرقة هذه أن توجه 60 – 150 ضربة بالدقيقة الى الخامة. إن طاقة الضربة في هذه الطريقة تساوي طاقة الوضع التي تعطى بالعلاقة:

Potential energy = m.g.h ……. (1)

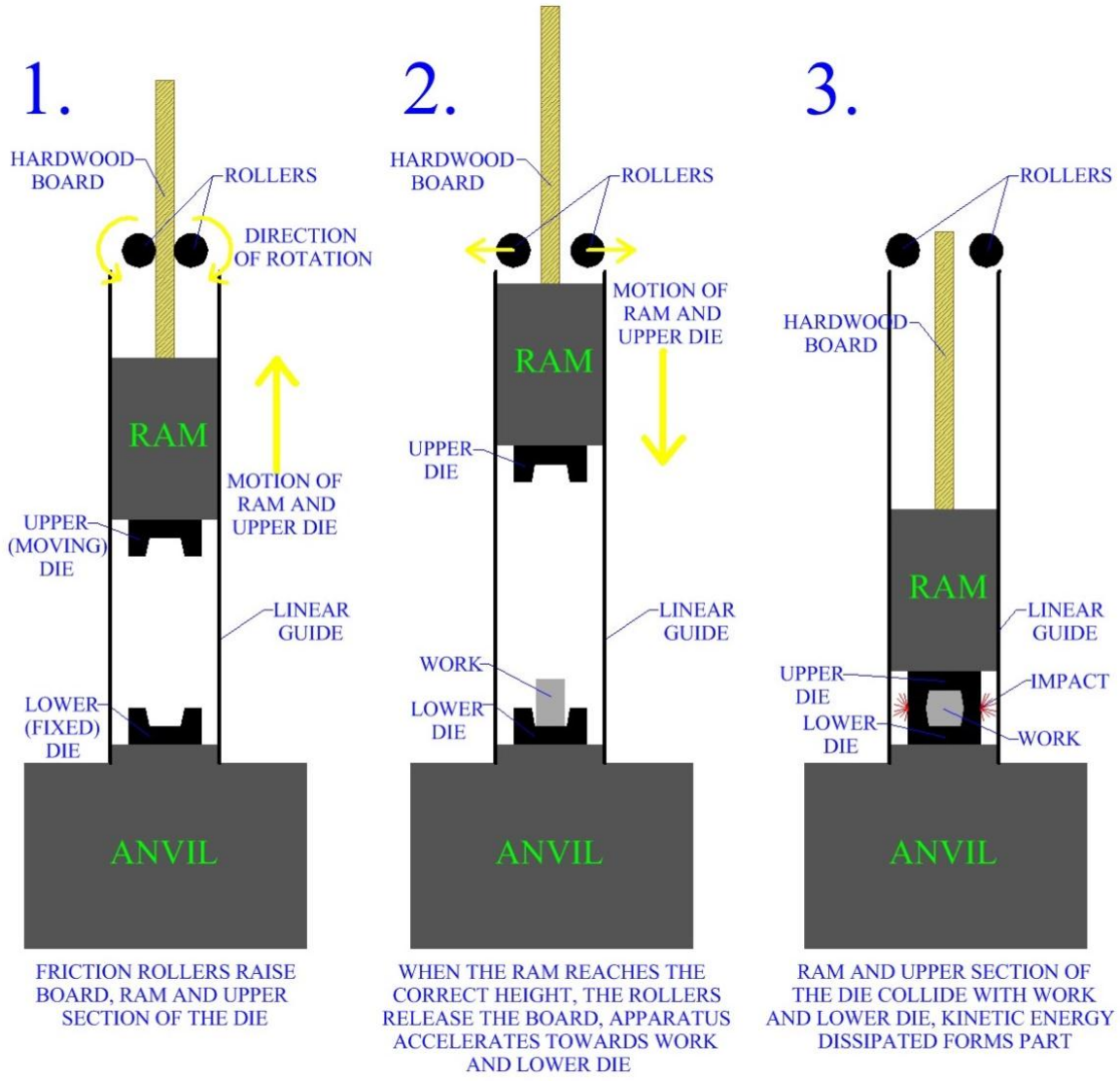
Where:

m = mass

g = acceleration of gravity

h = height of the ram drop

الشكل أدناه يعطي رسما توضيحيا لهذه العملية.

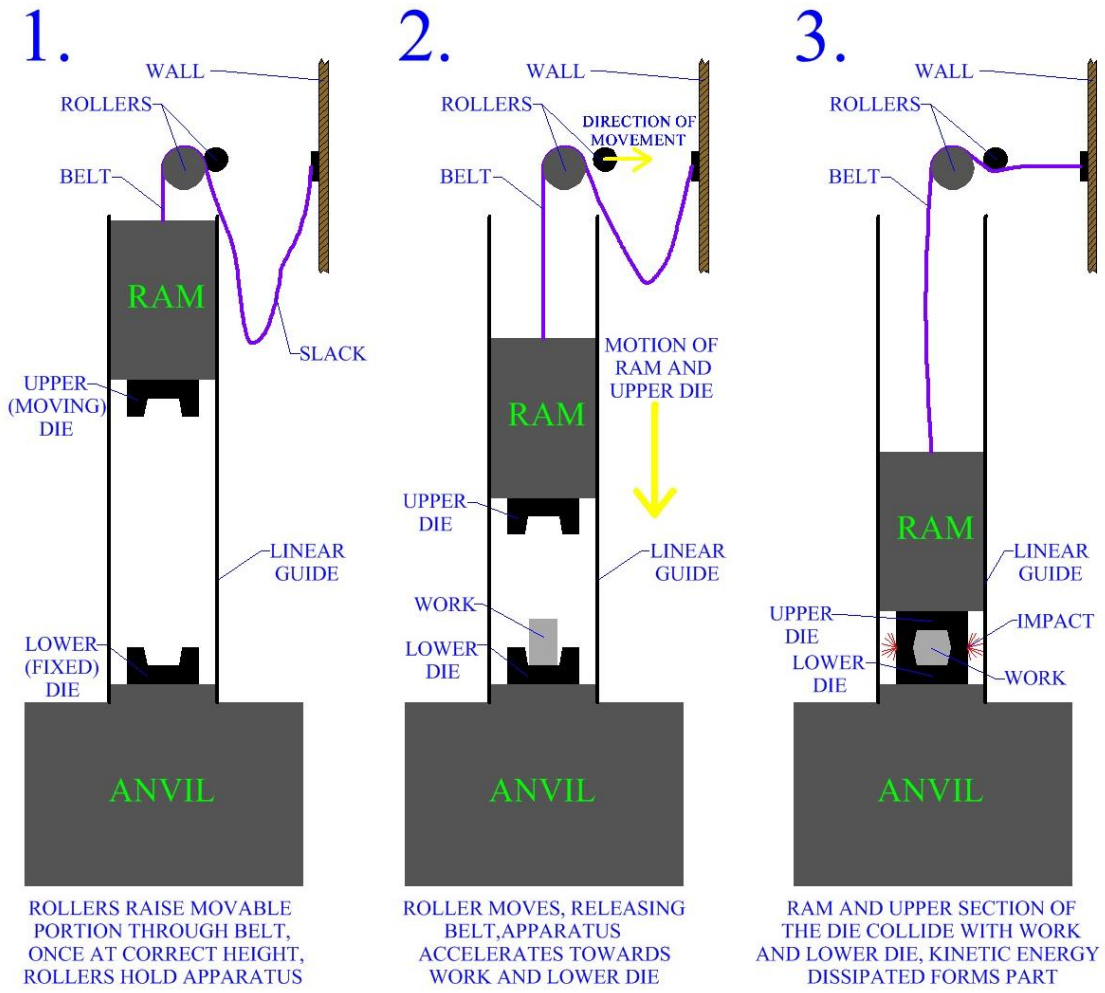


ب- مطرقة الحزام Belt Drop Hammer

هذه الطريقة مماثلة لطريقة مطرقة اللوح تماما عدا عملية صعود المدك والقالب العلوي والتي تتم من خلال حزام يقاد بواسطة درفيلين وعند الوصول الى أعلى نقطة من شوط الصعود يتم تحرير الحزام وسقوط المدك الذي يوجه ضربة الى الخامة كما في الطريقة السابقة. تعطي هذه الطريقة ضربات أسرع مما في طريقة اللوح وبذلك فهي أنسب للانتاج الكمي للاشكال المعقدة. أما طاقة الضربة في هذه الطريقة فهي نفسها في الطريقة السابقة وتساوي طاقة الوضع التي تعطى بالعلاقة:

Potential energy = m.g.h ……. (1)

الشكل أدناه يعطي رسما توضيحيا لهذه العملية.



ت- مطرقة القدرة Power Hammer

هذه المطرقة توفر سعة Capacity أعلى أي طاقة صدم أعلى مما توفره الطريقتان السابقتان، وفيها يتم تعجيل المدك خلال شوط النزول بواسطة ضغط البخار أو الهواء علاوة على الجاذبية. يستخدم ضغط البخار أو الهواء كذلك في رفع المدك والقالب العلوي في أثناء شوط الصعود. تعطى طاقة الضربة في مطرقة القدرة بالعلاقة الآتية:

$W = (1/2)\, m.v^2 + p.A.h = (m.g + p.A)\, h$ ..... (2)

Where:

m = mass

v = velocity of ram at start of deformation

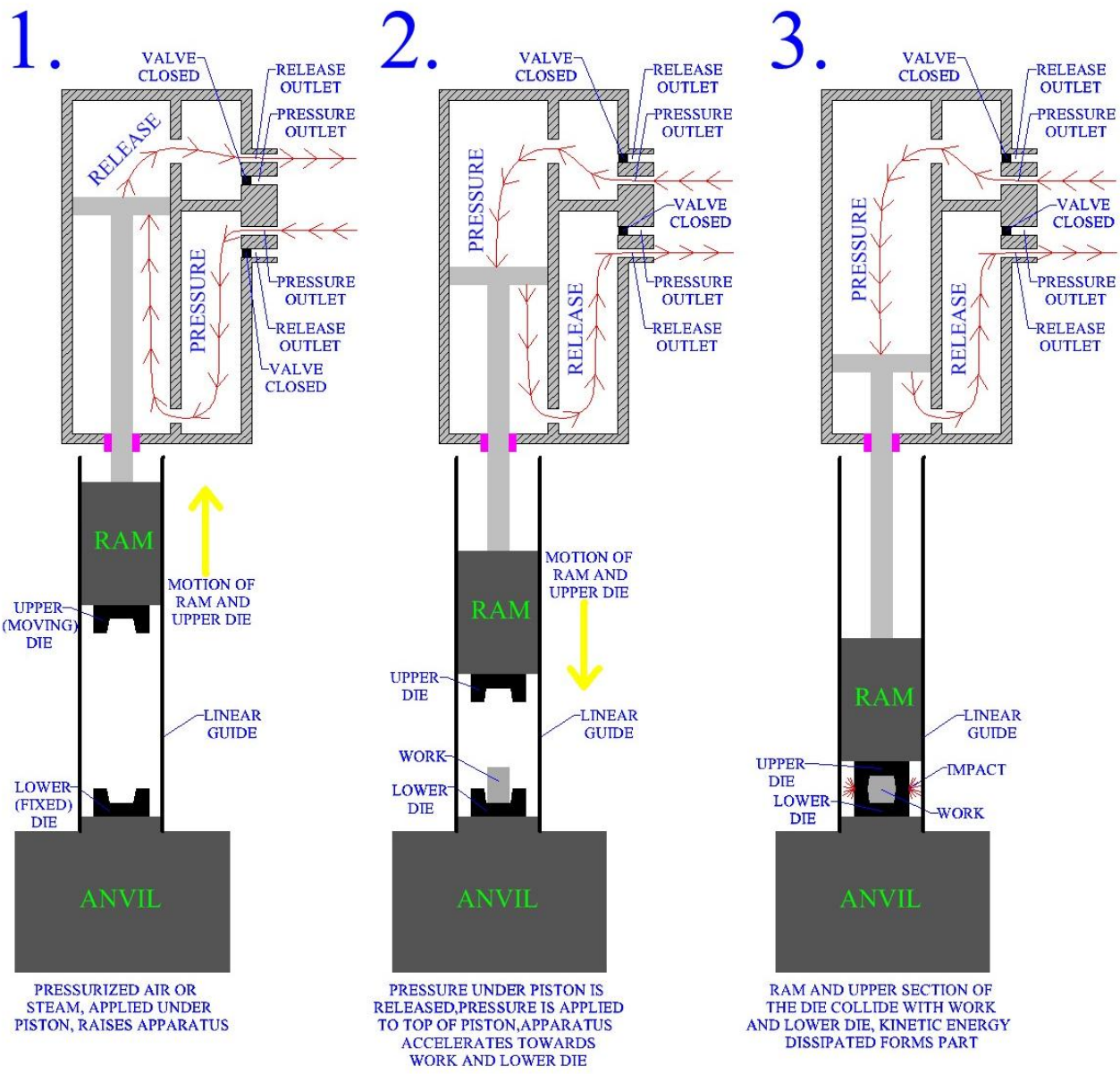
g = acceleration of gravity

p = air or steam pressure acting on ram cylinder on down stroke

A = C.S.A. of ram cylinder

h = height of the ram drop

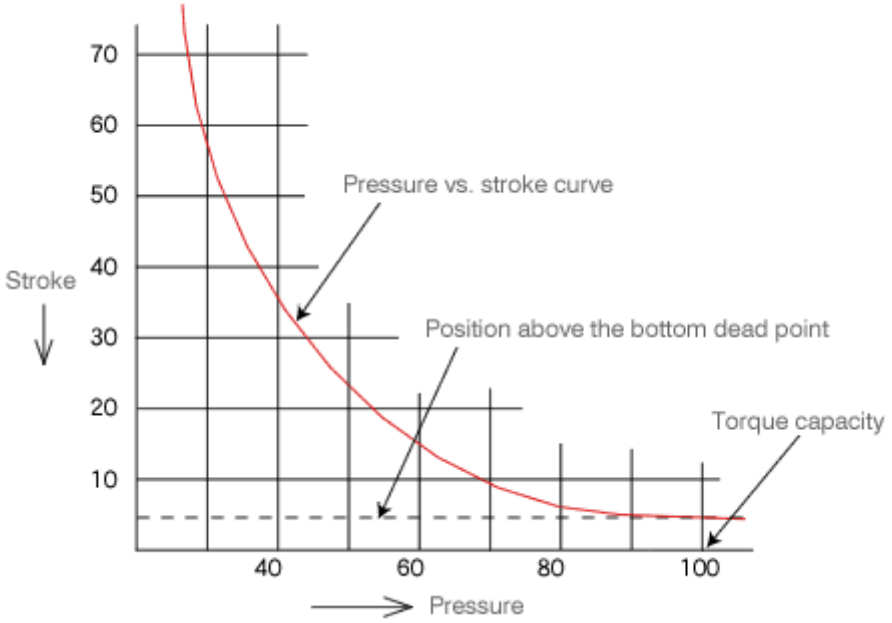
الشكل أدنه يوضح طريقة الحدادة بمطرقة القدرة:



2- الحدادة بالضغط Press Forging

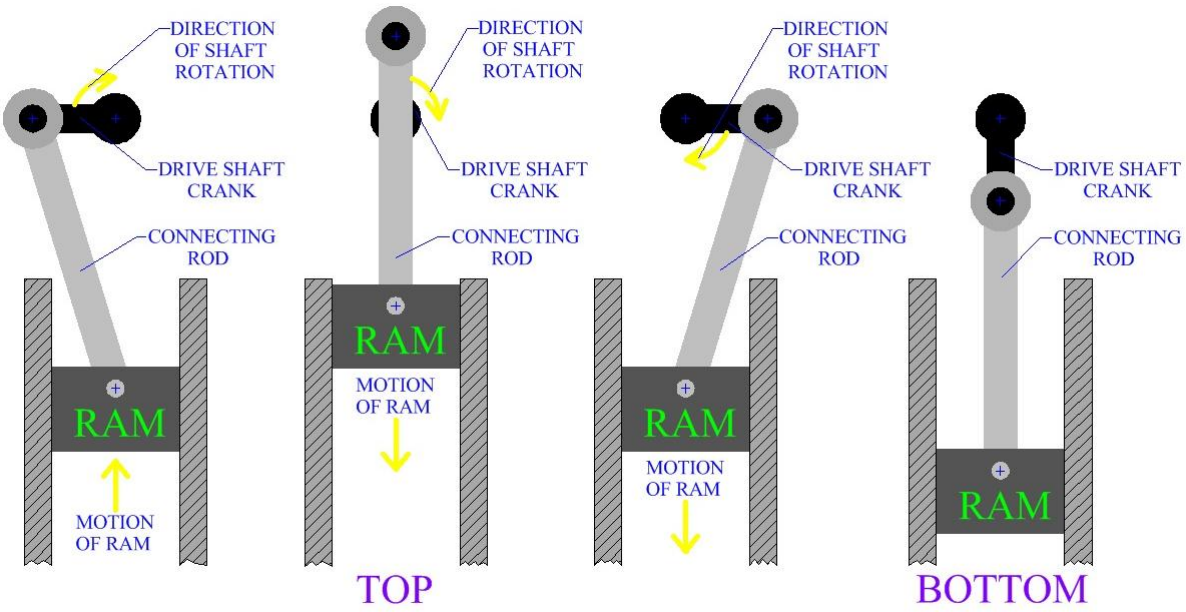
في هذه الطريقة يتم تسليط قوة ضغط متدرجة من خلال مكبس بدلا من قوة الصدم التي تسلطها طريقة الحدادة بالمطرقة الساقطة. يتم في هذه الطريقة استخدام مكابس ميكانيكية Mechanical Presses أو مكابس هيدروليكية Hydraulic Presses. يتم في المكابس الميكانيكية تحويل الحركة الدورانية لمحرك كهربائي الى حركة خطية للمدك وهي أسرع من المكابس الهيدروليكية. تصل سعة المكابس الميكانيكية المستعملة في التصنيع بصورة عامة الى 12000 طن ويمكن أن تصل في المكابس اللولبية بصورة خاصة الى 31000 طن. في المكابس الميكانيكية يتغير مقدار القوة وسرعة تسليطها بتغير المسافة على طول الشوط (المسافة التي يمكن للمكبس أن يتحركها) وبذلك فأن من الاهمية بمكان اختيار

الجزء الفعال من الطول الكلي للشوط والذي يتم خلاله التشكيل حسب سرعة التشكيل المطلوبة والقوة اللازمة. الشكل أدناه يبين تغير الضغط ومن ثم القوة بتغير الموقع من الشوط ويلاحظ فيه زيادة الضغط بالتقدم نحو النقطة الميتة السفلى في المكابس الميكانيكية العمودية:

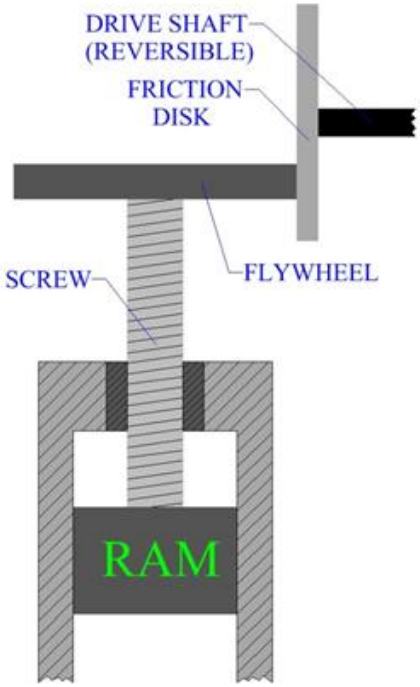


العلاقة بين الضغط والموقع من الشوط لمكبس ميكانيكي عمودي

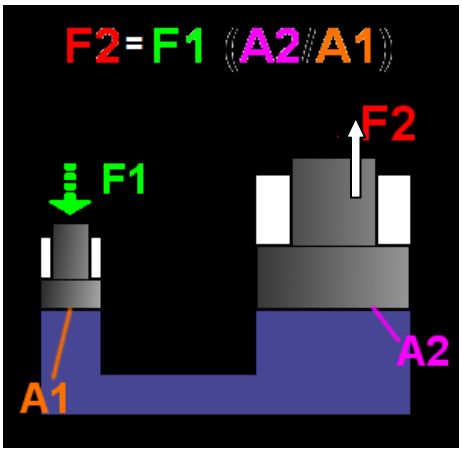
توجد أنواع مختلفة من المكابس الميكانيكية منها المكابس المرفقية Crank Presses والتي تستعمل عمود مرفقي قائد Crank Drive Shaft يرتبط بذراع توصيل Connecting Rod متصل بالمدك Ram والذي يتحرك داخل اسطوانة تماما كحركة المكبس داخل كتلة الاسطوانات في محرك الاحتراق الداخلي وكما موضح في الشكل التالي.



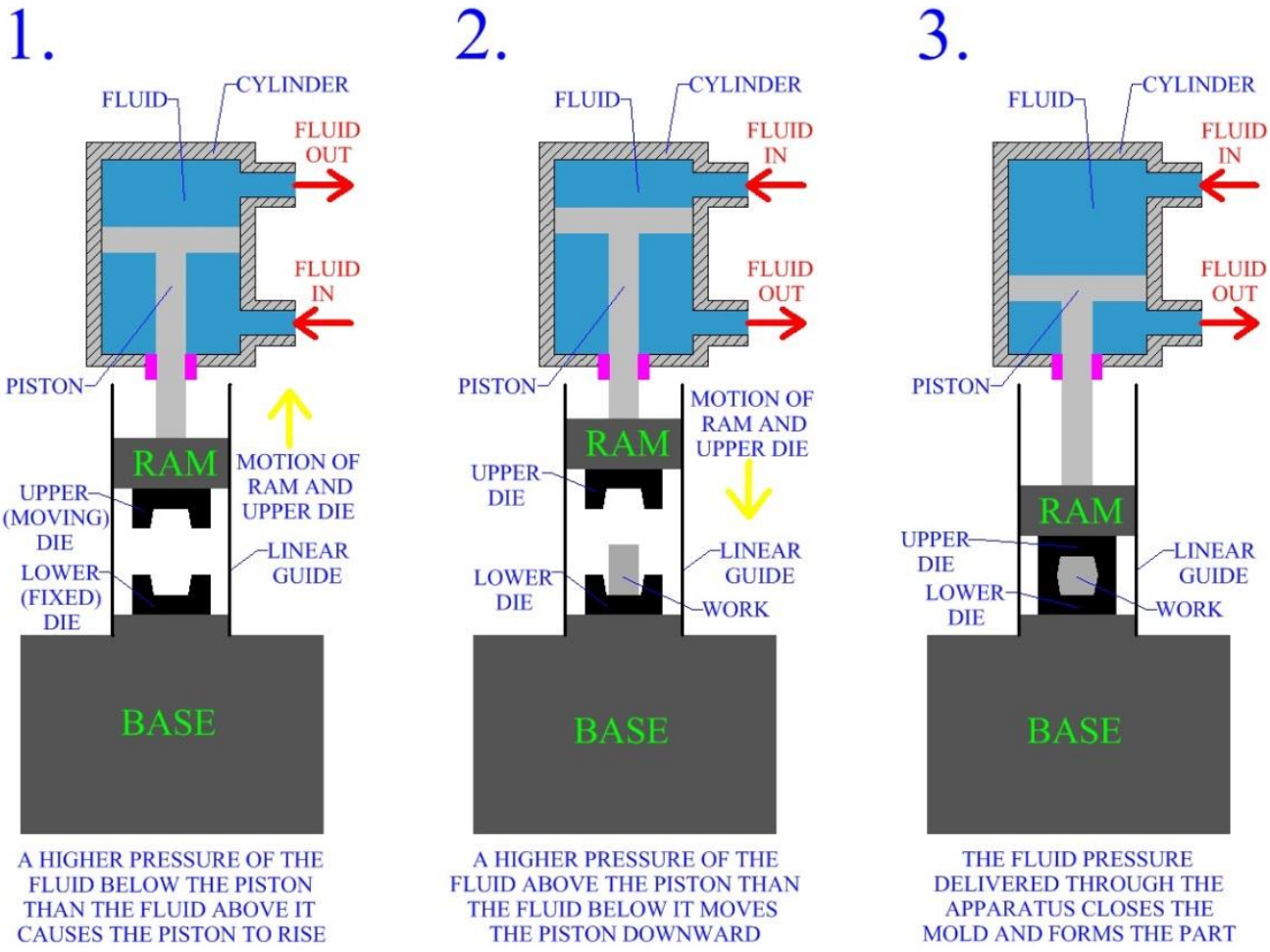
أما المكابس اللولبية فيتم فيها نقل الحركة من العمود القائد Drive Shaft الى دولاب طيار Flywheel من خلال قرص احتكاكي Friction Disk ومن الدولاب الطيار الى المدك Ram الذي يسلط القوة على الخامة. تعطي المكابس اللولبية سعة عالية جدا علاوة على إمكانية تجهيز قوة ضغط ثابتة ضمن جزء كبير من طول الشوط. الشكل أدناه يوضح عمل المكابس اللولبية:



أما المكابس الهيدروليكية فأنها تجهز قدرة أعلى بكثير مما يمكن للمكابس الميكانيكية تجهيزه إذ يمكن لسعتها أن تصل الى 75000 طن. تقوم هذه المكابس بتجهيز القدرة من خلال ضغط هيدروليكي. يستند مبدأ عملها على قانون باسكال إذ يتم تسليط قوة من خلال مكبس يضغط على مائع في اسطوانة صغيرة المقطع ضمن نظام هيدروليكي مغلق لتوليد قوة أكبر عند المقطع الأكبر من نفس المنظومة وبزيادة في القوة تتناسب مع النسبة بين مساحتي المقطع الكبير الى الصغير وكما مبين في الشكل أدناه:



والشكل التالي يعطي رسما توضيحيا لمبدأ الحدادة باستخدام المكابس الهيدروليكية:



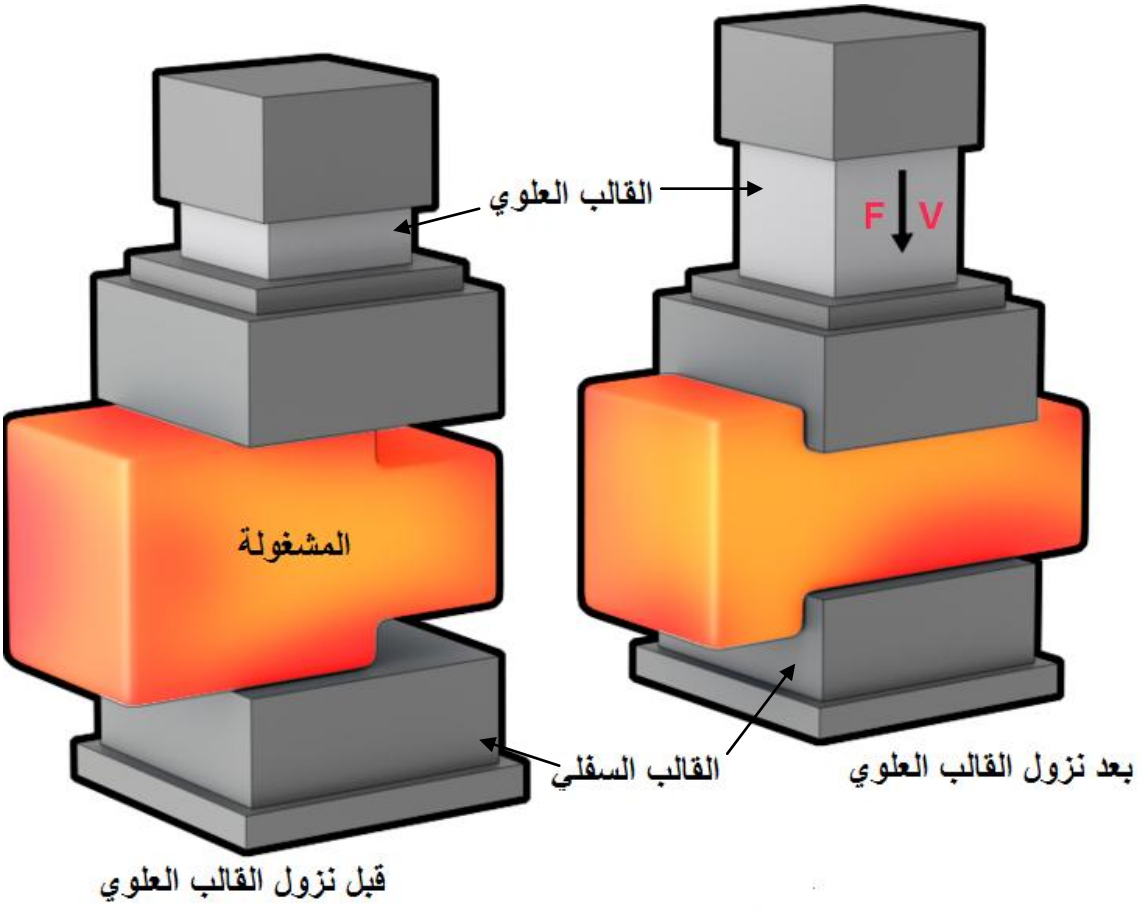
ثانيا: التصنيف حسب العملية Classification by Process

تقسم الحدادة بحسب نوع العملية الى:

1- الحدادة في القوالب المفتوحة Open-die Forging

تسمى أيضا بالطرق الحر Free Forging وتسمى كذلك بالحدادة في القوالب المسطحة Flat-die Forging ويتم فيها تشكيل الاجزاء المعدنية على الساخن عادة (وفي حالة التشكيل الساخن للفولاذ يتم التشكيل عادة بين 1000 و 1300 ^{o}م) بين قالب علوي

Upper Die متحرك ومرتبط بالمدك Ram وقالب سفلي Lower Die يرتبط بسندان ماكنة الحدادة أو فرش المكبس Press Bed. وكما مبين في الشكل أدناه:



عملية الحدادة في القوالب المفتوحة

تتميز الطريقة بما يلي:

أ- القوالب المستخدمة بسيطة الشكل وقليلة الكلفة.

ب- زمن التهيئة والاعداد للعملية قليل.

ت-تؤمن مدى واسع من الاوزان والحجوم الممكنة للمنتج إذ يمكن للوزن أن يتراوح من وزن يقل عن 1 كغم الى أوزان كبيرة تصل في حالات خاصة الى 275 طن ومن أبعاد صغيرة بحجم المسمار أو الدبوس إلى أعمدة بطول يصل الى 23 متر كالذي يستخدم في دافعات السفن Propellers.

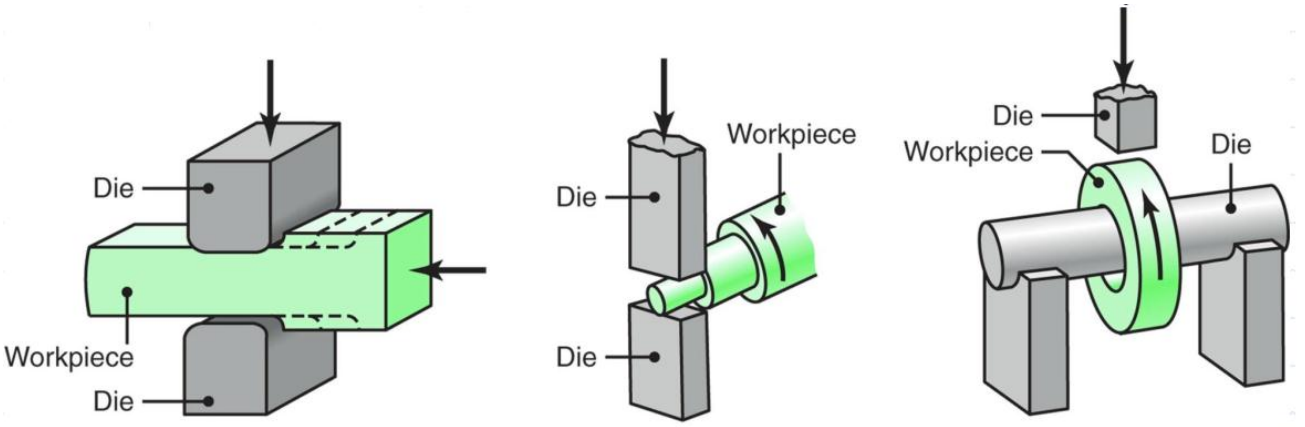
ث- غير مناسبة لتشكيل الاجزاء الدقيقة أو التي تتطلب تفاوتات Tolerances دقيقة.

ج- تتطلب مهارة عالية لدى العاملين.

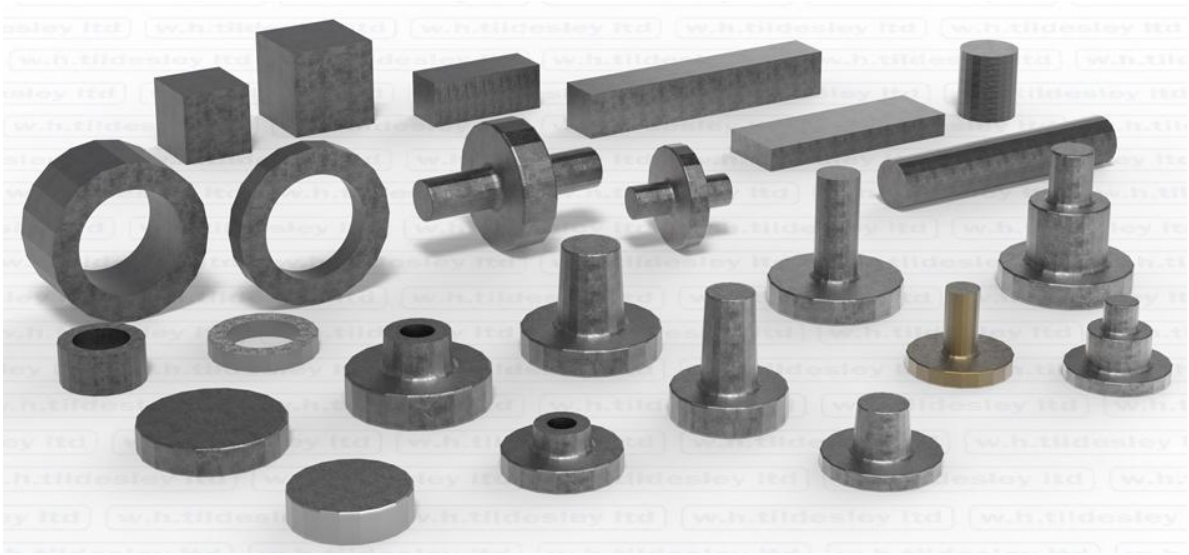
ح- غير مناسبة لتشكيل الاجزاء المعقدة.

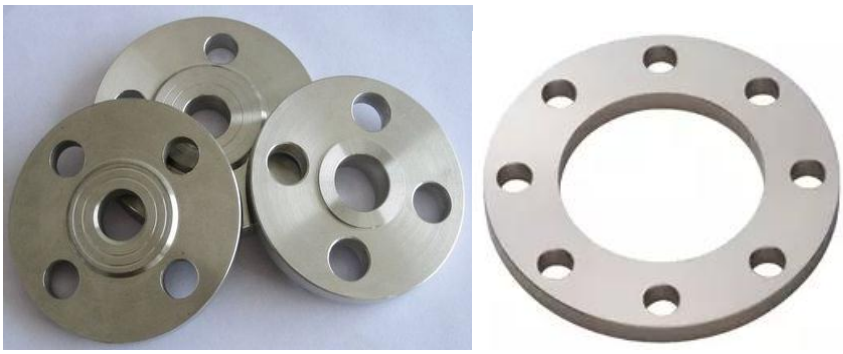
خ- تتطلب عمليات تشغيل للحصول على الدقة المطلوبة والشكل النهائي.

تنجز أغلب عمليات الحدادة في القوالب المفتوحة باستخدام قوالب مسحطة Flat Dies مع إمكانية استخدام قوالب بأشكال أخرى لانتاج الأعمدة بمقاطعها المختلفة والحلقات Rings ومحاور التدوير Spindles والفلنجات Flanges وغيرها من أشكال هندسية وكما مبين الاشكال التالية.



تقليل سمك عمود مستطيل **تقليل قطر عمود دائري** **تقليل سمك حلقة**



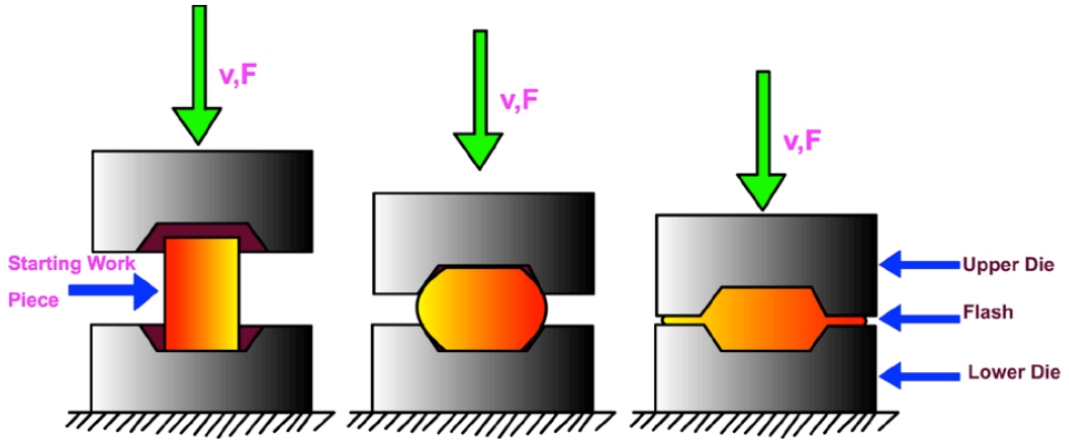


بعض منتجات الحدادة في القوالب المفتوحة كما هي بعد الحدادة أو بعد إجراء عمليات التشغيل والانهاء السطحي

2- الحدادة في القوالب المغلقة Closed-die Forging

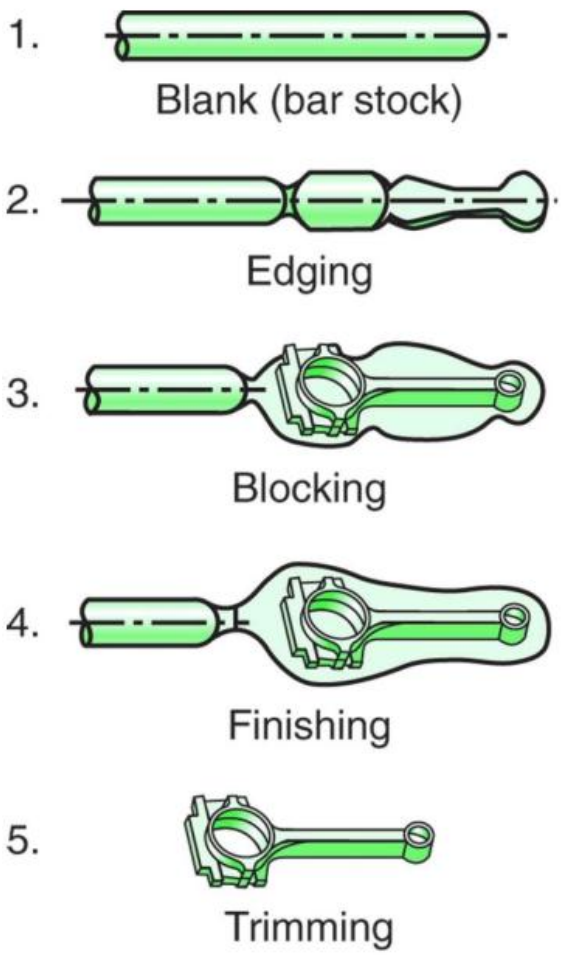
في هذه الطريقة يتم بعد تقارب القالبين العلوي والسفلي من بعضهما تطويق الخامة كليا أو جزئيا من قبل القالبين أي إحاطة القالبين بها وهي داخل التجويف بينهما. يتم ترك فجوة صغيرة بين القالبين العلوي والسفلي تسمى مجرى الومض Flash Gutter كي ينساب خلالها المعدن الزائد ويخرج بشكل ومض. يلعب الومض دورا أساسيا في أثناء تشكيل المعدن داخل تجويف القالب. إذ إن النسبة العالية بين طول الومض الى ارتفاعه

تؤدي الى حدوث احتكاك عالي في منطقة مجرى الومض مما يعرض معدن الومض لضغط عالي ومقاومة كبيرة ضد التشكيل. يساعد الضغط العالي في الومض على ملئ تجويف القالب. أما في الحدادة الساخنة فأن الومض يبرد بسرعة كبيرة مقارنة مع الخامة بسبب النسبة العالية لمساحته السطحية الى حجمه وبهذا يحافظ على الضغط العالي المطلوب لملئ تجويف القالب نتيجة ارتفاع أجهاد الانسياب له ومقاومته العالية ضد التشكيل. وبعد انتهاء العملية يتم إزالة الومض عن طريق التشغيل للحصول على الشكل النهائي المطلوب. قد تتطلب عملية الحدادة الساخنة إجراء تسخين مسبق للقالب كي لا يحصل تبريد سريع للخامة بسبب القالب البارد مما يمنع تحقق ملئ تام لفجوة القالب أو حصول تشقق في المنتج. تنجز العملية عادة بعدة مراحل متتابعة وكما مبين في الشكلين الآتيين:



المرحلة الأولية المرحلة الوسطية المرحلة النهائية

مراحل الحدادة في القوالب المغلقة



مراحل إنتاج ذراع توصيل في محرك إحتراق داخلي عن طريق الحدادة المغلقة

يتم في هذه العملية وضع الخامة Workpiece الساخنة (والتي تمتلك حجما مساويا لحجم المنتج المطلوب تقريبا) في القالب السفلي ليتم بعد ذلك تقدم القالب العلوي نحوها أو تقدم القالبين معا نحو بعضهما وإجبار الخامة على أخذ شكل التجويف الذي يكونه القالبان. تكون هذه العملية مصحوبة بومض أي زعنفة من المعدن عند خط الفصل بين القالبين وتتطلب عمليات إنهاء لاحقة.

تتميز الحدادة في القوالب المغلقة بما يلي:

أ- إنهاء سطحي أفضل من الحدادة في القوالب المفتوحة.
ب- التشغيل المطلوب قليل.
ت- كلف انتاج منخفضة في حالة الانتاج الكمي الواسع.
ث- دقة عالية في الابعاد وشكل قريب من الشكل النهائي المطلوب.
ج- غير مناسبة من الناحية الاقتصادية لانتاج دفعات صغيرة.
ح- كلف الانشاء أعلى مما في الحدادة بالقوالب المفتوحة.

تستخدم الحدادة في القوالب المغلقة في انتاج المحاور القلابة Crank Shafts وأذرع التوصيل Connecting Rods ومحاور الحدبات Cam Shafts لمحركات الاحتراق الداخلي والعدد اليدوية ومحاور التدوير Spindles والمحاور عامة والتروس Gears والعجلات Wheels بأنواعها المختلفة وأجزاء هندسية لاشكال لا حصر لها وكما مبين في الأشكال ادناه:

بعض منتجات الحدادة في القوالب المغلقة

3- الحدادة بلا ومض Flashless Forging

وتسمى أيضا بالحدادة في القوالب المغلقة الحقيقية True Closed-die Forging وفيها يكون تجويف القالب مغلق بشكل تام وبما يمنع الخامة من إخراج ومض بين القالبين. في هذه الطريقة يكون حجم الخامة مساوي تماما لحجم تجويف القالب وإن الزيادة أو النقصان في حجم الخامة يعطي منتجا معاباً. إذ إن النقصان في حجم الخامة يؤدي الى عدم امتلاء فجوة القالب في حين تؤدي الزيادة في الحجم الى حدوث تلف في القالب أو المكبس نفسه.

محاسن الطريقة:

أ- عدم وجود ضياع في المعدن بصورة ومض والذي يمثل 15-30% من الخامة المستخدمة (خامة البدء) في عمليات الحدادة االمغلقة.

ب- عدم الحاجة لعمليات إزالة الومض (عن طريق التشغيل) كما هو الحال في عمليات الحدادة االمغلقة.

ت-توفير في الطاقة (الطاقة المصروفة على تسخين وتشكيل الومض).

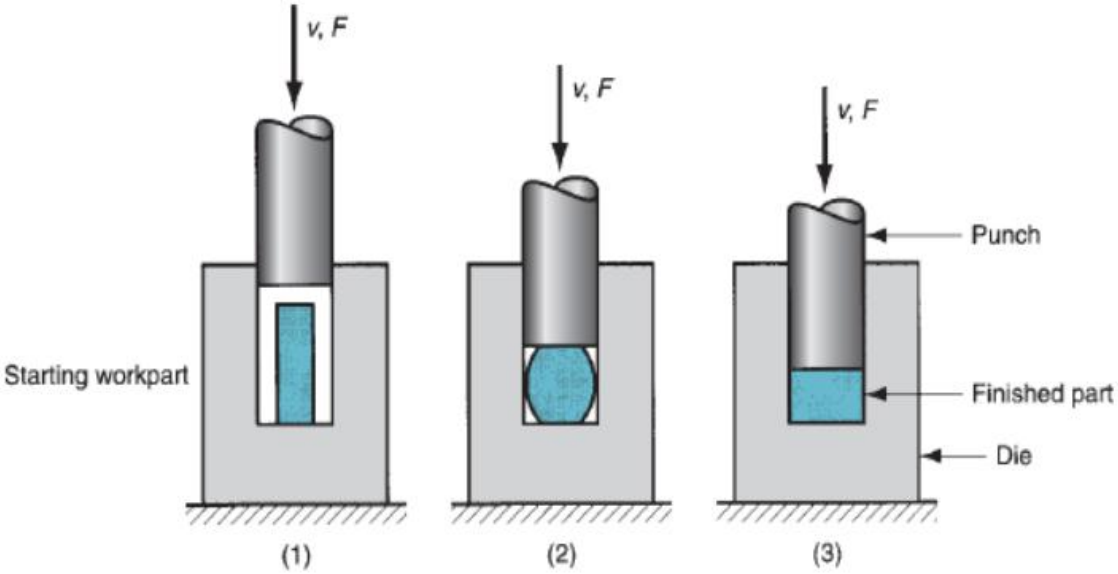
ث- دقة أعلى في الابعاد.

ج- معدل انتاج أعلى.

ح- خواص ميكانيكية أعلى.

خ- الجزء المنتج يكون بشكله النهائي.

أما مساوئ الطريقة هذه فهي الكلف العالية للقوالب والحاجة الى تزييت مضبوط. الشكل أدناه يعطي شكلا توضيحيا لعملية الحدادة بلا ومض:



الحدادة بلا ومض

تستخدم الطريقة في صنع نفس الاجزاء التي تصنع عن طريق الحدادة في القوالب المغلقة مع المزايا المذكورة في أعلاه. وفيما يلي صور لبعض الاجزاء الميكانيكية المصنعة بطريقة الحدادة بلا ومض:

إنتاج عن طريق الحدادة في القوالب المغلقة

إنتاج عن طريق الحدادة بلا ومض

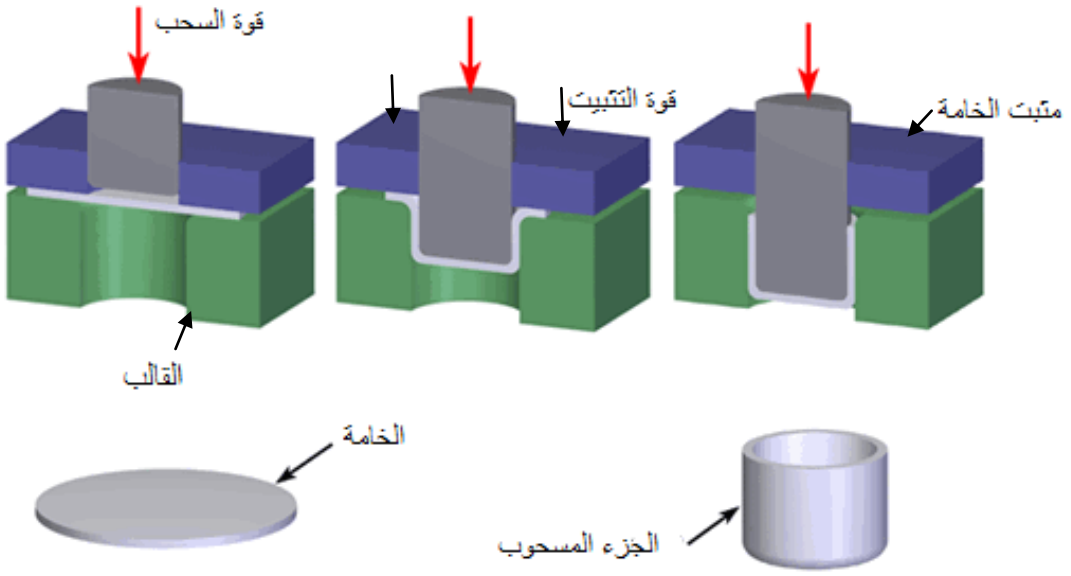
مقارنة بين ذراع توصيل منتج بالحدادة المغلقة والحدادة بلا ومض

أجزاء ميكانيكية متنوعة مصنعة بواسطة الحدادة بلا ومض

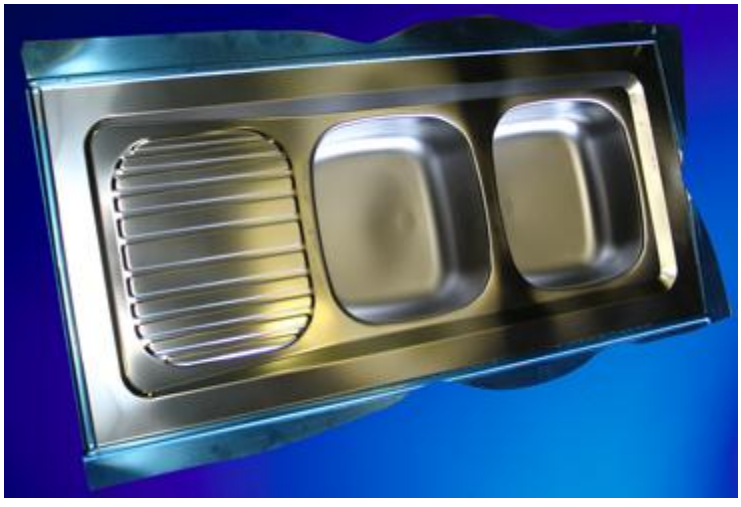
تروس وأجزاء ميكانيكية مصنعة بواسطة الحدادة بلا ومض

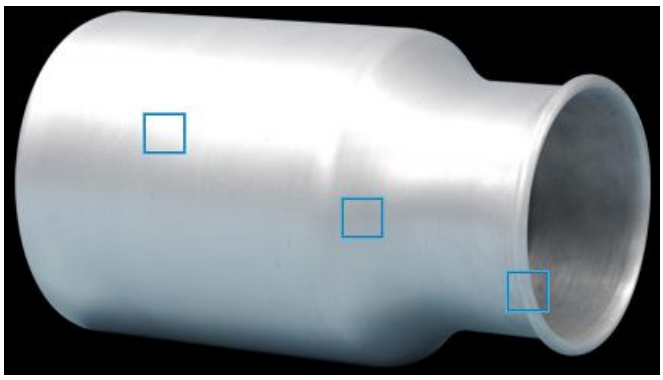
القوالب المستخدمة في الحدادة بلا ومض

السحب العميق Deep Drawing



السحب العميق هو إحدى عمليات تشكيل الصفائح المعدنية Sheet Metal Forming واسعة الاستخدام والذي يعرف كذلك بالسحب الكأسي Cup Drawing. تستعمل العملية في صنع الاشكال ذات الاشكال الكأسية Cup Shaped Objects مثل الآنية Utensils كآنية الطبخ متضمنة القدور Pots والمقلاة Pans والاطباق Dishes وغيرها، وأوعية الضغط pressure vessels واسطوانات الغاز Gas Cylinders والعلب Cans وأجزاء السيارات مثل خزانات الوقود وأحواض الزيت ومنتجات أخرى لا يمكن حصرها وكما مبين في الاشكال الآتية:



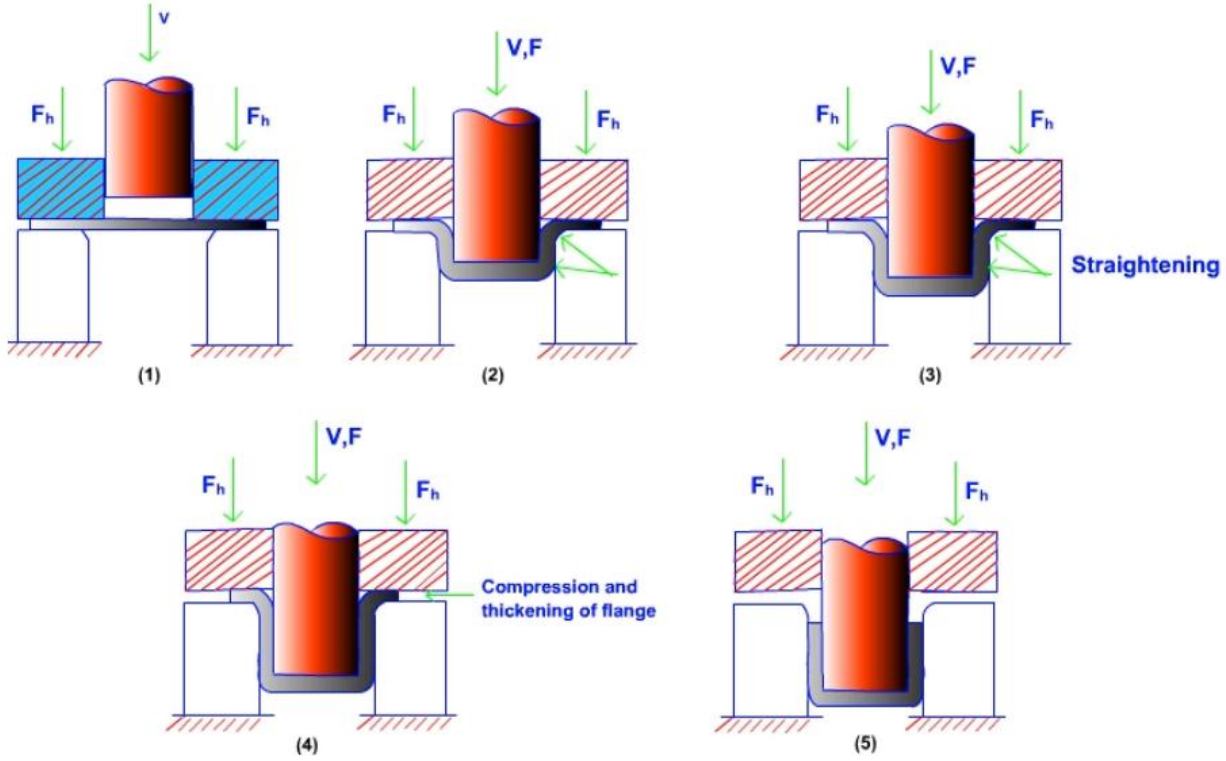


بعض منتجات عملية السحب العميق

العملية The Process

يتم في هذه العملية تجهيز الخامة التي تسمى Blank وهي عبارة عن صفيحة معدنية بشكل وأبعاد تتناسب مع شكل المنتج المطلوب. يتم بعد ذلك تشكيل الصفيحة الى كأس أو صندوق أو وعاء ثلاثي الابعاد. ولا تقتصر منتجات العملية على الاشكال ذات المقاطع الدائرية أو المربعة بل تتعداها الى أشكال بتفاصيل معقدة. يتم وضع الخامة فوق تجويف قالب السحب وتثبت في مكانها باستخدام كتلة أو حلقة تثبيت تسمى مثبت الخامة Blank Holder. يتم بعد ذلك كبس الخامة في تجويف القالب باستخدام خرامة صلدة Solid Punch لتأخذ الصفيحة في أثناء الكبس شكل تجويف القالب مع نهاية سفلية مسطحة وكما مبين في الاشكال الآتية. يزويد كل من القالب Die والخرامة بتقوس للحافات لتجنب حدوث عملية قص Shearing للصفيحة وتلفها في أثناء الكبس. تتم العملية بتأثير إجهادات شدية – انضغاطية.

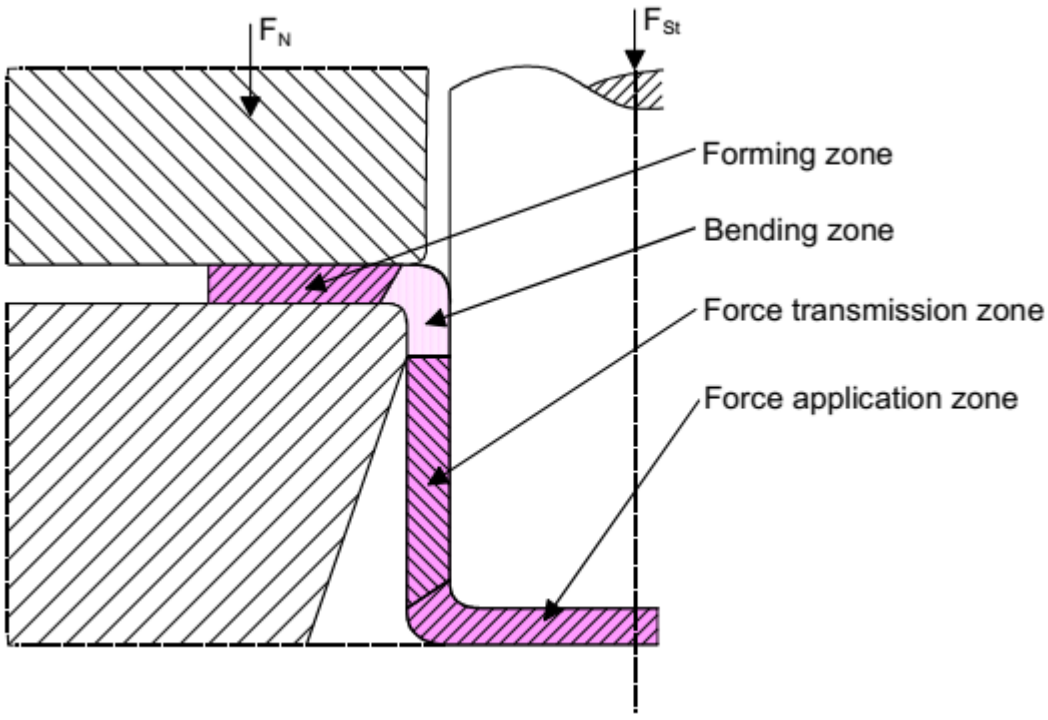
من الجدير بالذكر إن هناك سحب عميق Deep Drawing وسحب ضحل Shallow Drawing ينجز كلاهما بنفس العملية وبنفس المعدات تماما ولا يوجد معيار محدد تماما للتفريق بينهما ولكن يمكن القول بشكل عام أن السحب يسمى سحبا عميقا عندما تكون نسبة عمق المنتج الى قطره أكبر من 0.5 وما عدا ذلك يسمى سحبا ضحلا.



خطوات التشكيل في السحب العميق

أما الشكل أدناه فيوضح المناطق المختلفة من الخامة وهي قيد التشكيل ضمن الخطوات أعلاه بدءً من الخامة وانتهاءً بالكأس في عملية السحب العميق وهي:

1- منطقة التشكيل Forming Zone وهي المنطقة المحصورة بين السطح العلوي للقالب والسطح السفلي لمثبت الخامة والتي يتم فيها الحركة نصف القطرية للخامة نحو فتحة القالب بتأثير إجهاد شدي نصف قطري.
2- منطقة الحني Bending Zone ويتم عندها تحويل الحركة نصف القطرية للخامة الى حركة محورية بموازاة محور الخرامة. تتم عملية الحني عند حافة (مدخل) القالب والذي قلنا أن من الضروري تماما أن نتجنب الزاوية الحادة ونلجأ الى الحافة المستديرة (تزود الحافة بنصف قطر) لتجنب قص الخامة بدلا من حنيها.
3- منطقة نقل القوة Force Transmission Zone وهي المنطقة الواقعة بين منطقة الحني وقاعدة الكأس وتقوم بنقل القوة المسلطة (من قبل المكبس) من قاعدة الكأس الساندة للقوة الى منطقة الحني.
4- منطقة تطبيق القوة Force Application Zone أي منطقة اسناد القوة المسلطة من قبل المكبس وتمثل بقاعدة الكأس.



المناطق المختلفة من الخامة قيد التشكيل في السحب العميق

نسبة السحب Drawing Ratio

يمكن التعبير عن مقدار السحب المتحقق خلال عملية السحب العميق بواسطة نسبة السحب والتي تعطى بالعلاقة:

$$DR = \frac{D_b}{D_p} \dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (1)$$

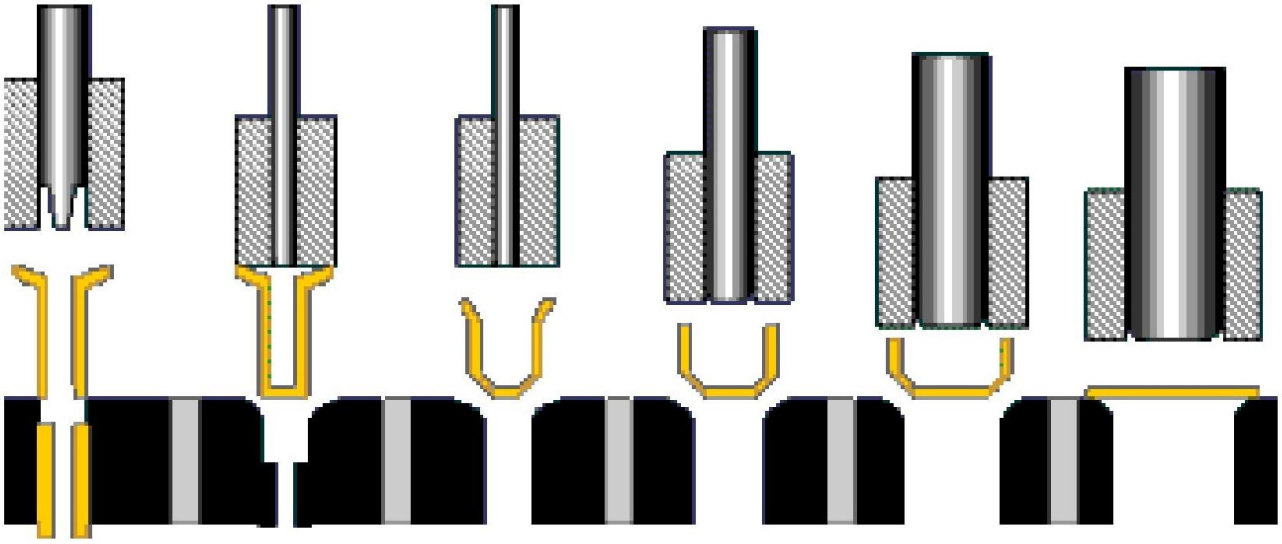
حيث إن:
DR هي نسبة السحب
D_b هو قطر الخامة Blank Diameter
D_b هو قطر الخرامة Punch Diameter

كلما كانت نسبة السحب أعلى كلما كان مقدار السحب أعلى. واعتمادا على هندسية المنتج والقوى المسلطة وخصائص المعدن فأن هناك حد لأقصى نسبة سحب يمكن الحصول عليها في السحبة الواحدة كما تعتمد نسبة السحب القصوى على عمق السحب ونصف قطر الخرامة ونصف قطر الخامة . أما بالنسبة للاجزاء غير الدائرية فيتم استخدام القطر الأكبر أو باستخدام المساحات السطحية لكل من المنتج والخرامة. وفي المعتاد تكون أقصى نسبة سحب خلال السحبة الواحدة تساوي 2 أو أقل.

يمكن التعبير عن مقدار السحب كذلك بواسطة التخفيض Reduction والذي يعطى بالعلاقة التالية. وفي هذه الحالة فان التخفيض r يكون 50% أو أقل.

$$\%r = \frac{(D_b - D_p)}{D_b} \times 100 \dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (2)$$

وبناء على ذلك، وعندما تكون نسبة السحب أعلى من 2 كحد أقصى أو نسبة التخفيض أعلى من 50% فأن سحبة واحدة لا تكفي للحصول على المنتج بعمقه النهائي مما يتطلب اكمال عملية السحب من خلال سحبات متعددة ومتتابعة وذلك بأجراء السحبة الاولى الى العمق الممكن واعتبار منتج السحبة الاولى خامة (مدخل) للسحبة الثانية وتكرر العملية لحين الوصول الى العمق المطلوب وكما مبين في الشكل التالي:



عملية سحب عميق بخمس سحبات متعاقبة للحصول على المنتج النهائي

كما قلنا فأن نسبة التشكيل القصوى الممكنة في السحبة الاولى (عملية السحب من الخامة) لا تتجاوز 50%، وهي قيمة نظرية أما عمليا فان نسبة السحب في السحبة الاولى تتراوح بين 35% - 45% اعتمادا على العوامل التي ذكرت سابقا وتتراوح في مرحلة اعادة السحب الاولى (سحب الكأس المنتج من السحبة الاولى) بين 20% - 30% وفي مرحلة اعادة السحب الثانية بين 13% - 16% وعند الحاجة الى سحب عميق شديد أي بنسبة سحب أو نسبة تشكيل عالية جدا فقد تتطلب العملية إجراء تخمير Annealing بين كل عمليتي اعادة سحب لاستعادة مطيلية المعدن.

تحليل عملية السحب العميق Analysis of Deep Drawing

1- إيجاد نسبة السحب من المعادلة (1)

$$DR = \frac{D_b}{D_p} \dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (1)$$

2- إيجاد نسبة التشكيل من المعادلة (2)

$$\%r = \frac{(D_b - D_p)}{D_b} \times 100 \dots\dots\dots \quad (2)$$

3- إيجاد ارتفاع الكأس

يتم ايجاد ارتفاع الكأس اعتمادا على فرضية ثبوت الحجم التي تفترض أن الحجم بعد التشكيل هو نفسه الحجم قبل التشكيل أي إن حجم معدن الخامة يساوي حجم معدن الكأس:

$V_b = V_c$

حيث إن V_b هو حجم معدن الخامة و V_c هوحجم معدن الكأس.
وفي حالة الكأس الاسطواني يتم إيجاد حجم معدن الخامة من العلاقة:

$$V_b = \frac{\pi}{4} (D_b)^2 \, t_o \dots\dots\dots\dots (3)$$

أما حجم الكأس الاسطواني فيستخرج من العلاقة:

$$V_c = \frac{\pi}{4} (D_p)^2 \, t_o + \pi \left(D_p + 2t_o \right) t_o \left(h - t_o \right) \dots\dots\dots (4)$$

وبمساواة المعادلتين 3 و 4 أعلاه يمكن إيجاد ارتفاع الكأس h

$$\frac{\pi}{4} (D_b)^2 \, t_o = \frac{\pi}{4} \left(D_p\right)^2 t_o + \pi \left(D_p + 2t_o \right) t_o \left(h - t_o \right) \dots\dots\dots (5)$$

إذ إن المجهول الوحيد في المعادلة 5 هو ارتفاع الكأس h أما t_o فهو سمك الصفيحة.

4- إيجاد القوة اللازمة للسحب Drawing Force

يمكن ايجاد القوة القصوى اللازمة للسحب من العلاقة التالية:

$$F_{max} = \pi D_p \, t_o \, UTS \left(\frac{D_b}{D_P} - 0.7 \right) \dots\dots\dots (6)$$

ويتم ايجاد قوة تثبيت الخامة من العلاقة التالية:

$$F_h = 0.015 \, Y \, \pi \, [\, (D_b)^2 - \left(D_p + 2.2 \, t_o + 2(DR) \right)^2 \dots\dots\dots (7)$$

حيث إن:
Fmax: قوة السحب القصوى
UTS: إجهاد الشد الأقصى لمادة الخامة
F_h: قوة تثبيت الخامة
Y: إجهاد الخضوع لمادة الخامة
DR: نسبة السحب

تشغيل المعادن (قطع) Machining (Cutting) of Metals

تشغيل المعادن هو إحدى عمليات التصنيع التي يتم فيها الحصول على الشكل المطلوب بأزالة الجزء الزائد من المشغولة وتوجد طرائق تشغيل عديدة منها الخراطة Turning والتفريز Milling والقشط Planning والتثقيب Drilling والتجليخ Grinding. يتم في طرائق التشغيل التقليدية إزالة المادة بشكل نحاتة (رايش) Chip باستخدام عدد ذات حد أو حدود قاطعة تسمى عدد القطع Cutting Tools. تستخدم عمليات تشغيل المعادن في إنتاج عدد يصعب إحصاؤه من الاجزاء مثل البراغي والصواميل والتروس والقوالب كقوالب السباكة وقوالب السحب وقوالب البثق وقوالب السحب العميق وقوالب حقن اللدائن والمحاور والاعمدة والخوابير ومجاري الخوابير والأخاديد والريش التوربينية والمساند وإجراء عمليات الانهاء وضبط أبعاد المسبوكات والمطروقات وغيرها.

عدد القطع Cutting Tools

عدة القطع هي الاداة المستخدمة في إزالة المعدن وتختلف هندسية العدة من عملية تشغيل لأخرى ولكنها تقسم بشكل عام الى عدد أحادية الحد القاطع مثل أقلام الخراطة والقشط وعدد متعددة الحدود القاطعة مثل المثاقب الحلزونية وسكاكين التفريز وعجلات التجليخ. تتعرض عدد القطع الى ظروف قاسية في أثناء التشغيل إذ تتعرض الى درجات حرارية عالية قد تزيد عن 1000 ^{o}C وقوى ضغط وقوى حني عالية وكذلك قوى صدم عالية في العديد من العمليات علاوة على تعرض العدة الى اجهادات حرارية عالية نتيجة دورات التسخين والتبريد السريعة والمتكررة. كما تتعرض العدد الى بلى وسوفان نتيجة الاحتكاك مع المشغولة والنحاتة. ولذلك فإن على عدد القطع أن تمتلك مجموعة من المواصفات التي تؤهلها لتحمل هذه الظروف.

مواصفات عدد القطع

1- الصلادة Hardness وتعرف الصلادة بأنها مقاومة الانغراز أو مقاومة الخدش من قبل مادة أخرى. يجب أن تكون صلادة العدة أعلى من صلادة المشغولة وكلما زاد الفرق كلما كان اختراق العدة للمشغولة أسهل. وبصورة عامة يجب أن تزيد صلادة العدة على صلادة المشغولة بما لا يقل عن 30 – 50%

2- الصلادة عند درجات الحرارة العالية Hardness at Elevated Temperatures ويقصد بها محافظة العدة على صلادتها ومقاومتها عند درجات الحرارة العالية التي تتعرض لها العدة في أثناء التشغيل. تدعى هذه الخاصية أيضا بالصلادة الحارة Hot Hardness وتصبح هذه الخاصية أكثر أهمية عند سرعات القطع العالية بهدف زيادة الانتاجية.

3- الجساءة Toughness وهي قابلية المادة على امتصاص الطاقة بدون فشل. وهذه الخاصية مهمة لحفظ العدة من التشظي أو التكسر في أثناء تعرضها لقوى صدمية في بداية شوط الشغيل أو في التشغيل المتقطع كما في حالة التفريز والقشط.
4- مقاومة البلى Wear Resistance توجد حركة نسبية بين الخامة والعدة وكذلك النحاتة (الرايش) والعدة مما يتطلب مقاومة العدة للبلى الناتج من هذا الاحتكاك لتأمين عمر مناسب للعدة قبل الاستبدال أو إعادة الحد.
5- مقاومة للصدمة الحرارية Thermal Shock Resistance إذ تتعرض العدة الى إجهادات حرارية ناتجة من دورات التسخين والتبريد السريعة.
6- الاستقرارية الكيميائية Chemical Stability وتسمى أيضا بالخمولية Inertness ويقصد بها خمولية العدة تجاه مادة المشغولة وعدم حدوث تفاعل بينهما وكذلك الخمولية تجاه موائع التبريد والجو المحيط.
7- التوصيلية الحرارية Thermal Conductivity التي يجب أن تكون عالية لتبديد الحرارة بأعلى سرعة ممكنة وتجنب الزيادة المفرطة في حرارة العدة والتي تقصر عمرها.
8- سعر مفضل Favorable Cost وذلك لتقليل كلف الانتاج.

المواد التي تصنع منها عدد القطع

يوجد العديد من مواد عدد القطع المستخدمة في عمليات التشغيل والتي مرت بمراحل طويلة من التطور إلى أن وصلت إلى ما هي عليه اليوم من تنوع في المواد المستخدمة فى صنعها. إن الإختلافات الموجودة بين مواد عدد القطع أوجدت تنوعاً كبيراً في تطبيقات هذه العدد ومجالات إستخدامها. إن العدة المثالية ليست بالضرورة التي تكون أعلى كلفة أو أقل كلفة بل هي العدة التي يمكنها أداء العمل بسرعة واقتصادية. وفيما يلي المواد المستخدمة في تصنيع عدد القطع:

1- صلب العدة Tool Steel

ويقسم صلب العدة المستخدم في صنع عدد القطع الى نوعين هما:

أ- الصلب الكربوني Carbon Steel والذي يحتوي على كربون بنسبة تتراوح بين 0.6 – 1.5% مع كميات صغيرة من السليكون والكروم والمنغنيز والفناديوم لتنعيم البنية المجهرية. تستخدم هذه العدد بعد تسخينها الى درجات حرارية تتراوح بين 750-835 ^{o}C والاخماد السريع في الماء للحصول على بنية مارتنزايتية ومن ثم المراجعة عند درجة حرارة تتراوح بين 200-350 ^{o}C وتتميز هذه العدد بصلادة حارة منخفضة ومقاومة بلى واطئة وتجد

استخدامات محدودة منها عدد القطع اليدوية وعدد تشغيل الخشب إذ لا يمكن استخدامها عند درجات حرارية تزيد عن 200 ^{o}C تقريبا.

ب- الصلب واطئ السبائكية Low Alloy Steel ويحتوي هذا النوع من الصلب على عدد من العناصرالسبائكة مثل التنكستن والمنغنيز والكروم والفناديوم بنسب تقل عن 10% ويتم عادة إصلاد هذا النوع من الصلب في الهواء مما يجنبه خطر التشقق والتشوة في أثناء الاخماد في الماء.

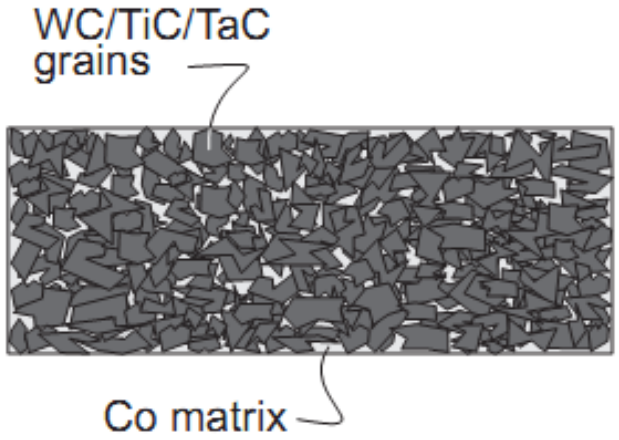
2- صلب السرعات العالية High Speed Steel (HSS)

ويعرف بأنه صلب عالي السبائكية High Alloy Steel إذ يحتوي على عناصر سبائكية هي الفناديوم والكوبلت والمولبدنيوم والتنكستن والكروم والتي تضاف لرفع مقاومة البلى والصلادة الحارة والجساءة. تحتوي 95% من عدد صلب السرعات العالية على 5-10% مولبدنيوم و1.5-10% تنكستن و 1-4% فناديوم و 4% كروم و 5-10% كوبلت. تستخدم هذه العدد عند سرعات قطع تتراوح بين 10-60 m/min . هذه العدد مناسبة للاستخدام في تشغيل الاشكال المعقدة عند سرعات القطع الواطئة والمتوسطة وفي أعمال القطع المتقطع بسبب جساءتها العالية. الاستخدام الشائع له في الوقت الحالي هو عدد التسنين والمثاقب الحلزونية وعدد البرغلة Reaming (ضبط أبعاد الثقوب) وعدد قطع التروس وعمل الاخاديد. تستخدم هذه العدد عند درجات حرارية تصل الى 600 ^{o}C تقريبا. يمكن لهذه العدد أن يعاد حدها ويعاد استخدامها مرارا. جدير ذكره أن العناصر السبائكية الداخلة في تصنيع هذه العدد عالية الكلفة. الصور أدناه تبين بعض عدد القطع المصنعة من صلب السرعات العالية.

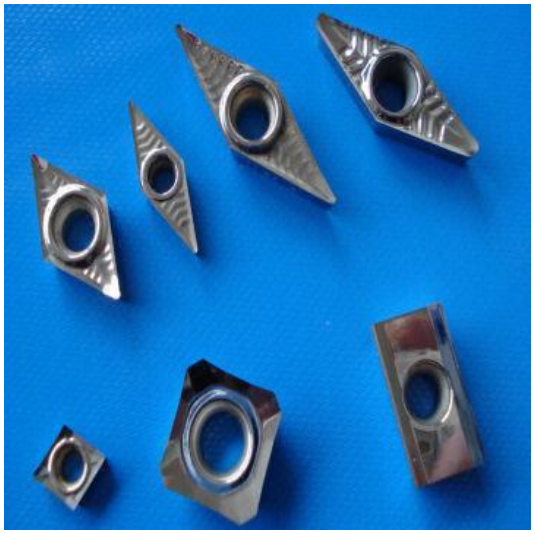
3- الكربيدات المسمنتة Cemented Carbides

وتعد من أهم عدد القطع المستخدمة حاليا بسبب خصائصها الممتازة ومنها مقاومتها العالية وصلادتها الحارة العالية ومقاومتها للبلى وجساءتها إذ إنها تحافظ على مقاومة البلى لغاية 500 ^{o}C وعلى الصلادة لغاية 1000 ^{o}C ويمكن استخدامها عند سرعات قطع تزيد كثيراعن السرعات الممكنة في صلب السرعات العالية إذ تستخدم عند سرعات قطع تتراوح بين 150 - 30 m/min . تستخدم هذه العدد بصورة لقم Inserts على شكل مثلث أو مربع أو معين وغيرها من الاشكال الهندسية وتصنع عن طريق تقنيات ميتالورجيا المساحيق Powder Metallurgy إذ يتم خلط المساحيق ومزجها جيدا ومن ثم تكبس في قوالب حسب الشكل المطلوب. يتبع ذلك التلبيد Sintering عند درجات حرارية

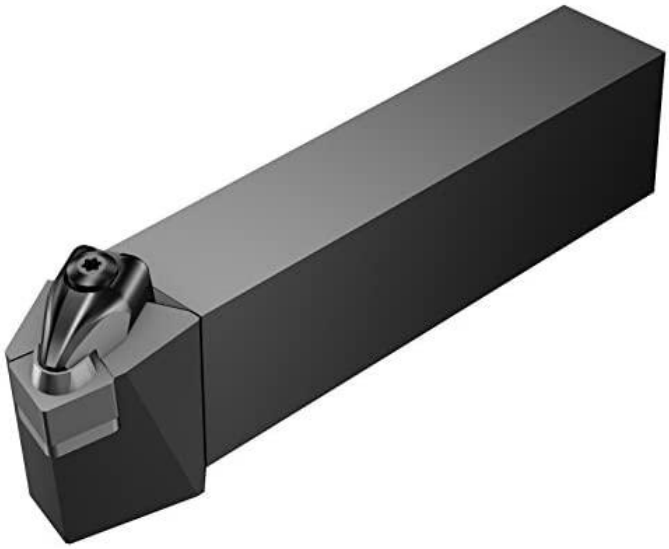
عالية بوجود مادة رابطة مثل معدن الكوبلت للحصول على المواصفات النهائية. عادة ما تتكون المساحيق من كربيد التنكستن WC وكربيد التيتانيوم TiC وكربيد التنتاليوم TaC ويقوم معدن الكوبلت بالربط بين جسيمات هذه الكربيدات في أثناء التلبيد وكما مبين في الصورة أدناه:

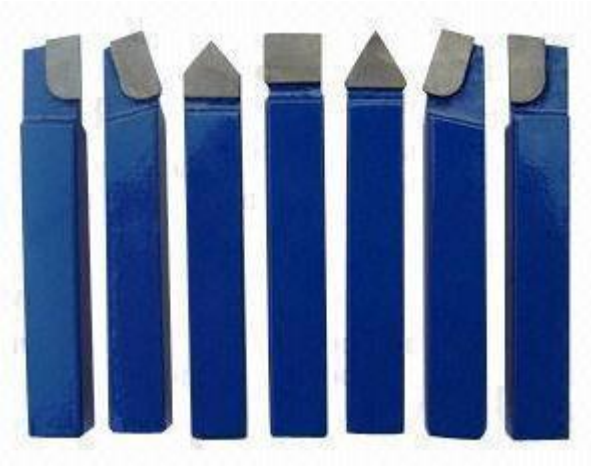


أما الصور الآتية فتبين أنواع اللقم الكربيدية المستخدمة في تشغيل المعادن:



يتم تثبيت هذه العدد على حامل العدة Tool Holder باستخدام المشبك Clamp أو بلحام التبريز (لحام البراص) Brazing. ويفضل استخدام المشابك في التثبيت لأنها تتيح امكانية تدوير العدة في مكانها من الحامل بعدما يبلى (يعمى) الحد القاطع لاستخدام بقية الحدود القاطعة لنفس اللقمة قبل رميها. هذه العدد لا يتم إعادة حدها مطلقا بينما يتم إعادة حد العدد المثبتة باللحام. والشكل التالي يبين طريقتي تثبيت اللقم على حامل العدة:





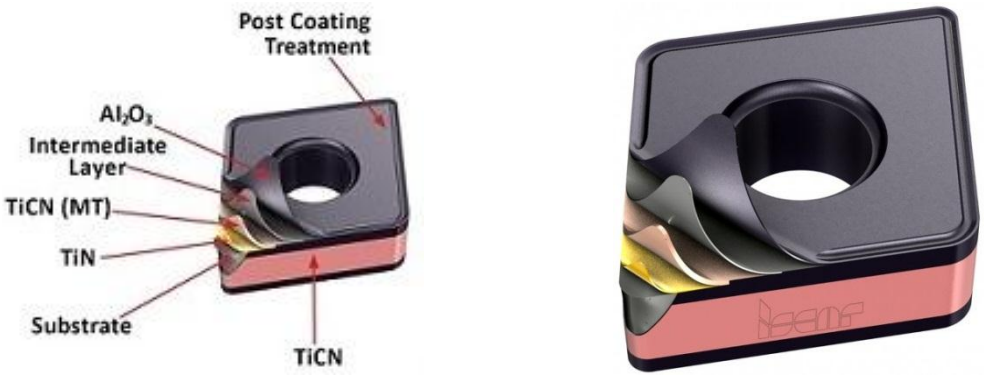
التثبيت بواسطة المشبك

التثبيت عن طريق اللحام

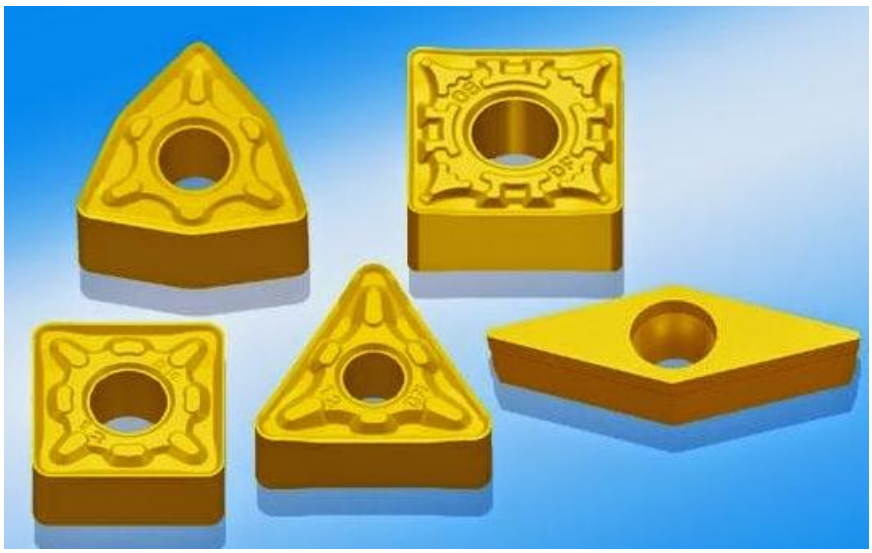
4- العدد الكربيدية المسمنتة المطلية Coated Cemented Carbide Tools

وتشكل هذه العدد في الوقت الحاضر بين 80-90% من إجمالي لقم القطع. إذ يتم طلاء العدد الكربيدية بطبقة يتراوح سمكها بين 4-7µm من كربيد التيتانيوم TiC أو نتريد التيتانيوم TiN أو من أوكسيد الألمنيوم Al_2O_3 أو من الماس. عادة ما يتم الطلاء بطبقات

متعددة من هذه المواد لزيادة كفاءة أداء العدد. يتم الطلاء بهدف تقليل الاحتكاك وزيادة عمر العدة وزيادة سرع القطع إذ يمكن استخدامها في سرعات قطع تتراوح بين 250 - 100 m/min. الصورة التالية تبين رسما تخطيطيا للعدد الكربيدية المسمنتة المطلية بطبقات متعددة:



والصورة التالية توضح مظهر العدد الكربيدية المطلية:



والصورة التالية تبين رسما توضيحيا لانواع الطلاء المطبق على العدد الكربيدية المسمنتة وكما يلي:

أ- عدة مطلية بطبقة طلاء واحدة.

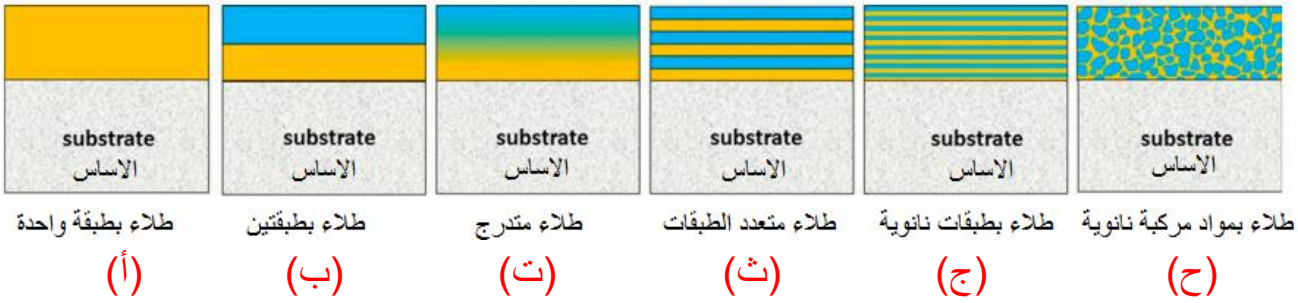
ب- عدة مطلية بطبقتي طلاء.

ت- عدة مطلية بطبقات طلاء متعددة متدرجة لا يوجد فصل بين مواد الطلاء المختلفة.

ث- عدة مطلية بطبقات طلاء متعددة.

ج- عدة مطلية بطبقات طلاء نانوية متعددة.

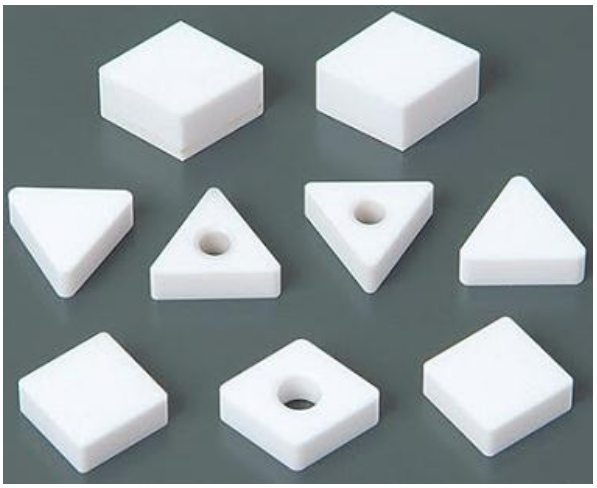
ح- عدة مطلية بطبقة طلاء من مواد مركبة نانوية وفيها يتم خلط مواد الطلاء معا وتطبيقها بطبقة واحدة متعددة المواد.

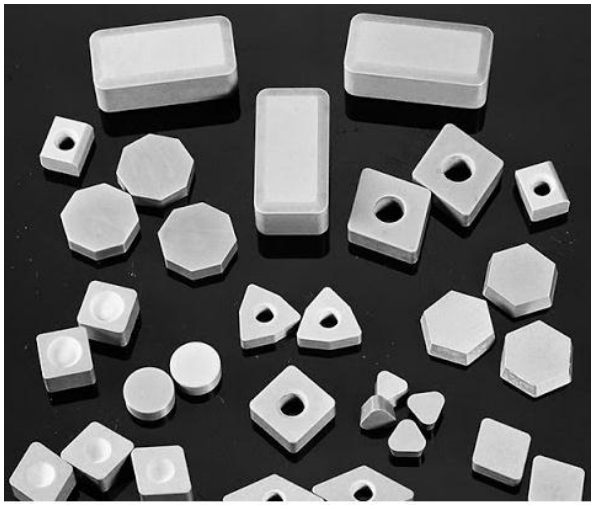


5- العدد السيراميكية Ceramic Tools

توجد أنواع مختلفة من المواد السيراميكية المستخدمة في صنع عدد القطع ومن أقدمها عدد القطع المصنعة من الالومينا Al_2O_3 والذي يضاف اليه نتريد السليكون Si_3N_4 وقد يضاف اليهما اوكسيد الزركونيوم ZrO_2 لتحسين الجساءة ولكنه يقلل الصلادة. كما يضاف كربيد السليكون SiC أحيانا لتحسين الجساءة ومقاومة الصدمة الحرارية.

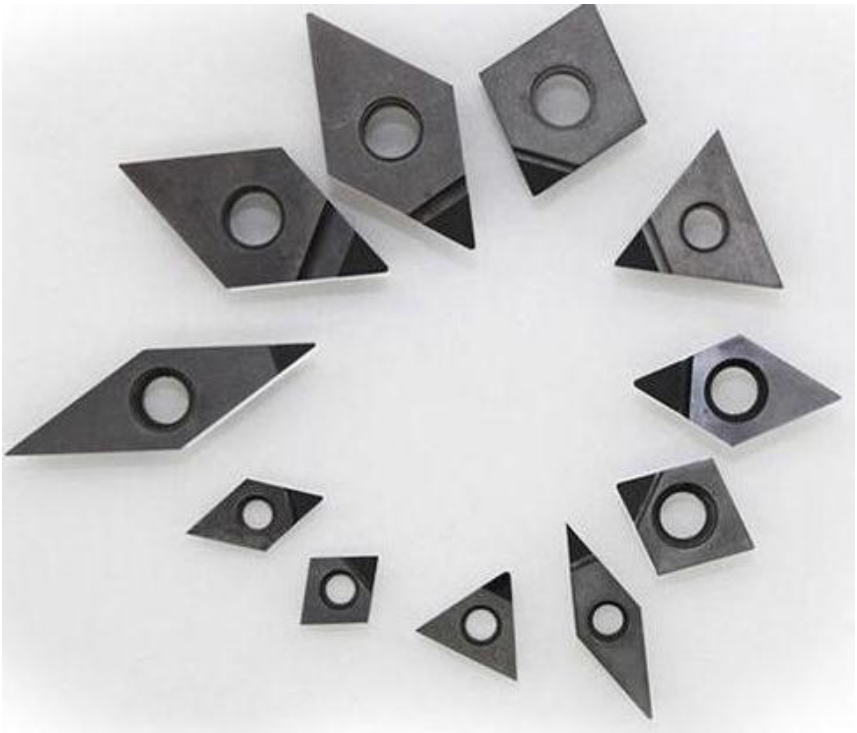
تمتلك هذه العدد مقاومة بلى وصلادة حارة واستقرارية كيميائية أعلى مما في عدد صلب السرعات العالية والعدد الكربيدية المسمنتة. أما المأخذ الرئيسي عليها فهو جساءتها المنخفضة والحاجة في أغلب الاحيان الى استخدام زاوية جرف Rake Angle سالبة لمنع تشظي العدة بسبب جساءتها المنخفضة ومقاومة الشد المنخفضة لها واستخدامها على مكائن تشغيل جاسئة قليلة الاهتزاز. تستخدم هذه العدد للقطع في سرع عالية جدا تتراوح بين 150 - 650 m/min وفيما يلي صورا لعدد قطع سيراميكية أساسها أوكسيد الالمنيوم:





6- عدد الماس Diamond Tools

يعد الماس أصلد مادة معروفة حاليا. تصنع هذه العدد من بلورات صغيرة جدا من الماس الصناعي موزعة في أرضية كربيدية للربط بينها. الاستقرارية الكيميائية لعدد الماس منخفضة ولهذا فهي غير مناسبة في تشغيل الصلب الكربوني أو النيكل أو التيتانيوم أو سبائك الكوبلت. هذه العدد مناسبة أكثر لاعمال التشغيل النهائي Finishing Cuts الخفيفة غير المتقطعة. وتستخدم بشكل رئيسي في التشغيل عالي السرعة لسبائك الالمنيوم-سليكون والمواد المركبة والمواد غير المعدنية. تستخدم هذه العدد عند سرع تتراوح بين - 200 2000 m/min وفيما يلي صورا لانواع من عدد الماس:



عمر أداة القطع Tool Life

تتعرض أداة القطع في أثناء التشغيل الى بلى نتيجة ظروف الاحتكاك والتي تتسبب في بلى العدة أي سوفانها وفقدانها التدريجي للمادة عند الاسطح التي تتعرض الى الاحتكاك. يؤدي ذلك الى انخفاض كفاءة أداء العدة مما يتطلب إعادة الحد أو الاستبدال.

ويعرف عمر أداة القطع بطرائق متعددة منها:

1- هو الوقت المستغرق بين حدتين متعاقبتين للاداة.
2- هو الفترة الزمنية التي تقوم العدة خلالها بتشغيل مقنع.
3- هو الزمن الكلي المتراكم للتشغيل قبل حصول فشل للعدة.

يتأثر عمر أداة القطع بظروف التشغيل التي يتعرض لها ومنها سرعة القطع وعمق القطع ومعدل التغذية ومادة المشغولة وظروف التبريد وغيرها إلا إن سرعة القطع هي المتحكم الرئيسي في عمر الاداة وقد ربط العالم Taylor في العام 1907م بعد تجارب دامت لسنين العلاقة بين سرعة القطع وعمر الاداة بالعلاقة المعروفة بأسمه وكالآتي:

$$V\,T^{n} = C$$

أي إن:

$$V_1\,T_1^{\,n} = V_2\,T_2^{\,n} = V_3\,T_3^{\,n} = C$$

V هي سرعة القطع (م/دقيقة)

T هو عمر أداة القطع (دقيقة)

n أس يعتمد على مادة العدة ومادة الخامة وظروف التشغيل ويأخذ القيم التالية

n = 0.1 to 0.2; for H.S.S. tools

0.2 to 0.4; for Carbide tools

0.4 to 0.6; for Ceramic tools

C هو ثابت التشغيل والذي يمكن ايجاده عمليا أو يؤخذ من جداول وتعتمد قيمته على مادة العدة ومادة المشغولة ومعدل التغذية وعندما يكون عمر الاداة دقيقة واحدة يصبح:

C = V

لذا يمكن التعبير عن الثابت C فيزيائيا (المعنى الفيزيائي له) بأنه يمثل سرعة القطع التي يكون عمر الاداة عندها دقيقة واحدة.

وقد طورت هذه المعادلة لاحقا الى أخرى أكثر عمومية تأخذ عمق القطع ومعدل التغذية بنظر الاعتبار وكما في الصيغة التالية:

$$V\ T^n\ d^x\ S^y = C$$

أي إن عمر الاداة يعطى بالعلاقة:

$$T^n = \frac{C}{V\ d^x\ S^y}$$

حيث إن:

d هو عمق القطع (ملم)

S هو معدل التغذية (ملم/دقيقة)

x و y هما أسّان يؤخذان من جداول أو يتم ايجادهما من التجارب العملية.

يلاحظ من المعادلتين أعلاه ما يلي:

1- يقل عمر الاداة بزيادة سرعة القطع.
2- يقل عمر الاداة بزيادة عمق القطع ومعدل التغذية.
3- المتحكم الاكبر في عمر الاداة هما سرعة القطع ودرجة الحرارة التي ترتبط مباشرة بسرعة القطع.

مثال 1: عند القطع بسرعة 250 m/min كان عمر الاداة 9 دقائق. جد سرعة القطع التي تعطي عمرا للاداة مقادره 160 دقيقية إذا علمت أن قيمة الأس n هي 0.22

الحل:

نجد قيمة الثابت C من معادلة تايلور اعتمادا على معطيات الحالة الاولى:

$$V_1\ {T_1}^n = C$$

$$250\ X\ 9^{0.22} = C$$

$$C = 405.39$$

وبمعرفة الثابت C وقيمة الأس n وعمر الاداة في الحالة الثانية يمكن أيجاد سرعة القطع المقابلة لهذا العمر باستخدام معادلة تايلور نفسها وكما يلي:

$$V_2\ T_2^{\ n} = C$$

$$V_2 \text{ X } 160^{0.22} = 405.39$$

$$V_2 = 132.73 \text{ m/min}$$

مثال2: في ظروف قطع معينة أعطي عمر أداة القطع المصنوعة من صلب السرعات العالية بالعلاقة:

$$V\ T^{0.125} = C_1$$

ولعدة مصنوعة من كربيد التنكستن بالعلاقة:

$$V\ T^{0.2} = C_2$$

قارن بين عمر الاداة لكلا العدتين عند سرعة قطع قدرها 30 m/min إذا علمت أن عمر الاداة لكلا العدتين هو 170 دقيقة عند سرعة قطع مقدارها 24 m/min

الحل:

1- التشغيل بعدة قطع من صلب السرعات العالية:

أ- نجد قيمة الثابت C بمعلومية سرعة القطع الأولى وعمر الاداة

$$V_1\ T_1^{\ 0.125} = C$$

$$24 \text{ X } 170^{0.125} = C$$

$$C = 45.61$$

ب- نجد عمر اداة القطع للسرعة الثانية بعدما علمت قيمة الثابت C:

$$30 \text{ X } T_2^{\ 0.125} = 45.61$$

$$T_2 = 28.52 \text{ min}$$

2- التشغيل بعدة قطع من كربيد التنكستن:

أ- نجد قيمة الثابت C بمعلومية سرعة القطع الأولى وعمر الاداة

$V_1 T_1^{0.2} = C$

$24 X 170^{0.2} = C$

$C = 67.035$

ب- نجد عمر اداة القطع للسرعة الثانية بعدما علمت قيمة الثابت C:

$30 X T_2^{0.2} = 67.035$

$T_2 = 55.71$ min

ويلاحظ أن عمر أداة كربيد التنكستن هو ضعف عمر أداة HSS تقريبا

واجب بيتي1: إذا علمت أن n = 0.5 وأن C = 90 وباستخدام معادلة تايلور جد النسبة المئوية للزيادة في عمر أداة القطع عندما تقل سرعة القطع بمقدار:

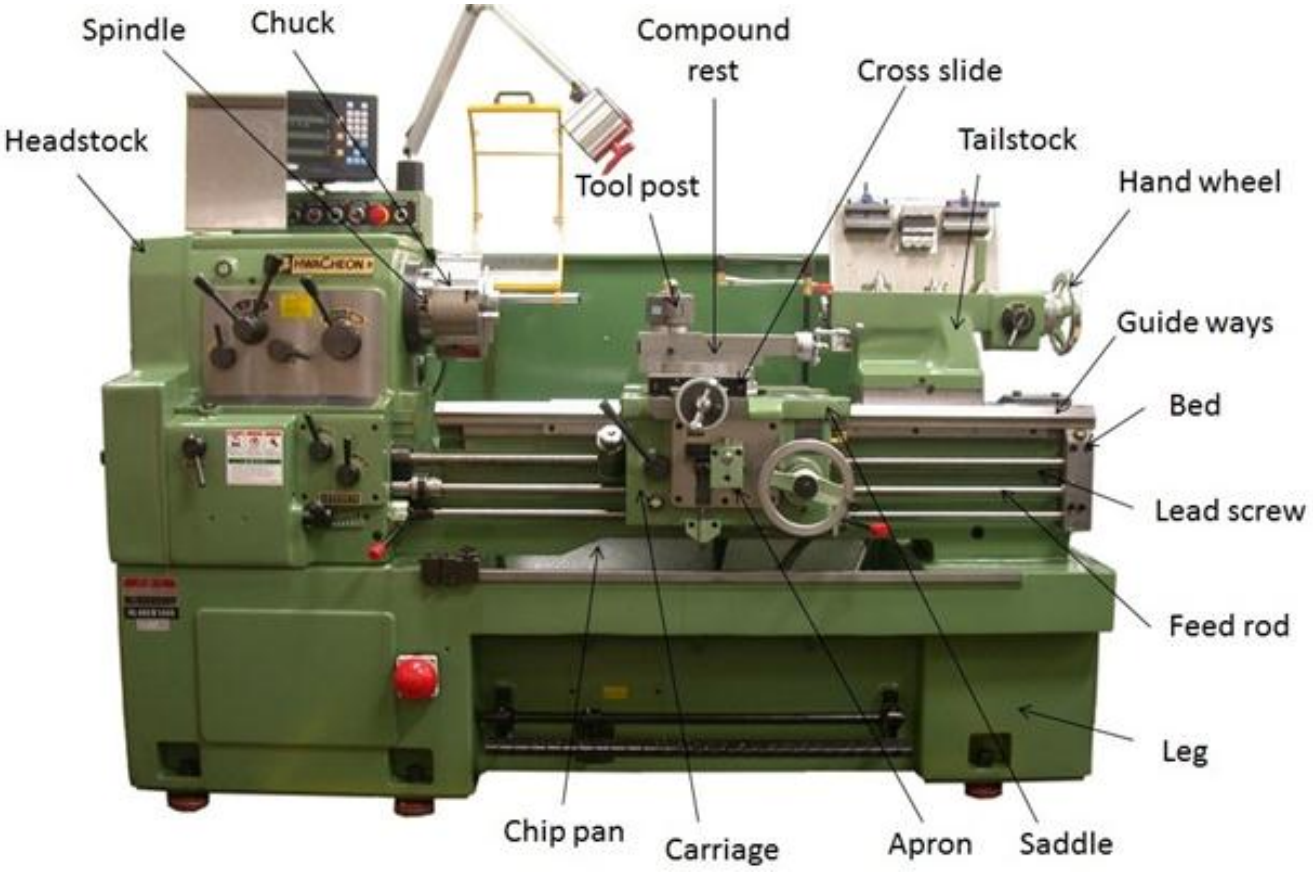
أ- 50%

ب- 75%

واجب بيتي2: وجد في عملية خراطة اسطوانية لعمود دائري المقطع قطره 24mm أن عمر قلم الخراطة هو 9 دقائق عندما كانت السرعة الدورانية 300 rpm وباستخدام عدة من HSS. وعند خراطة نفس العمود بسرعة دورانية مقدارها 250 rpm ازداد عمر القلم الى 48.5 دقيقة. جد عمر القلم عندما تصبح السرعة الدورانية 280 rpm

فيما يلي أهم عمليات التشغيل التقليدية:

أولا: الخراطة Turning



الشكل أعلاه يمثل ماكنة الخراطة مؤشرا على أجزائها والتي سبق لكم دراستها والتعرف عليها في الصف الاول من دراستكم الجامعية.

الخراطة هي إحدى عمليات تشغيل المعادن واسعة الاستخدام لانتاج أجزاء دورانية (غاليا) بإزالة الجزء الزائد من المشغولة باستخدام عدة أحادية الحد القاطع تسمى قلم الخراطة. تتطلب عملية الخراطة ماكنة خراطة ومشغولة ووسيلة تثبيت المشغولة وعدة القطع. في هذه العملية تعطى المشغولة حركة القطع الرئيسية وهي حركة دورانية مستمرة تستمدها الخامة من محور الدوران الرئيسي Spindle بينما تقوم العدة بحركة التغذية وهي، في حالة الخراطة الاسطوانية حركة خطية مستمرة بموازاة محور الخامة. وفيما يلي بعض التعاريف الاساسية لعملية الخراطة:

1- سرعة القطع Cutting Speed (V) وهي سرعة سطح المشغولة نسبة الى حافة قلم الخراطة خلال عملية القطع وتعطى بالعلاقة:

$$V = \frac{\pi D N}{1000} \ m/min$$

حيث إن:

D هو متوسط قطر المشغولة ويحسب من العلاقة (ملم)

$$D = \frac{D_1 - D_2}{2}$$

D_1: قطر المشغولة قبل التشغيل

D_2: قط المشغولة بعد التشغيل

N: السرعة الدورانية للمشغولة (rpm)

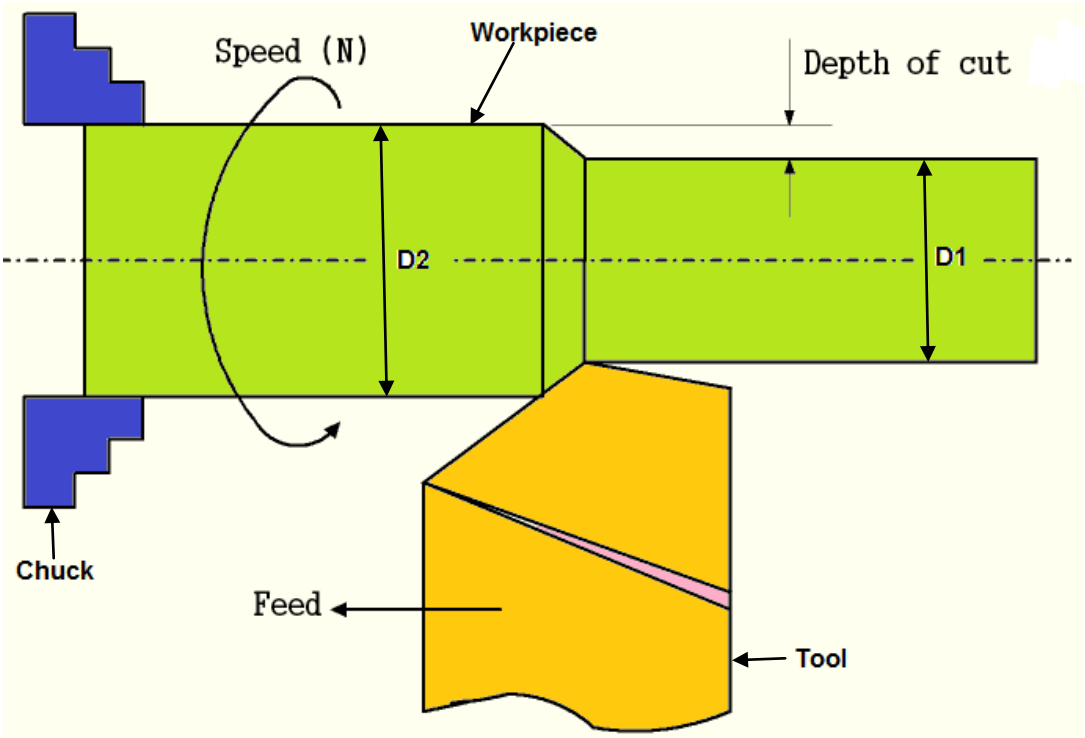
2- التغذية (f) Feed هي المسافة التي يتحركها قلم الخراطة خلال دورة واحدة لمحور دوران المخرطة Spindle وتقاس بوحدات (mm/rev) أي ملم لكل دورة. أما معدل (سرعة التغذية) (S) Feed Rate فهي سرعة حركة قلم الخراطة نسبة الى المشغولة وتقاس بوحدات (mm/min) وتحسب من العلاقة:

$$S = f\ x\ N\ \ (mmlmin)$$

وبزيادة معدل التغذية يزداد معدل ازالة المادة وتزداد انتاجية العملية الا إنها في نفس الوقت تنتج سطحا خشنا وتجعل عمر عدة القطع أقصر مع صرف وقت أطول لاستبدال العدة أو إعادة حدها كما إنها تعمل على رفع درجة الحرارة وزيادة قوى القطع وحصول اهتزاز مع توفير فرصة لتكوين نحاتة متقطعة ونحاتة مع طرف بناء Built-up Edge والذي يعني التحام النحاتة على حافة الحد القاطع. لذا تستخدم سرعات التغذية العالية مع عمق قطع كبير في القطع الخشن الذي يهدف الى ازالة اكبر قدر ممكن من المعدن ويستخدم في أشواط التشغيل الاولية. بينما تعطى العدة معدل تغذية منخفض مع عمق قطع قليل في أشواط التشغيل الأخيرة بهدف الحصول على سطح ناعم علما ان استخدام التغذية المنخفضة يؤدي الى هدر في طاقة الماكنة وتقليل معدل ازالة المادة وتقليل الانتاجية. تتراوح التغذية في الخراطة الاسطوانية بين 0.5mm/rev – 0.05 في الخراطة الخشنة و 0.1mm/rev – 0.01 في خراطة الانهاء. أما في التسنين (عمل البراغي) فأن التغذية تساوي خطوة السن pitch of Thread.

3- عمق القطع Depth of Cut (d) هو المسافة نصف القطرية (في الخراطة الاسطوانية) التي يتغلغلها قلم الخراطة في المشغولة وتقاس بالمليمتر.

الشكل التالي يبين التعريفات أعلاه:

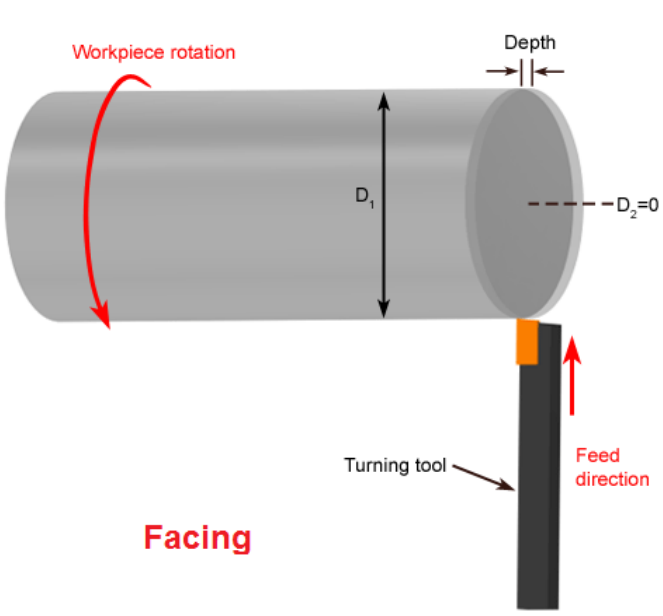


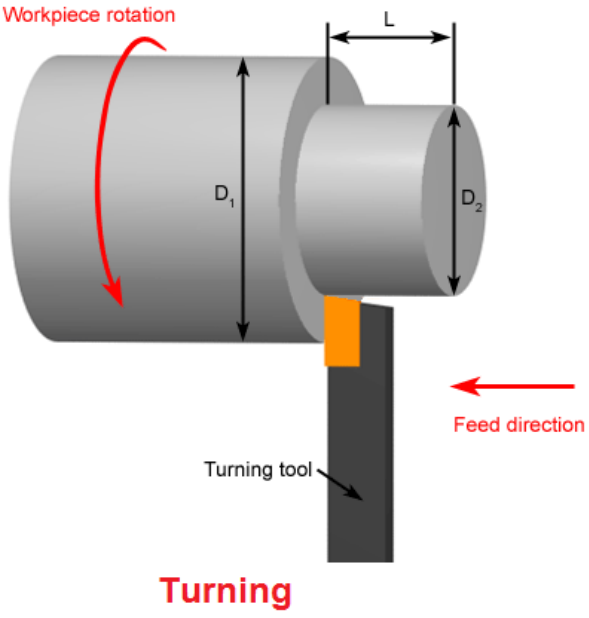
أما أهم العمليات التي تجرى على المخرطة فهي:

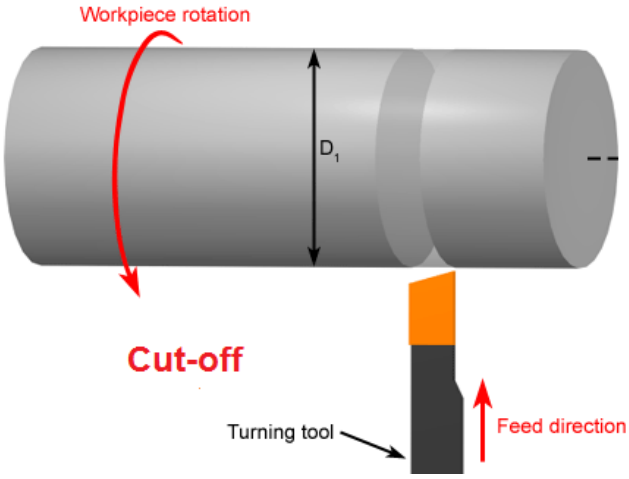
1- الخراطة Turning وفيها يعطى قلم الخراطة حركة محورية وذلك للحصول على اسطح اسطوانية أو أسطح مخروطية أو أسطح قطاعية.
2- الخراطة الوجهية Facing وفيها يعطى قلم الخراطة حركة نصف قطرية عند طرف المشغولة للحصول على سطح مستوي.
3- عمل الحزوز Grooving وفيها يعطى قلم الخراطة حركة نصف قطرية عند موقع الحز من المشغولة.
4- القطع (الفصل) Cut-off or Parting وفيها يعطى قلم الخراطة حركة نصف قطرية كما في عمل الحزوز تماما الا ان القلم يستمر في حركته الى مركز المشغولة ليفصلها الى جزئين.
5- التسنين Thread Cutting وفيها يعطى قلم الخراطة حركة محورية بموازاة محور الخامة لقطع الاسنان على السطح الخارجي من المشغولة وقد تتطلب العملية أكثر من شوط. تجدر الاشارة أن حركة العربة في حالة التسنسن تؤخذ من لولب الجر Lead Screw وفي العمليات الاخرى من عمود التغذية Feed Shaft.

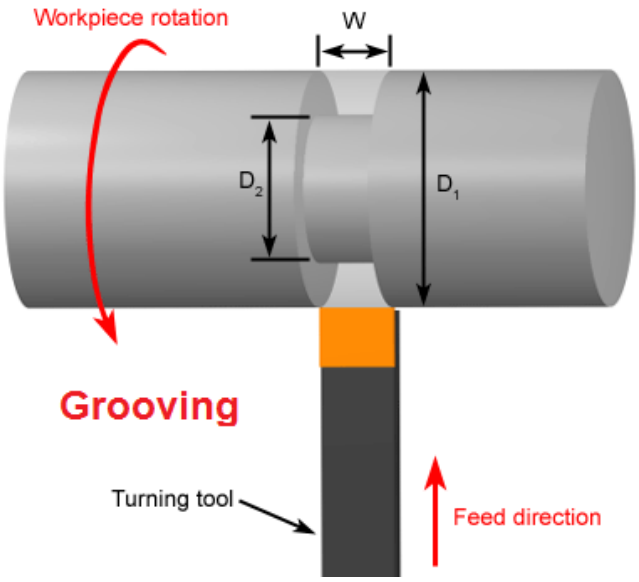
6- التثقيب Drilling وفيها يتم عمل ثقب مركزي من خلال مثقب حلزوني يثبت في غراب الذيل Tailstock مع تزويده بحركة محورية.
7- توسيع الثقوب Boring وفيها يتم استخدام قلم خراطة يتحرك محوريا داخل الثقب المركزي من المشغولة لتوسيعه أو لعمل سلبة داخلية أو لعمل حافة مشطوفة Chamfer.
8- البرغلة Reaming وذلك باستخدام عدة خاصة متعددة الحدود القاطعة والتي تثبت في غراب الذيل. تجرى البرغلة عادة بعد التثقيب وذلك لضبط الابعاد ولتنعيم الاسطح.
9- التسنين الداخلي Tapping وهي الاخرى تجرى بعد التثقيب باستخدام عدة التسنين الداخلي التي تثبت في غراب الذيل للحصول على تسنين داخلي.

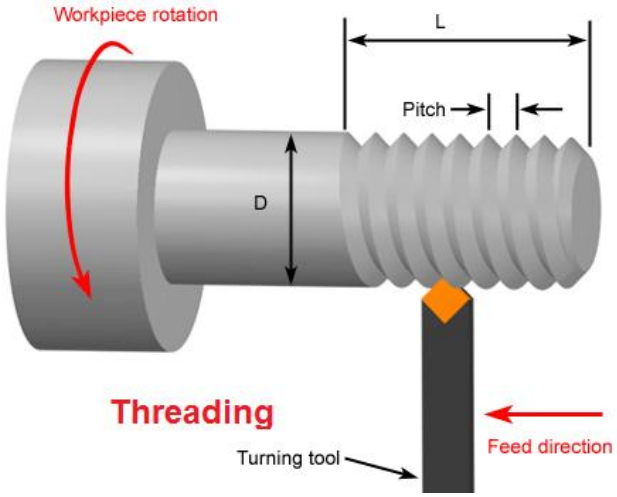
وفيما يلي صورا توضيحية لهذه العمليات:

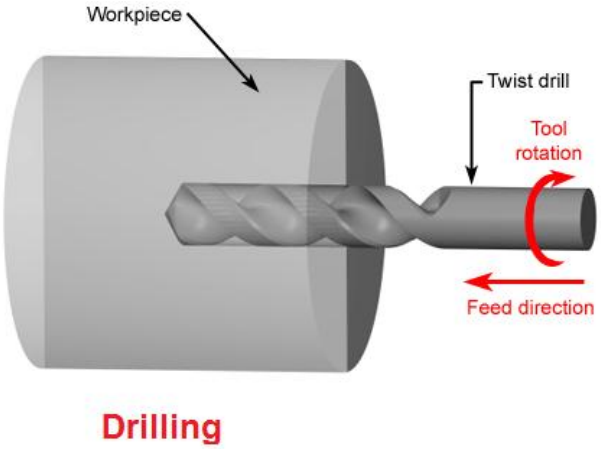


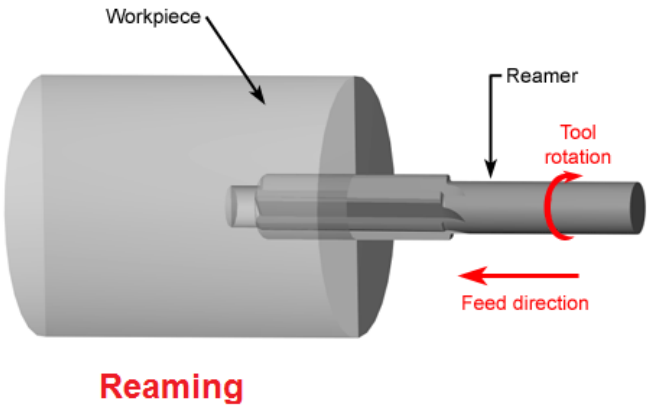


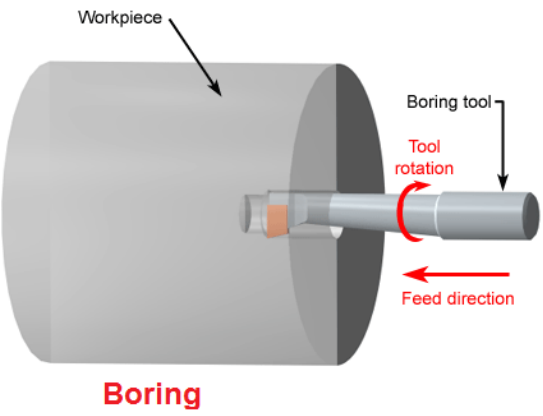

Workpiece rotation
D1
Cut-off
Turning tool
Feed direction

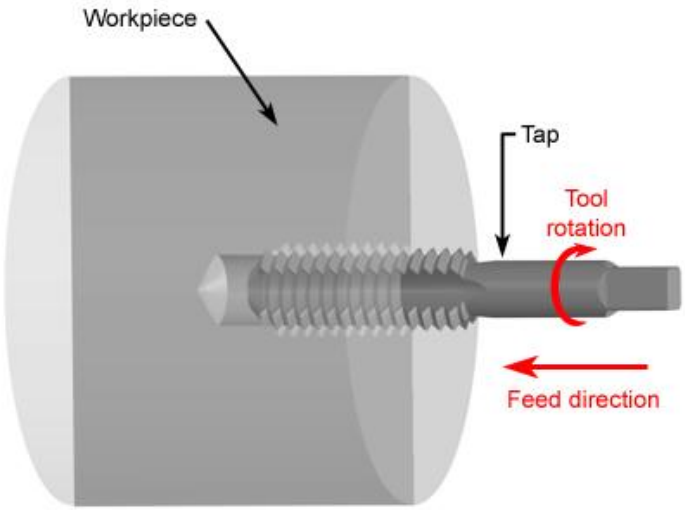

Workpiece rotation
W
D2
D1
Grooving
Turning tool
Feed direction


Workpiece rotation
L
Pitch
D
Threading
Turning tool
Feed direction


Workpiece
Twist drill
Tool rotation
Feed direction
Drilling


Workpiece
Reamer
Tool rotation
Feed direction
Reaming


Workpiece
Boring tool
Tool rotation
Feed direction
Boring



Tapping

قوى وقدرة القطع Cutting Forces and Power

إن إيجاد قوى القطع له أهمية كبيرة وأساسية للأسباب الآتية:

1- لتحديد قدرة الماكنة المناسبة لانجاز العمل.
2- لتحديد المتطلبات التصميمية لأجزاء الماكنة.
3- لتقييم تأثير ومساهمة كل عامل من العوامل المتحكمة في عملية التشغيل مثل عمق القطع ومعدل التغذية وسرعة القطع وغيرها.
4- لتقييم الأداء (تحديد القوى والقدرة اللازمة) لأي مادة جديدة يراد تشغيلها أو مادة جديدة لعدة القطع أو تقنية قطع جديدة.

إن محصلة القوى التي تؤثر على اداة القطع من قبل المادة قيد التشغيل تسمى بقوة المقاومة للقطع او قوة المقاومة لتكوين النحاتة. في عملية الخراطة يمكن تحليل محصلة القوى هذه الى ثلاث مركبات متعامدة كما مبين في الشكل ادناه وهي:

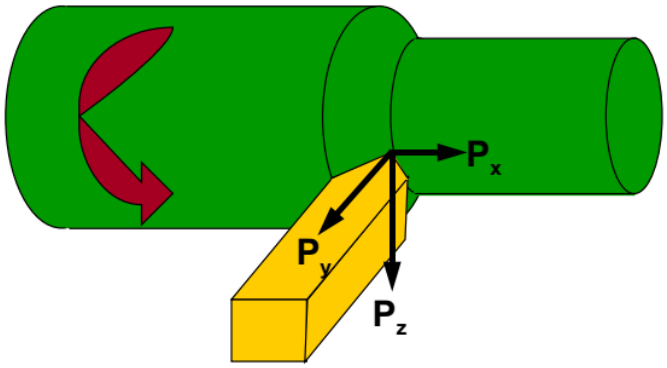
1- قوة القطع أو قوة القطع الرئيسية Cutting Force or Main Cutting Force (F_z or F_c) وتسمى كذلك بالقوة المماسية Tangential Force وهي قوة مماسية لسطح القطع وتتطابق مع اتجاه حركة القطع الرئيسية. تحاول هذه المركبة حني الاداة في مستوى عمودي.

2- قوة التغذية Feed Force (F_x or F_f) وتسمى كذلك بالقوة المحورية Axial Force وتؤثر بموازاة محور المشغولة باتجاه معاكس لحركة التغذية. تحاول هذه المركبة حني الاداة في مستوى افقي.

3- قوة الدفع Thrust Force (F_y or F_t) وتسمى ايضا بالقوة نصف القطرية او القوة الشعاعية Radial Force وتؤثر في مستوى افقي وبصورة عمودية على محور المشغولة. تحاول هذه المركبة دفع الاداة بعيدا عن المشغولة.

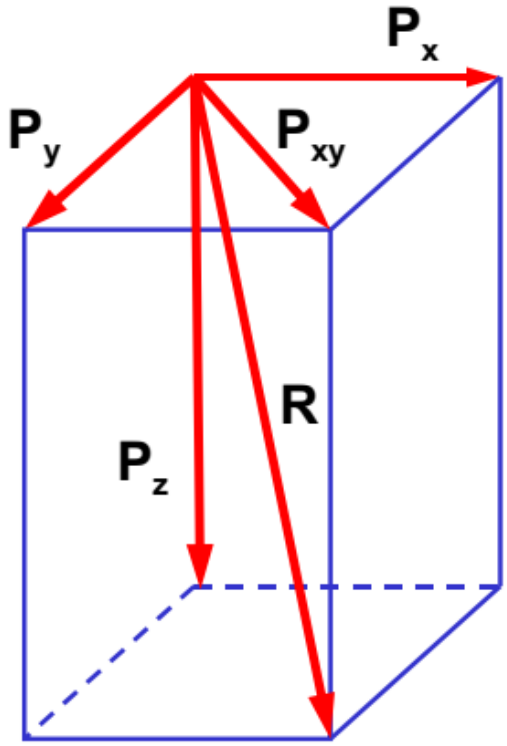
يمكن ايجاد قيم هذه المركبات عمليا باستخدام وسيلة تعرف بالداينموميتر Dynamometer كما يمكن اشتقاق علاقات رياضية لحسابها كذلك ولكنها خارج نطاق موضوعنا.

الشكل أدناه يوضح مركبات القوة الثلاثة التي تؤثر على أداة القطع في عملية خراطة طولية مع تحديد اتجاه تأثير هذه القوى:



إن محصلة هذه القوة R يمثلها قطر متوازي الاضلاع المبين في الشكل ادناه وهي تساوي:

$$R = \sqrt{F_z{}^2 + F_y{}^2 + F_x{}^2}$$



قدرة القطع Cutting Power (Pc)

لحساب القدرة المستهلكة في عملية القطع نقوم بجمع قيم القدرة اللازمة للتغلب على كل مركبة من مركبات القوة الثلاثة أعلاه أي إن:

$$P_c = P_{Fz} + P_{Fy} + P_{Fx}$$

حيث إن:

P_{Fz} هي القدرة اللازمة للتغلب على قوة القطع الرئيسية

P_{Fy} هي القدرة اللازمة للتغلب على قوة الدفع

P_{Fx} هي القدرة اللازمة للتغلب على قوة التغذية

وحيث ان القدرة هي معدل انجاز الشغل اي الشغل المنجز لوحدة الزمن (لكل ثانية)، لذا فأن كل مركبة من مركبات القدرة هي ناتج ضرب مركبة تلك القوة X السرعة النسبية لحركة الاداة في اتجاه تلك المركبة (او في الاتجاه المعاكس لها). وبادخال عوامل التحويل من الدقيقة الى الثانية (60) ومن المليمتر الى المتر (1000) ومن kgf-m per second الى kW (102) تصبح قدرة القطع:

$$P_c = \frac{F_z * \nu}{60 * 102} + \frac{F_y * \nu_y}{60 * 102} + \frac{F_x * \nu_x}{60 * 102}\ kW \ldots\ldots\ldots (1)$$

وفي حالة الخراطة الطولية لا توجد حركة باتجاه القوة F_y أي ان $v_y = 0$ وبهذا تصبح قيمة الحد الثاني صفرا. أما الحد الثالث وهو القدرة اللازمة لانجاز حركة التغذية فهي صغيرة ولا تتجاوز 1–2% P_{Fz} ويمكن اهمالها. وبذلك فان قدرة القطع ستعطى بالعلاقة:

$$P_c = \frac{F_z * \nu}{60 * 102}\ kW \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

حيث ان F_z بوحدات kgf و v بوحدات m/min

وبأخذ كفاءة الماكنة بنظر الاعتبار يمكن حساب القدرة المطلوبة للمحرك الكهربائي الرئيسي للماكنة من العلاقة:

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} \ldots\ldots\ldots (3)$$

يمكن قياس F_z كما قلنا عمليا باستخدام الداينموميتر ومن ثم يمكن حساب قدرة المحرك الكهربائي المطلوب لعملية القطع.
وحيث إننا نحتاج تخمين قدرة المحرك الكهربائي لماكنة التشغيل اللازمة لانجاز عملية تشغيل معينة قبل الشروع بها كي لا يحدث هدر لطاقة الماكنة من ناحية ولتجنب حدوث تلف لأجزاء الماكنة عند تجاوز القدرة المطلوبة لعملية التشغيل امكانيات الماكنة أي أن عندما تكون القدرة المطلوبة أعلى من قدرة المحرك الرئيسي للماكنة وكذلك ليتم توزيع الاعمال على المكائن المتوفرة بصورة اقتصادية آمنة، لذا توجب تخمين القوى والقدرة من علاقات تأخذ متغيرات عملية التشغيل بنظر الاعتبار مثل عمق القطع ومعدل التغذية وسرعة القطع وظروف التبريد ومادة المشغولة ونوع وهندسية اداة القطع وغيرها. وسنعتتمد الصيغة الرياضية التالية لتخمين قدرة المحرك الكهربائي الرئيسي لماكنة الخراطة P_m المطلوب:

$$P_m = \frac{d * f * \nu * K_c}{60 * 10^3 * \eta} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

حيث إن:
d: عمق القطع (ملم)
f: التغذية (ملم/دورة)
v: سرعة القطع (م/دقيقة)
K_c: قوة القطع النوعية (نيوتن/ملم^2) وتعرف بأنها القوة اللازمة لقطع نحاتة (رايش) مساحتها 1mm^2 وبسمك 1mm من المادة.
η: كفاءة الماكنة

وبمعرفة العوامل أعلاه يمكن تخمين قدرة المحرك الكهربائي المطلوب لماكنة القطع المناسبة لانجاز العمل. وفيما يخص قوة القطع النوعية K_c فأنها تعطى في جداول خاصة بكل عملية من عمليات التشغيل. الجدول رقم (1) يعطي قيم K_c لخراطة مواد مختلفة في بعض ظروف التشغيل :

جدول رقم (1): قيم Kc عند ظروف مختلفة في عملية الخراطة

Workpiece Material	Tensile Strength(MPa) and Hardness	Specifi c Cutting Force Kc (MPa)				
		0.1(mm/rev)	0.2(mm/rev)	0.3(mm/rev)	0.4(mm/rev)	0.6(mm/rev)
Mild Steel	520	3610	3100	2720	2500	2280
Medium Steel	620	3080	2700	2570	2450	2300
Hard Steel	720	4050	3600	3250	2950	2640
Tool Steel	670	3040	2800	2630	2500	2400
Tool Steel	770	3150	2850	2620	2450	2340
Chrome Manganese Steel	770	3830	3250	2900	2650	2400
Chrome Manganese Steel	630	4510	3900	3240	2900	2630
Chrome Molybdenum Steel	730	4500	3900	3400	3150	2850
Chrome Molybdenum Steel	600	3610	3200	2880	2700	2500
Nickel Chrome Molybdenum Steel	900	3070	2650	2350	2200	1980
Nickel Chrome Molybdenum Steel	352HB	3310	2900	2580	2400	2200
Hard Cast Iron	46HRC	3190	2800	2600	2450	2270
Meehanite Cast Iron	360	2300	1930	1730	1600	1450
Gray Cast Iron	200HB	2110	1800	1600	1400	1330

مثال رقم1: جد قدرة المحرك الكهربائي الرئيسي المطلوب في ماكنة خراطة لتشغيل خامة من الفولاذ المطاوع Mild Steel بسرعة قطع مقدارها 120 m/min وعمق قطع مقداره 3 mm وتغذية مقدارها 0.2 mm/rev إذا علمت أن كفاءة الماكنة هي 80%

الحل:

يمكن ايجاد قدرة المحرك الكهربائي من المعادلة رقم (4):

$$P_m = \frac{d * f * v * K_c}{60 * 10^3 * \eta} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

ويلاحظ أن جميع المعلومات المطلوبة معطاة عدا قوة القطع النوعية والتي يتم أخذها من الجدول رقم (1) أعلاه بمعرفة مادة المشغولة ومقدار التغذية. نجد من الجدول ان K_c = 3100 MPa

$$P_m = \frac{3\ x\ 0.2\ x\ 120\ x\ 3100}{60\ x\ 10^3\ x\ 0.8}$$

$$P_m = 4.65\ \text{kW}$$

إنتهى

مثال رقم2: وفق المعطيات المبينة في المثال رقم1 أعلاه جد:

1- السرعة الدورانية للمشغولة إذا علمت أن القطر الابتدائي للمشغولة هو 50mm
2- معدل التغذية
3- قدرة القطع
4- مقدار قوة القطع الرئيسية

الحل:

1- ايجاد السرعة الدورانية للمشغولة من العلاقة:

$$V = \frac{\pi\ D\ N}{1000}\ \text{m/min}$$

$$N = \frac{V * 1000}{\pi\ D}$$

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

$$D = \frac{50 + 44}{2} = 47\ mm$$

ملاحظة: يرجى تصحيح أشارة العلاقة في المحاضرة السابقة من – الى +

$$N = \frac{120 * 1000}{\pi * 47} = 813\ rpm$$

2- إيجاد معدل التغذية من العلاقة

$$S = f\ x\ N\ \ (mm/min)$$

$$S = 0.2\ x\ 813 = 162.6\ \ (mm/min)$$

3- إيجاد قدرة القطع من العلاقة

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} \ \ldots\ldots\ldots (3)$$

$$P_c = P_m * \eta$$

$$P_c = 4.65 * 0.8 = 3.72\ kW$$

4- إيجاد قوة القطع الرئيسية من العلاقة

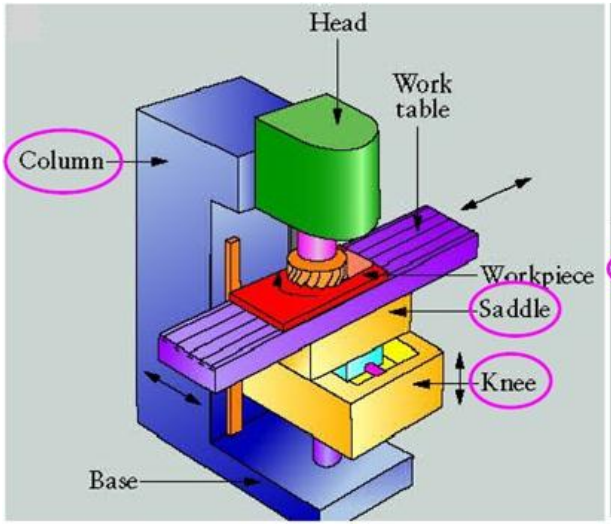
$$P_c = \frac{F_z * v}{60 * 102}\ kW \ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

$$F_z = \frac{P_c * 60 * 102}{v}$$

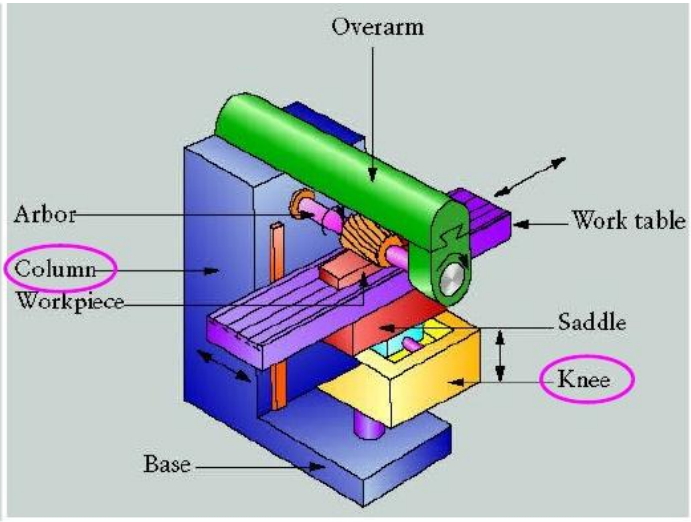
$$F_z = \frac{3.72 * 60 * 102}{120} = 189.72\ N$$

إنتهى

ثانيا: التفريز Milling



ماكنة تفريز عمودية



ماكنة تفريز أفقية

التفريز هو إحدى عمليات التشغيل متعددة الامكانات ويستخدم في انتاج عدد كبير من الاجزاء الميكانيكية مثل التروس والقوالب وتسوية الأسطح وعمل الاخاديد والاسطح القطاعية وغيرها. يستعمل في التفريز عدة ذات حدود قاطعة متعددة تسمى سكين التفريز Milling Cutter ويعد التفريز من عمليات التشغيل المتقطعة التي تتعرض فيها اسنان السكين (الحدود القاطعة) الى قوى صدم وصدمات حرارية في كل دروة من دورات السكين. يتم في هذه العملية تثبيت المشغولة على منضدة الماكنة التي تتحرك في الاتجاهات X و Y و Z والتي يمكن أن تتحرك في آن واحد للحصول على المسار المطلوب.

في عمليات التفريز تقوم السكين بحركة القطع الرئيسية وهي حركة دورانية مستمرة حول محور أفقي في مكائن التفريز الافقية أو حول محور عمودي في مكائن التفريز العمودية وتستمد حركتها من محور الدوران الرئيسي في الماكنة. أما حركة التغذية فهي حركة متعددة الاتجاهات كما ذكرنا وتقوم بها المشغولة المثبتة على منضدة الماكنة.

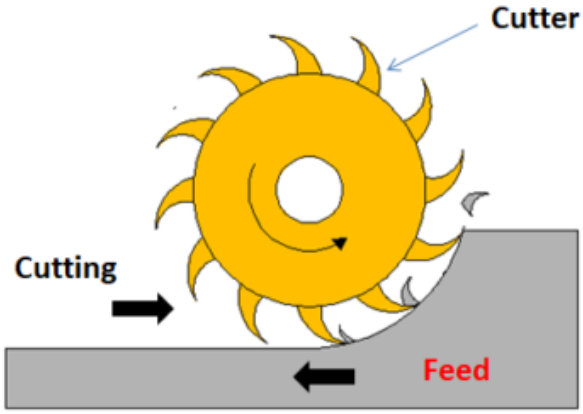
واعتمادا على اتجاه حركة السكين نسبة الى المشغولة تقسم عملية القطع بالتفريز الى نوعين هما:

1- التفريز الى الاعلى Up Milling وفيه تكون حركة دوران السكين بعكس حركة التغذية ويبدأ تعشيق Engage كل سن من أسنان سكين التفريز مع المشغولة بسمك نحاته قدره صفرا ومن ثم يأخذ سمك النحاتة بالتزايد التدريجي حتى يصل الى قيمته القصوى حين يغادر السن المشغولة ويفك التعشيق بينهما. من محاسن هذا الاسلوب هو أن قوة القطع على كل سن تبدأ بأدنى قيمة لها وتتزايد تدريجيا وهو ما يناسب تشغيل المطروقات والمسبوكات التي قد تحتوي أسطحها على أكاسيد صلدة. وعلى كل حال فأن هذا لاسلوب يسلط قوى الى الاعلى تحاول فك المشغولة عن مثبتاتها مما يتطلب وسائل تثبيت جاسئة كما إن البدء

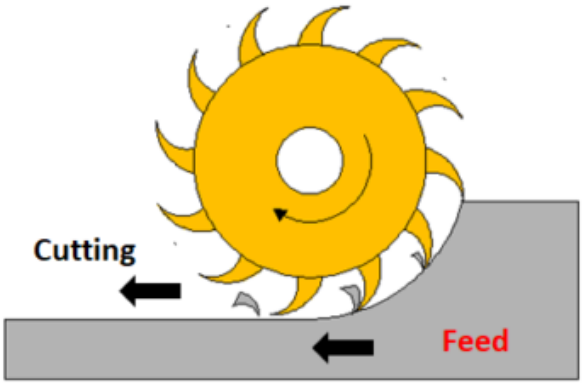
بسمك صفري للنحاتة يجعل العدة تنزلق على المشغولة ولو لفترة قصيرة مما يزيد من سوفانها ويقلل من عمرها.

2- التفريز الى الاسفل Down Milling وفيه يكون اتجاه دوران سكين التفريز بنفس اتجاه حركة المشغولة. وفيه يتعشق السن بأقصى سمك في المشغولة ثم يأخذ بالتناقص التدريجي حتى يصل الى الصفر عند مغادرة السن للمشغولة. في هذه الطريقة تبدأ قوة القطع عند كل سن بأقصى قيمتها ثم تتناقص تدريجيا. القوى التي يسلطها السكين تكون نحو الاسفل وتعمل على تثبيت المشغولة كما ان هذا الاسلوب يعطي انهاء سطحيا افضل من التفريز الى الاعلى.

الشكل ادناه يوضح اسلوبي التفريز المشار اليهما:



Up Milling



Down Milling

سرعة القطع Cutting Speed وهي السرعة المحيطية لسكين التفريز وتقع قيمتها في المدى 0.1 – 4 m/s وتستخرج من العلاقة:

$$V = \frac{\pi D N}{1000} \text{ m/min}$$

حيث إن:

D هو القطر الخارجي لسكين التفريز (ملم)

N هي السرعة الدورانية للسكين (rpm)

التغذية Feed يوجد في التفريز ثلاث أنواع من التغذية هي:

1- التغذية لكل سن Feed per Tooth (f_z) وهي تقابل التغذية Feed (f) في الخراطة وتقع قيمتها في المدى 0.05 – 0.5 mm/tooth

2- التغذية لكل دورة Feed per Revolution (f_r) وهي تحدد كمية المادة المزالة خلال دورة كاملة لسكين التفريز وتحسب من العلاقة:

$$f_r = f_z * z$$

حيث إن z هو عدد أسنان سكين التفريز

3- التغذية لكل دقيقة Feed per Minute (f_m) وتحسب من العلاقة:

$$f_m = f_z * z * N = f_r * N$$

قدرة القطع Cutting Power (Pc)

يتم إيجاد قدرة المحرك الكهربائي الرئيسي المطلوب لأجراء عملية تفريز في ظروف محددة من العلاقة:

$$P_m = \frac{d * w * f_m * K_c}{60 * 10^6 * \eta}$$

حيث إن:

Pm: قدرة المحرك الكهربائي الرئيسي (kW)

d: عمق القطع (ملم)

w: عرض القطع (ملم)

f_m: التغذية لكل دقيقة (mm/min)

K_c: قوة القطع النوعية (MPa)

η: كفاءة الماكنة

تعطى قوة القطع النوعية في جداول وكما مبين في الجدول رقم (2) أدناه:

Workpiece material	Tensile strength ($kg \cdot mm^2$) and hardness	Specific Cutting Force KFs(N/mm^2)				
		0.1(mm/rev)	0.2(mm/rev)	0.3(mm/rev)	0.4(mm/rev)	0.6(mm/rev)
Mild Steel	520	2200	1950	1820	1700	1580
Medium Steel	620	1980	1800	1730	1600	1570
Hard Steel	720	2520	2200	2040	1850	1740
Tool Steel	670	1980	1800	1730	1700	1600
Tool Steel	770	2030	1800	1750	1700	1580
Chrome Manganese Steel	770	2300	2000	1880	1750	1660
Chrome Manganese Steel	630	2750	2300	2060	1800	1780
Chrome Molybdenum Steel	730	2540	2250	2140	2000	1800
Chrome Molybdenum Steel	600	2180	2000	1860	1800	1670
Nickel Chrome Molybdenum Steel	940	2000	1800	1680	1600	1500
Nickel Chrome Molybdenum Steel	352HB	2100	1900	1760	1700	1530
Cast Iron	520	2800	2500	2320	2200	2040
Hard Cast Iron	46HRC	3000	2700	2500	2400	2200
Meehanite Cast Iron	360	2180	2000	1750	1600	1470
Gray Cast Iron	200HB	1750	1400	1240	1050	970
Brass	500	1150	950	800	7000	630
Light Alloy (Al-Mg)	160	580	480	400	350	320
Light Allow (Al-Si)	200	700	600	490	450	390

مثال1: يراد اجراء عملية تفريز لمشغولة من صلب العدة بسرعة قطع مقدارها 80m/min وبعمق قطع مقداره 2mm وعرض قطع مقداره 80mm وبتغذية مقدارها 280mm/min باستخدام سكين تفريز قطرها 250mm وعدد أسنانها 12 سن. جد:

أ- السرعة الدورانية لمحور الماكنة.
ب- التغذية لكل دورة.
ت- التغذية لكل سن.

ث-قدرة المحرك الكهربائي اللازم لانجاز العمل.

إذا علمت أن كفاءة الماكنة هي 80%

الحل:

أ- إيجاد السرعة الدورانية لمحور الماكنة من العلاقة:

$$V = \frac{\pi D N}{1000} \ m/min$$

$$N = \frac{V * 1000}{\pi * D} = \frac{80 * 1000}{3.14 * 250} = 101.91 \ rpm$$

ب- إيجاد التغذية لكل دورة من العلاقة:

$$f_m = f_z * z * N = f_r * N$$

$$f_r = \frac{f_m}{N}$$

$$f_r = \frac{280}{101.91} = 2.75 \ mm/rev$$

ت- إيجاد التغذية لكل سن من العلاقة:

$$f_r = f_z * z$$

$$f_z = \frac{f_r}{z} = \frac{2.75}{12} = 0.229 \ mm/tooth$$

ث- إيجاد قدرة المحرك الكهربائي من العلاقة:

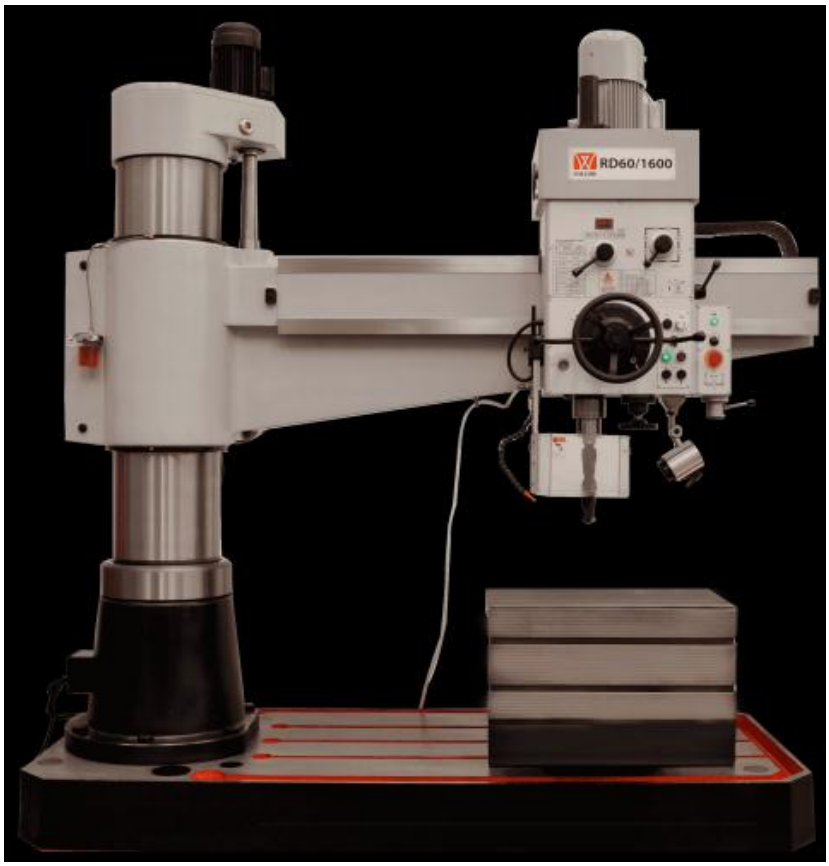
$$P_m = \frac{d * w * f_m * K_c}{60 * 10^6 * \eta}$$

من الجدول (2) أعلاه نجد قوة القطع النسبية (K_c) لصلب العدة هي 1800 MPa

$$P_m = \frac{2 * 80 * 280 * 1800}{60 * 10^6 * 0.8} = 1.68\ kW$$

إنتهى

ثالثا: التثقيب Drilling



ماكنة تثقيب شعاعية

التثقيب هي أحدى عمليات التشغيل الأكثر شيوعا. تتم عملية التثقيب باستخدام عدة قطع ثنائية الحد القاطع تسمى المثقب الحلزوني Twist Drill والموضح في الشكل التالي:

مثقب حلزوني

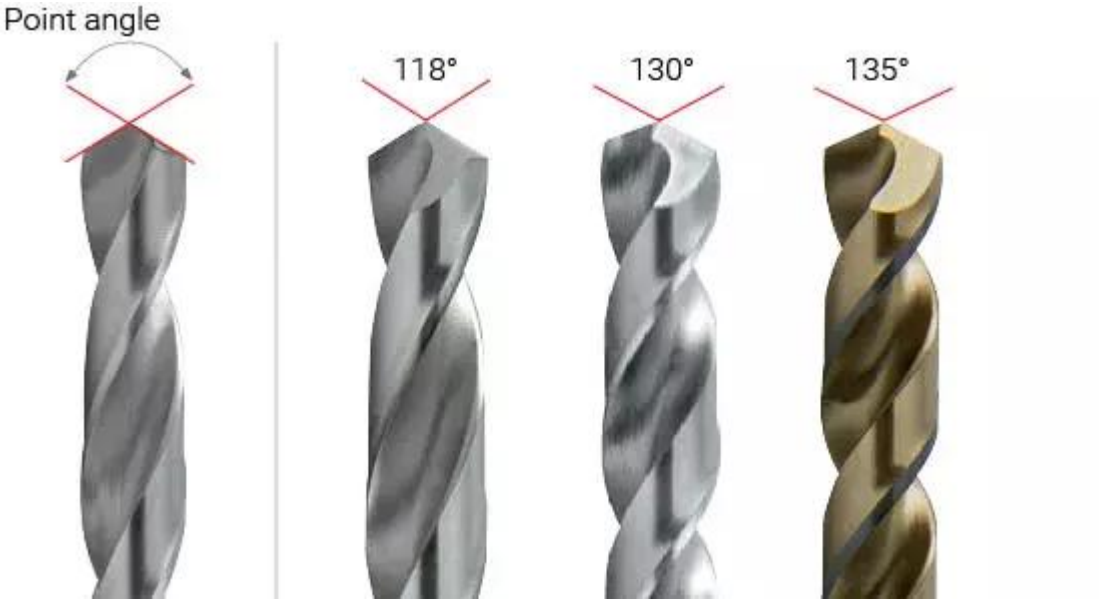
يصنع الحد القاطع Bit للمثقب الحلزوني من صلب السرعات العالية HSS أو من الصلب المطلي بنتريد التيتانيوم أو من العدد الكربيدية أوغيرها. يعمل المثقب على ازالة المعدن الزائد بصورة نحاتة (رايش) بطريقة اقتصادية وسهلة وسريعة.

سمات المثقب الحلزوني Features of Twist Drill

فيما يلي بعض سمات المثقب الحلزوني:

1- زاوية النقطة Point Angle

تقع هذه الزاوية عند رأس المثقب وتقاس بين الحدين القاطعين الرئيسيين. تعمل هذه الزاوية على مركزة المثقب في المشغولة (تطابق خط مركز المثقب مع خط مركز الثقب المطلوب) . كلما كانت قيمة زاوية النقطة أقل كلما كانت عملية المركزة أسهل وكلما قلت احتمالية انزلاق المثقب. أما الزاوية الاكبر فأنها تجعل عملية المركزة أكثر صعوبة ولكنها مفيدة في تقليل زمن التثقيب. وعلى كل حال فمن المألوف عمل ثقب صغير في المشغولة (يسمى ثقب مركز Center-hole) قبل البدء بعملية التثقيب. يتم عمل ثقب المركز بعدة خاصة تسمى مثقب المركز Center-drill وذلك لضمان عملية المركزة وتجنب انزلاق العدة في بداية التثقيب. بصورة عامة تستخدم زاوية النقطة الصغيرة في تثقيب المواد الطرية بينما تستخدم الزاوية الكبيرة في تثقيب المواد الصلدة والمواد الهشة. الشكل التالي يوضح هذه الزاوية:



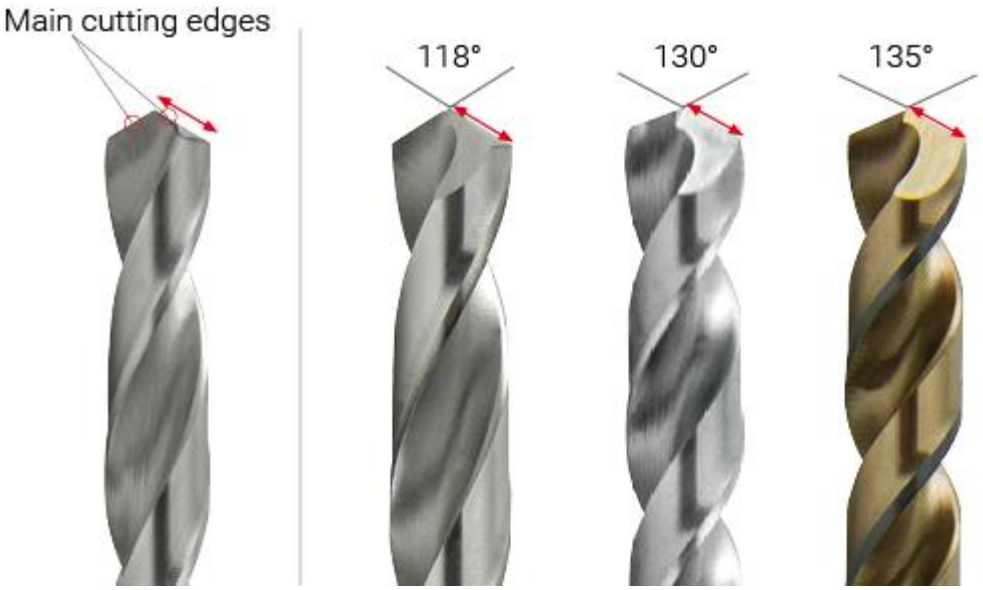
مثاقب حلزونية بزوايا نقطة مختلفة

الشكل التالي يوضح صورة لمثقب المركز:

مثاقب المركز

2- الحدود القاطعة الرئيسية Main Cutting Edges

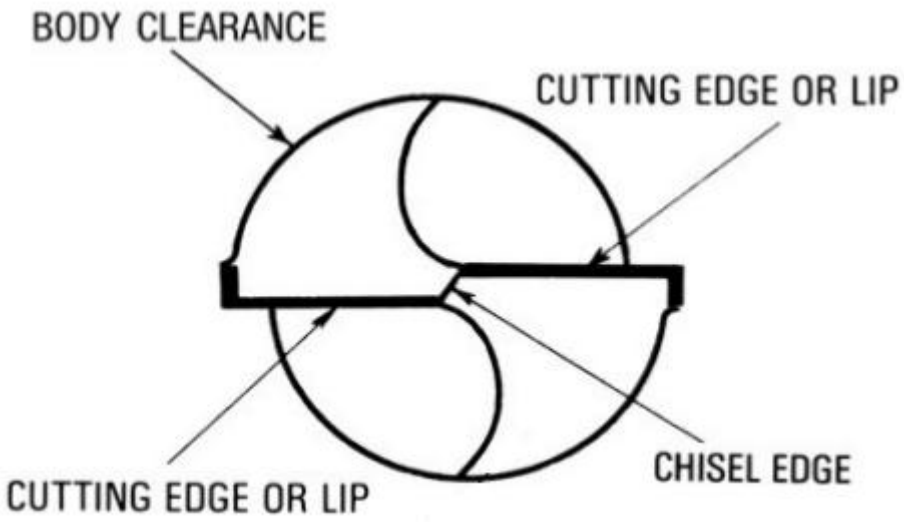
يمتلك المثقب الحلزوني حدين قاطعين رئيسيين يربط بينهما الحد القاطع الاسفيني Cut Chisel Edge. تقوم الحدود القاطعة الرئيسية بعملية التثقيب الفعلية. يرتبط طول الحد القاطع بزاوية النقطة إذ يزداد الطول بنقصان الزاوية والعكس صحيح. وكلما كان طول الحد القاطع أكبر كلما كان أداؤه أفضل. الشكل التالي يبين الحدين القاطعين الرئيسيين لمثقب حلزوني وعلاقته بزاوية النقطة:



الحدود القاطعة الرئيسية لمثقب حلزوني

3- الحد القاطع الاسفيني Cut Chisel Edge

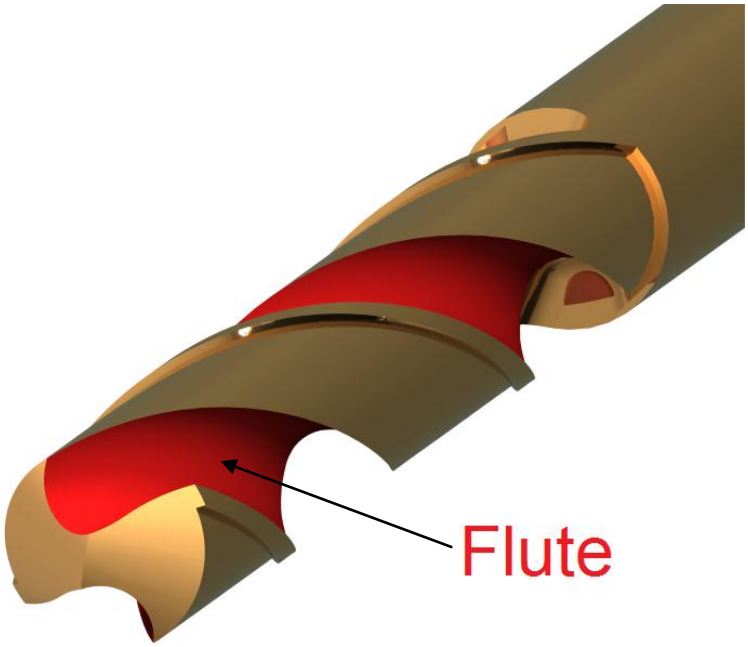
يقع هذا الحد في وسط الجزء القاطع Bit للمثقب الحلزوني وليست له أية مساهمة في عملية القطع. وعلى كل حال فهو أساسي لانشاء المثقب ويعمل على الربط بين الحدين القاطعين الرئيسيين. هذا الحد هو المسؤول عن دخول المثقب في المشغولة عن طريق البثق Extrusion ويعمل على تسليط ضغط وتوليد احتكاك مع المشغولة وهي أمور غير مرغوبة لأنها ترفع درجة الحرارة وتزيد استهلاك القدرة. الشكل أدناه يوضح الحد القاطع الاسفيني:



الحد القاطع الاسفيني في المثقب الحلزوني

4- شكل الاخدود Profile of Flute (Groove Profile)

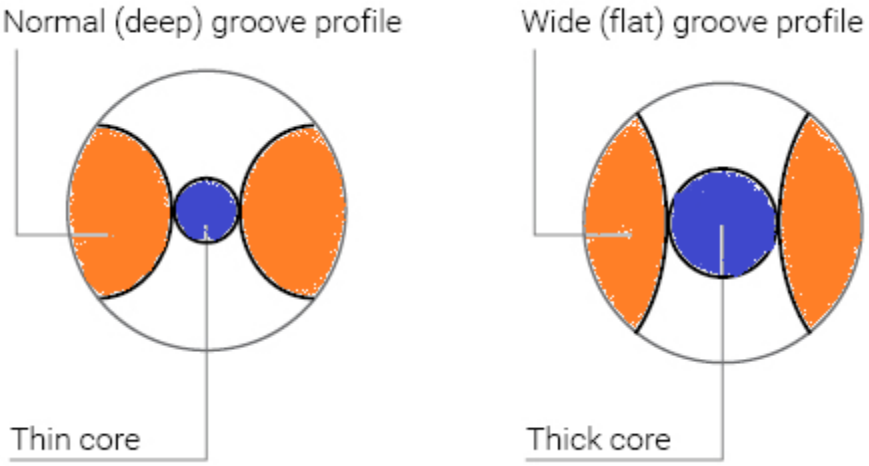
يمتلك كل مثقب حلزوني أخدودين حلزونيين يقومان بازالة النحاتة خارج منطقة التثقيب. وكلما كان عرض الاخدود أكبر كلما كان أداؤة أفضل والعكس صحيح. يؤدي الأداء الردئ للاخدود الى توليد حرارة قد تؤدي الى ضعف المثقب وربما الى كسره. عادة ما يكون الاخدود الواسع ذو عمق قليل بينما يكون الاخدود الضيق ذو عمق كبير. وكلما زاد عمق الاخدود كلما قل قطر لب Core المثقب. الشكل التالي يوضح أخدود المثقب الحلزوني:



شكل الاخدود Flute في مثقب حلزوني

5- لب المثقب Core

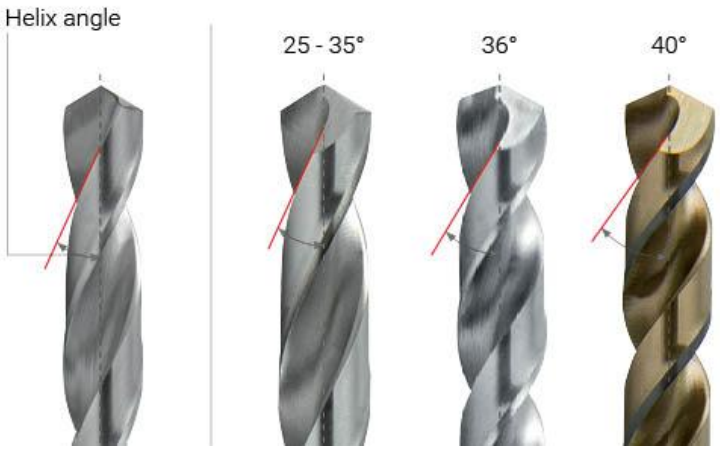
يعد سمك (قطر) اللب معيارا لمدى استقرارية المثقب الحلزوني. كلما زاد قطر اللب كلما زادت استقرارية المثقب ويصبح مناسبا للاستخدام مع العزوم العالية والمعادن الصلدة. كما إنها مناسبة تماما مع مكائن التثقيب اليدوية لمقاومتها العالية للاهتزازات والقوى الجانبية.
الشكل التالي يوضح لب المثقب وعلاقته بعمق الاخدود:



قطر اللب وعلاقته بعمق الاخدود

6- الزاوية الحلزونية أو الزاوية اللولبية (Helix Angle (Spiral Angle

الزاوية الحلزونية هي إحدى أهم سمات المثقب الحلزوني وتتحكم في عملية تكوين النحاتة. تقوم الزاوية الكبيرة بالازالة الفاعلة لنحاتة المواد الطرية بصورة نحاتة طويلة مستمرة بينما تستخدم الزاوية الصغيرة في إزالة نحاتة المواد الصلدة بصورة نحاتة قصيرة متقطعة.
تتراوح الزاوية الحلزونية في المثاقب الاعتيادية بين 19^{o} – 40^{o} وهي تعطي لولب بطول طبيعي بينما تؤدي زيادة الزاوية أو نقصانها الى تقليل طول اللولب وزيادته على التوالي.
الشكل التالي يوضح مثاقب بزوايا حلزونية مختلفة:



مثاقب بزوايا حلزونية مختلفة

تعد عملية التثقيب نقطة البدء لعمليات أخرى منها:

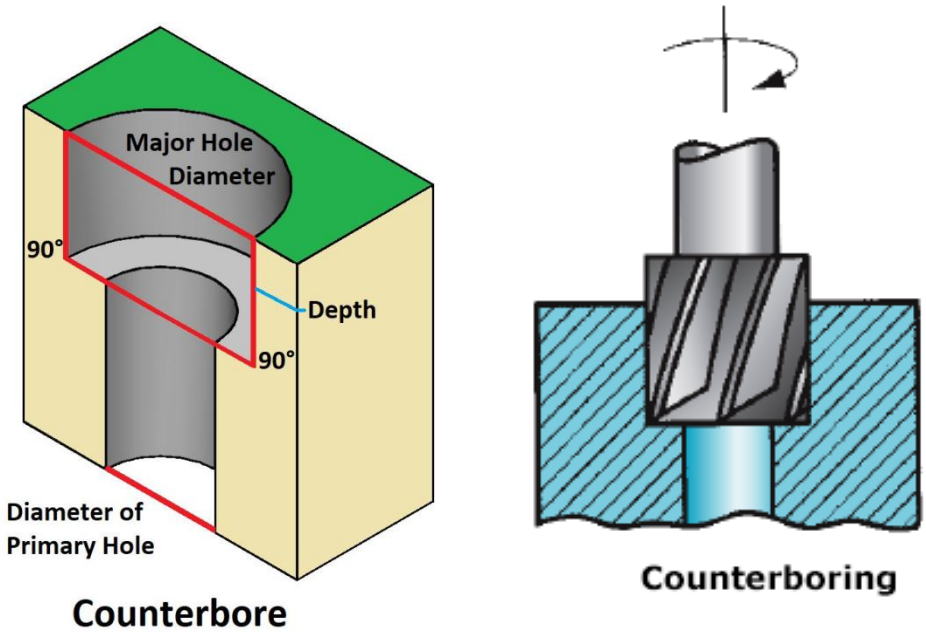
1- البرغلة Reaming

وهي عملية ضبط دقة الثقب ونعومة السطح باستخدام عدة البرغلة وهي عدة متعددة الحدود القاطعة وكما مبين في الشكل أدناه. في هذه العملية يتم إزالة جزء صغير جدا من المادة وبعمق قطع صغير.

عدة البرغلة

2- التخويش الاسطواني Counterboring

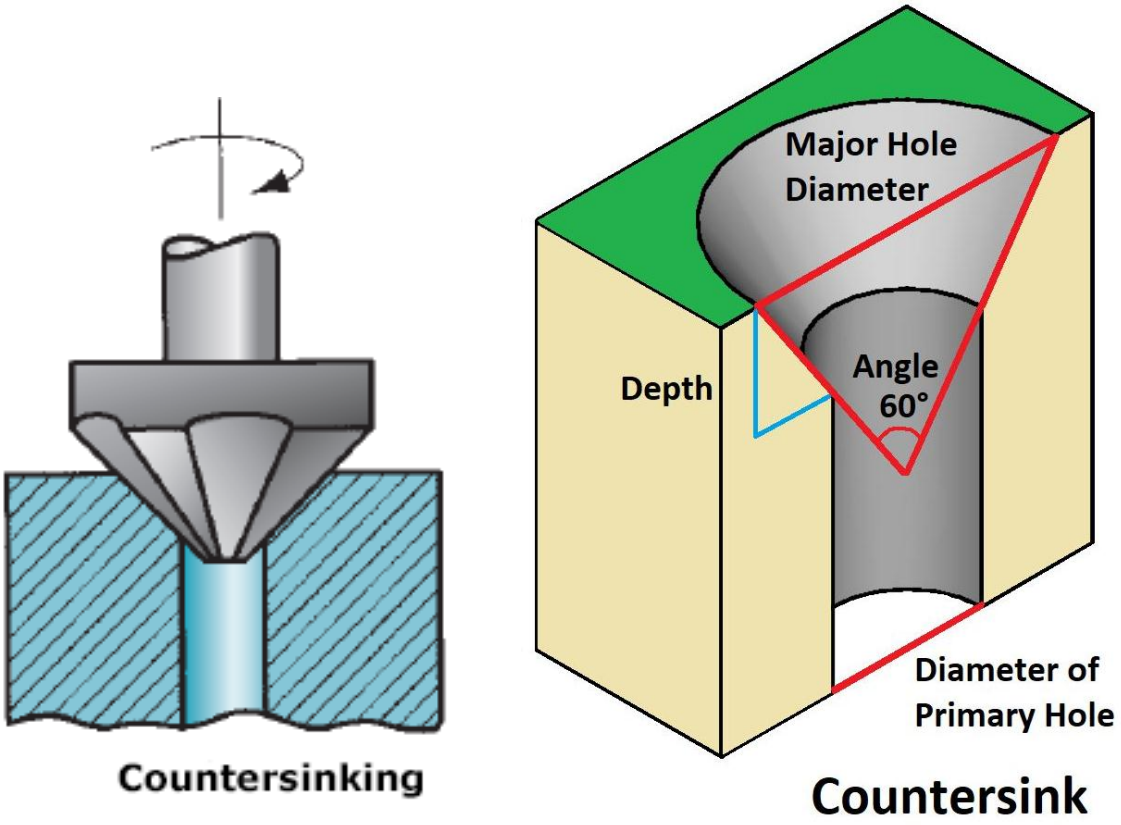
وهي عملية تتم بعد عملية التثقيب باستخدام عدة خاصة كما مبين في الشكل أدناه بهدف تزويد الثقب بنهاية اسطوانية ذات قطر أكبر من قطر الثقب لاخفاء رؤوس البراغي او الصواميل داخلها.



التخويش الاسطواني

3- التخويش المخروطي Countersinking

وهي عملية مماثلة تماما لعملية التخويش الاسطواني لكنها تزود الثقب بنهاية مخروطية تعمل على إخفاء البراغي ذات الرؤوس المخروطية وكما موضح في أدناه:



التخويش المخروطي

4- التسنين الداخلي Tapping

يلحق بعملية التثقيب عملية التسنين الداخلي باستخدام عدة خاصة تسمى القلاووظ الذي يزود الثقب بتسنين داخلي يتم عادة على مراحل باستخدام عدة قلاووظات متعاقبة. الشكل التالي يبين صورة لنوع من هذه القلاووظات:

قلاووظات تسنين داخلي