9 – عمليات التشغيل غير التقليدية
Non-Traditional Machining Processes

9 –1 مقدمـــة

لقد أدى الاستعمال المتزايد للمواد الصلدة والمقاومة للحرارة في الاستخدامات الهندسية إلى ضرورة تطوير واستحداث تقنيات حديثة لتشغيل هذه المواد. وباستثناء التجليخ تعتبر الطرق التقليدية لإزالة المادة من سطح قطعة العمل غير فعّالة ولا يمكن استخدامها بسهولة في تشغيل هذه المواد الجديدة. وحتى لو كان التشغيل بالطرق التقليدية ممكناً, فدائماً ما يكون بطيئاً وغير فعّـال. ورغم أن معظم عمليات التشغيل الحديثة تم تطويرها أساساً لتشغيل المواد الصعبة التشغيل, إلا أن بعضها يتم استخدامها في إنتاج الأشكال المعقدة والفجوات الضيقة في المواد اللينة السهلة التشغيل أيضاً.

ويمكن تقسيم عمليات القطع غير التقليدية إلى أربع مجموعات أساسية:

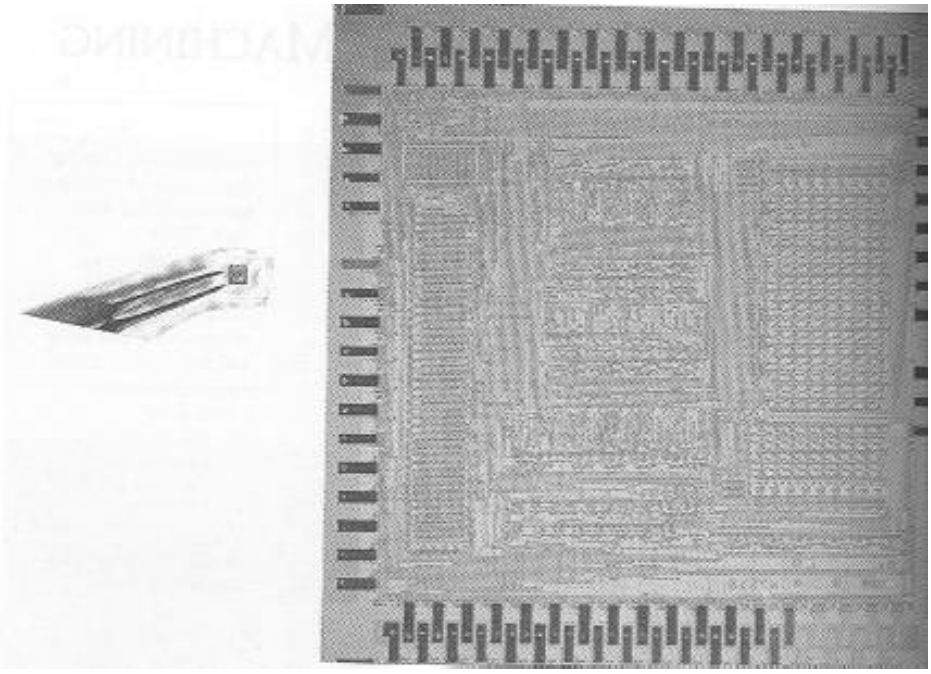
1) عمليات كيميائية: وتتم إزالة المادة في هذه العمليات بالتفاعل الكيميائي.
2) عمليات كهربائية: تتم هذه العمليات بالاستعانة بالطاقة الكهربية.
3) عمليات ميكانيكية: وتتم إزالة المادة بالنحت .
4) عمليات حرارية: تستخدم درجات الحرارة العالية في مناطق محددة لصهر وتبخير المادة.

سوف ندرس فيما يلي بعض من هذه العمليات حيث نذكر مثال أو اثنين من كل مجموعة مع شرح مبسط لمباديء العمل ومتغيرات التشغيل ومجالات استخدام كل نوع. وفي نهاية الباب سوف نلخص الخصائص الأساسية لباقي الأنواع في جداول مقسمة حسب كل مجموعة من المجموعات الأربع المذكورة.

9-2 التشغيل الكيميائي Chemical Machining

يعتبر التشغيل الكيميائي من أبسط وأقدم الطرق غير التقليدية في إزالة المادة. ولقد استخدم لسنوات عدة في إنتاج الصفائح المنقوشة لعمليات الطباعة ولوحات كتابة الأسماء. وفي عمليات التشغيل يتراوح استخدامه بين إنتاج الدوائر

الالكترونية الصغيرة جداً , انظر الشكل 9-1, إلى الأجزاء الكبيرة التي يصل طولها إلى 15 متراً.



الشكل 9-1: صورة مكبرة لجزء من رقيقة chip معالج دقيق microprocessor . تظهر هذه الرقيقة على اليسار بالحجم الطبيعي , طولها 5 مم فقط وتحتوي على ما يزيد عن 3000 ترانزستور [1].

9-2-1 عمليات التشغيل الكيميائية

في التشغيل الكيميائي, تتم إزالة المادة من أماكن محددة من قطعة العمل وذلك بغمرها في محلول كيميائي. وتتم إزالة المادة بواسطة تأثير الخلية الكهروكيميائية الدقيقة, تماماً كما يحصل في صدأ أو انحلال المعادن, ولا تدخل في العملية أي دائرة كهربية. وسيحفر الانحلال الكيميائي المتحكم به في آن واحد كل الأسطح المعرضة له, و تتم العملية بمعدلات تغلغل مختلفة تبعا لنوع المحلول ومادة قطعة العمل , وقد تكون هذه المعدلات بسيطة بقدر mm/min 0.0125 أو أكبر من ذلك بكثير . وتتخذ العملية الأساسية أشكالاً عدة مثل:

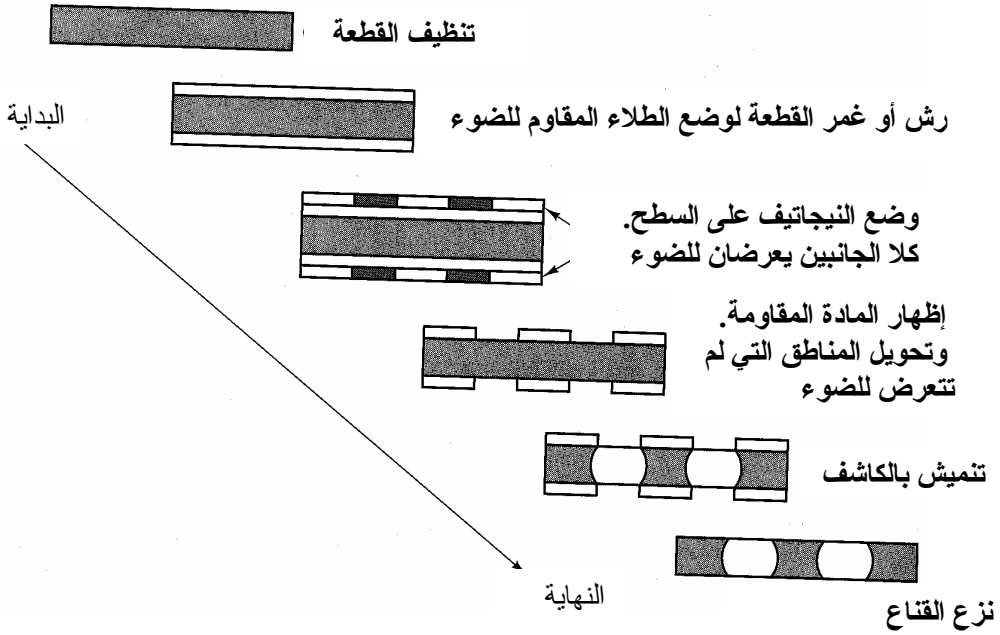
- التفريز الكيميائي chemical milling : لتشغيل الجيوب والتجاويف والجانبيات.
- تشكيل الأغفال chemical blanking : لحفر الصفائح الرقيقة.
- التشغيل الضوئي كيميائي photochemical machining: لحفر المواد المقاومة الحساسة للضوء في الإلكترونات الدقيقة.
- الطلاء الكيميائي: chemical polishing : حيث تستخدم محاليل كيميائية ضعيفة, تعمل أحياناً بالتحكم عن بعد, للطلاء أو لنزع الشوائب.

ويتلخص إجراء عملية التفريز أو تشكيل الأغفال الكيميائي في الخطوات التالية:

1. التجهيز, وتشمل: تنظيف , إزالة الشحم , غسل السطح وذلك لتوفير السطح المناسب لالتصاق المادة الحاجبة.
2. الحجب: طلاء أو حماية الأماكن التي لا يراد حفرها.
3. الحفر: التحليل الكيميائي إما بالرش أو بالغمر متبوعاً بالغسل.
4. نزع الحجاب: نزع الحجاب , التنظيف.
5. التشطيب: المعالجة والكشف على قطعة العمل.

بعد إجراء التنظيف والحجب يغمر الجزء المراد تفريزه أو يرش بحامض أكّال ويحفظ في المحلول لفترة. يتم الحفظ في المحلول فقط حين يسمح حجم وشكل القطعة بذلك, إلا أن حالات الرش غالبا لا تتطلب هذا الإجراء. إن أكبر مشكلة تواجهها هذه الطريقة هي عملية تغطية أو حجب سطح قطعة العمل بحيث يحصل التآكل على المناطق المرغوبة فقط. دائما ما يتم هذا بتغطية كامل سطح القطعة ومن بعدها يتم نزع الأجزاء المطلوبة باليد من على المناطق المراد حفرها.

تتشابه عمليات التشغيل الضوئي كيميائي بما سبق ذكره, حيث تستخدم تقنيات التصوير الفوتوغرافي لتوفير الغطاء اللازم. ويظهر الشكل 9-2 الخطوات المتبعة عند إجراء التشغيل الضوئي كيميائي باستخدام المقاومات الحساسة للضوء.



الشكل 9-2: الخطوات الرئيسية في التشغيل الضوئي كيميائي (PCM)

وتتلخص هذه العملية كما يلي:

1. تنظيف قطعة العمل.
2. تغطية قطعة العمل بمستحلب حساس للضوء, وذلك بالغمر أو الرش. ثم يجفف المستحلب في فرن.
3. تجهيز الرسومات, ترسم قطعة العمل بدقة , غالباً ما يكون ذلك في ورق من البوليستر أو الزجاج , بمقياس رسم كبير يصل إلى 50 مرة أو أكبر من الحجم الأصلي للقطعة. وبهذا التكبير يمكن تنفيذ الأجزاء الدقيقة في الشكل.
4. تصغير الرسم الأصلي بوسائل فوتوغرافية وذلك للحصول على النيجاتيف الذي يمثل القالب الرئيسي. وهو بنفس قياس القطعة النهائية المطلوبة. وهذا التصغير يمكن أن يتم على خطوات عديدة, باستعمال معدات التصوير الصناعية.

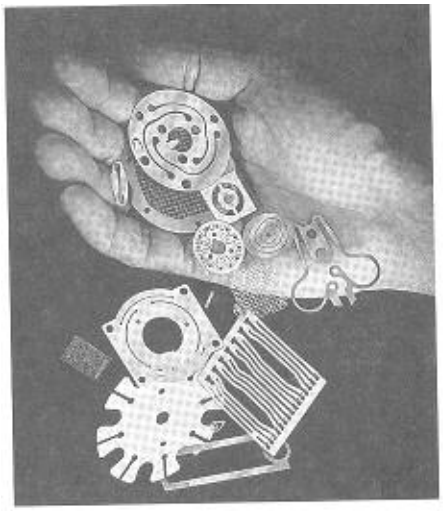
5. وضع القالب الرئيسي على قطعة العمل باستخدام إطار مفرغ من الهواء لضمان التماس الجيد, ثم تعريضه للضوء الأزرق, وتمرير الضوء عبر النيجاتيف. تستخدم غالبا مصابيح بخار الزئبق كمصدر للضوء. يساعد تعريض القطعة للضوء على تصليد المناطق المختارة من المستحلب (المادة المقاومة) بحيث لا يتم جرفها بالغسل في عملية الإظهار التالية.
6. نزع النيجاتيف وإظهار قطعة العمل. وهذا يزيل, أو يحلل, مناطق المادة المقاومة غير المعرضة, وبالتالي تعريض مناطق قطعة العمل التي يجب تشغيلها بالمحلول الكيميائي. وآخر خطوة للإظهار هي شطف كل المواد المتبقية بالغسل.
7. رش أو غمر قطعة العمل في المحلول الكيميائي.
8. نزع الأقنعة المتبقية.

يستخدم التشغيل الضوئي الكيميائي بشكل واسع في إنتاج الأجزاء الصغيرة المعقدة مثل لوحات الدوائر الالكترونية, والأجزاء الرفيعة جداً التي لا يسمح حجمها بتشغيلها بقوالب تشكيل الأغفال blanking dies المعتادة, انظر الشكل 9-3 .
وغالباً ما يُتبع التشغيل الكيميائي بالطلاء الكهربي, أو الطلاء بالرش الكاثودي, أو الترسيب الفراغي (الترسيب في منطقة مفرغة من الهواء) لترسيب الأغشية المعدنية ذوات السمك الدقيق. وتعتبر عمليات التشغيل الضوئي الكيميائي التقنية الأساسية للصناعات الالكترونية الدقيقة.

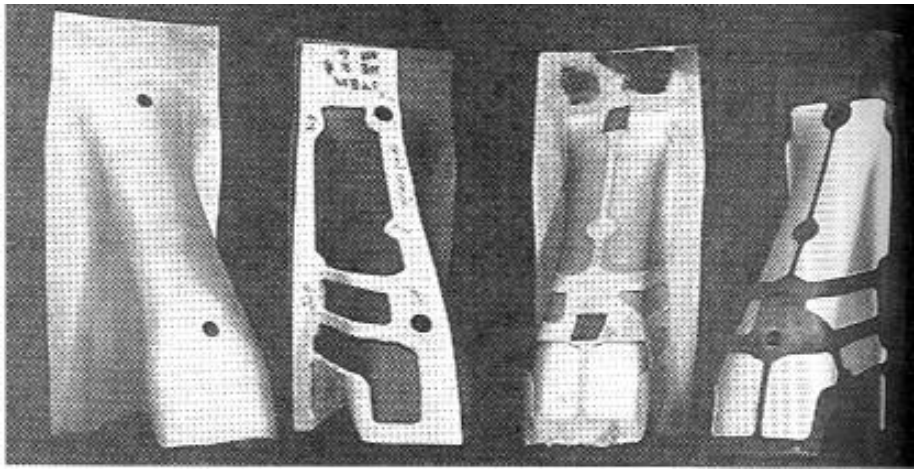
9-2-2 مزايا وعيوب عمليات التشغيل الكيميائية

للتشغيل الكيميائي عدد من المميزات الهامة. وباستثناء إجراءات التجهيز الفني للعملية من رسم وإظهار وتحويل للأغطية, تعتبر العملية بشكل عام بسيطة, لا تحتاج إلى مهارة, لا تحدث إجهادات في المعدن, ويمكن استخدامها تقريباً في كل المعادن , والمعادن الأكثر شيوعا هي الألومنيوم , الماغنيسيوم, التيتانيوم, والصلب. ويمكن تشغيل المساحات الكبيرة, مثل الخزانات التي تصل أبعادها إلى

4 × 15 متراً. ويتم تشغيل أي شكل معين من قطع العمل. كما أنه يمكن تشغيل قطع العمل الرقيقة والقليلة السمك, وذلك لعدم تعرض القطعة إلى أي قوى ميكانيكية, وبالتالي يكون التشغيل الكيميائي مفيداً جداً واقتصادياً في عمليات تخفيض الوزن. يبين الشكل 9-4 قطعة نموذجية كبيرة تم تفريزها كيميائياً بقصد تخفيض وزن القطعة. والتفاوتات المتوقعة من التشغيل الكيميائي تتراوح بين 0.0125 mm ± مع إنهاء سطحي جيد بشكل عام.



الشكل 9-3: قطع نموذجية تم إنتاجها بالتشغيل الكيميائي [2]



الشكل 9-4: صفائح معدنية لمحرك طائرة تم إنتاجها بالتفريز الكيميائي لتخفيض الوزن. (إلى اليسار) قطعة الصفيحة المشكّلة, (إلى وسط اليسار) تغطى الصفيحة بالمطاط السائل مع وضع نموذج المعايرة في مكانه, (إلى وسط اليمين) قطعة العمل محززة (معلّمة) , (إلى اليمين) الصفيحة الجاهزة [1].

وعند استخدام التشغيل الكيميائي , يجدر التنبيه إلى بعض العيوب الممكنة للعملية. إذ أن معدل إزالة المعدن بطيئة بالنسبة إلى مساحة السطح المعرض, ويكون معدل إزالة المعدن في حالة قطع العمل المصنوعة من الصلب في حدود 0.01 إلى .0.0002kg/min لكل متر مربع من السطح المعرض. إلا أنه بسبب إمكانية تعريض مساحات كبيرة من السطح في آن واحد , فيمكن أن يكون المعدل العام لإزالة المعدن في هذه الحالة مرضيا مقارنة بالعمليات الأخرى.

ويجب إخضاع المواد المشكّلة (أي التي تعرضت إلى عمليات تشكيل قبل التشغيل الكيميائي) إلى المعالجة الحرارية بشكل منتظم وأن تحوّل منها الإجهادات قبل تشغيلها. ورغم أن التشغيل الكيميائي لا يُحدث أية إجهادات في قطعة العمل , إلا أنه يمكن أن يُطلق الإجهادات المتبقية الموجودة في المعدن وبالتالي يسبب في تقوّسها. ويمكن تشغيل المسبوكات كيميائياً إذا ما لم تكن بها مسامات وكان حجم حبيباتها منتظماً.

3-9 التشغيل الكهربي

يمكن أن يُطلق مصطلح التشغيل الكهربي على مجموعة العمليات التي تستخدم التيار الكهربي أو التفريغ لإزالة المادة. وتعمل إزالة المادة عن طريق التيار الكهربي أو التفريغ على التخلص من التحويل غير الفعال للقدرة الكهربية إلى قدرة ميكانيكية والتي تعتبر السمة المميزة لعمليات التشغيل التقليدية وعمليات التشكيل المختلفة. ويساعد التخلص من المرحلة الميكانيكية أيضاً على التغلب على إحدى الصعوبات الكامنة في العمليات التقليدية, وهي الزيادة المستمرة في القوى المؤثرة على أداة القطع وفي زيادة معدلات البلي التي تتعرض لها الأداة عند تشغيل المواد والسبائك الشديدة الصلادة.

وفي عمليات التشغيل الكهربي يمكن أن تكون مادة الأداة أقل صلادة من مادة قطعة العمل, وليس لصلادة مادة قطعة العمل أي تأثير على معدل إزالة المعدن. وهذه هي أهم مميزات هذه العمليات. ولكن من أهم عيوب هذه العمليات هو أنه ينبغي أن تكون مادة قطعة العمل موصلة للتيار الكهربي.

ويمكن تقسيم عمليات التشغيل الكهربي إلى نوعين أساسيين (وكل نوع يمكن أن ينقسم بدوره أيضا إلى أنواع أخرى).

النوع الأول هو التشغيل بالتفريغ الكهربي Electrical discharge machining (EDM) : تستعمل هذه الطريقة خاصية النحت (أو الحث) التي تحدثها سلسلة متعاقبة وسريعة من الشرر الكهربية التي تعمل على إزالة المادة من

قطعة العمل. والنوع الثاني هو التشغيل الكهروكيميائي Electrochemical machining (ECM). وتستعمل هذه الطريقة خاصية التأثير الألكتروليتي لإزالة المادة من سطح قطعة العمل. ويختلف هذا النوع كلية عن التشغيل بالتفريغ الكهربي في آلية إزالة المادة وفي طريقة عملها الأساسية.

1-3-9 التشغيل بالتفريغ الكهربي

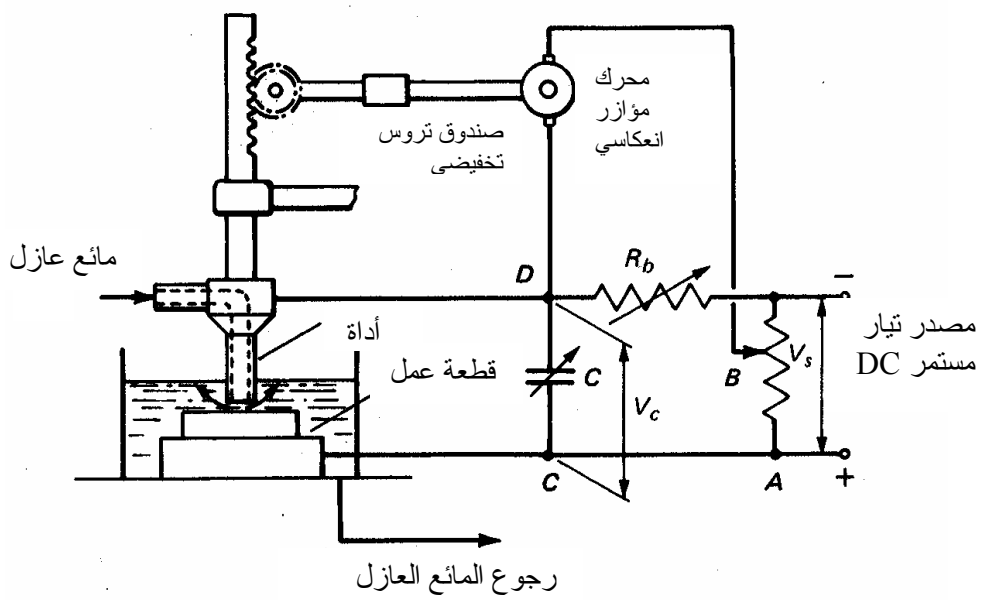
Electrical Discharge Machining (EDM)

تُدرج أحياناً عمليات التشغيل بالتفريغ الكهربي, أو الحث بالشرر كما يطلق على اسمها أيضاً, تحت مجموعة العمليات الحرارية وذلك بسبب تولّد حرارة عالية في منطقة العمل, إلا أنه بسبب استخدام الطاقة الكهربية لتوليد هذه الحرارة تم إدراجها في هذا الكتاب تحت عمليات التشغيل الكهربية. وتعتمد عملية التشغيل بالتفريغ الكهربي على خاصية تأثير الحث (أو النحت) الناتج من الشرارة الكهربية على كلا الألكترودين المستعملين لإحداثها. ولقد وجد من واقع التجربة العملية أنه إذا ما تم استخدام إلكترودين من نفس المادة, فسيحدث نحت أكبر على الألكترود الموجب. لذلك, لكي نتحصل على معدل أقصى لإزالة المادة مع أدنى مقدار من البلي على الأداة, نجعل قطعة العمل إلكتروداً موجباً والأداة إلكتروداً سالباً.

أساسيات عملية التشغيل بالتفريغ الكهربي

للإطلاع على أساسيات عملية التشغيل بالتفريغ الكهربي يجدر الاستعانة بالشكل 9-5. تثبت الأداة في الظرف المتصل بالمركز الدوار للآلة الذي يتم التحكم على تغذيته العمودية بواسطة محرك مؤازر Servomotor خلال صندوق تروس تخفيض السرعة. وتوضع قطعة العمل في خزان مملوء بمائع عازل للكهرباء Dielectric fluid (يطلق على هذا المائع أحياناً بالمائع الثنائي الخاصية, أي أنه يكون عازلاً مرة وغير عازل مرة أخرى, كما سنرى لاحقاً). ويجب أن تغمر القطعة في المائع على عمق لا يقل عن 50 mm فوق سطحها وذلك لتجنب خطر الاشتعال. وتوصل كل من الأداة وقطعة العمل بدائرة من التيار المستمر DC التي يزودها مولد تيار مستمر, أو مقوّم قوسي زئبقي أو مقوّم سيلينيوم. ويتم تدوير المائع العازل بالضغط عن طريق مضخة, ودائما ما يكون ذلك عبر فتحة (أو

فتحات) تحفر في الأداة الألكترود. ويتم المحافظة على فجـــوة الشرارة Spark gap التي تكون في حدود 0.025 إلى 0.05 mm عن طريق المحرك المؤازر.

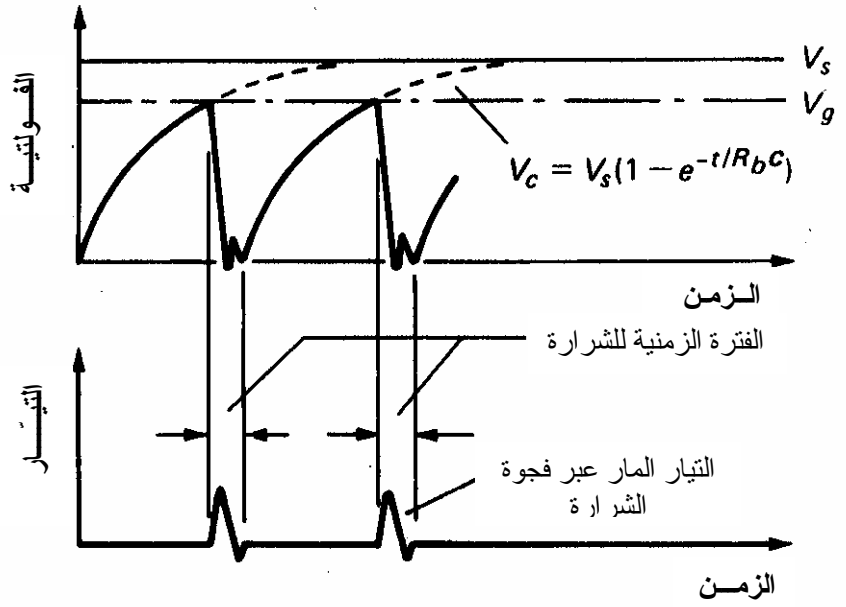


الشكل 9-5: التشغيل بالتفريغ الكهربي

وعندما يشغل مغذي القدرة, يبدأ جهد (فولتية) المكثف V_c بالتزايد أسّـــيـّـاً نحو جهد المصدر V_s (انظر الشكل 9-6) . وخلال هذه الفترة الابتدائية تعمل فجوة الشرارة كما لو كانت دائرة مفتوحة, ولا تسمح بمرور التيار. وبينما يزداد الجهد V_c تدريجياً, يصل إلى جهد انهيار الفجوة V_g (الذي يمكن تحديده بعرض الفجوة ونوع المائع العازل). عندها تنتج الشرارة عبر الفجوة, ويتأين المائع العازل, ويفرغ المكثف. ثم يزول التأين من المائع العازل المحيط بحيث يصبح ثانية عازلاً فعّـــالاً, تم تتكرر الدورة. وبهذه الكيفية نحصل على سلسلة سريعة ومتوالية من الشرر.

تكون الفترة الزمنية بين الشرارات المتعاقبة في حدود 100 ميكرو ثانية,

وتولّـد كـل شـرارة درجة حـرارة موضعية عاليـة تبلـغ $12000\ C^o$. وتسبب هذه الحرارة في تبخير جزء من المائع العازل المحيط بها, كما تعمل أيضا على صـهر وتبخيـر المعدن محدثـة شقاً صـغيراً علـى سطح قطعـة العمـل. وحيـث أن الشرارة تحصل دائماً بين نقطتـي الأداة وقطعـة العمل القريبتـان من بعضـهما, فـإن السطح العلوي لقطعة العمل ينحت تدريجياً وينسـخ شكل الأداة علـى قطعـة العمل (أي أن الشكل الناتج بفعل النحت على قطعة العمل يكون صـورة طبق الأصـل من شـكل الأداة). وتحمـل كريـات المعدن الصـغيرة التـي تكونـت أثنـاء العمليـة بعيداً بواسطة المائع العازل المتدفق. وبينما يتم نحت المعدن, تتم تغذية الأداة نحو قطعة العمل بواسطة آلية تغذية يتحكم فيها بالمؤازرة.



الشكل 9-6: الجهد (الفولتية) والتيار الكهربي في عملية التشغيل بالتفريغ الكهربي

تغذية الأداة بالمؤازرة

تحتوي آلية المؤازرة المبينة في الشكل 9-5 على محرك مؤازر قابل للإنعكاس موصّل بين أحد طرفي المكثف D والمنزلقة ذات المقاومة المتغيرة B. وتكون النقطتين A و C على نفس الجهد : إذا كانت القيمة المتوسطة للجهد V_c (الشكل 9-6) تساوي الجهد المُضبط مسبقاً بين A و B والجهدين عند B وD متساويين, والمحرك المؤازر في وضع السكون. وعندما تتغير القيمة المتوسطة للجهد V_c بفعل تغير عرض الفجوة, سوف يتغير الجهد عند D , وسيدور المحرك المؤازر إلى أن يتم الحصول على الفجوة المطلوبة مرة أخرى. وبهذه الكيفية تحافظ منظومة المؤازرة على الجهد المتوسط لفجوة الشرارة (وبالتالي عرض الفجوة) عند قيمة ثابتة. وعلى المحرك أن يكون قابلاً للانعكاس وذلك لأنه إذا ما تجاوزت آلية المؤازرة الهدف أو إذا ما حصلت فيها دائرة قصر نتيجة لتراكم الخراطة في الفجوة, فيجب سحب الأداة. ودائما ما يتم تأمين فجوة ثابتة تتراوح بين 0.025 إلى 0.05 mm , ويمكن أن تتغير قيمة الفجوة وذلك بتغيير ضبط المقاومة المتغيرة.

وتعمل الأنواع الأخرى من التحكم المستخدمة في العمل إما بضبط جهد الفجوة أو مواسعتها Capacitance.

بلي الأداة

يعتبر المعدل العالي لبلي الأداة من أكبر الصعاب التي تواجه عملية التشغيل بالتفريغ الكهربي. ويمكن التعبير عن نسبة البلي بحجم المعدن الذي تفقده الأداة مقسوماً على حجم المعدن الذي تم إزالته من قطعة العمل. وهذه النسبة تتغير بتغير مادة الأداة وقطعة العمل. وعلى سبيل المثال, إذا ما كانت مادة الأداة من النحاس الأصفر (البراص), ومادة قطعة العمل هي أيضا من النحاس الأصفر فإن هذه النسبة تساوي تقريبا 0.5, بينما إذا ما كانت الأداة من النحاس الأصفر وقطعة العمل من الصلب الكربوني المصلّد , تكون النسبة تقريباً الواحد الصحيح. وإذا ما كانت الأداة من النحاس الأصفر وقطعة العمل من كربيد التنجستن تكون هذه النسبة كبيرة وتصل إلى 3 . وعند اختيار المواد المناسبة لكل من الأداة وقطعة العمل يمكن الحصول على نسب بلي صغيرة تصل إلى 0.1 .

وينتج عن النسب العالية للبلي تشغيل غير دقيق علاوة على التكاليف العالية. ولهذه الأسباب , فقد استحوذ البحث عن مادة الأداة الأكثر ملاءمة لقطعة العمل على كثير من الاهتمام لدى الباحثين. ولأسباب عملية يستخدم عادة كل من النحاس والبراص (النحاس الأصفر) كمواد لأدوات التشغيل بالتفريغ الكهربي. ولكن إذا ما استلزم الأمر تقليل الفاقد من الألكترود للحد الأدنى, يستخدم الجرافيت النحاسي أو كربيد التنجستن. ويستخدم سلك التنجستن غالباً في حفر الثقوب العميقة ذوات الأقطار الصغيرة لأنه يقاوم بشكل جيد الميول إلى الالتواء أو الاحديداب نتيجة الموجات الصدمية التي تنتج عن تفريغ الشرارة أو التلامس مع قطعة العمل في حالة تخطي الهدف.

وكلما ارتفعت نقطة انصهار مادة الأداة , انخفض فعل النحت عليها. وبالتالي عند استخدام مادة الجرافيت النحاسي, مثلا, في صنع الأداة, سوف نجد أنه بينما ينحت النحاس بسرعة عند سطح الأداة, إلا أن الجرافيت (الذي له نقطة انصهار عالية) يصمد ويمنع استمرار النحت في الأداة. وبدا تتم المحافظة على باقي النحاس في الأداة لكي يساعد على إبقاء المقاومة الكهربية للأداة منخفضة.

المائع العازل Dielectric Fluid

الموائع العازلة الشائعة الاستخدام في عمليات التفريغ الكهربي هي زيوت البرافين وزيوت المحولات. هذان المائعان هما من الهيدركربونات , ووجد أن الهيدروجين الموجود في هذه الموائع هو الذي يعمل على نزع الأيونات من المائع حتى يصبح عازلاً فعالاً بعد كل تفريغ للشحنة.

وعلى المائع العازل المستخدم أن يبقى غير موصل (عازل) حتى يحدث الانهيار. وعند بلوغ الجهد الحرج , عليه أن ينهار بسرعة وبعدها عليه أيضاً أن تنزع أيوناته بسرعة بعدما يفرّغ المكثف. ويجب أن تكون الحرارة الكامنة للتبخير للمائع العازل عالية بحيث تسمح بتبخير كمية قليلة منه فقط. وعلى المائع العازل أن تكون له لزوجة منخفضة بقدر كاف لكي يتمكن من الانسياب بسهولة ويحمل الكريات المعدنية الدقيقة بكفاءة من مكان العمل.

ولقد دلت الدراسات على أن المركبات العضوية القطبية المذابة في الماء أكثر فاعلية من الموائع الهيدروكربونية التقليدية. وتعزى كفاءتها العالية إلى أن

طرد الإلكترونات من هذه المركبات يحتاج إلى طاقة أقل بحيث تتواجد الأيونات بسهولة لتفريغ الشرارة.

يمكن تغذية المائع العازل عبر منفث Nozzle بجانب منطقة العمل, ولكن إذا كان بالإمكان, وخاصة عند حفر الثقوب العميقة, تتم تغذية المائع عبر الأداة نفسها. ومن بين التحسينات المستخدمة في إنتاج الشقوق والثقوب العميقة والضيقة استخدام مضخة شفط لسحب المائع العازل عبر الأداة وعبر منطقة العمل. ويساعد استخدام مضخة الشفط على تخفيض التسخين المفرط وميول الألكترود إلى الالتواء ويعمل أيضا على زيادة معدل إزالة المعدن. وقبل أن يعاد تدوير المائع ثانية إلى المنفث, من الضروري تصفيته بغية إزالة جزيئات المعدن التي نتجت في العملية.

معدل إزالة المعدن

يعتمد معدل إزالة المعدن على المعاملات الكهربية التي تم شرحها سابقاً. ومن الجدير ذكره أن معدل الإزالة المنخفض ينتج عنه إنجاز سطحي أفضل وبالتالي يجدر الوصول إلى الحل المرضي, وهذا يعتمد على نوع السطح المرغوب إذا ما كان خشناً أم ناعماً. وهذا الحل يشبه ذلك المستخدم في عمليات التشغيل التقليدية حيث يتطلب السطح الناعم معدل تغذية منخفض, وبالتالي يعتمد معدل الإزالة على حدود سرعة القطع الممكنة.

ومع استخدام الأنواع المحسنة من مولدات النبض يمكن الحصول على معدلات إزالة تبلغ $0.09\ \mu m^3/sec$ تحت ظروف التشغيل التخشينية.

ويتأثر معدل إزالة المعدن بالفترة الزمنية التي تستغرقها الشرارة تحت كمية معرفة من الطاقة الكهربية. ووجد أنه عند قدرة كهربية معطاة يتواجد زمن تفريغ مثالي يعطي أقصى معدل لإزالة المعدن لكل تفريغ. بينما إذا كان زمن التفريغ قصيراً جداً, يصبح بلي الأداة متزايداً , وهذه الزيادة في بلي الأداة تقلل من دقة العملية.

والسطح الناتج من عملية التفريغ الكهربي له مظهر شبيه بالذي ينتج عن العصف الرملي, ويحتوي على تشققات كروية صغيرة جداً نتيجة إزالة المعدن بسبب الشرارات المنفردة. وبالتالي يكون الإنهاء السطحي غير اتجاهي (أي ليس

في اتجاه واحد) وهو مناسب جداً لحفظ وتثبيت المزلّقات (زيوت التزليق) . ويمكن أن نحصل على إنجاز سطحي بمقدار 0.25 µm وأفضل من ذلك بهذه الطريقة.

دقة العملية

تعتمد دقة هذه العملية بقدر كبير على عرض فجوة الشرارة, وكلما كانت الفجوة صغيرة زادت الدقة, ولكن الفجوة الصغيرة ينتج عنها جهد تشغيلي منخفض, وهذا ينتج عنه, كما سنرى لاحقاً, معدل إزالة منخفض. وبالتالي يتوجب اللجوء إلى الحل المرضي وهذا يتوقف على نوع السطح والدقة المطلوبة.

ومن بين العوامل الأخرى التي تؤثر على دقة العملية دقة الكترود الأداة نفسه والتسامح الذي تم تصميمه عليه لتحديد فجوة الشرارة. وتحدث عدم الدقة في الأبعاد في حالة إنتاج الفجوات أو الثقوب العميقة ذوات الأسطح الداخلية المتوازية, ويحصل ذلك بسبب السلبة أو الاستدقاق الذي ينتج عن الشرر الذي يحدث بين جانبي الألكترود وجانبي الفجوة. وتساعد الجزيئات المتفتتة التي تمر بين الألكترود وجانبي الفجوة على التفريغ الشراري وتعمل على تخفيض جهد الانهيار للمائع العازل بشكل فعّال. والاستدقاق الذي ينتج بهذه الكيفية (وهو في حدود 0.05 mm للجانب الواحد على كامل عمق الفجوة) يصبح من سمات بعض المنتجات مثل قوالب التشكيل وقوالب السحب, الخ. حيث تتطلب هذه المنتجات زاوية سحب صغيرة . ولكن عندما يكون الاستدقاق غير مرغوب فيه , عندها يمكن تصحيح شكل الأداة وذلك بتحفيفها من جهة الرأس.

أثر التغير في معاملات التشغيل الكهربية على العملية

يعتمد حجم الشرخ الذي تحدثه الشرارة على الطاقة المتبددة في كل تفريغ, وبذلك يتوقف حجم الشرخ على جهد الانهيار للفجوة V_g والمواسعة C . وللحصول على شروخ صغيرة وبالتالي إنهاء سطحي جيد, يتوجب أن يكون كل من V_g و C صغيرين.

ويتوقف معدل إزالة المعدن على كل من الطاقة المتبددة في كل تفريغ وتردد التفريغ. ولقد وجد نظرياً وكذلك تجريبياً أنه عند جهد مصدر مقداره V_s يكون معدل الإزالة أقصى ما يمكن عندما يتساوى V_g مع V_s , ويتناسب معدل الإزالة

الأقصى المناظر مع V_s^2/R_b , حيث R_b هو مقاومة الكبح Ballast resistance.

ولزيادة معدل الإزالة يجب زيادة V_s وتخفيض R_b . ولكن إذا كان V_s عال جداً , فإن الإنجاز السطحي يتدهور, وتصبح مشاكل العزل أكثر صعوبة. (يكون جهد المصدر في حدود 70 إلى 500 V). وعندما تكون R_b منخفضة جداً, يصبح ثابت الزمن لدائرة الشحن منخفض جداً, وبدا يصبح تردد التفريغ الشراري عال جداً , ولا يستطيع المائع العازل أن ينزع أيوناته بمعدل عال بما فيه الكفاية. وعندما تكون أيضاً R_b منخفضة جداً , يحدث قوس كهربي مستمر , ويحدث عن هذا إنجاز سطحي رديء وضرر حراري لقطعة العمل ومكونات العملية وذلك بسبب ارتفاع درجة الحرارة.

يساعد تخفيض V_s وبالتالي V_g على الحصول على فجوة شرارة صغيرة, والتي تعطي دقة عالية وإنجازاً سطحياً جيداً . بينما يقل معدل الإزالة بسبب بتخفيض V_s, وعلى ذلك يتم اللجوء أيضا إلى الحل التوفيقي.

الاستخدامات العملية

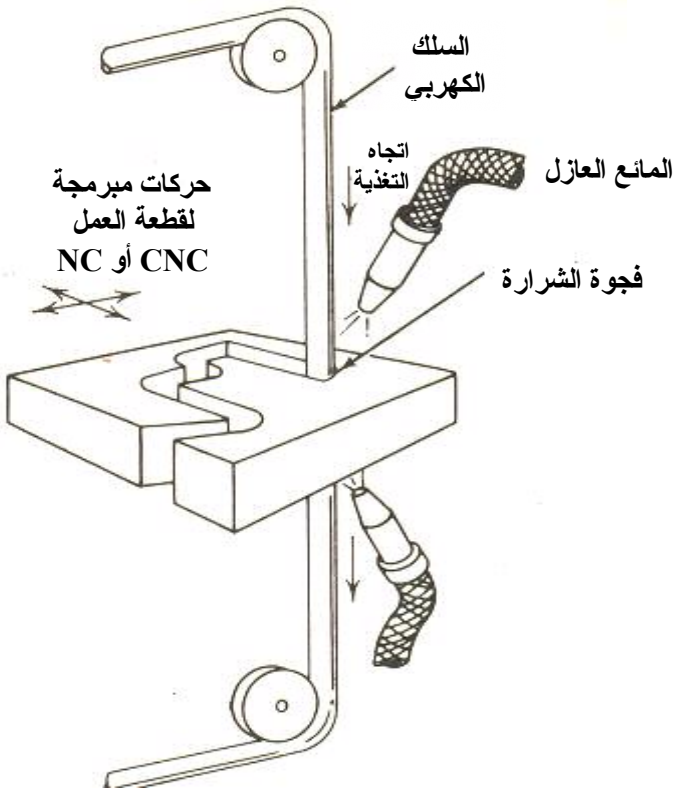
تستخدم عمليات التفريغ الكهربي بشكل واسع في صنع العُدد والأدوات , وخاصة في صناعة أدوات الكباسات , قوالب الثقب, قوالب الحدادة, وقوالب السباكة.

ومن المميزات الهامة لعمليات التفريغ الكهربي هو أن العُدّة أو القالب يمكن تشغيله بالشرر بعد ما يتم تصليده, وبالتالي يمكن الحصول على دقة عالية في الأبعاد. ويمكن تشغيل الأدوات الكربيدية الملبدة cemented carbide tools مباشرة بعد التلبيد النهائي, وهذا يقلل من الحاجة إلى مرحلة التلبيد الجزئية الوسطى وبالتالي يقلل من عدم الدقة الناتجة من التلبيد النهائي بعد تشغيل الثقوب..الخ.

وتجعل خاصية الاحتفاظ بالزيت, التي يتمتع بها السطح الناتج, العملية مناسبة لتصنيع كراسي التحميل واسطوانات محركات الاحتراق الداخلي. وزيادة على ذلك يساعد خلو الأسطح الناتجة من الأشكال الاتجاهية ومن الشقوق الفائقة الدقة على التقليل من إمكانية حدوث فشل الكلال fatigue failure . كما تستخدم

العملية أحياناً في إنتاج الثقوب ذوات الأقطار الصغيرة في الأجزاء المصلّـدة مثل منافث حاقنات الوقود في محركات الديزل.

ويمكن تحوير شكل أداة القطع بالطريقة التي تتناسب مع الشكل أو مسار القطع, ومن الأمثلة على ذلك جعل أداة القطع على هيئة سلك من النحاس يدور على بكرات باستمرار, ويتم تحريك قطعة العمل في مسار محدد باستخدام آلية التحكم العددي للتحكم في حركة قطعة العمل مع المحافظة على وجود المحلول العازل كما هو مبين بالشكل (9-7) وتسمى هذه العملية - القطع بالسلك الكهربائي Electric Discharge Wire Cutting (EDWC)



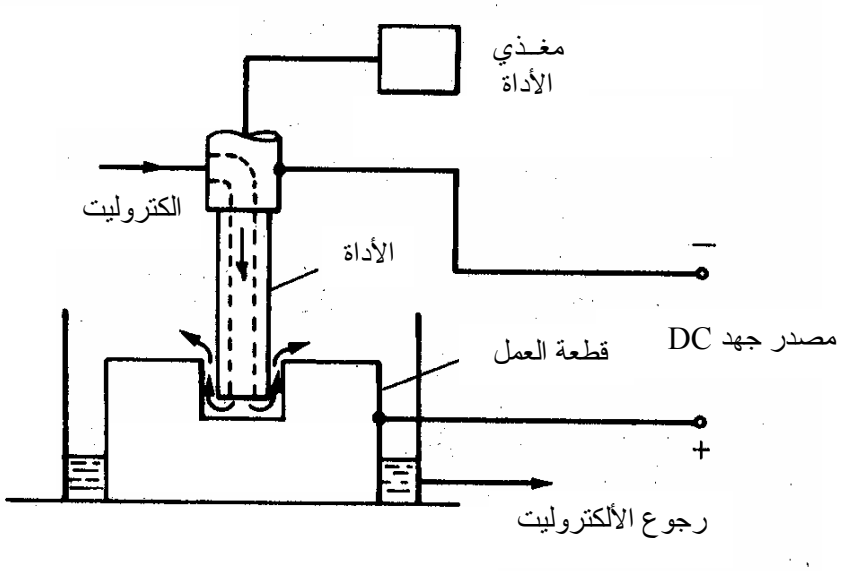
الشكل (9-7) القطع بالتفريغ الكهربائي باستخدام سلك نحاسي كأداة قطع [10]

9-3-2 التشغيل الكهروكيميائي Electrochemical Machining

يطلق التشغيل الكهروكيميائي ECM على عملية إزالة المعدن التي يستخدم فيها التأثير الألكتروليتي في تحليل معدن قطعة العمل. وهي في حد ذاتها تمثل العملية العكسية للطلاء الكهربي المعروف.

مبادئ عمل التشغيل الكهروكيميائي

يوضح الشكل 9-8 عملية التشغيل الكهروكيميائي . توضع قطعة العمل (التي يجب أن تكون جيدة التوصيل للكهرباء) في وعاء يوضع على سطح طاولة الآلة ويكون موصلا للطرف الموجب لمصدر كهربي ذو تيار مستمر DC. ويشكّل إلكترود الأداة بنفس شكل الفجوة المراد عملها في قطعة العمل ويثبت في ماسك الأداة ويوصل بالطرف السالب لمصدر الجهد. ويتدفق السائل الألكتروليتي خلال الفجوة التي بين الأداة وقطعة العمل ويجمع في خزان أسفل منطقة العمل ثم يرجع إلى المنطقة ثانية بواسطة المضخة, إما عبر الأداة أو من الخارج وذلك حسب تجهيزات العملية.



الشكل 9-8: التشغيل الكهروكيميائي

ويعمل التيار الذي يسري خلال الألكتروليت على تحليل المعدن الذي في الأنود , أي قطعة العمل. وتكون المقاومة الكهربية منخفضة (وبالتالي يكون التيار عال) في المنطقة التي يتقارب فيها كل من الأداة وقطعة العمل. وحيث أن المعدن يتحلل من قطعة العمل بسرعة في هذه المنطقة, فإن قطعة العمل تتشكل بشكل الأداة.

ولا يوجد اتصال ميكانيكي بين الأداة وقطعة العمل , ويحول تدفق الألكتروليت المستمر في منطقة العمل دون ترسب جزيئات المعدن على الأداة (الكاثود) . وبالتالي لن يكون هناك بليٌ للأداة ولا ترسبٌ لجزيئات المعدن على الأداة, أي أن الأداة الواحدة يمكن أن تُنتج عدداً كبيراً من قطع العمل طيلة فترة عمرها. والجهد والتيار يكونان ثابتين في عمليات التشغيل الكهروكيميائي.

الألكتروليت

للألكتروليت وظيفتين هامتين في التشغيل الكهروكيميائي . الأولى أنه يوفر الوسط الذي يحدث فيه التحليل الكهربي, والثانية أنه يبعد الحرارة التي تتولد في منطقة العمل نتيجة سريان التيار العالي بين الألكترودين وبين الألكتروليت نفسه. ويجب أن يكون تدفق الألكتروليت كافياً حتى يمنع السائل من بلوغ درجة الغليان.

وإضافة إلى مقدرة الألكتروليت على تأدية الوظائف المذكورة, يجب أن يتمتع بالخصائص الكيميائية الآتية:

1) يجب أن يكون نشطاً كيميائياً بما فيه الكفاية كي يعمل على إزالة المعدن بصورة فعّالة.
2) يجب أن لا يكون مسبّباً للصّدأ بشكل كبير وإلا سيحدث تهالك سريع لأجزاء الآلة التي يتلامس معها.

ولتلبية المطلب الأخير تصنع أجزاء الآلة المعرضة للألكتروليت عادة من الصلب اللاصدؤ أو تطلى بدهان مقاوم للصدأ.

والألكتروليت الأكثر شيوعاً واستخداماً في هذه العملية هو ماء الملح, كما تستخدم محاليل ملحية أخرى في بعض الحالات.

معدل إزالة المعدن

يمكن التنبؤ عن المعدل الذي يتم به إزالة المادة من أي قطعة عمل في عملية التشغيل الكهروكيميائي وذلك بمعرفة المكافيء الكهروكيميائي له. ويمكن التعبير عن معدل إزالة المعدن كما يلي:

$$Z_{we} = \eta_e \frac{e}{\rho} I \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (9.1)$$

حيث

Z_{we} = حجم المعدن المزال بالتحليل الكهربي لكل وحدة زمنية

e = المكافئ الكهروكيميائي لمادة قطعة العمل

I = شدة التيار

η_e = كفاءة التيار, أي, الجزء من التيار الفعلي الذي يعمل في التحليل الكهربي

ρ = كثافة مادة قطعة العمل

إن معادن الكوبلت والحديد والنيكل والمولبدنيوم والكروم والتنجستن, التي تعتبر المكونات الأساسية للسبائك الهندسية, لها قيم $\frac{e}{\rho}$ تتراوح بين 1.95 إلى 2.25 $cm^3/min/1000A$, وكفاءة التيار تكون في الغالب بين 0.75 إلى 0.90. وبالتالي يكون الرقم التقريبي للمعدل المناسب لإزالة المعدن بالتشغيل الكهروكيميائي في حدود 1.65 $cm^3/min/1000A$

ومن المعادلة (9.1) نجد سرعة التغذية للأداة كالآتي:

$$f_m = \frac{Z_{we}}{A_s} = \eta_e \frac{e}{\rho} \frac{I}{A_s} \ldots\ldots\ldots (9.2)$$

حيث

f_m = سرعة تغذية الأداة

A_s = مساحة سطح قطعة العمل المعرضة للتحلل الكيميائي

$\frac{I}{A_s}$ = فيض التيار

وبالتالي, لكي نحصل على أعلى معدل للتشغيل, يجب استخدام أعلى فيض تيار ممكن. ويتوقف فيض التيار على جهد المصدر وعلى مادة قطعة العمل والأداة وعلى نوع الألكتروليت الذي سينقل التيار. ويجب ألا يكون التيار عال جداً حتى لا تنتج عنه حرارة مفرطة تؤثر على الأداة وقطعة العمل أو يحدث عطلاً كهربائياً أو يسبب في تحلل الألكتروليت. وفي الغالب يكون فيض التيار في حدود 1.5

MA/m^2 , إلا أنه من المعتاد أن نصادف عمليات تشغيل تعمل بفيض تيار تصل إلى $4.5\ MA/m^2$.

وإذا كان فيض التيار المسموح بها لعمل ما تجعل التيار الكلي للعملية أقل بكثير من سعة الآلة ومصدر الجهد , ففي هذه الحالة يمكن العمل على قطعتين أو أكثر في آن واحد. وبهذه الكيفية يمكن استخدام الآلة بأقصى طاقة لها مع الاستفادة في تخفيض تكاليف الإنتاج للقطعة الواحدة.

إن أعلى معدل إنتاج تم التوصل إليه في العمليات الصناعية كان في حدود $0.08\mu m^3/sec$. وكان ذلك عند تشغيل مكونات المحركات النفاثة. بينما في الأعمال البحثية تم التوصل إلى رقم يبلغ $0.38\ \mu m^3/sec$ عند العمل بتيار يبلغ 10000A.

طبيعة السطح الناتج

حيث أن إزالة المعدن بالتشغيل الكهروكيميائي لا يتم بالقص الميكانيكي (كما هو الحال في العمليات التقليدية) ولا بصهر وتبخير المعدن (كما في التشغيل بالتفريغ الكهربي مثلاً) , هذا يعني أن لا وجود للضرر الحراري ولا ينتج عن العملية إجهادات متبقية في السطح المشغّل. إن الحرارة الوحيدة التي تتولد في هذه العملية هي بسبب المقاومة الكهربية, ولا يسمح لدرجة الحرارة بالارتفاع إلى درجة غليان الألكتروليت.

تأثير التغذية وجهد المصدر على الدقة

إن المقاومة الرئيسية لسريان التيار في التشغيل الكهروكيميائي هي بسبب الألكتروليت , وبالتالي يمكن التعبير عن شدة التيار المار في الدائرة كالآتي:

$$I = \frac{V_s}{R_e} = \frac{A\ V_s}{r_e\ a_g} \qquad \text{.....(9.3)}$$

حيث

V_s = جهد المصدر

R_e = مقاومة الألكتروليت

r_e = المقاومة النوعية للألكتروليت

a_g = الفجوة بين الأداة وسطح قطعة العمل

A_s = مساحة سطح قطعة العمل المعرض للألكتروليت

ويمكن التعبير عن عرض الفجوة وذلك بالاستعانة بالمعادلتين 9.2 و 9.3 كالتالي:

$$a_g = \frac{\eta_e V_s}{r_e \rho f_m} \quad \text{.....(9.4)}$$

تبين المعادلة 9.4 أنه كلما زادت سرعة التغذية فإن عرض الفجوة يقل. وإذا كانت الفجوة بين الأداة وقطعة العمل صغيرة تكون الدقة عالية, وبدا إذا كانت سرعة التغذية عالية (وبالتالي معدل الإزالة عال) فإنها تعطي دقة عالية.

ويتضح أيضاً من المعادلة 9.4 أن الزيادة في جهد المصدر V_s تعمل على زيادة a_g وبالتالي تخفيض دقة العملية. وتعمل زيادة عرض الفجوة a_g على رفع المقاومة, راجع المعادلة 9.2, وبالتالي ارتفاع درجة الحرارة. ويؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى زيادة المقاومة النوعية r_e وهذا يجعل العلاقة الخطية بين a_g و V_s غير قائمة.

وجهد المصدر الشائع الاستخدام في عمليات التشغيل الكهروكيميائي يتراوح بين 5 إلى 20V . وتستخدم القيم الصغيرة للجهد في عمليات التنعيم بينما تستخدم القيم العالية في عمليات التخشين .

تصحيح شكل الأداة

إذا ما استخدمت أداة ذات جانبين عموديين في تشكيل فجوة على سطح قطعة العمل, فلن يكون جانبي الفجوة عموديين تماماً. يعزى ذلك إلى سريان التيار بين جانبي الأداة وجانبي قطعة العمل . وللتخلص من هذا الأثر عادة ما يتم تغطية جانبي الأداة بمادة عازلة. بينما إذا لم يكن جانبا الفجوة المطلوبة موازيين لاتجاه التغذية , فقد لا يكون هذا العزل ضرورياً. ويمكن الحصول على الشكل المرغوب للفجوة في هذه الحالات وذلك بتصحيح شكل الأداة بما هو مناسب. ويجب تحديد مقدار التصحيح اللازم من واقع الخبرة المكتسبة في استخدام هذه العملية.

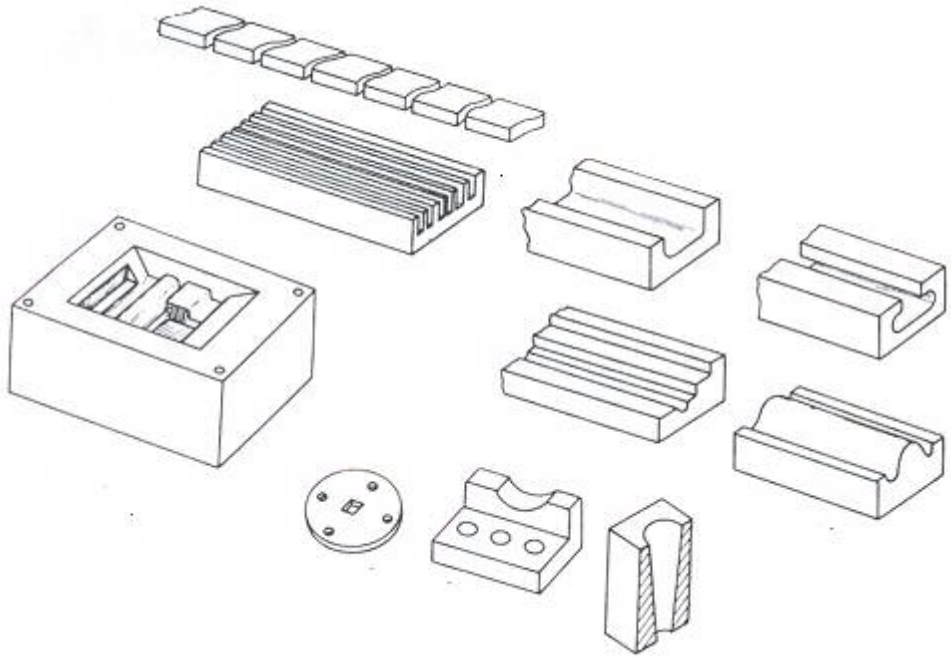
الاستخدامات

تتركز الاستخدامات الأساسية للتشغيل الكهروكيميائي في تشغيل المواد الصلدة, مثل تلك التي تستخدم عند العمل في ظروف درجات الحرارة العالية. ويمكن أن يكون معدل الإزالة في هذه المواد أعلى من ذلك الذي يتم الحصول عليه من عمليات التشغيل التقليدية, هذا إذا ما كانت الأخيرة قادرة على تنفيذ العمل أصلاً. ولكن معدل الإزالة بالنسبة للمواد الأقل صلادة والمطيلية يكون أقل من ذلك الذي يتم بالطرق التقليدية, ولكن حتى للمواد المطيلية واللينة تبقى عمليات التشغيل الكهروكيميائي مفيدة في حالة إنتاج الإشكال المعقدة.

وتم استخدام التشغيل الكهروكيميائي بنجاح في عمليات التشغيل الآتية:

1) تشغيل الثقوب النافذة مهما اختلف شكلها ومساحة مقطعها, ودائما ما يتم ذلك بطريقة التجويف اللبي (أي نزع السطح الخارجي للثقب والإبقاء على اللب)
2) تشغيل الثقوب العمياء ذوات الجوانب المتوازية.
3) تشغيل الفجوات المشكّـلة, مثل قوالب الحدادة.
4) تشغيل الأشكال الخارجية المعقدة, مثل ريش التوربينات.

وتجد في الشكل 9-9 نماذج لبعض المنتجات التي تم إنتاجها بعمليات التشغيل الكهروكيميائي.



الشكل(9-9) نماذج لبعض القطع المنتجة بالتشغيل الكهروكيميائي

9-4 العمليات الميكانيكية

9-4-1 التشغيل بالموجات فوق- الصوتية
Ultrasonic Machining (USM)

تستخدم عمليات التشغيل بالموجات فوق الصوتية أداةً تهتـز بتردد عال يفوق تردد الموجات الصوتية لكي تدفع المادة الحاكة التي في الملاط (محلول به مواد حاكة) slurry باتجاه قطعة العمل حيث تصطدم المادة الحاكة بسطح القطعة ويتم الحفر عليها بواسطة الطرق المستمر. وتُـنتج (تحفر)الأداة شكلاً مطابقاً لها في قطعة العمل عندما يحتك الملاط المحمّـل بالجسيمات الحاكة بسطح القطعة. والمواد الحاكة الأكثر شيوعاً هي كربيد البورون, أكسيد الألومنيوم, وكربيد السيليكون. ويمكن لهذه العملية أن تقطع أي مادة ولكنها تكون أكثر كفاءة في المواد القصيفة مثل السيراميك والجرمانيوم والزجاج أو المواد التي تزيد صلادتها عن R_c40. نجد في الشكل 9-10 رسماً توضيحياً لهذه العملية.

طريقة العمل

هنالك تقنيتان أساسيتان تستخدمان في التشغيل بالموجات فوق الصوتية. تُستخدم في الأولى أداة معدنية غير دوّارة ولكنها تهتز. ويغمر رأس الأداة في الملاط ولكنه لا يلمس أبداً قطعة العمل , وتعمل الجسيمات الحاكة التي يدفعها اهتزاز الأداة على نحث القطعة وذلك باستخراج جزيئات صغيرة من مادتها. ويطلق على هذه التقنية التشغيل بالصدم Impact machining. والتقنية الثانية تستخدم فيها أداة دوارة هزازة يصنع رأسها من الألماس وتقوم بالقطع بطريقة مشابهة لتلك التي يعمل بها المثقاب الألتوائي أو قطـّاع التفريز. ولا يستخدم ملاط في هذا النوع. ويتم القطع نتيجة حواف القطع الحادة للأداة التي تقوم بملامسة القطعة بشكل متناوب.

ومبدأ عمل التقنية الأولى يمكن شرحه كالتالي. تهتز أداة القطع تحت اهتزازات صغيرة السعة تتراوح بين 0.06 إلى 0.08 mm وبترددات عالية تتراوح بين 20,000 إلى 30,000 هرتز. وتصدر الإهتزازات في هذا المدى صوتاً عالياً لا يمكن سماعه بالأذن البشرية. ويتوجه تيار من الملاط ناحية رأس الأداة, ثم تندفع الجسيمات الحاكة التي في السائل بعيدة عن الرأس باتجاه قطعة العمل بقوة عالية

تبلغ تقريباً 150,000 مرة من قوة الجاذبية الأرضية. وتتمثل ظروف القطع بالفعل التدميري الذي تحدثه هذه الجسيمات على القطعة. ويجب مراعاة أن يكون الملاط الذي يستخدم في هذا النوع قليل التركيز وذلك لتفادي التحام الأداة مع قطعة العمل.

وفي التقنية الثانية, يتضمن مبدأ العمل أداة دوّارة لها شكل يشابه عجلة التجليخ, أو قطّاع التفريز, أو المثقاب الإلتوائي والتي تنقل إليها الذبذبات فوق الصوتية عبر محورها. ولأداة القطع شكل مناظر للحفرة أو التجويف المطلوب في قطعة العمل. وتشابه العملية في الأساس عملية تجليخ مطوّرة. وعلى عكس التقنية الأولى, لا يستخدم الملاط في هذا النوع , وتلامس رأس الأداة مع قطعة العمل يكون أدنى ما يمكن ويحدث هذا في الفترات التي بين الاهتزازات. وكل حبيبة قطع في الأداة لها حركة جانبية إضافة إلى حركتها المحيطية العادية. وتعمل هذه الحركة الجانبية شيئين : 1. تقلل من الاحتكاك وهذا يجعل الأداة تقطع بكفاءة عالية, 2. تنظف الفضالة وتبعدها خارج منطقة القطع , وهذا أيضا يجعل الأداة تقطع بقوة أعلى كما يساعد على إنتاج أسطح ذات إنجازية عاليةً.

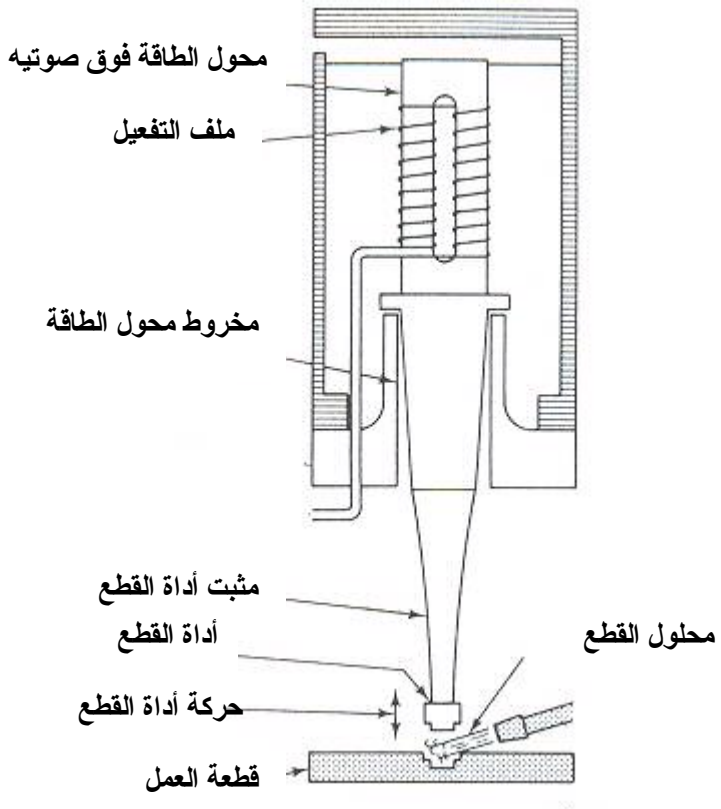
معدلات الأداء

على أداة القطع أن تكون قوية بما فيه الكفاية لمقاومة فشل الكلال. وغالباً ما تكون مواد الأداة من البراص (النحاس الأصفر) , الكربيدات, الصلب اللين, أو من صلب العدة. وتختلف معدلات بلي الأداة تبعاً لصلادتها. وتتراوح هذه بين 1 : 1 و 1 : 100 (نسبة المادة المزالة من قطعة العمل إلى المادة التي تفقدها الأداة بسبب البلي) .

ستكون حجم الحفرة التي تحدثها الجسيمة المرتطمة بسطح القطعة أكبر بمقدار مرتين من حجم الجسيمة , وسيكون الثقب مسلوباً وهذا يحد من نسبة عمق الثقب إلى قطره حيث لا تزيد هذه النسبة في الغالب عن 3 : 1 . وتتم السيطرة على الإنهاء السطحي عن طريق حجم الجسيمات الحاكة المستخدمة (كلما كانت الجسيمات صغيرة كان الإنجاز السطحي دقيقاً) . إلا أن معدل إزالة المادة يكون صغيراً.

ويزداد معدل الإزالة كلما زاد حجم الجسيمة إلى أن يصل الحد الأقصى له تم يبدأ في النقصان, وذلك لصعوبة وصول الجسيمة الكبيرة إلى منطقة القطع عندما يزداد التغلغل , وبدا يقل معدل التشغيل.

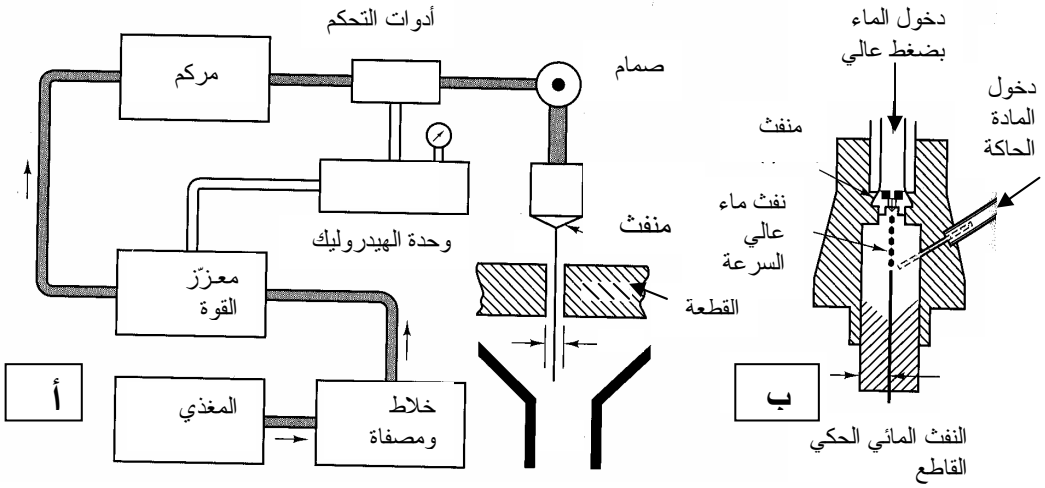
ويمكن بهذه العملية عمل الثقوب والشقوق والفجوات المختلفة الأشكال بسهولة وفي أي مادة موصلة أو غير موصلة للكهرباء أو في المواد غير المعدنية أو حتى المواد المركّـبة. و تتميز هذه الطريقة عن غيرها من العمليات بأنها لا تؤثر على تركيب المادة المقطوعة حيث لا يحدث خلال عملية القطع ارتفاع في درجات الحرارة ولا تتعرض لمرور تيار كهربائي بها كما أنها لا تتعرض لإجهادات ميكانيكية زائدة.



الشكل (9-10) الفكرة الأساسية لعملية القطع بالموجات فوق صوتيه

2-4-9 التشغيل بالنفث المائي Waterjet machining

تستخدم طريقة التشغيل بالنفث المائي نفث عالي السرعة تصل سرعته إلى 2 ماخ (ضعف سرعة الصوت), وحين يرتطم هذا النفث بقطعة العمل يُحدث شقاً بها. وتسمى هذه الطريقة أيضاً بالتشغيل الهيدروديناميكي , انظر الشكل 9-11. ويمكن إضافة مواد بوليمرية إلى الماء لجعل النفث المائي مترابطاً (بحيث لا يخرج من فوّهة المنفث nozzle على هيئة رذاذ) تحت ضغط المنفث الذي يتراوح بين 70 إلى 410 MPa . كما تستخدم في هذه العملية موائع بديلة للماء مثل الكحول والجليسرين وزيوت الطبخ وذلك لقطع اللحوم ومنتجات الأفران والمواد الغذائية المجمدة. والقطر النموذجي للنفث يكون في حدود 0.075 إلى 0.5 mm ويخرج من الفوّهة بسرعة تصل إلى 1000 m/sec . وتستخدم هذه الطريقة في قطع المواد غير المعدنية اللينة مثل البلاط والقرميد واللدائن والألواح الورقية والأسبستوس (بدون غبار) والجلد والمطاط والألياف الزجاجية.



الشكل 9-11: رسم توضيحي للتشغيل الهيدروديناميكي . يرفع معزز القوة المائع إلى ضغط المنفث المرغوب بينما يعمل المركم على تحسين النبضات في الدفق. ويظهر إلى اليمين منفث التشغيل بالنفث المائي الحكي.

وعندما تضاف مادة حاكة وناعمة للنفث المائي يمكن بذلك قطع بعض من المواد الحديدية والغير حديدية. وتسمى هذه الطريقة بالتشغيل بالنفث المائي الحكي Abrasive water jet machining . تضاف المادة الحاكة بعد أن يغادر النفث الفوهة, انظر الشكل 9-11 ب, وتكون المادة الحاكة غالباً من الجرانيت أو السيليكا أو أكسيد الألومنيوم. وتعتبر هذه الطريقة جيدة في تشغيل المواد المركبة Composites , حيث تكون معدلات القطع مقبولة ولا تفصل طبقات المادة.

5-9 العمليات الحرارية Thermal Processes

في هذه العمليات تُستخدم الحرارة لقطع المادة, ويمكن تصنيف العمليات الحرارية على أنها طرق غير تقليدية سواء في أسلوب توليد هذه الطاقة أو طرق التحكم فيها. ومبدأ هذه العمليات سواء التشغيل بالحزمة الإلكترونية أو بأشعة الليزر أو غيرها هو تحويل الطاقة المنبعثة كلاً حسب مصدرها إلى طاقة حرارية تقوم بصهر منطقة محددة من المادة وبذلك تتم إزالة المادة المرغوبة وتحويلها من سطح قطعة العمل.

1-5-9 التشغيل بالحزمة الالكترونية
Electron Beam Machining (EBM)

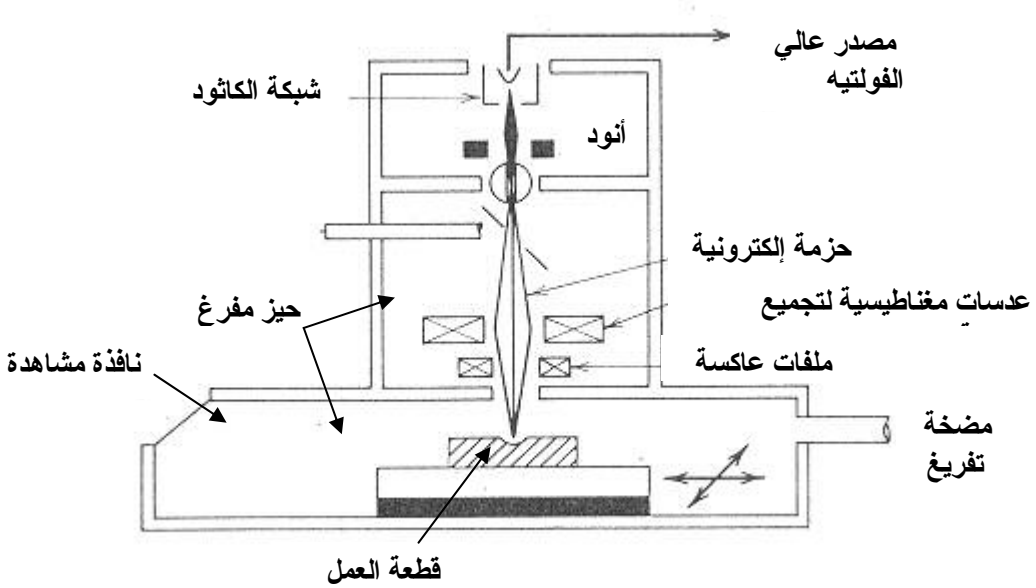
إن الاستخدام الأساسي للحزم الالكترونية في عمليات التصنيع هو اللحام, ولكنها قد تستخدم أحياناً في القطع ويكون ذلك غالباً في عمليات الثقب. والتشغيل بالحزمة الالكترونية هي عملية قطع حرارية غير تقليدية تستخدم حزمة من الإلكترونات عالية الطاقة تُركّز في بؤرة وتُسلّط على قطعة العمل لتصهر وتبخّر المعدن الذي تقع عليه. تؤدى هذه العملية في مكان مفرغ من الهواء (في حدود 10^{-5} mm-Hg). وتستخدم عدسات مغناطيسية لتركيز الحزمة في بؤرة، حيث تتحكم ملفات الانعكاس في موضع الحزمة. كما يمكن برمجة المسار المرغوب للحزمة بواسطة الكمبيوتر لإنتاج الشكل المطلوب على قطعة العمل.

يكون قطر البقعة التي تسلط عليها الحزمة في حـــدود 0.0125 إلى 0.25 mm , ويمكن تشغيل ثقوب وفتحات بعمق يصل إلى 100 مرة من قطرها أو عرضها, ويتم ذلك بمنتهى الدقة في وقت قصير وفي أي مادة. إلا أن التداخل بين الحزمة وسطح القطعة ينتج أشعة X الخطيرة, وعليه يلزم حجب هذه الأشعة بالكامل.

وتعتبر الطبقة السطحية من مادة قطعة العمل التي يتم صهرها وكذلك العمق المتضرر حرارياً صغيرًا جدا مما يقلل من العيوب السطحية الناتجة.

وفي التشغيل الدقيق (الميكروي) يمكن أن تزيد سرعة القطع عن تلك التي تتم بها عمليات التشغيل بالتفريغ الكهربي وعمليات التشغيل الكهروكيميائية. وتكون التفاوتات النموذجية في حدود 10% من قطر الثقب أو عرض الفتحة.

وتتطلب هذه الآلات فولتية عالية (50 إلى 200kV) وذلك لتعجيل الإلكترونات إلى سرعات عالية جداً تكون في حدود 0.5 إلى 0.8 من سرعة الضوء. ويجب أن يشغل هذه الآلات أشخاص مدربين عليها تدريباً جيـــداً وذلك باعتبارها عملية دقيقة وخطيرة في نفس الوقت. يظهر الشكل 9-12 رسمـاً توضيحياً لهذه العملية.



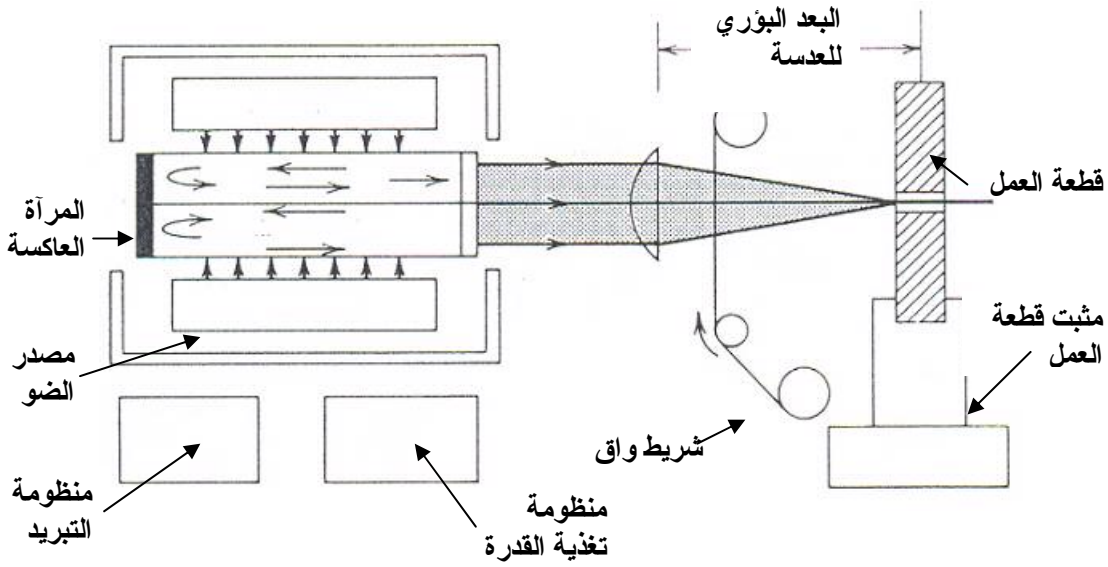
الشكل 9-12 رسم توضيحي لفكرة القطع بالحزمة الالكترونية

2-5-9 التشغيل بالليزر Laser Beam Machining (LBM)

التشغيل بالليزر هو أيضاً عملية تشغيل حرارية وتستخدم شعاع الليزر لصهر وتبخير المواد. وأشعة الليزر عبارة عن حزمة ضوئية من ضوء أحادي الطول الموجي مركزة ومجمعة بأقل تشتت ممكن. وجاءت كلمة الليزر من تجميع الأحرف البادئة للجملة المرادفة باللغة الإنجليزية الآتية:

Light Amplification by Simulated Emission of Radiation

أي: تضخيم الضوء بواسطة تنشيط الأشعة المنبعثة. و يمكن تركيز الحزمة في بؤرة صغيرة القطر بقدر 0.125 mm أو أقل , انظر الشكل 9-13.



الشكل (9-13) رسم توضيحي لفكرة القطع بأشعة الليزر

تستخدم هذه العملية غالباً في حفر الثقوب الدقيقة في المعادن التي يصل سمكها إلى 2.5 mm , إلا أن الثقوب النموذجية هي تلك التي تكون النسبة بين عمقها وقطرها بنسبة 10 : 1.

توجد مصادر مختلفة لتوليد أشعة الليزر تلبي كافة متطلبات عمليات التشغيل واللحام غير التقليدية وعمليات التصنيع الأخرى.

ومن بين هذه المصادر بلورات الياقوت الصناعي التي يضاف إليها قدر ضئيل من أكسيد الكروم بنسبة 0.05 % تقريباً الذي يكسب الياقوت اللون الأحمر الخفيف. فعندما تمتص ذرات الكروم الأشعة الضوئية فإن بعض أيوناتها تستثار (ترتفع طاقتها) , ثم ما تلبث أن تعود إلى حالتها الأولى مطلقة جزءًا مما امتصته وتشعها في صورة أشعة ضوئية فلورسنتية. ثم تقوم الأشعة المطلقة باستثارة ذرات أخرى , وهكذا تتكرر الاستثارة وإطلاق الأشعة من ذرات الكروم في ما يعرف بعملية تضخيم الأشعة الضوئية. تستمر عملية تضخيم الأشعة الضوئية بتكرار اصطدامها بذرات الكروم وإثارتها حتى يصل الحال إلى الحد الحرج لشدة الأشعة المضخمة والتي عنده يمكن للأشعة النفاذ من طرف الياقوت ذي المرآة نصف العاكسة. يؤدي سقوط الأشعة بسطح المعدن إلى رفع درجة حرارته حتى درجة الانصهار أو البخر أحياناً, ففي هذه الحالات يجب تخفيض طاقة الشعاع لتجنب تبخر معدن السطح. ويتم تركيز شعاع الليزر بالأجهزة البصرية كما يمكن تعزيز عملية الصهر بمساعدة الأكسجين.

وتوجد الآن مصادر أخرى عديدة لتوليد الأشعة مثل التي تستعمل غاز النيون للاستثارة مع استخدام أشعة ألكترومغناطيسية تصدر من مولد ذو تردد عال وتتصل بإلكترودات موضوعة حول أنبوب زجاجي.

كما يستخدم غاز ثاني أكسيد الكربون مع شوائب من النيتروجين أو الهليوم. يوضع الغاز في أنبوب طويل فيصدر أشعة ليزر ذات طول موجي أعلى من تلك التي تصدر عن المصادرة الصلبة.

وتوجد حالياً وحدات لتوليد أشعة الليزر بقدرة تبلغ 20 kW تستخدم في اللحام وقطع المقاطع السميكة بمساعدة الأكسجين. كما توجد وحدات ليزر بغاز ثاني أكسيد الكربون ذات قدرة عالية تستخدم لقطع مواد حتى سمك 3 mm . وتبلغ

سرعة شعاع الليزر حوالي 12 mm/sec إلا أنها قد تصل أحياناً إلى 20 mm/sec ففي هذه الحالة تصبح هذه العملية منافسة للتشغيل بالحزمة الإلكترونية.

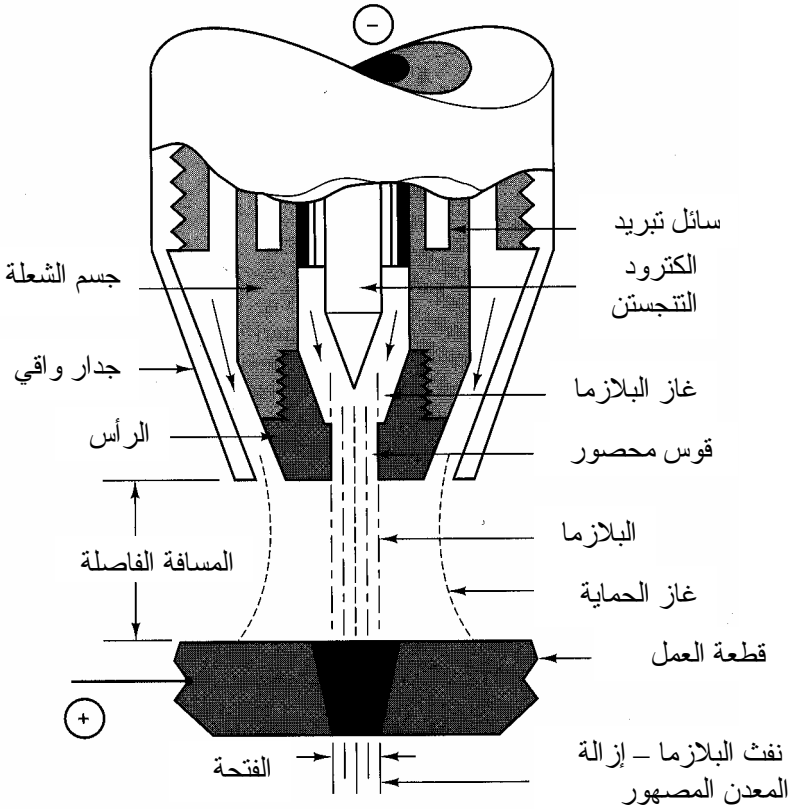
يكون الشكل الهندسي للثقوب المشغّلة بهذه العملية غير منتظم , كما تتكون طبقة سطحية مسبوكة (بفعل انصهارها ثم تبريدها) , وتكون هناك أيضا منطقة متأثرة بالحرارة مما يضر بخصائص المادة.
تصل دقة التموضع في المنظومات العالية الدقة إلى $\pm$ 0.125 mm . وتستخدم عمليات الليزر الصناعية أساساً في القطع واللحام والمعالجة الحرارية والتسوية , وذلك بتغيير فيض القدرة مع تعديل مناسب في شدة الحزمة الخارجة , وتركيزها وفترة عملها.

وتوجد الآن منظومات الليزر التي تعمل بالتحكم العددي NC يتراوح استخدامها بين قطع ورق السجائر إلى حفر الثقوب الميكروسكوبية في ريش محركات التوربين. وعند العمل بين معدات الليزر من أي نوع يجب استخدام المواد الواقية وذلك بسبب الضرر البالغ الذي قد تسببه في البصر سواء من ضوء الليزر المباشر أو من الضوء المبعثر.

3-5-9 القطع بقوس البلازما Plasma Arc Cutting (PAC)

تستخدم عمليات القطع بقوس البلازما تياراً محمصاً (مسخّن فوق العادة) superheated stream من الغاز المتأين كهربائياً لصهر المادة وإزالتها من سطح قطعة العمل. انظر الشكل 9-14. والبلازما هي حالة الغاز المتأين المتعادل الشحنة (أي أن عدد الأيونات الموجبة يساوي عدد الإلكترونات السالبة) والغاز في هذه الحالة يصبح موصلاً للتيار الكهربائي ويتأثر بالمجالات المغناطيسية.
ويُكوَّن البلازما الذي تكون درجة حرارته بين 10,000 إلى 25,000°C داخل منفث مبرد بالماء عن طريق التأيين الكهربي لغاز مناسب مثل النيتروجين أو الهيدروجين أو الهليوم أو خليط من هذه الغازات. وتستخدم العملية تقريبا في تشغيل أي معدن موصل للكهرباء. وقوس البلازما هو خليط من الإلكترونات الحرة و أيونات موجبة الشحنة وذرات متعادلة. ويطلق القوس في حيز مملوء بالغاز بواسطة شرارة عالية التردد. ويعمل الجهد العالي والتيار

المستمر على تعزيز القوس, الذي يخرج من المنفث بسرعة قريبة من سرعة الصوت. وتوصل قطعة العمل بالقطب الكهربائي الموجب, بينما تعمل الغازات العالية السرعة على صهر المعدن وتحويل المعدن المصهور بعيداً (بالنفخ).
تستخدم الشعلات ذات الدفق المزدوج غازاً ثانوياً أو درعاً مائياً للمساعدة في تحويل المعدن المصهور خارج الفتحة , وهذا يجعل ناتج عملية القطع أكثر نظافة (أي خالي من العوالق). ويمكن إجراء العملية تحت الماء باستخدام خزان كبير ويساعد الماء على حصر القوس وتقليل الدخان المنبعث.



الشكل 9-14: التشغيل بقوس البلازما

والميزة الأساسية لعمليات القطع بقوس البلازما هي السرعة. إذ يمكن قطع الصلب اللين الذي يبلغ سمكه 7 ملليمترات بسرعة تصـــل إلـــى .40 m/min . إلا أن هذه السرعة تقل كلما زاد السمك عن ذلك. ويساعد الحقن المائي في إطالة عمر المنفث. كما يجب التحكم في المسافة الفاصلة بـين المـنـفـث وقـطـعـة العـمـل stand-off distance كي نحصل على النتائج الصحيحة. والجدير بالذكر أنه يمكن استخدام الألكترود ذو المقاس الواحد لقطع عدد من المواد المختلفة في مادتها وسمكها وذلك بالتعديل المناسب لمستوى القدرة ونوع الغاز, ومعدل التدفق, والسرعة الجانبية, وزاوية اللهب.

والقطع الجانبي profile للمعادن مثل الصلب اللاصدؤ والألومنيوم هو من أهم الاستخدامات التجارية لهذا النوع. كما يمكن أيضاً قطع الصلب اللين والصلب السبائكي والتيتانيوم والبرونز بكفاءة وبسرعة, إلا أن الخبث الذي قد يلتصق بالسطح السفلي لمكان القطع وتكوّن المنطقة المتأثرة بالحرارة قد يحدّان من استخدام العملية في بعض الحالات.
ومن الجدير بالذكر أنه يمكن برمجة الوحدات لجعل العملية متحكم فيها عددياً.

وفي نهاية هذا الباب سوف نلخص الخصائص الهامة ومتغيرات التشغيل للأنواع المختلفة من عمليات التشغيل غير التقليدية. وسوف نوردها في الجداول 9-1 إلى 9-4 حسب المجموعة السالفة الذكر في أول الباب.

الجدول 9-1 ملخص عمليات التشغيل الكيميائية غير التقليدية

العملية	الإنجاز السطحي µm	معدل إزالة المعدن $cm^3/min.$	القدرة الحصانية $HP/in^3.min.$	معدل التغلغل mm/min.	الدقة mm	ملاحظات
التفريز الكيميائي	1.5 إلى 6 وقد يصل إلى 0.2	390	طاقة كيميائية	0.025 إلى 0.05	0.025 إلى 0.0075 تبعاً للمادة المشغلة.	صالحة لكافة المواد, لا يزيد عمق القطع عن 15 mm , لا نتوءات, لا إجهادات سطحية, تكلفة أداة منخفضة
التلميع الكهربي	0.1 إلى 0.8 وقد يصل إلى 0.05	منخفض جداً	50 إلى 200	0.0125 إلى 0.0375	لا تشملها: تستخدم العملية للحصول على الإنجاز الدقيق	جودة عالية, لا إجهادات سطحية, لا إجهادات متبقية, تنتج أسطح مقاومة للصدأ, يمكن تصنيفها مع مجموعة الكهروكيميائي
التشغيل الضوئي كيميائي	1.5 إلى 6 وقد يصل إلى 0.2	390	قدرة DC	0.01 إلى 0.05	0.025 إلى 0.05	تقتصر على المواد الرفيعة السمك, لا نتوءات, تغفيل المواد القصيفة, تكاليف منخفضة للأداة, تستخدم في الألكترونات الدقيقة.
التشغيل الحراري كيميائي	خال من النتوءات	منخفض جدا بدورات زمنية سريعة	لا تشملها	دورات زمنية من 15 إلى 50 ثانية	لا تشملها	تبخر النتوءات في الأجزاء المسبوكة والمشغلة, وتنزع الزوائد من تروس الصلب أتوماتيكياً

الجدول 9-2 ملخص عمليات التشغيل الكهربائية غير التقليدية

العملية	الإنجاز السطحي µm	معدل إزالة المعدن $cm^3/min.$	القدرة الحصانية $HP/in^3.min$.	معدل التغلغل mm/min.	الدقة mm	ملاحظات
التشغيل الكهروكيميائي (ECM)	0.4 إلى 1.5	1 إلى 10	160	2.5 إلى 7.5	0.125 إلى 0.0125	إزالة المعدن بلا إجهادات, تصميم الأداة مكلف, مشكلة تصريف الكيماويات, لا يتوقف معدل الإزالة على صلادة المعدن.
التجليخ الكهروكيميائي (ECG)	0.2 إلى 0.75	0.25 إلى 6.5	مرتفع	سرعة القطع: 2000 – 1500 m/min.	0.025 إلى 0.0075	تحوير لعملية الـ ECM , مناسبة لتجليخ المواد الصلدة الموصلة للكهرباء, لا أضرار حرارية ولا إجهادات متبقية.
التفريغ الكهربائي (EDM)	0.75 إلى 2	5	40	12.5	0.05 إلى 0.0375	أقدم الأنواع غير التقليدية, تستخدم بكثرة ومؤتمتة, الأدوات غالية, تقطع كل المعادن الموصلة للكهرباء, لا نتوءات, تكوّن دائماً طبقة من المعدن المسبوك.
التفريغ بالسلك الكهربائي (EDWC)	0.75 إلى 1.5	1.5 إلى 4.5	40	100 إلى 250 باستخدام سلك من المولبدنيوم	0.005 إلى 0.0025	حالة خاصة من الـ EDM تستخدم سلكاً متحركاً, تقطع فجوة ضيقة مستقيمة بسمك 0.025 إلى 75 mm , تستخدم أسلاك ذوات أقطار بين 0.05 إلى 0.25 mm , تستخدم معها آلات NC لتشغيل الأشكال المعقدة.

الجدول 9-3 ملخص عمليات التشغيل الميكانيكية غير التقليدية

العملية	الإنجاز السطحي µm	معدل إزالة المعدن $cm^3/min.$	القدرة الحصانية $HP/in^3.min$	معدل التغلغل mm/min	الدقة mm	ملاحظات
التشغيل بالدفق الحكّي	0.75 إلى 7.5 وحتى 0.05	منخفض	لا تشملها	منخفض	0.025 إلى 0.05	تستخدم أساسًا لتنعيم الممرات الداخلية التي لا يمكن الوصول إليها, وتستخدم إزالة الطبقة المسبوكة الناتجة من الـ EDM (لا تستخدم في الثقوب العمياء: غير النافذة)
التشغيل بالنفث المائي	1.25 إلى 2.5	منخفض جداً	لا تشملها	تتوقف على نوع المادة	±0.25	تستخدم في الخشب والمواد غير المعدنية, بضغوط تبلغ 380 MPa ,وسرعة نفث من 500 إلى 1000 m/sec
التشغيل بالنفث المائي الحكي	1.25 إلى 2	منخفض جداً: عملية تشطيب دقيقة	لا تشملها	منخفض	0.125	تستخدم في المواد الحساسة للحرارة والقصيفة: الزجاج, التيتانيوم, المواد المركبة والمواد اللامعدنية. ينتج عنها جدران مسلوبة في القطعيات العميقة.
التشغيل الهيدروديناميكي	0.75 إلى 2.5	تتوقف على نوع المادة	لا تشملها	تتوقف على نوع المادة	يمكن حتى 0.025	تستخدم في شق المواد اللينة غير المعدنية, لا وجود لمنطقة متأثرة بالحرارة, تنتج فتحات ضيقة (0.025 إلى 0.5 mm) , لها مستويات ضجيج عالية
التشغيل بالموجات فوق الصوتية	0.25 إلى 1.5	بطيئة: نموذجيًا تبلغ 0.8	200	0.5 إلى 3.75	0.025 إلى 0.012	تكون أكثر فعالية في المواد الصلدة التي تزيد صلادتها على R_c40 , تكون نسبة عمق الثقب إلى عرضه كنسبة 2.5 : 1 بسبب البلي السريع.

الجدول 9-4 ملخص عمليات التشغيل الحرارية غير التقليدية

العملية	الإنجاز السطحي µm	معدل إزالة المعدن $cm^3/min.$	القدرة الحصانية $HP/in^3.min.$	معدل التغلغل mm/min.	الدقة mm	ملاحظات
التشغيل بالحزمة الألكترونية (EBM)	0.75 إلى 6	منخفض جداً 0.08	10,000	150	0.025 إلى 0.005	تستخدم في التشغيل الميكروي للمواد النحيفة وحفر الثقوب الرفيعة بنسبة عمق إلى قطر يساوي 100 : 1 يجب وضع قطعة العمل في حيز مفرغ من الهواء ومناسب للتحكم الآلي, تستخدم الحزمة للتشغيل وللكشف, تستخدم بكثرة في الالكترونيات الدقيقة.
التشغيل بأشعة الليزر (LBM)	0.75 إلى 6	منخفض جداً 0.006	60,000	2.5 إلى 100 في حفر الثقوب	0.125 إلى 0.0125	يمكنها حفر ثقوب بقطر 0.125 إلى 1.25 mm في مواد يبلغ سمكها 2.5 mm في ثوان. ويمكن لنفس المعدات أن تقوم بعمليات اللحام والمعالجة الحرارية و...الخ. تنتج عنها منطقة متأثرة بالحرارة وطبقة مسبوكة قد تتطلب الإزالة.
التشغيل بقوس البلازما (PAM)	0.75 إلى 12	160	20	250 إلى 3000 عند تشغيل الصلب	0.5 إلى 3.5	تؤدي عمليات قطع نظيفة وسريعة في معظم الصفائح بسمك يصل إلى 200 mm وبسلبة بحدود 5^o إلى 10^o .

أسئـــــــلة

1. ما هي المجموعات الأساسية لعمليات القطع غير التقليدية؟
2. لماذا تعتبر عمليات التشغيل بدون الرائش ذات أهمية كبيرة في المستقبل؟
3. ما هي الخطوات المتبعة في التشغيل الكيميائي باستخدام الطليّـة المقاومة الحساسة للضوء؟
4. في التشغيل الكيميائي لماذا يفضل وضع المنمّـش بالرش وليس بالغمر؟
5. ما مميزات تشكيل الأغفال الكيميائي عن تشكيل الأغفال العادي باستخدام السنبك والقالب؟
6. هل يمكن إنتـــاج تجـويف عرضـــه 2 mm وعمقـه 3 mm بالتشغيل الكيميائي؟
7. هل من الممكن تشغيل مجموعة ملتحمة من الصلب بالتشغيل الكيميائي؟ ولماذا؟
8. كيف يمكن إنتاج مقطع مسلوب بالتشغيل الكيميائي؟
9. هل للتشغيل الكهروكيميائي علاقة بالتشغيل الكيميائي؟
10. ما تأثير صلادة مادة قطعة العمل على معدل إزالة المعدن في التشغيل الكهروكيميائي؟
11. ما هو السبب الرئيسي في بلي الأداة في التشغيل الكهروكيميائي؟
12. كيف تتأثر دقة العملية في التشغيل الكهروكيميائي بكل من جهد المصدر وسرعة التغذية؟
13. ما هي الخصائص التي يجب أن يتمتع بها الألكتروليت في التشغيل الكيميائي؟
14. كيف يمكن جعل عملية التشغيل بالنفث المائي مناسبة لتشغيل بعض أنواع المعادن الحديدية؟
15. في عمليات التشغيل بالموجات فوق الصوتية, ما أثر حجم الجسيمات الحاكة على معدل إزالة المعدن والإنهاء السطحي؟ ولماذا يقل معدل الإزالة كلما زاد عمق الفجوة؟
16. ما طبيعة السطح المنتج بعمليات التفريغ الكهربي؟
17. ما الميزة الرئيسية في استخدام الكترود سلكي متحرك في التشغيل بالتفريغ الكهربي؟

18. إذا ما كانت مادة صنع قطعة العمل قصيفة وأن القطعة سوف تكون معرضة لقوى شد متكررة, هل تختار التشغيل الكهروكيميائي أو التشغيل بالتفريغ الكهربي لإنتاجها؟ لماذا؟
19. إذا ما كانت العملية المطلوبة هي حفر ثقوب عديدة في قطع عمل مشابهة, هل تفضل التشغيل الكهروكيميائي, التفريغ الكهربي, الحزمة الألكترونية, أم أشعة الليزر ؟ ولماذا؟
20. لماذا تكون مقادير القدرة عالية جداً في التشغيل بالليزر؟
21. إشرح ,مستعيناً بالفيزياء وعلم المعادن, لماذا تكون قطع الرائش في العمليات الحرارية على هيئة كريات جوفاء؟