



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة بابل - كلية الهندسة

السيطرة على الظروف التشغيلية في منظومة التشغيل الكهروكيميائي

رسالة قدمها المهندس محمد صباح علي الميالي الى قسم
هندسة المواد في كلية الهندسة / جامعة بابل
كجزء من متطلبات نيل درجة الماجستير علوم في هندسة المواد

باشراف

الدكتور _____

حيدر عبد

تحسين علي حسين الحطاب

الدكتور
الحسن العذاري

شعبان ١٤٢٣ هـ

تشرين الاول ٢٠٠٢ م

قرار لجنة المناقشة

نشهد باننا اعضاء لجنة المناقشة قد اطلعنا على الرسالة الموسومة
(السيطرة على الظروف التشغيلية في منظومة التشغيل الكهروكيميائي)
المقدمة من قبل الطالب محمد صباح علي الميالي ، وقد ناقشنا الطالب في
محتوياتها وفيما له علاقة بها ورأينا انها جديرة بالقبول لنيل درجة
الماجستير علوم في هندسة المواد بدرجة

د. حيدر عبد الحسن العذاري
عضو (مشرف)
جامعة بابل

د. تحسين علي حسين الحطاب
عضو (مشرف)
جامعة بابل

رئيس اللجنة

مصادقة رئيس قسم هندسة المواد
د. تحسين علي حسين

مصادقة عمادة كلية الهندسة
د. عبد الامير سهم رسن

الهدف من البحث

نظراً لأهمية عملية التشغيل الكهروكيميائي في العمليات التصنيعية ، وخاصة في الصناعات العسكرية التي تستخدم العملية في صناعة المسدسات والبنادق لغرض ازالة الحواف وانهاء السطح وتوسيع الثقوب ، ولغرض اعطاء فكرة عن العملية ومدى الاستفادة منها لمن يعمل في هذا المجال ، تم الخوض بهذا البحث حيث تم الاعتماد على احد تطبيقاتها والذي يسمى بالتشغيل الكهروكيميائي الثابت (Static ECM) او ما يسمى بالتشغيل الكهروكيميائي باستخدام عدة قطع ثابتة .

حيث يهدف البحث الى دراسة عملية نظرية لتحديد الظروف التشغيلية لعملية (ECM) من ضغط (Pressure) ، تيار (Current) ، معدل جريان (P.R.) وفولتية (Voltage) للوصول الى ادق شكل وفضل نعومة للاشكال المعقدة كبديل لعمليات التشغيل التقليدية .

سيتم استخدام ثلاثة معادن وهي الالمنيوم (Al) ، الفولاذ (Steel) والبراص (Brass) وبغض النظر عن الصلادة ، حيث من المعروف ان عملية (ECM) تستخدم لتشغيل المعادن الصلدة وفي هذا البحث استُخدمت معادن ذات صلادة منخفضة وذلك لأن لها صلة بما تحتاجه الشركة المنتجة من دراسة في هذا المجال .

المحتويات

	الفصل الاول : المقدمة
١	١-١:مقدمة
٢	١-٢:مزايا ومحددات التشغيل الكهروكيميائي
٤	١-٣:الهدف من البحث
	الفصل الثاني : الجزء النظري
	٢-١:التشغيل الكهروكيميائي
	٢-٢:العناصر الرئيسية لعملية ECM
	٢-٢-٢:المحلول الاليكتروليتي
	٢-٢-٢-١:خصائص المحلول الاليكتروليتي
	٢-٢-٢-٢:متطلبات المحلول الرئيسية
	٢-٢-٢-٣:اختيار المحاليل الاليكتروليتية
	٢-٢-٣:القطعة المراد تشغيلها او المشغولة
	٢-٣:الاساس الكهروكيميائي
	٢-٣-١:التفاعلات الكهروكيميائية في عملية ECM
	٢-٤:معدل الازالة المعدنية
	٢-٥:كفاءة التيار
	٢-٦:التشغيل الكهروكيميائي الثابت
	٢-٦-١:تغير المسافة بين القطبين (عرض الفجوة)
	٢-٦-٢:تغير كثافة التيار المسلطة مع تغير المسافة بين القطبين
	٢-٧:تصميم عدد القطع
	٢-٧-١:متغيرات التصميم
	٢-٧-١-١:تصميم انسياب المحلول
	٢-٧-١-٢:تصميم العازل
	٢-٨:الظروف التشغيلية في عملية ECM
	٢-٨-١:الفولتية المسلطة
	٢-٨-٢:ضغط المحلول الداخل ودرجة الحرارة
	٢-٨-٣:تركيز المحلول الاليكتروليتي
	٢-٩:خشونة السطح المنتج بعملية ECM
	٢-١٠:تطبيقات على عملية ECM

المحتويات

	الفصل الثالث : الجزء العملي
	٣-١:مقدمة
	٣-٢-١:خلية التشغيل الكهروكيميائي
	٣-٢-٢:مجهز القدرة
	٣-٢-٣:المضخة
	٣-٣:تصميم اداة القطع
	٣-٣-١:عدة القطع رقم (١)
	٣-٣-٢:عدة القطع رقم (٢)
	٣-٤:القطعة المراد تشغيلها
	٣-٥:التجارب التي اجريت على منظومة التشغيل

الفصل الرابع : النتائج

٤-١: التجارب الخاصة بمعدن الالمنيوم

٤-١-١: تأثير كثافة التيار على معدل الازالة

٤-١-٢: تغيير الفولتية والتيار مع زمن التشغيل

٤-١-٣: تأثير الزمن على تغيير القطر الداخلي لاسطوانة الانود وتغير عرض الفجوة اثناء التشغيل

٤-١-٤: تأثير الزمن على نعومة السطح المنتج

٤-١-٥: تأثير الضغط ومعدل الجريان على نعومة السطح

٤-٢: التجارب الخاصة بمعدن البراص

٤-٢-١: تأثير كثافة التيار على معدل الازالة

٤-٢-٢: تغيير الفولتية والتيار مع زمن التشغيل

٤-٢-٣: تأثير الزمن على تغيير القطر الداخلي لاسطوانة الانود وتغير عرض الفجوة اثناء التشغيل

٤-٢-٤: تأثير زمن التشغيل على نعومة السطح المنتج

٤-٢-٥: تأثير الضغط ومعدل الجريان على نعومة السطح

٤-٣: التجارب الخاصة بمعدن الفولاذ

٤-٣-١: تأثير كثافة التيار على معدل الازالة

٤-٣-٢: تغيير الفولتية والتيار مع زمن التشغيل

المحتويات

٤-٣-٣: تأثير الزمن على تغيير القطر الداخلي وتغير عرض الفجوة اثناء التشغيل

٤-٣-٤: تأثير زمن التشغيل على نعومة السطح المنتج

٤-٣-٥: تأثير الضغط ومعدل الجريان على نعومة السطح المنتج

الفصل الخامس : المناقشة

٥-١: مقدمة

٥-٢: معدن الالمنيوم

٥-٣: معدن البراص

٥-٤: معدن الفولاذ

الفصل السادس : الاستنتاجات والتوصيات

٦-١: الاستنتاجات

٦-٢: التوصيات

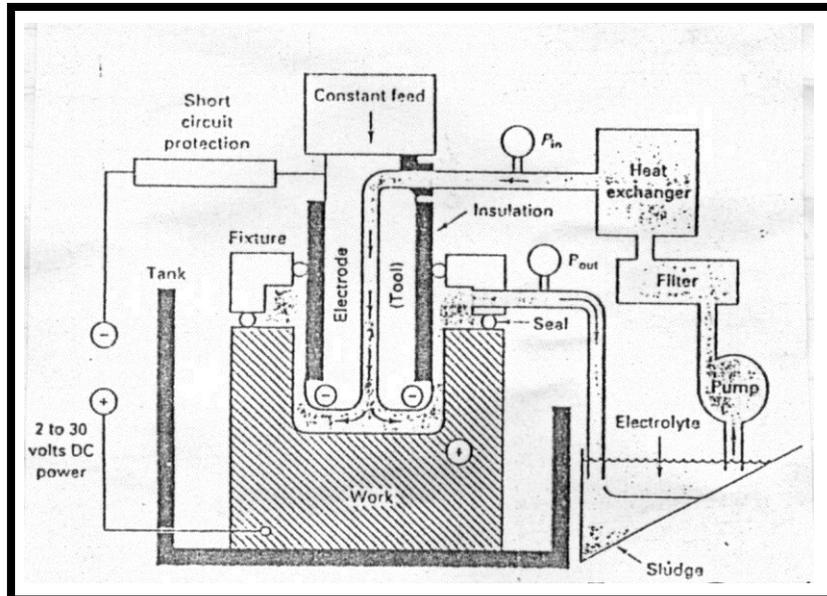
1-1: مقدمة Introduction

تعتبر طريقة التشغيل الكهروكيميائي (electrochemical machining ECM) واحدة من طرق التشغيل اللاتقليدية (non traditional methods) ، جاءت لحل كثير من المشاكل الموجودة في طرق التشكيل التقليدية (traditional methods) كالمخرطة وماكنة التفريز وغيرها [1] ، ومن هذه المشاكل ، صعوبة قطع المعادن الصلدة جداً ، صعوبة تشكيل الاشكال المعقدة وبلى عدد القطع وغيرها من المشاكل . تختلف هذه الطريقة عن الطرق التقليدية بعدم وجود اتصال فيزيائي مباشر بين المشغولة (work piece) وعدة القطع (cutting tool C.T) حيث يفصل بينهما فراغ صغير يمر من خلاله المحلول الاليكتروليتي [2] .

تعتمد عملية التشكيل الكهروكيميائي على ما يسمى بالاذابة الانودية للمعادن (Anodic dissolving) التي وضع مبادئها الاساسية العالم مايكل فاراداي (Micheal Faraday) ، ولقد استغل هذا المبدأ بعملية الطلاء الكهربائي (electroplating) .

وفي سنة (١٩٢٩) ، اقترح العالم الروسي (W.Gusseff) بتطبيق هذا المبدأ كعملية تشغيل ، وذلك باعتبار القطعة المراد تشغيلها (المشغولة w.p) قطب الانود (Anode) وعدة القطع قطب الكاثود (Cathode) [3] ولقد استخدم المبدأ كطريقة تشغيل عملية في سنة ١٩٦٠ ، واستمر تطور العملية وخاصة عند ازدياد الحاجة الى استخدام سبائك صلدة جداً في تصنيع الاجزاء الدقيقة والمعقدة الخاصة [4] ، مثلاً بالمفاعلات النووية (nuclear reactor) ، التوربين الغازي (gas turbine) وغيرها والتي يصعب تشغيلها بدقة بطرق التشكيل التقليدية [5] .

تتم الازالة المعدنية بعملية (ECM) بميكانيكية خاصة ، بحيث يُزال المعدن بدقة متناهية بفعل التحلل الكهروكيميائي ، وبذلك فهي تختلف عن الازالة المعدنية بالطرق التقليدية والتي تعتمد على مبدأ القص الميكانيكي (Mechanically torn) نتيجة للاتصال المباشر بين عدة القطع والمشغولة (w.p) [3] . يحدث التحلل الكهروكيميائي بتطبيق فرق جهد معين وتيار مستمر (D.C) على كل من المشغولة (W.P) وعدة القطع (C.T) وبوجود المحلول الاليكتروليتي الموصل الذي يمر من خلال المسافة التي تفصل المشغولة (W.P) والعدة والتي تسمى بعرض الفجوة (gab width) ، حيث يتحرك المحلول بسرعة وضغط معينين ليسمح بدفع نواتج التحلل بعيداً ومنعها من الالتصاق على العدة [6] ، وشكل (١-١) يوضح مخطط عملية (ECM) .



1. تتميز عملية (ECM) بعدة مميزات ومنها :
 لا يعتمد معدل تشغيل المواد على الخواص الميكانيكية لها مثل الصلادة بل يعتمد على مكوناتها ، ويكون معدل التشغيل ما بين $[1200 - 2500 \frac{mm^3}{1000A}]$ وبذلك فهي تستخدم لتشكيل أصلد المعادن [٨] .
2. التشغيل الكهروكيميائي ، لا يسبب اجهادات متبقية في معدن المشغولة [٩] .
3. لا يحدث بلى لعدة القطع ، وذلك بسبب عدم وجود اتصال مباشر بين العدة والمشغولة وبذلك يمكن انتاج عدد كبير من المنتجات بدون ابدال عدة القطع [١٠] .
4. لا يحدث تشويه بالمشغولة وذلك لعدم توليد حرارة ، أي لا يحدث تغير في البنية البلورية للمعدن [١١] .
5. يمكن الحصول على خشونة سطح منخفضة وتكون ما بين $(0.1 - 2.5 \mu m)$ Ra (معدل الخشونة) بالنسبة للمعادن المثالية ، وبذلك فهي تنتج انهاء سطحي جيد عند السيطرة على الظروف التشغيلية [١٠] ، كما لا توجد حواف او حزوز على السطح الناتج .
6. تستخدم لانتاج مشغولات ذات سمك قليل ودقيقة ومعقدة وذات اشكال كنتورية [٨] ، وبدون الابتعاد عن شكل المشغولة المطلوب وكذلك انتاج مشغولات ثلاثية الابعاد [١٢] .
- اما محددات او عيوب التشغيل الكهروكيميائي (Disadvantage of ECM) فهي :
1. تُستخدم لتشغيل المواد الموصلة فقط [١٢] .
2. عدم قدرتها على تشغيل زوايا او حافات حادة اقل من $(r = 0.2 mm)$ بسبب كثافات التيار العالية في تلك النقطة [١٢] .
3. المعدات اللازمة لعملية لعملية (ECM) مكلفة ، كما ان تصنيع عدد القطع عملية مكلفة [١٣] .
4. تلف وتآكل المعادن المستخدمة في تصنيع اجزاء ماكنة التشغيل [١٢] وذلك بسبب الفعل التآكلي للمحاليل الالكتروليتية [٨] .
5. صعوبة التنبؤ بنتائج عملية القطع ، لوجود المتغيرات الكثيرة مثل الضغط وسرعة المحلول ، شدة التيار الكهربائي ، الفولتية ، هندسية اداة القطع ، التركيز ودرجة حرارة المحلول وغيرها [١١] .
- ان لعملية التشغيل الكهروكيميائي تطبيقات كثيرة فمنها ما يعتمد على استخدام نظام تغذية ثابت لعدة القطع مثل عملية التنقيب الكهروكيميائي (drilling) ، ومنها ما يعتمد على استخدام عدة قطع ثابتة والذي يسمى بالتشغيل الكهروكيميائي الثابت (ECM with stationary tool electrode) أي ان معدل التغذية يكون مساوٍ للصفر . مثل عملية ازالة الحواف (debarring) وتوسيع الثقوب وغيرها .
- وفي هذا البحث تم استخدام التشغيل الكهروكيميائي الثابت (ECM with stationary tool electrode) والذي تم بواسطته اجراء عملية توسيع الثقوب والانهاء السطحي لمشغولات اسطوانية مجوفة من معادن مختلفة .

الهدف من البحث

نظراً لأهمية عملية التشغيل الكهروكيميائي في العمليات التصنيعية ، وخاصة في الصناعات العسكرية التي تستخدم العملية في صناعة المسدسات والبنادق لغرض ازالة الحواف وانهاء السطح وتوسيع الثقوب ، ولغرض اعطاء فكرة عن العملية ومدى الاستفادة منها لمن يعمل في هذا المجال ، تم الخوض بهذا البحث حيث تم الاعتماد على احد تطبيقاتها والذي يسمى بالتشغيل الكهروكيميائي الثابت (Static ECM) او ما يسمى بالتشغيل الكهروكيميائي باستخدام عدة قطع ثابتة .

حيث يهدف البحث الى دراسة عملية نظرية لتحديد الظروف التشغيلية لعملية (ECM) من ضغط (Pressure) ، تيار (Current) ، معدل جريان (P.R.) وفولتية (Voltage) للوصول الى ادق شكل وفضل نعومة للاشكال المعقدة كبديل لعمليات التشغيل التقليدية . سيتم استخدام ثلاثة معادن وهي الالمنيوم (Al) ، الفولاذ (Steel) والبراص (Brass) وبغض النظر عن الصلادة ، حيث من المعروف ان عملية (ECM) تستخدم لتشغيل المعادن الصلدة وفي هذا البحث استُخدمت معادن ذات صلادة منخفضة وذلك لأن لها صلة بما تحتاجه الشركة المنتجة من دراسة في هذا المجال .

٢-١: التشغيل الكهروكيميائي Electrochemical machining

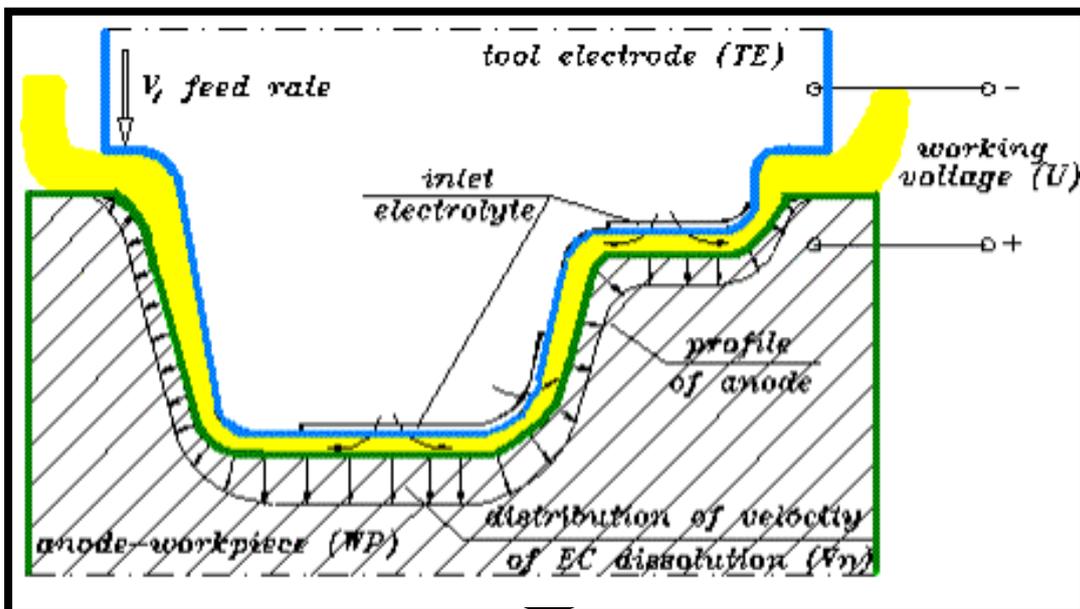
وهو عملية ازالة معدنية مسيطر عليها بواسطة الفعل الاليكترووليتي وبدون مساعدة ميكانيكية [٣] ، واحياناً يسمى بالتشغيل البارد (Cold machining) [١٤] ، حيث وجد العالم مايكل فاراداي (M.F) عند وضع قطبين في حيز يحتوي بداخله محلول موصل وبوجود فرق جهد مستمر (D.C) مطبق على القطبين ، فان قطب الانود سيتحلل كاسياً قطب الكاثود وهذه العملية تسمى بالاذابة الانودية (Anodic dissolution) [١٢] .

ان الصقل الكهربائي (electropolishing) هو احد الامثلة على عملية الاذابة الانودية ، ففي عملية الصقل ، القطعة المراد تشغيلها (المشغولة w.p) هي التي تصقل وتمثل قطب الانود في خلية اليكترووليتية ، حيث تُدَوَّب النتوءات الموجودة على سطح المشغولة (w.p) وبذلك يُصبح السطح ناعم وصقيل . ان كثافة

التيار المثالية في هذه العملية تكون $(0.1 \frac{A}{cm^2})$ ، كما ان النتوءات السطحية التي تتم ازلتها هي اصغر من

$(10\mu m)$ وفي هذه العملية [١٠] وعملية الطلاء الكهربائي ام ان يتحرك المحلول بسرعه قليلة جداً او يكون ساكن (لايتحرك) [١٢] .

يشبه التشغيل الكهروكيميائي ، عملية الصقل الكهروكيميائي ، وهو ايضاً عملية اذابة انودية كهروكيميائية باستخدام تيار مستمر (D.C) وبكثافة عالية (High density) وفولتية منخفضة مسلطة على المشغولة (w.p) والعدة المشكلة (عدة القطع) [١٥] . حيث يتحلل المعدن عند سطح المشغولة (w.p) على شكل ايونات معدنية بواسطة تفاعل الطلاء ، ولهذا فان شكل العدة سوف يُطبع عليها ، وبذلك فان التعديلات التي أُجريت على كل من عمليتي الطلاء والصقل الكهربائي هو جعل المحلول ينساب بقوة خلال المسافة الفاصلة بين القطبين والتي تسمى بعرض الفجوة (gab width) ، وبسرعة عالية وعادة اكبر من $(٥ m/s)$ ليزداد انتقال الشحنة / الكتلة خلال الطبقة القريبة من سطح الانود ولطرد النواتج المذابة كهيدروكسيد المعدن والحرارة وفقاعات الغاز المتولدة [٩] ، وفي عمليات التشغيل المثالية تتحرك عدة القطع (cutting tool) باتجاه المشغولة (w.p) مع الحفاظ على عرض الفجوة ثابتة وصغيرة وكما في شكل (٢-١) الذي يوضح مبدأ عملية التشغيل [١٠] .



٢-٢: العناصر الرئيسية لعملية (ECM)

٢-٢-١: عدة القطع (Cutting Tool)

يعتبر تصميم عدة القطع من العوامل المهمة في عملية (ECM) ، والتي تمثل قطب الكاثود (cathode) ، حيث ان شكل العدة يؤثر بصورة مباشرة على دقة القطعة المشغولة (w.p) ، لذا فان شكل المنتج لا يمكن ان يكون اكثر دقة من العدة التي انتجته ، ونفس الشيء يمكن تطبيقه على الانتهاء السطحي للعدة ، فاذا كان الانتهاء السطحي للعدة رديء فان الانتهاء السطحي للمشغولة (w.p) يكون رديء ايضاً ، وذلك لأن سطح العدة سوف يُطبع على المشغولة بما فيه من تعرجات وحزوز [١٦] .

عدة القطع في عملية (ECM) لا تبلى ولا تتآكل وذلك بسبب عدم وجود اتصال فيزيائي بين العدة (tool) والمشغولة (w.p) [١٧] ، وعند مقارنتها مع العدة المستخدمة في طرق التشغيل التقليدية ، نجد ان عدة واحدة في (ECM) يمكن ان تنتج آلاف من المشغولات ، وهذا يعود الى طبيعة التشغيل في هذه العملية [١٨] .

١. تتميز عدة القطع بميزات خاصة ، لا بد من توفرها للعدة الجيدة وهي :

٢. مادة العدة سهلة التشغيل [١٦] .

٣. تقاوم التآكل الكيميائي وان تكون مقاومة للتشوه (distortion) والاهتزاز بسبب الضغط العالي لانسياب المحلول [١٧] .

٤. ان يكون لها مقطع عرضي كافٍ، ليوصل تيارات التشغيل بالكمية المطلوبة .

٥. الدقة العالية في تصنيعها بالابعاد القياسية المطلوبة ودقة الانتهاء السطحي لأن دقة شكل العدة هو دالة لدقة المشغولة (w.p) [١٧] .

يعتمد اختيار مادة عدة القطع على الخواص الكهروكيميائية والخواص الميكانيكية المطلوبة [١٩] ، كما وجد بان المواد التي لها استخدام واسع في تصنيع عدد القطع في عملية (ECM) هي الالمنيوم (Al) ، البراص (Brass) ، البرونز (Bronze) ، النحاس (Cu) ، الكاربون (C) والفولاذ المقاوم للصدأ (st. steel) وغيرها من المواد ، هذه المواد سهلة التشغيل ويكون تصنيع العدة اعتماداً على شكل المشغولة (w.p) أي ان لكل مشغولة عدة قطع خاصة [٨] ، وجدول رقم (٢-١) يوضح خواص المواد المستخدمة في تصنيع عدد القطع الخاصة بـ (ECM) .

جدول (٢-١) : خواص ومزايا المواد المستخدمة في تصنيع عدد القطع [١٠]

المادة Material	المقاومة الكهربائية ele. Resistance at ٢٠ °C $\mu\text{.ohm.cm}$	الكلفة Cost	مقاومة الشد Mpa	معامل المرونة (M/E) Kpa	التوصيلية الحرارية cal/cm ^٢
النحاس Copper	١.٧١	متوسطة	٤٦٠	١٢١*١٠ ^٤	٠.٩٣٤
براص النافال Naval Brass (٦٠)Cu,(٣٩)Zn	٦.٦٣	منخفضة	٥١٧	١٠٣*١٠ ^٤	٠.٢٨٧
البرونز Bronze	٣.٦	متوسطة	٦٠٦	١٠٣*١٠ ^٤	٠.٤٧٩
فولاذ مقاوم للصدأ الايوستنتيني	٧٣.٠	عالية	٥٦٥	٢٠٠*١٠ ^٤	٠.٠٣٩

٢-٢-٢: المحلول الايكتروليتي Electrolyte

وهو محلول موصل للكهربائية ، مُكوّن من مواد كيميائية مذابة في الماء بتراكيز معينة مثل محلول كلوريد الصوديوم (NaCl) و نترات الصوديوم (NaNO_٣) المستخدمة بشكل شائع في تشغيل المعادن [٣] .

٢-٢-٢-١: خصائص المحلول الايكتروليتي

- للمحلول الاليكتروليتي في عملية (ECM) خصائص عديدة منها :
١. توفير شروط الاذابة الانودية لمادة المشغولة (w.p) [١٠] .
 ٢. حمل التيار الكهربائي وذلك لغرض اكمال الدائرة الكهربائية بين العدة والمشغولة [١٠] .
 ٣. يمنع طلاء عدة القطع من خلال ابعاد نواتج التفاعلات الكهروكيميائية من الفجوة (gab) ما بين العدة والمشغولة [١٢] .
 ٤. حمل الحرارة المتولدة بعيداً وبالتالي بقاء الحرارة ثابتة تقريباً في منطقة التشغيل [٢٠] .

٢-٢-٢-٢: متطلبات المحلول الرئيسية

ان أهم متطلبات المحلول هي كالاتي :

١. يجب ان تتمكن الأيونات السالبة (anions) الموجودة في المحلول الاليكتروليتي من ترك الانود (Anode) المتحلل بانتظام عند السرعة العالية ، وان لا تتفاعل مع معدن الانود وتكوين طبقة خاملة على سطحه ومن هذه الأيونات السالبة (Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, ClO₃⁻) [١٠] .
٢. عدم السماح للأيونات الموجبة (cations) بالترسب على سطح الكاثود ، وبهذا فان شكل الكاثود يبقى دون تغير ، ولتحقيق هذا الهدف تستخدم المحاليل الحاوية على الأيونات الموجبة المعدنية القاعدية (alkaline) كالبوتاسيوم والصوديوم [١٠] .
٣. يجب ان يكون للمحلول توصيلية كهربائية عالية ولزوجة منخفضة ، وذلك لتقليل الفقدان بالطاقة التي تؤدي الى مقاومة المحلول وتوليد الحرارة وكذلك للحصول على انسياب جيد للمحلول خلال عرض الفجوة (gab width) [١٢] .
٤. ان يكون مستقراً من ناحية التركيب وقيمة الـ (ph) خلال دورة التشغيل وان تكون توصيلته ولزوجته قليلة التغير بدرجة الحرارة .
٥. يجب ان لا يكون ساماً او يسبب تآكلاً او تلفاً سريعاً بالنسبة لأجزاء التشغيل التي تكون في حالة تماس وان يكون متوفراً ورخيص الثمن [١٩] .

٢-٢-٢-٣: إختيار المحاليل الاليكتروليتيية Selections of Electrolyte

يتم اختيار المحاليل الاليكتروليتيية على اساس ، مادة القطعة المراد تشغيلها ، الانهاء السطحي المرغوب ، الانتاجية المرغوبة ، تسامح (tolerance) البعد المرغوب [١٠] .

ان اكثر المحاليل استخداماً في (ECM) هما ، محلول كلوريد الصوديوم (NaCl) و نترات الصوديوم (NaNO₃) ، ولقد وُجد ان محلول (NaCl) يكون اُكَّالاً مقارنة مع المحاليل الاخرى ، اما محلول (NaNO₃) فهو يتميز بخواص مفضلة وهو اقل اُكَّالية من محلول (NaCl) ولكنه يميل الى سلبية التفاعل الكيميائي ونوعاً ما يُقلل التوصيلية الكهربائية [١٢] ، كما تستخدم الالكالين الكيميائي (القاعدة) مثل نترات البوتاسيوم وكرومات الصوديوم وغيرها ، وفي بعض الاحيان يُستخدم خليط من محلولين او اكثر ، اما المحاليل الحامضية الضعيفة مثل حامض الكبريتيك فتستخدم لانتاج انهاء سطحي جيد [١٠] ، وجدول (٢-٢) يوضح المحاليل الاليكتروليتيية المستخدمة لتشغيل المعادن .

جدول (٢-٢) : المحاليل الاليكتروليتيية المستخدمة في تشغيل المعادن [١١]

معدن المشغولة	نوع المحلول الاليكتروليتي المستخدم	تركيز المحلول (كغم / لتر)
صلب سبائكي نيكل - كوبلت	كلوريد الصوديوم NaCl KCl نترات الصوديوم NaNO ₃	٠.٢٦٨ ٠.٥٣٧

٠.٧٠٠٠	سيانيد الصوديوم NaClO _٣	صلب العدد المقسى
٠.٢٦٨	كلوريد الصوديوم NaCl	حديد الزهر الرمادي
٠.٥٣٧	نترات الصوديوم NaNO _٣	
٠.٥٣٧	نترات الصوديوم NaNO _٣	حديد الزهر الابيض
٠.٥٣٧	نترات الصوديوم NaNO _٣	الالمنيوم وسبائكه
٠.٢٦٨	كلوريد الصوديوم او البوتاسيوم	
٠.١٠٧	كلوريد الصوديوم او البوتاسيوم	سبائك التيتانيوم
٠.١٦١	هيدروكسيد الصوديوم NaOH	التنكستن (W)
٠.١٦١	هيدروكسيد الصوديوم NaOH	موليبدينوم (Mo)
٠.٢٦٨	كلوريد الصوديوم او البوتاسيوم	النحاس وسبائكه
٠.٥٣٧	نترات الصوديوم NaNO _٣	

٢-٢-٣: القطعة المراد تشغيلها او المشغولة (Work Piece (w.p)

تمثل المشغولة (w.p) قطب الانود (Anode) ، الذي يتحلل بفعل التفاعلات الكهروكيميائية الحادثة ، ويكون التحلل اختياريًا وحسب ما مطلوب ، ويمكن تشغيل أي مادة بعملية (ECM) ، بشرط ان تكون موصلة للكهربائية .

تؤثر الخواص الكيميائية للمشغولة (w.p) على معدل ازالة المعدن ، حيث ان معدل الازالة يتناسب طردياً مع الوزن الذري وعكسياً مع تكافؤ معدن الشغلة [١٢] .

كما يؤثر وجود الشوائب في معدن الشغلة على معدل الازالة ومثال على ذلك حديد الزهر وذلك لأنه يحتوي على الكرافيت الحر (Free Graphite) ، حيث ان وجود الكرافيت يسبب عدم انتظامية في معدل الازالة وبالتالي خشونة عالية [١١] اضافة الى ذلك ، ان معدل الازالة لايعتمد على الخواص الميكانيكية للمشغولة مثل الصلادة والمتانة ، ولكن هو دالة لمعدل التبادل الايوني ، وبذلك يمكن تشغيل المعادن الصلدة وبمعدل ازالة اكبر من معدل الازالة بالطرق التقليدية [٢١] .

تثبت المشغولة (w.p) بواسطة مثبتات مصنوعة من مواد عازلة مثل راتنجات الايبوكسي (epoxy rysen) وراتنجات الالياف الزجاجية (fiber glass rysen) وهي ضرورية لهذا الغرض ، وهناك مواد اخرى رخيصة الثمن مثل مادة (PVC) بولي فانيل كلورايد ، وهي تمتلك استقرارية حرارية جيدة وخاصة امتصاص رطوبة منخفضة [١٢] .

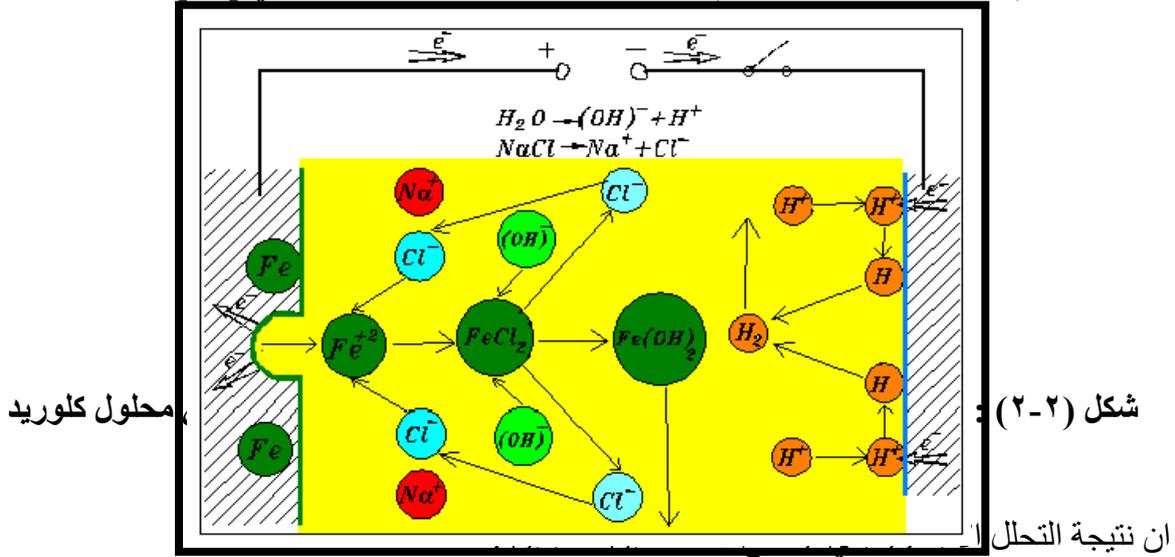
٢-٣:الاساس الكهروكيميائي لعملية (ECM) Elec. Basis of ECM

يتعلق الاساس الكهروكيميائي بالتأثيرات الفيزيائية والكيميائية الحادثة عند وضع قطبين موصلين في محلول موصل يُعرف بالاليكتروليت (electrolyte) وهو لا يشبه الموصلات المعدنية او المواد الموصلة كالكرافيت (Graphite) التي يمر التيار فيها بواسطة حركة الاليكترونات خلال البناء الشبكي لها (Lattice Structure) ، أما مرور التيار في المحلول الموصل فانه يتم بواسطة حركة المادة (الايونات) اضافة الى الاليكترونات وهذا ما يسمى بالتحلل الكهربائي (electrolysis) [٣] .

يكون التوصيل الكهربائي ممكناً خلال المحلول الموصل ، وذلك بسبب تفكك جزيئات المادة المذابة كلها او بعضها الى جسيمات موجبة وسالبة والتي تسمى بالايونات (Ions) ، وتكون هذه الايونات حرة وتتحرك بعشوائية خلال المحلول بسبب تكسر قوى الربط نتيجة الذوبان في المحلول [٣] .

عند تسليط المجال الكهربائي وبفولتية معينة ، سوف يسبب حركة الايونات نسبة الى الآخر بحيث تتجه الايونات الموجبة (cations) الى القطب السالب (cathode) وتتجه الايونات السالبة (anions) الى القطب الموجب (Anode) ولأن هذه الايونات مشحونة كهربائياً ، فهذا يسبب انتقال التيار الكهربائي أي ان تبادل الاليكترونات بين الايونات (Ions) والأقطاب (electrodes) يُكمل الدائرة الكهربائية ويسبب ظاهرة الاذابة

الانودية عند قطب الانود (Anode) وهي اساس عملية (ECM) ، شكل (٢-٢) الذي يوضح الاذابة الانودية للفولاذ باستخدام محلول كلوريد الصوديوم وهو مثال بسيط للتشغيل الكهروكيميائي [١٢] .



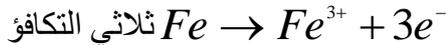
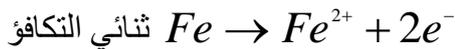
وبذلك فان الايونات السالبة (anions) هي (Cl^-) ، (OH^-) تتجه نحو قطب الانود ، والايونات الموجبة (cations) هي (H^+) ، (Na^+) تتجه نحو قطب الكاثود وبهذا تكتمل الدائرة الكهربائية [٣] ومما موضح بالشكل ، وهناك تفاعلات تجري خلال عملية التشغيل والتي توضح كالتالي .

٢-٣-١: التفاعلات الكهروكيميائية في عملية (ECM) Elec. Reaction in ECM

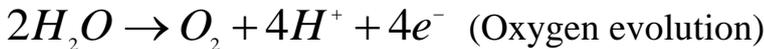
عند اكتمال الدائرة الكهربائية وكما موضح بالشكل هناك تفاعلات تحدث خلال العملية وهي كالاتي :

A. التفاعلات الانودية Anodic Reactions

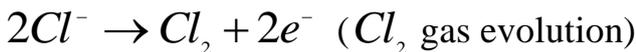
وهي التفاعلات التي تحدث عند سطح قطب الانود ، ومن هذه التفاعلات تفاعل تحلل معدن قطب الانود مثل تحلل الفولاذ .



وقد يكون هذا التفاعل مصحوباً بتفاعل تحلل الماء والذي يكون بمدى محدد جداً وناتج التفاعل هو تحرر غاز الاوكسجين (Oxygen evolution) وتكوين ايونات الهيدروجين (H^+) والذي يسبب زيادة موضعية في حامضية المحلول وكما في المعادلة :

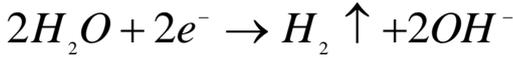


وهناك تفاعل آخر ، وهو تفاعل تحرر غاز الكلور (Cl_2) [١٢] .

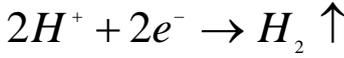


B. التفاعلات الكاثودية (Cathodic Reactions)

وهي التفاعلات التي تحدث عند سطح قطب الكاثود (Cathode) ، ففي المحاليل القاعدية (basis) والمحاليل المتعادلة (neutral) ، يعتبر التفاعل الرئيسي عند الكاثود هو التحلل الكهربائي للماء والذي يسبب تحرر غاز الهيدروجين (H_2) وكذلك تكوين ايونات الهيدروكسيل (OH^-) والتي تؤدي الى زيادة موضعية في القاعدية (alkaline) وكما في المعادلة :



وهناك تفاعل آخر وهو تحرر غاز الهيدروجين ، وذلك بمعادلة الشحنة على ايونات الهيدروجين وهو تفاعل رئيسي في المحاليل الحامضية [٢٢] وكما في المعادلة :



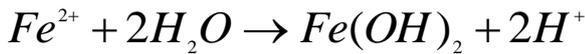
أما التفاعل الاخير ، هو تفاعل تحول ايونات المعدن المتحلل الى ذرات وترسبها على قطب الكاثود وخاصة في المحاليل الحامضية .



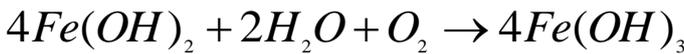
هذه الترسبات تميل الى الالتصاق وتتكون ببطئ اذا كان المحلول ضعيفاً في ايونات المعدن ، لذلك في المحاليل يستخدم نظام لعكس اتجاه تيار التحلل وبصورة دورية لازالة الترسبات المتراكمة على قطب الكاثود [١٢] .

C. التفاعلات التي تحدث في المحلول الاليكتروليتي Electrolyte Reactions

عند ذوبان ذرات المعدن على شكل ايونات (Fe^{2+}) مثلاً ، وكما موضح في شكل ، هذه الايونات ستتجه الى داخل المحلول الاليكتروليتي والتي تتفاعل اما مع الماء او تتفاعل مع ايون الهيدروكسيل ، ويكون ناتج التفاعلين هو هيدروكسيد الحديدوز وكما في المعادلتين [١٠] .



هيدروكسيد الحديدوز المتكون ذو لون اخضر مسود وهو مترسب ، وان ترسبه ليس له اهمية في التفاعلات الكهروكيميائية ، ولكن ترسبه على عدة القطع غير مرغوب به جداً ، وتتم ازالة هذه الترسبات من المحلول بواسطة طريقة الفصل بالطرد المركزي مثلاً ، او بواسطة مرشحات خاصة (Filters) وبالتالي لايتغير المحلول خلال العملية . كما ان هيدروكسيد الحديدوز بدوره ايضاً يتفاعل مع الماء وبوجود الاوكسجين (O_2) ليكوّن هيدروكسيد الحديدك وهو ذو لون احمر داكن او بني محمر ، وكما في المعادلة :



حيث يُزال كل من الهيدروجين المتحرر والهيدروكسيد المترسب بواسطة قوة جريان المحلول [١٢] .

٢-٤: معدل الازالة المعدنية (MRR) Metal Removal Rate

يُطلق على وزن المعدن المزال خلال فترة زمنية ، بمعدل ازالة المعدن وعادة تُؤخذ بوحدة ($\frac{g}{min}$) الغرام لكل دقيقة ، ويكون معدل الازالة متغيراً من معدن الى آخر حيث يعتمد على التركيب الكيميائي للمعدن [٣] .

ولقد وضع العالم مايكل فاراداي قانونين يحكمان معدل ازالة المعدن وهما :

١. كمية المعدن المتحلل او المترسب تعتمد على كمية التيار الكهربائي المار .
٢. كمية المعدن المتحلل او المترسب ولنفس التيار الكهربائي يعتمد على الوزن المكافئ الكيميائي للمعدن ، ومن خلال هذين القانونين نحصل على معدل الازالة النظري للمعدن (Theoretical metal removal rate) [٢٠] والذي يكون بهذه الصيغة :

$$M \propto I * t * \left(\frac{A}{Z}\right)$$

$$\Rightarrow M = \frac{I * t * (A)}{F(Z)} \dots\dots\dots(٢-١)$$

ان ثابت هذه المعادلة يسمى بثابت فاراداي ويرمز له بالرمز (F) ويكون مساوٍ الى ٩٦٥٠٠ (A.sec) وهو كمية كهربائية اللازمة لازالة ما مقداره (A/Z) بالغرام من المادة . ان معادلة رقم (٢-١) تكون صحيحة بالنسبة للمعدن الذي يمتلك تكافؤ واحد ، ومن خلالها يتم حساب كمية المعدن المتحللة او المترسبة ، وبقسمة كمية المعدن المتحللة او المترسبة على الزمن ، يتم الحصول على معدل الازالة الوزني النظري والذي تمثله معادلة (٢-٢) :

$$\frac{mass}{time} = \frac{M}{t} = \frac{I * A}{F * Z} = M_{(m)}^{\bullet} \dots\dots\dots(٢-٢)$$

ان اكثر المواد الهندسية هي سبائك تتكون من اكثر من عنصر لذلك فان معادلة رقم (٢-٢) تم تعديلها الى صيغة معينة بحيث تشمل السبائك في حساب معدل الازالة ، على فرض ان عناصر السبائك هي ١ ، ٢ ، ٣ ، ، n ، ولها اوزان ذرية (A_١ ، A_٢ ، ، A_n) وذات تكافؤات (Z_١ ، Z_٢ ، ، Z_n) ، وكل منها موجود بنسبة مئوية معينة في السبيكة (% x_١ ، % x_٢ ، ، % x_n) ولأن (1F) يزيل (A/Z) غرام من المادة [٢٣] . أي ان (١) غرام من المادة سوف يُزال من الانود بواسطة .

$$F \left[\frac{x_1 Z_1}{A_1} + \frac{x_2 Z_2}{A_2} \dots\dots\dots + \frac{x_n Z_n}{A_n} \right] C(Coulomb)$$

وبذلك فان معدل الازالة الوزني للسبيكة يكون بهذه الصيغة :

$$M_{(a)}^{\bullet} = \frac{mass}{time} = \frac{I}{F} \left[\frac{x_1 Z_1}{A_1} + \frac{x_2 Z_2}{A_2} \dots\dots\dots + \frac{x_n Z_n}{A_n} \right]^{-1} g / sec \dots\dots\dots(٢-٣)$$

تعتبر كثافة التيار من العوامل المؤثرة على معدل ازالة المعدن في عملية (ECM) ، كما يؤثر عرض الفجوة (gab width) وبصورة مباشرة على كثافة التيار وبالتالي على معدل الازالة ، فعندما يكون عرض الفجوة صغيراً كانت كثافة التيار عالية وهذا يؤدي الى معدل ازالة عالي وبالعكس ، كما يجب تجنب كون عرض الفجوة صغيراً جداً ، لأنه من المحتمل ان تتسبب مخلفات التشغيل بانسداد عرض الفجوة وبالتالي حدوث قطع للدائرة الكهربائية والتي تؤدي الى تلف العدة والمشغولة ، كما يؤثر عدد التكافؤ ونوع المحلول على معدل ازالة المعدن [٨] .

اما معدل الازالة الحجمي (Volumetric Removable Rate) فيمكن الحصول عليه من معادلة رقم

$$(٢-٢) ، \text{ واذ كانت كثافة معدن الانود } \left(\rho = \frac{g}{cm^3} \right) \text{ فان معدل الازالة يكون}$$

$$Q_{(m)} = \frac{A * I}{\rho * F * Z} \dots\dots\dots(٢-٤) \quad \text{معدل الازالة الحجمي للمعدن}$$

معادلة (٢-٤) تُطبق اذا كان المعدن يمتلك عدد تكافؤ واحد ، اما اذا كان المعدن سبيكة يتألف من اكثر من عنصر أي له اكثر من تكافؤ ، عند ذلك يمكن ايجاد معدل الازالة الحجمي باعتبار الشحنة اللازمة تُزيل وحدة حجم لكل عنصر ، على فرض ان عناصر السبائك هي (١ ، ٢ ، ٣ ، ، n) واوزانها الذرية (A_١ ، A_٢ ، ، A_n) وذات تكافؤات (Z_١ ، Z_٢ ، ، Z_n) وموجودة بنسب وزنية (% x_١ ، % x_٢ ، ، % x_n)

x_n (%) فان حجم السبيكة المزال $(\frac{v\rho x}{100})(\text{vcm}^3)$ غرام للعنصر [٢٣] ، وبما ان (ρ) كثافة السبيكة (g/cm^3) ، فان الشحنة اللازمة لازالة كل عنصر في الحجم (v) تعطى بالصيغة :

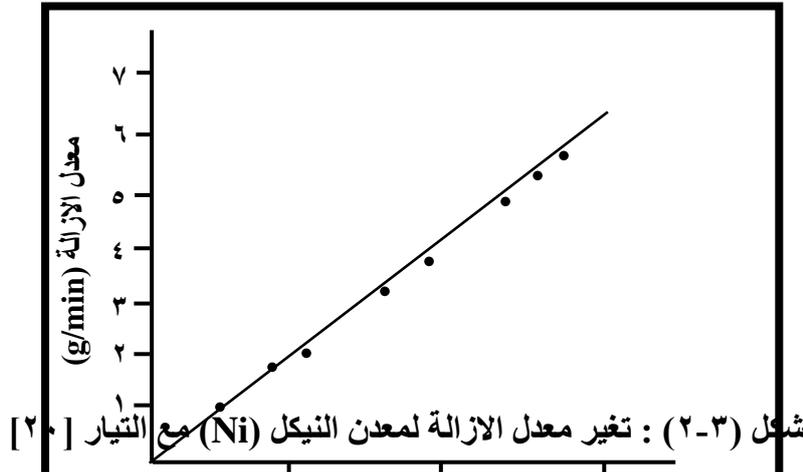
$$\left[\frac{v\rho x}{100} * \frac{Z_1 F}{A_1} \right]$$

وبذلك فان حجم السبيكة المزال لكل وحدة شحنة يكون

$$Q_{(a)} = \frac{100}{\rho * F} \left[\frac{1}{\sum \frac{(x_2^- * Z_2^-)}{A_2^-}} \right] \text{cm}^3/\text{amp.sec} \dots\dots\dots(٢ - ٥)$$

وهو معدل الازالة الحجمي للسبيكة $Q_{(a)}$.

ففي عملية (ECM) الفعلية ، يوجد عدد من العوامل التي تؤثر على معدل الازالة ، كما انه نادراً ما تكون العملية مثالية ، كنتيجة لذلك ، فان معدل الازالة الفعلي يمكن ان يختلف قليلاً عن معدل الازالة النظري الذي نحصل عليه من معادلة (٢-٤) ، شكل (٢-٣) يوضح معدل الازالة النظري والفعلي لمعدن النيكل كمثال على ذلك [٢٣] .

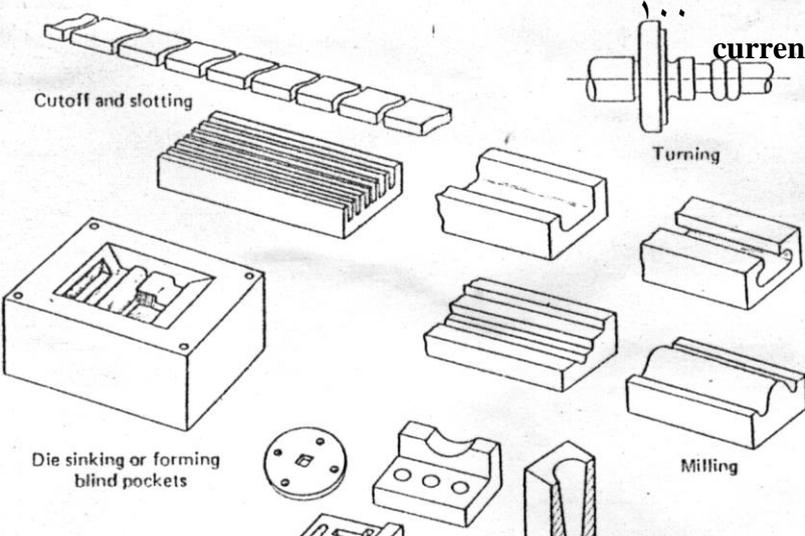


شكل (٢-٣) : تغير معدل الازالة لمعدن النيكل (Ni) مع التيار [٢٣]

ان معدل الازالة النظري يعتمد على تذبذب يعني ان التذبذب يحدث عند فرق جهد اعلى وقيمة القيمة النظرية تميل ان تكون اعلى من القيمة الاحيان يعتمد على المحاليل ، فمثلاً يتحلل النحاس بينما في محاليل النترات يحدث التذبذب بالحالة [٢٣] .

جدول (٢-٣) يوضح الوزن الذري الغراء

المعدن	الوزن الذري الغراء
--------	--------------------



٢.٦٧	٣	٢٦.٩٧	الالمنيوم
٧.١٩	٢-٣-٦	٥١.٩٩	الكروم
٨.٨٥	٢-٣	٥٨.٩٣	الكوبلت
٨.٩٦	١-٢	٦٣.٥٧	النحاس
٧.٨٦	٢-٣	٥٥.٨٥	الحديد
٨.٩٠	٢-٣	٥٨.٧١	النيكل
٧.٣٠	٢-٤	١١٨.٦٩	القصدير
٤.٥١	٣-٤	٤٧.٩	التيثانيوم
١٩.٣	٦-٨	١٨٣.٨٥	التنكستن
٧.٣	٢	٦٥.٣٧	الزنك
٢.٣٣	٤	٢٨.٠٩	السليكون
٧.٤٣	٢-٤-٦-٧	٥٤.٩٤	المنغنيز

٢-٥: كفاءة التيار (Current efficiency (η))

وهي معدل الازالة الفعلية نسبة الى معدل الازالة النظرية المحسوبة حسب قانون فاراداي وتكون :

$$\text{كفاءة التيار } (\eta) = \frac{\text{معدل الازالة الفعلية (g/min)}}{\text{معدل الازالة النظرية (g/min)}} \cdot 100\%$$

معدل الازالة النظرية (g/min)

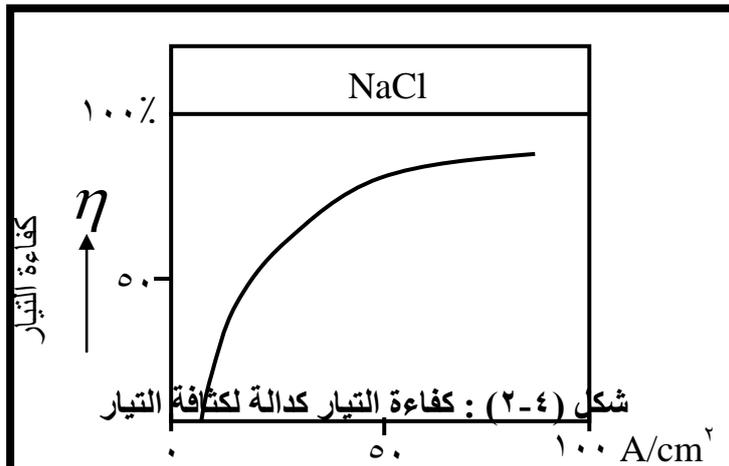
تعتمد كفاءة التيار على :

٣. كثافة التيار

٢. المحلول الالكتروليتي

١. مادة المشغولة

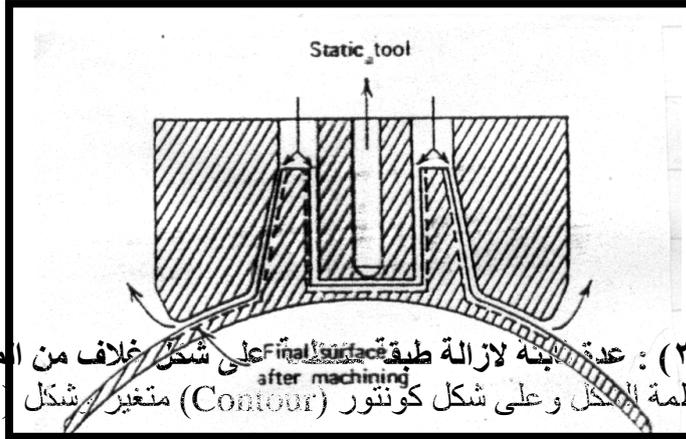
فمثلاً محلول نترات الصوديوم (NaNO_3) عند استخدامه لتشغيل الفولاذ (steel) ، تتكون الطبقة الانودية الخاملة على المشغولة وهذا يؤثر على معدل الازالة وبالتالي على كثافة التيار والتي عند انخفاضها تؤدي الى انخفاض كفاءة التيار ، اما عند كثافات التيار العالية فان تأثير الطبقة الانودية يكون قليلاً وبذلك تزداد كفاءة التيار ، اما بالنسبة لمحلول (NaCl) فان كفاءة التيار فيه لاتعتمد على كثافة التيار وذلك بسبب عدم تكوّن الطبقات الانودية الخاملة عند استخدامه [٢٤] وكما في شكل (٢-٤) الذي يوضح كفاءة التيار كدالة لكثافة التيار في التشغيل الكهروكيميائي للفولاذ في محلولي (NaCl و NaNO_3) ، ففي محلول (NaCl) لاتعتمد كفاءة التيار على كثافة التيار وتكون ١٠٠% ، اما في محلول (NaNO_3) فان الكفاءة تنخفض عند انخفاض كثافة التيار [٤] .



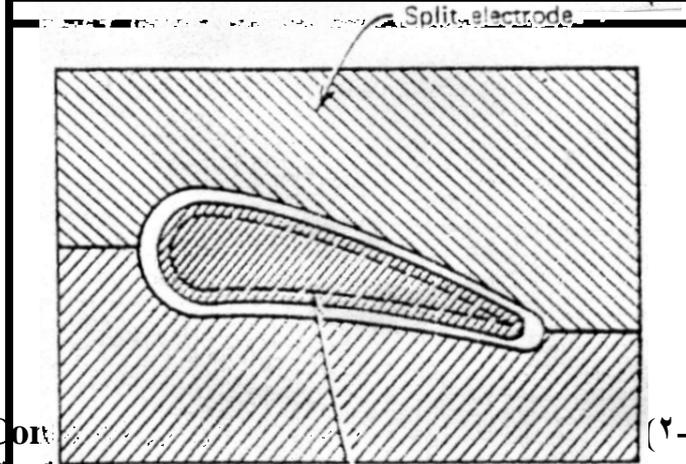
٢-٥: التشغيل الكهروكيميائي الثابت Static ECM Machining

وهو أحد تطبيقات التشغيل الكهروكيميائي بالإضافة الى التشغيل المتحرك ويطلق عليه ايضاً بالتشغيل الكهروكيميائي باستخدام عدة قطع ثابتة (ECM With Stationary Test Electrode) وتستخدم هذه الطريقة لازالة اعماق قليلة من المادة . تطبق في كثير من عمليات الانهاء (Finishing Operations) ، ازالة الحواف (deburring) ، توسيع الثقوب وتستخدم في تعديل زوايا الاجزاء المشغلة وجعلها غير حادة ومدوّرة (radiating) [١٠] .

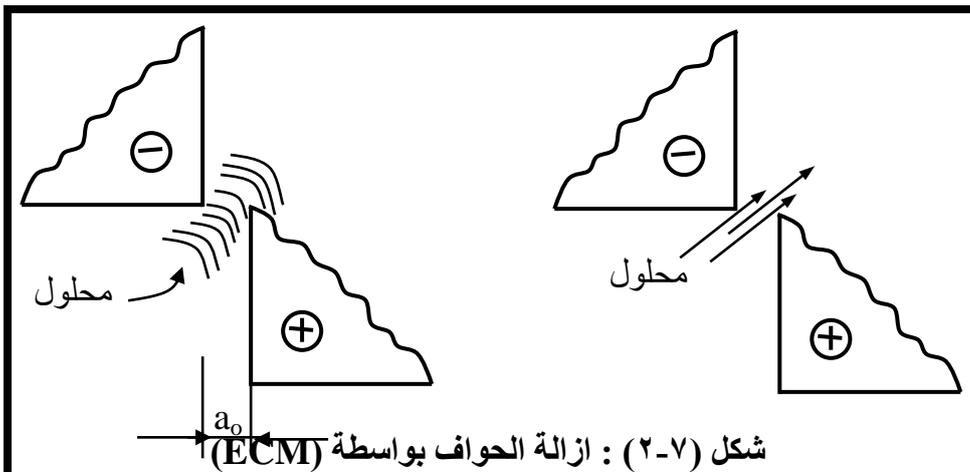
وبصورة عامة تعتبر هذه الطريقة كعملية نهائية لانهاء السطح المنتج بطرق التشغيل التقليدية ، بحيث تُزال طبقة ذات سمك قليل من معدن المنتج كما ان الفجوات المنتجة بهذه الطريقة وذات عمق اكبر من (٢.٥ mm) اما ان تكون ذات شكل منتظم (uniform) وكما موضح بالشكل



شكل (٢-٥) : عدة لإزالة طبقة Final surface على شكل غلاف من المادة [٣] او ان تكون غير منتظمة الشكل وعلى شكل كونتور (Contour) متغير الشكل (٢-٦) يوضح ذلك



شكل (٢-٦) ولأن عدة القطع ثابتة ، يمكن استخدامها لإزالة الطبقة الحامية والتي تكون على شكل غلاف (envelope) ويمكن تشغيلها بـ (١) سرعة تشغيل (٢) مادة ، وهذه تستخدم لتشغيل ريشة التوربين (Turbine blades) [٣] ومن تطبيقاتها أيضا ، إزالة الزوائد والحواف للتروس (deburning of gear) واجزاء الانظمة الهيدروليكية ، اجزاء المحركات وشكل (٢-٧) يوضح ازالة الحواف بواسطة (ECM) .



شكل (٢-٧) : ازالة الحواف بواسطة (ECM) وعندما يراد ازالة معدن معين من التشغيل المنتج بعمق اكبر من (mm) قبل التشغيل هذه الحالة تستخدم مجموعة من عدد القطع الثابتة ، أي تتم الازالة الاولى بالعدة الاولى حيث يُزال المعدن بعمق معين وبعدها تستخدم

العدة الثانية لتكملة الازالة بالعمق المطلوب وهكذا وحسب الشكل المطلوب ، وفيما يلي صورة توضح الاجزاء المُشغلة بواسطة عدة قطع ثنائية [٣] .



يستخدم

شكل (٨)

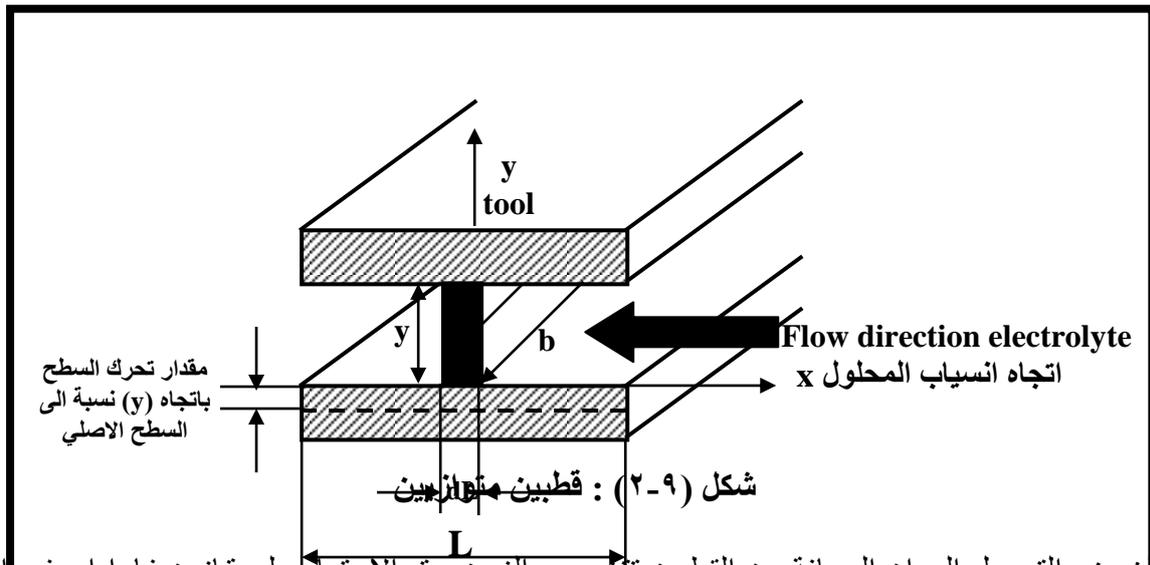
الاخرى ، يكون
بجدة ، وهذا يؤدي
معدل

تختلف تقنية
معدل التعرية لعدة
الى زيادة عرض
ازالة المعدن ويمكن توضيح ذلك كالاتي [٤] .

١-٥-٢: تغيير المسافة بين القطبين (عرض الفجوة gab width) مع زمن التشغيل

Change the Gab Width with Machining Time

الشكل (٩-٢) يوضح قطبين متوازيين يوصل بينهما بمسافة وهي عرض الفجوة والتي يمر منها المحلول الاليكتروليتي ، القطب الأعلى يمثل عدة القطع والقطب الاسفل يمثل المشغولة ، تتحرك عدة القطع بمعدل تغذية (feed rate) وسرعة ثابتة (constant velocity) وباتجاه (y) عمودي على سطح القطب الآخر .



غرض التوصل الى ان المسافة بين القطبين تتغير مع الزمن ، تم الاعتماد على قانون فاراداي في ازالة المعدن وذلك بافتراض المسألة باتجاه واحد (One Directional) ، وان المسافة بين سطحي القطبين (الأنود والكاثود) هي (y) ، وبأخذ شريحة صغيرة من عرض الفجوة بسمك (dl) وارتفاع (y) وعرض (b) ، وباستخدام معادلة رقم (٢-٢) وبافتراض ان المعدن نقي (Pure Metal) . فعند تسليط الفولتية على القطبين تحدث الازالة المعدنية ، وهذا يؤدي الى تحريك سطح المشغولة نسبة الى السطح الأصلي [٢٣] .

باشتقاق معادلة (٢-٢) نسبة الى الزمن نحصل على :

$$\frac{dM}{dt} = \frac{dI}{Z * F / A} \quad \text{g/sec.} \quad \dots\dots\dots(٢ - ٦)$$

وبما ان الكثافة = $\frac{\text{الكتلة}}{\text{الحجم}}$ (٢ - ٧) $\rho = \frac{M}{v}$

وان حجم شريحة عرض الفجوة (v) = (bdLy)(٢ - ٨) $v = bdLy$
بتعويض معادلة (٢-٨) في (٢-٧) نحصل على :

$$M = \rho * (b * dL * y) \quad \dots\dots\dots(٢ - ٩)$$

باشتقاق معادلة (٢-٩) $\frac{dM}{dt} = \rho * bdL * \frac{dy}{dt}$

ومن قانون اوم [V] ← التيار = $\frac{\text{الفولتية}}{\text{المقاومة}}$ (٢ - ٢٠) $I = \frac{V}{R}$

وبما ان المقاومة (R) = [V] $\frac{\text{طول المقاومة (y)}}{\text{مساحة عرض الفجوة (a) * ثابت التوصيلية الكهربائية للمحلول (k)}}$

$$\therefore R = \frac{y}{k * a} \quad \dots\dots\dots(٢ - ١١)$$

$$a = (bdL)$$

وبتعويض معادلة (٢-١١) في (٢-١٠)

$$\Rightarrow I = \frac{v * k * a}{y} \quad \dots\dots\dots(٢ - ١٢)$$

وباشتقاق معادلة (٢-١٢) $dI = \frac{v * k * b * dL}{y} \quad \dots\dots\dots(٢ - ١٣)$

ومن خلال معادلة (٢-٦) و (٢-٩) و (٢-١٣) يتم الحصول على

$$dI = \frac{v * k * b * dL}{y} = \rho * bdL * \frac{Z * F}{A} * \frac{dy}{dt}$$

$$\therefore \frac{dy}{dt} = \frac{v * k * A}{\rho_m * y * F * Z} \quad \dots\dots\dots(٢ - ١٤)$$

على فرض ان المقدار $\lambda = \frac{v * k * A}{\rho_m * Z * F}$

$$\therefore \frac{dy}{dt} = \frac{\lambda}{y} \quad \dots\dots\dots(٢ - ١٥)$$

وبما ان عدة القطع تتحرك بمعدل تغذية وسرعة ثابتة لذلك فان معادلة (٢-١٥) تصبح :

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\lambda}{y} - f \dots\dots\dots (2-16)$$

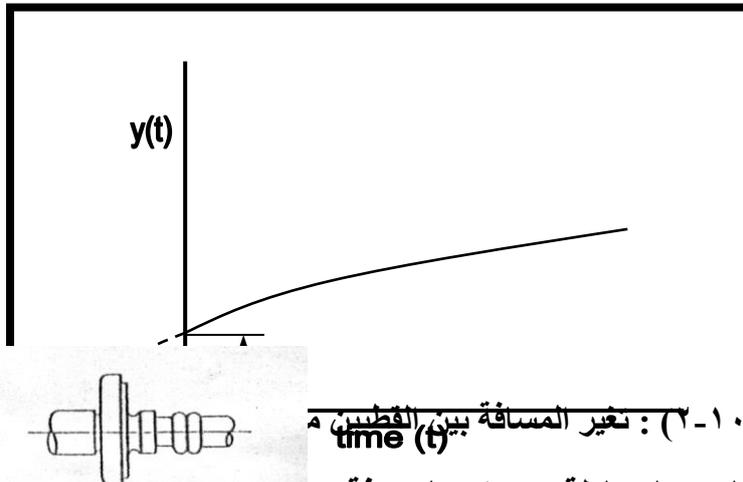
هذه المعادلة تشير الى تغير قيمة المسافة بين القطبين (y) بوجود التغذية (f). وفي حالة كون التغذية مساوية للصفر (f=0) بعملية التشغيل الكهروكيميائي الثابت فان المعادلة تصبح :

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\lambda}{y}$$

اذا كان عرض الفجوة الابتدائي (initial gap) y_0 فان حل معادلة (2-15) يكون :

$$y = \sqrt{2\lambda t + y_0^2} \dots\dots\dots (2-17)$$

ومن معادلة (2-17) نجد ان الـ (gab) يزداد بزيادة زمن التشغيل وكما في شكل (2-10) الذي يوضح زيادة الـ (gab) مع الزمن لقيم مختلفة من (λ).

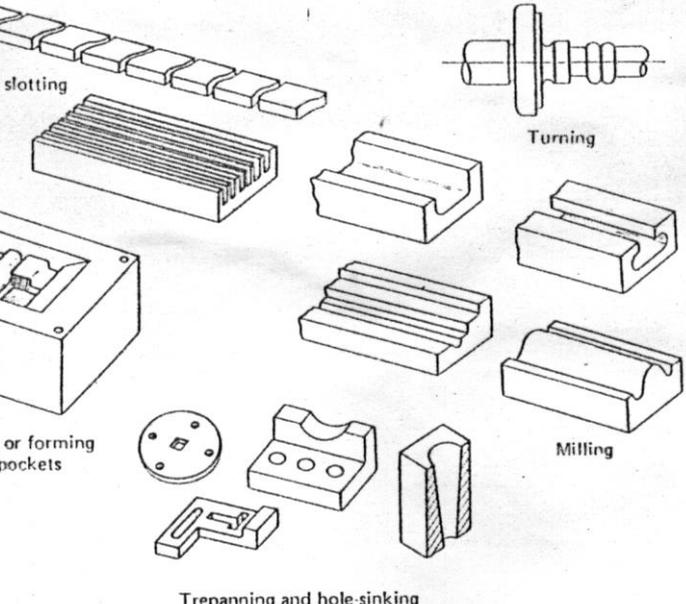


شكل (2-10) : تغير المسافة بين القطبين مع الزمن

2-5-2: تغير كثافة التيار المسلطة مع تغير المسافة بين القطبين

تنخفض كثافة التيار المسلطة بازياد المسافة بين القطبين

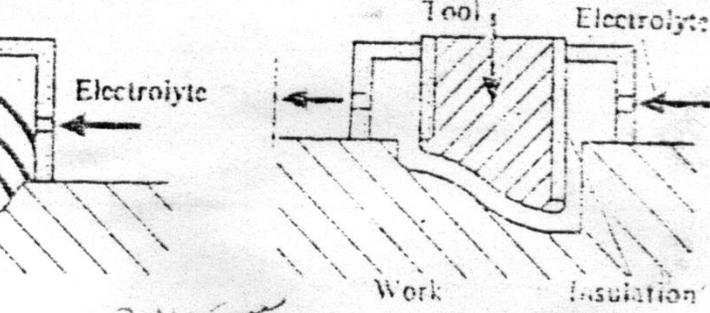
$$\dots\dots\dots (2-18)$$



(19 -

حيث ان

وكنتيجة لانخفاض كثافة التيار المسلطة سوف يقل معدل ازالة المعدن، و اذا كان محض القدرة تعمل بحالة تيار ثابت ، فان الفولتية تنخفض مع زمن التشغيل ويكون ما



2-6: تصميم عدد القطع (Cutting Tool Design)

تختلف عملية (ECM) عن طرق التشغيل التقليدية ، حيث خاصة فالثقب الدائري يحتاج الى عدة قطع ذات مقطع دائري

، والشكل غير المنتظم (الكونتور Contour) يحتاج الى عدة غير منتظمة وغيرها ، لذلك لا بد من الدقة في تصنيع العدة وخاصة في تصنيع الأشكال المعقدة ، وهناك جانبين رئيسيين لتصميم عدة القطع [١١] .

١. الجانب الأول : يتعامل مع ايجاد شكل عدة القطع المناسبة بظروف تشغيلية مُثلى لانتاج المشغولة المناسبة (أي التكهن بشكل المشغولة التي يمكن الحصول عليها بواسطة عدة القطع عند الظروف المُثلى) [٢٦] .

٢. الجانب الثاني : يتعامل مع تصميم وتصنيع عدة القطع مع الأخذ بنظر الاعتبار إختيار المادة المناسبة للعدة ، التصميم المناسب لانسياب المحلول الأليكتروليتي ، العزل الجيد لأجزاء العدة لمنع القطع المفرط (Over cutting) في المناطق غير المرغوبة والمقاومة المطلوبة لعدة القطع [٢٧] .

٢-٦-١-١: متغيرات التصميم Design Changes

ان كل شكل من اشكال عدد القطع له مشاكل خاصة ، ولا بد من التعامل معها بدقة [٣] ، منها حدوث ظاهرة الخواء (Cavitation) والركود (Stagnation) وهذه بدورها تؤدي الى رداءة السطح ، هذه المشاكل متعلقة بعدة امور وهي :

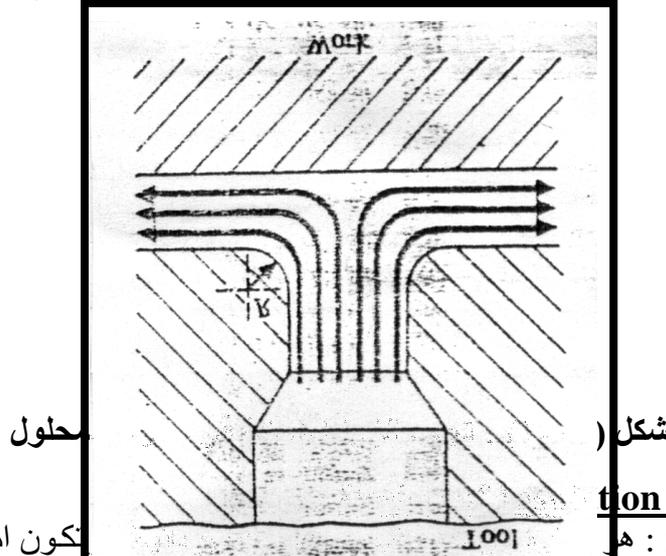
١. تصميم انسياب المحلول

٢. تصميم عزل العدة [٢٣]

٢-٦-١-١-١: تصميم انسياب المحلول Design for Electrolyte Flow

ان انسياب المحلول بشكلٍ كافٍ بين العدة والشغلة ضروري لحمل الحرارة المتولدة ونواتج التشغيل بعيداً ليساعد عملية التشغيل عند معدل التغذية المطلوب ، ولانتاج سطح جيد يجب تجنب كل من ظاهرة الخواء (Cavitation) والركود (Stagnation) [٢٣] .

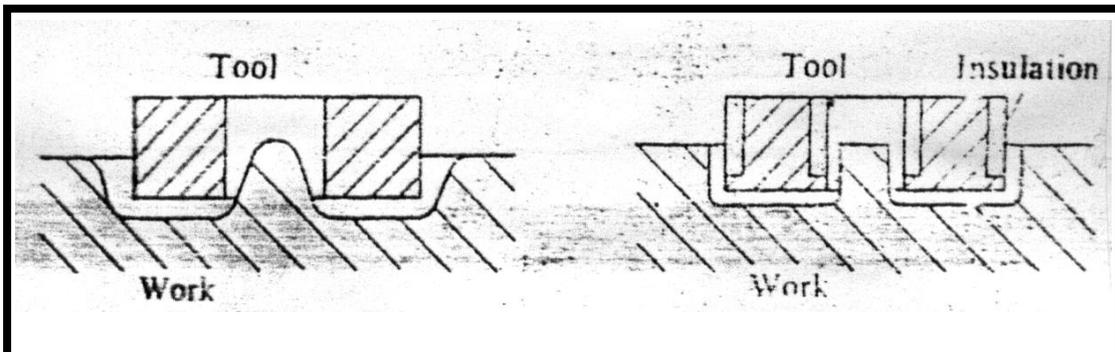
ان وجود الزوايا الحادة يسبب اعاقه لجريان المحلول وهذا بدوره يؤدي الى عدم انسياب المحلول بشكلٍ كافٍ وبالتالي يسبب ظاهرة الخواء والركود وللتخلص من هذه المشاكل لا بد من تجنب الزوايا الحادة (sharp corners) في مجرى المحلول وجعلها مدورة وبقطر اقل من (٠.٨ - ٠.٧ mm) وكما في شكل (١١-٢) :



٢-٦-١-١-٢: تصميم العازل Isolation Design

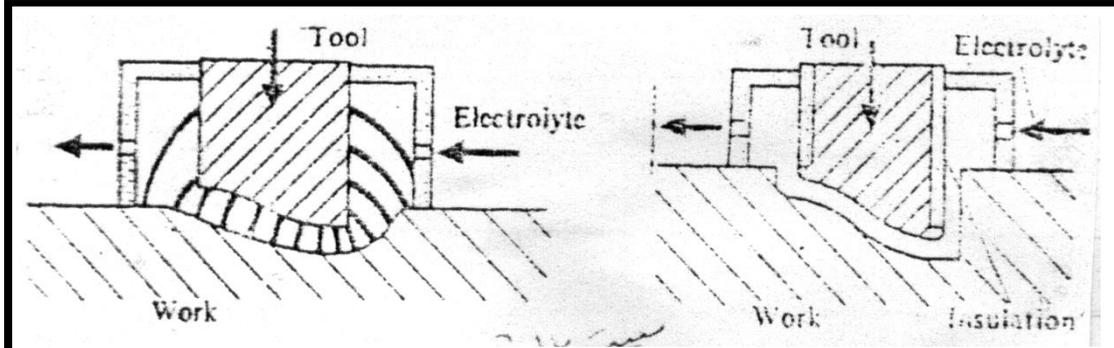
العازل (Insulation) : هو مثل الايبوكسي (Epoxy) أو غير عضوية (inorganic) مثل الطلاء بالزرف (Porcelain enamel) ، تكون اما عضوية (Organic) وتستخدم في عزل عدد القطع لمنع مرور تيار التشغيل الى المنطقة غير المرغوب في ازلتها [٣] .

يجب ان يكون العازل متيناً (tough) ويثبت بصورة جيدة على سطح العدة ، ويمكن تحقيق ذلك بواسطة ضبط تقوية المادة البلاستيكية الصلبة بالعدة بمثبت مثل راتنجات الايبوكسي والبراغي البلاستيكية ، كما يجب ان لا تتعرض حدود طبقة العزل الى سرعة المحلول العالية وذلك لأنها قد تسبب تمزق الطبقة المصمغة (المثبتة) ، كما يُستخدم العازل للحفاظ على جوانب الثقوب مستقيمة ومتوازية وكما في شكل (١١-٢) [٢٠] .



(a) عدة معزولة (b) عدة بدون عازل
شكل (٢-١٢) : تأثير العزل

شكل (b) (٢-١٢) يوضح تكوّن الشكل يوضح تكوّن الشكل بصورة غير دقيقة بسبب التشكيل المفرط المقابل لأوجه عدة القطع ، أما شكل (a) (٢-١٢) فإنه ذو أبعاد دقيقة بسبب التقليل من التشغيل المفرط باستخدام العازل وبالتالي الحفاظ على جوانب الشكل مستقيمة ومن الأمثلة ايضاً شكل (٢-١٣) [٢٣] .



لحرض نجاح عملية التشغيل ودقتها يجب ان يبقى العازل مضبوطاً وغير تالف على العدة ، لأن تلف العازل يسبب عدم دقة المسعولة (w.p) وقد يسبب تلف العدة ، لذلك يجب ان تكون المادة العارلة متينة ومثبتة جيداً على العدة كما ان فاعلية المادة العازلة (Effectiveness of Material Insulation) تعتمد على كمية الطلاء ، مادة الطلاء وعلى دقة الطلاء [٢٨] .

٢-٧: الظروف التشغيلية في عملية التشغيل الكهروكيميائي

Machining Condition in ECM

هناك مجموعة من العوامل (Parameters) تؤثر تأثيراً مباشراً على عملية ECM [٣] ، فهي تؤثر على منتجات العملية مثل دقة أبعاد المنتج ، الانهاء السطحي (Surface finish) ومعدلات الازالة وغيرها وبناءً على ذلك فان فهم هذه العوامل أمر ضروري ومن هذه العوامل [١٢] .

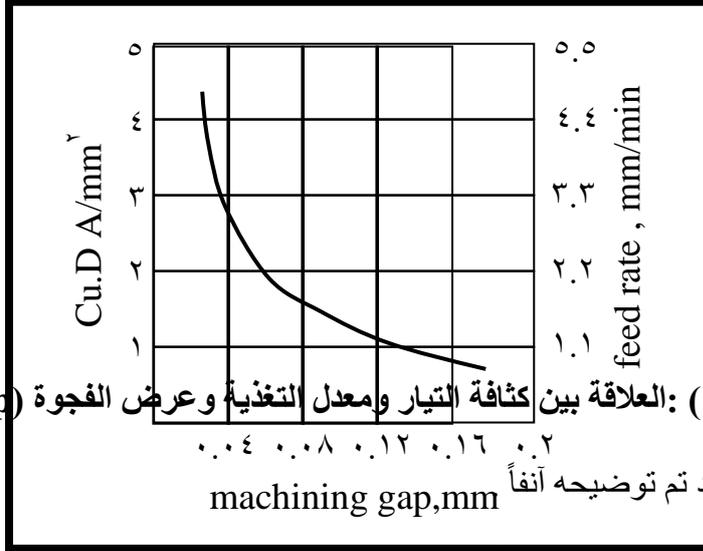
١. الفولتية المسلطة بين عدة القطع والمشغولة .
٢. ضغط المحلول الداخل والخارج او معدل الجريان ودرجة حرارته .
٣. تركيز المحلول الاليكتروليتي .
٤. معدل تغذية التشغيل ، هذا العامل لامجال لذكره ، وذلك لأنه تم استخدام التشغيل الكهروكيميائي الثابت [١٠] .

٢-٧-١: الفولتية المسلطة Applied Voltage

حتى تتم عملية الازالة المعدنية ، فان فرق جهد مستمر (D.C) سوف يسلط على كل من العدة والمشغولة ، وهذه الفولتية تكون منخفضة وبحدود معينة ما بين (٣٠ - ٥ V) [١٥] ، وبذلك فان التباين الشديد في فولتية التشغيل سيؤثر على القطع المفرط (Overcut) ، حيث ان الفولتية العالية تسبب قطع مفرط كبير والفولتية المنخفضة تسبب قطع مفرط قليل وللحصول على افضل دقة لا بد ان يكون التغير بالفولتية طفيف قدر الامكان [١٢] .

ومن الجدير بالذكر ان هناك علاقة وثيقة ما بين الفولتية المسلطة وعرض الفجوة (gab width) [٢٣] ، كما ان تطبيق عملية (ECM) قاد الى استنتاج ان عدم دقة التشغيل تكون متناسبة مع عرض الفجوة (gap) ولتحسين دقة المنتج يجب ان يكون عرض الفجوة صغيراً قدر الامكان مع ملاحظة عدم قطع الدائرة الكهربائية بسبب انسداد الفجوة بمخلفات التشغيل . ان ثبات عرض الفجوة ضروري لتقليل عدم انتظامية التوصيلية الكهربائية والعوامل الفيزيائية الاخرى مثل درجة الحرارة والضغط وسرعة الجريان ذات الاهمية في عملية الازابة [١٠] .

تتم السيطرة على عرض الفجوة بواسطة السيطرة على معدل التغذية ، فعندما يزداد معدل التغذية ، عرض الفجوة سوف يقل وتنخفض مقاومة المحلول ، وهذا يؤدي الى كثافة تيار عالية وفولتية منخفضة ومعدل ازالة عالي وبالعكس ، هذا بالنسبة لعدة القطع المتحركة وكما موضح بشكل (٢-١٤) .



شكل (٢-١٣) : العلاقة بين كثافة التيار ومعدل التغذية وعرض الفجوة (gap) [٧]

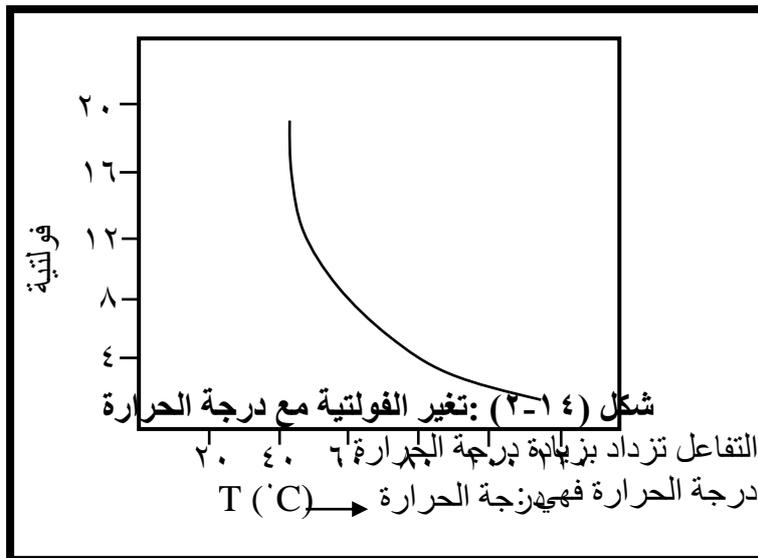
أما بالنسبة للعدة الثانية فقد تم توضيحه آنفاً

٢-٧-٢: ضغط المحلول الداخل ودرجة الحرارة

يعتبر ضغط المحلول دالة لمعدل الجريان ، فكلما يزداد الضغط يزداد معدل الجريان ، كما ان معدل الجريان له حدود معينة فعند الخروج عنها تنجم بعض المشاكل والتي تتمثل بحدوث ظاهرة الخواء (Cavitation) نتيجة لتبخر المحلول وخصوصاً في مناطق تعوّ الاتجاه والمناطق التي يسود فيها الضغط المنخفض والذي يساعد على حدوث الخواء عند استخدام كثافة تيار عالية ، وهذا يؤثر على طبيعة السطح المُشغّل وعدم استقرارية عملية التشغيل [١١] .

ان اختلاف درجة حرارة المحلول عند دخوله وخروجه من عرض الفجوة ، يُعتبر عاملاً مهماً ، لأن هذا الاختلاف يؤدي الى خفض المقاومة النوعية للمحلول ممثلاً محلول (١٠٪ NaCl) تنخفض مقاومته بمقدار ٥٠٪ عند اختلاف درجة الحرارة وهذا التغير يؤثر على معدل الجريان وضغط المحلول ، كما يجب تجنب التسخين المفرط للمحلول والذي يؤدي الى التبخر في منطقة التشغيل وبالتالي رداءة السطح المنتج ، كما يمكن استخدام المحلول الساخن ، وله مميزات ومنها :

١. عند ارتفاع درجة الحرارة تزداد تفاعلات القطب وتقل الفولتية المطلوبة وكما في شكل (٢-١٤) [١٢] .



شكل (٢-١٤) : تغير الفولتية مع درجة الحرارة

٢. قابلية ذوبان نواتج التفاعل تزداد بزيادة درجة الحرارة

١. المقاومة الاومية .

٢. التفاعلات الكيميائية العكسية واللاعكسية .

٣. لزوجة المحلول الأليكتروليتي وتعتبر المقاومة الأومية هي المصدر الرئيسي ، هذه المصادر تعتبر رافعات إضافية لدرجة الحرارة [٢٤] . ولخفض درجة الحرارة تستخدم أقطاب ذات توصيلية حرارية عالية ليساعد على تسريب درجة الحرارة .

٣-٧-٢: تركيز المحلول الأليكتروليتي Concentration of Electrolyte

ان معدل تشغيل المواد كهروكيميائياً يعتمد على كثافة تيار التحلل الكهربائي وحسب قوانين فاراداي وان اعلى كثافة تيار تكون عند اقل مقاومة اومية للمحلول خلال الفجوة (gap) ، وان التشغيل بفجوة صغيرة جداً يؤدي الى تقليل المقاومة الأومية وبالتالي كثافة تيار عالية ولكن يكون محدداً بعدة عوامل وهي :

١. حجم المترسبات (المخلفات) .

٢. متانة القدرة والشغلة .

٣. توزيع انسياب المحلول [١٠] .

ان موصلية المحلول تتحدد بكمية المادة الموصلة المذابة فيه ، فكلما تزداد الكمية المذابة (التركيز) تزداد الموصلية وبالتالي فان المحلول ذو التوصيلية الجيدة يسمح بالتشغيل بمعدل تغذية عالٍ (كثافات تيار عالية) باستخدام عرض فجوة مناسب وفولتية معتدلة [١٠] ، أي ان المحلول المركز يسبب انخفاض المقاومة الأومية للمحلول ومن مساوئ المحاليل المركزة هو تبلور الأملاح خارج المحلول ويؤدي الى اعاقه المساحات الضيقة في المشغولة ، اما المحاليل المخففة فهي مفيدة في حالات معينة ، فهي مفيدة بالنسبة لانتهاء السطحي للمشغولة وكذلك تُستخدم في حالة الفولتية العالية كما تستخدم مع عرض الفجوة الصغير بدلاً عن الفولتية المنخفضة والمحلول العالي التركيز [٨] .

إضافة الى تأثير التركيز على الموصلية ، فان هناك عوامل تسبب تغير الموصلية وهي ارتفاع درجة الحرارة ، تحرير فقاعات الهيدروجين (H₂) وتكوين المترسبات وهذا العامل تأثيره قليل ، جميع هذه العوامل تؤدي الى عدم انتظامية كثافة التيار على طول انسياب المحلول بتأثيرها على الموصلية [٢٣] .

٢-٨: خشونة السطح المنتج بعملية (ECM)

تتم عملية التشغيل الكهروكيميائي بدون وجود اتصال مباشر بين العدة والمشغولة مختلفة بذلك عن طرق التشغيل الميكانيكية [٢] ، وكذلك بدون توليد حرارة عالية في منطقة التشغيل ، لذلك فان سطح المعدن لا يتعرض الى التشويه الميكانيكي (Mechanical Distortion) ، اجهادات الضغط (Comp. stresses) ، الشقوق (Cracks) والتشوه الحراري (Thermal Distortion) ، وهذا يعود الى كون السطح الناتج جيد وذو خشونة قليلة وتكون ما بين (٢.٥ – ٠.١ μm) عند الظروف المثالية [٥] .

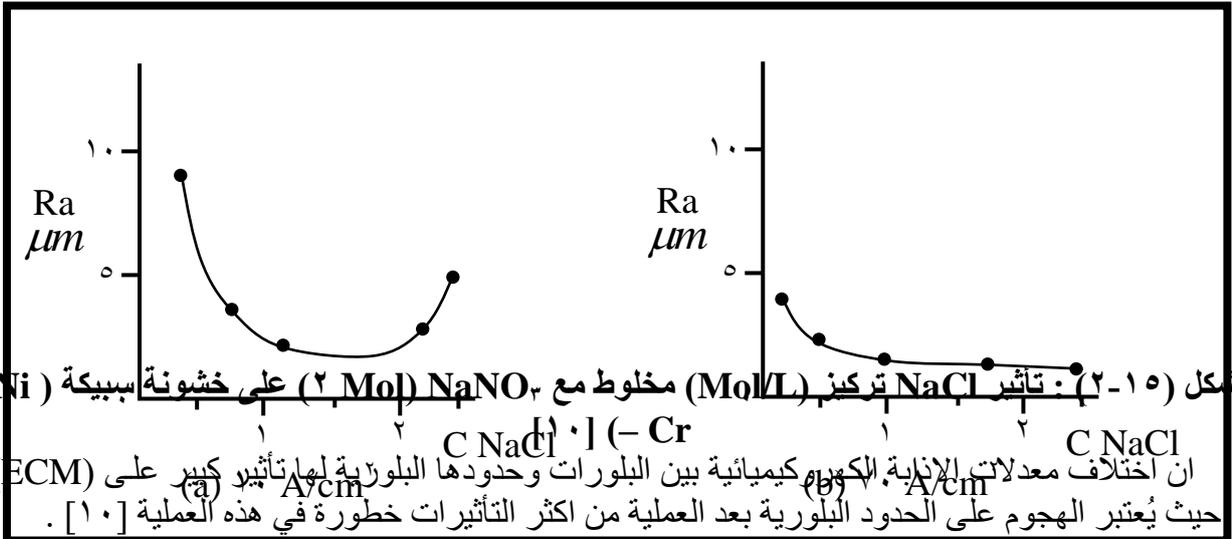
تختلف خشونة السطح من معدن لآخر ، فمثلاً السبائك التي اساسها نيكل (Nickel base) والتي اساسها كوبلت (Cobalt base) وذات اساس فولاذ مقاوم للصدأ (st. steel) تقترب خشونتها من (٠.٥ – ٠.١ μm) ، أما التي اساسها حديد (Iron) وفولاذ (steel) تكون ما بين (٢ – ٠.٥ μm) بعد تشغيلها كهروكيميائياً [١٢] .

تعتمد خشونة السطح على عدة عوامل ومنها ، درجة الحرارة ، تركيب المحلول الأليكتروليتي ، كثافة التيار ، بنية وتركيب مادة المشغولة [٣] إضافة الى ذلك تأثير المعادلة الحرارية حيث تعتبر كعامل يستخدم لتحسين خشونة السطح قبل التشغيل [٢٣] .

تتميز المعادن المسبوكة بكون سطحها الناتج بعد عملية (ECM) خشن ، لأن هذه السبائك تتكون بنيتها البلورية من مركبات مختلفة او اطوار وهذه المركبات والاطوار مختلفة في الحجم البلوري والشكل والخواص الكهروكيميائية ، حيث ان الحجم البلوري له تأثير على خشونة السطح ، فعندما يكون الحجم البلوري كبير يكون السطح الناتج خشن وبالعكس ، وتتم معالجة ذلك باجراء المعاملة الحرارية لتصغير الحجم الحبيبي [١٠] ، ولقد اجريت دراسات عديدة في هذا المجال ، ومن هذه الدراسات ماتوصل اليه العالمان (V. Radhakrishna , O.V. Krishnaiahchety) بصدد تأثير الحجم الحبيبي (Grain Size) وسرعة المحلول (velocity) على خشونة السطح ، فلقد وجد ان كبر الحجم الحبيبي يؤدي الى خشونة

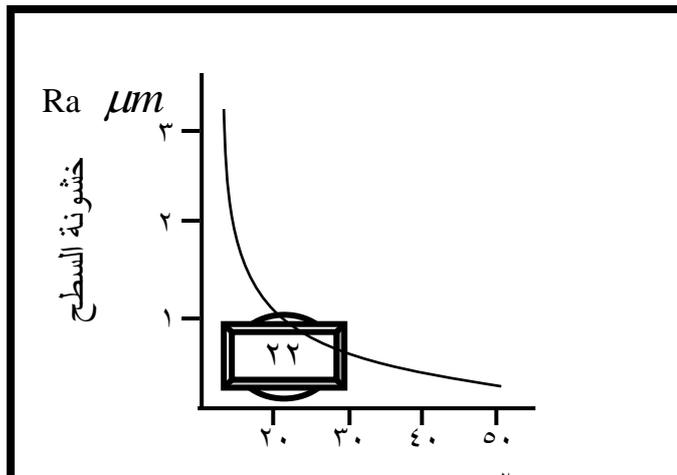
السطح وكذلك وُجد انه كلما تزداد سرعة المحلول تقل خشونة السطح وبالعكس [٣٠] ، حيث عند سرعة أكبر من (١٥ m/s) يصبح تأثير الحجم الحبيبي غير مهم على خشونة السطح [١٠] .
كما ان لجهد القطب تأثيراً على الخشونة (Roughness) ، حيث يُعرف بأنه فرق الجهد الموجود بين نقطة موجودة على سطح المعدن (القطب) وأقرب نقطة في المحلول الاليكتروليتي وهو يعتمد على كل من القطب والمحلول [٢٣] .

فالاطوار ذات الجهد المنخفض تتحلل كهربائياً بسرعة ، اما الاطوار ذات الجهد العالي فتتحلل ببطئ ، وتنزل الى المحلول [٢٣] . وبهذا فان تأثير جهد القطب والحجم البلوري يكون مباشراً على الخشونة .
كما ان اختلاف ميل مكونات السبيكة الى تكوين طبقة الخمولية [١٠] (passivation film) وهي الطبقة الاوكسيدية الرقيقة جداً التي تتكون في الهواء او عند غمر المعدن في محلول حامضي والتي تمكّن بعض المعادن من مقاومة التآكل [٣] ، اثناء التشغيل تؤثر على خشونة السطح [١٠] ، فمثلاً يتحلل احد الأطوار او المركبات اسرع من الثاني عندما يكون ميله للخمولية قليل ويمكن اهماله ، اما الطور او المركب الثاني فيكون خاملاً ولا يتحلل وهذا يؤثر على الخشونة [١٠] ، ولقد وُجد انه يمكن تقليل خشونة السطح للسبائك التي تتكون من اكثر من طورين والمختلفة في قابلية الخمولية باستخدام محاليل تتكون من مركبين ، وكمثال على ذلك سبيكة نيكل - كروم الفائقة (Ni - Cr super alloy) وفيها طورين ، الاول يمثل اساس السبيكة ويكون على شكل محلول جامد (Ni - Cr) والثاني يمثل طور (g') ، ينوب هذين الطورين بجهود مختلفة في كلا المحلولين (NaNO₃ ، NaCl) ، اما عند استخدام محلول موصل يتكون من هذين الملحنيين ، فان جهود الاذابة تكون قريبة أي ان الاختلاف يكون قليلاً وهذا يقود الى انخفاض الخشونة ، وكما في شكل (٢-١٥) الذي يوضح تأثير خليط NaNO₃ ، NaCl على سطح سبيكة نيكل - كروم .



كذلك تؤثر المعاملة الحرارية على خشونة السطح من خلال تصغير الحجم الحبيبي ومن الأمثلة على ذلك ، سبائك التيتانيوم والفولاذ الكربوني (٠.٤٢ %) فعند اجراء معاملة تصغير الحجم الحبيبي يؤدي ذلك الى انخفاض الخشونة .

ومن العوامل الاخرى المؤثرة على الخشونة ، هي كثافة التيار فكلما تزداد كثافة التيار تنخفض خشونة السطح وبالعكس حيث يؤدي الى تنقر السطح [٢٢] وكما في شكل (٢-١٦) .



شكل (١٠-٢) : العلاقة بين كثافة التيار وخشونة السطح [١٠]

كما ان مدى الفولتية المستخدم في (ECM) كما هو معروف ما بين (٣٠ - ٥) وعند تسليط فولتية اعلى من هذا المدى يعطي سطحاً خشناً أقل من هذا المدى يستخدم للتشغيل النهائي [٣٣]. ومن البحوث التي قُدمت في هذا المجال ، هو البحث الذي قدمه العلماء في سنة ١٩٧٨ (V. RAD HAKRISHNAN , O.V.K , T.GURUMURTHY) فلقد توصلوا الى ان خشونة السطح تنخفض عند ازدياد كثافة التيار وكذلك تنخفض خشونة السطح عند زيادة تركيز المحلول الاليكتروليتي [٣٤].

كما ان زيادة معدل التغذية والذي يصاحبه زيادة كثافة التيار والانحدار الشديد في منحنى الجهد وزيادة زمن التشغيل يؤدي الى تحسن الانهاء السطحي [٣] ، وللحصول على سطح لماع تستخدم مثلاً كثافة تيار

$$\text{عالية تقريباً } \left(100 \frac{A}{cm^2} \right) \text{ [٣٥].}$$

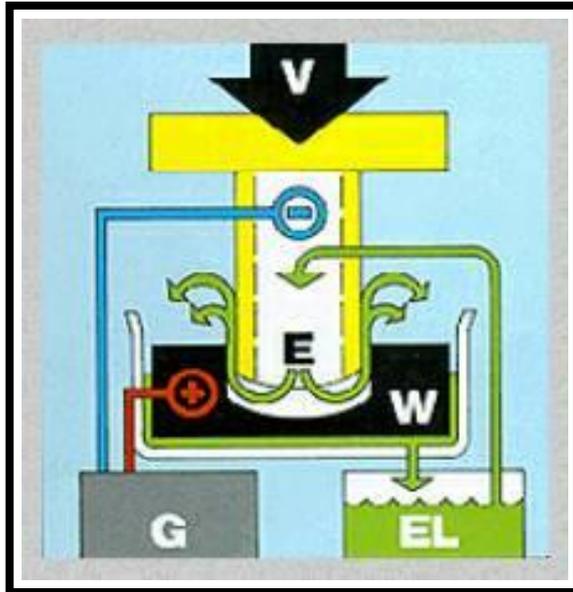
ولقد وُجد ان زمن التشغيل يؤثر على خشونة السطح ، فمثلاً وجد العالمان (١٩٧٨) (V.R , O.V) عند دراستهما لتأثير الزمن على تعديل سطح الانود ، انه بمرور زمن التشغيل وبمعدل تغذية منتظم سوف تقل خشونة السطح [٣٦]. كما يؤثر معدل الجريان على خشونة السطح ، فكلما يزداد معدل الجريان يؤدي الى انخفاض خشونة السطح [٣٢].

ومن العوامل الاخرى التي تؤثر على خشونة السطح هي تحرر غاز الهيدروجين اثناء التشغيل ، فعندما يوجد (H_2) بالمحلول الموصل ، يعمل على انخفاض الموصلية النوعية للمحلول وهذا التأثير يزداد بزيادة (H_2) وبالتالي يعمل على تدني الانهاء السطحي أي زيادة الخشونة [٣٧].

علاوة على ذلك ، وُجد ان فتحة تجهيز المحلول الاليكتروليتي لها تأثير على تكوّن المنطقة المدببة المقابلة للفتحة في عمليات الثقب غير النافذة ، وبذلك يكون السطح غير مستوٍ بسبب وجود هذه المنطقة ، ولقد وجد العلماء (G.K ، V.J ، P.S) أنه كلما قلّ قطر فتحة التجهيز ، قلّ حجم الرأس المدبب (Spike) المتكون على السطح [٣٥].

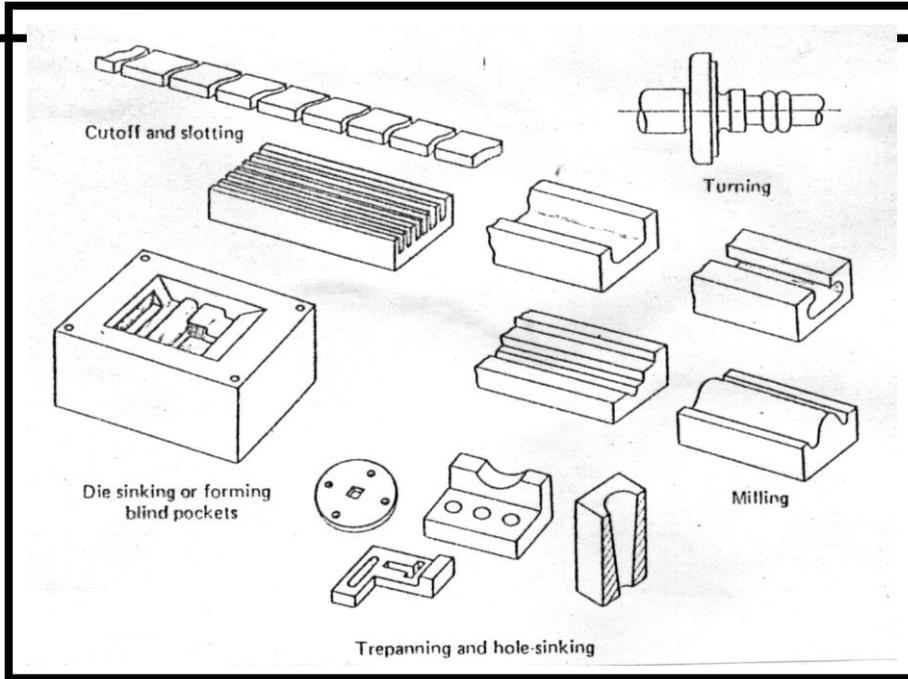
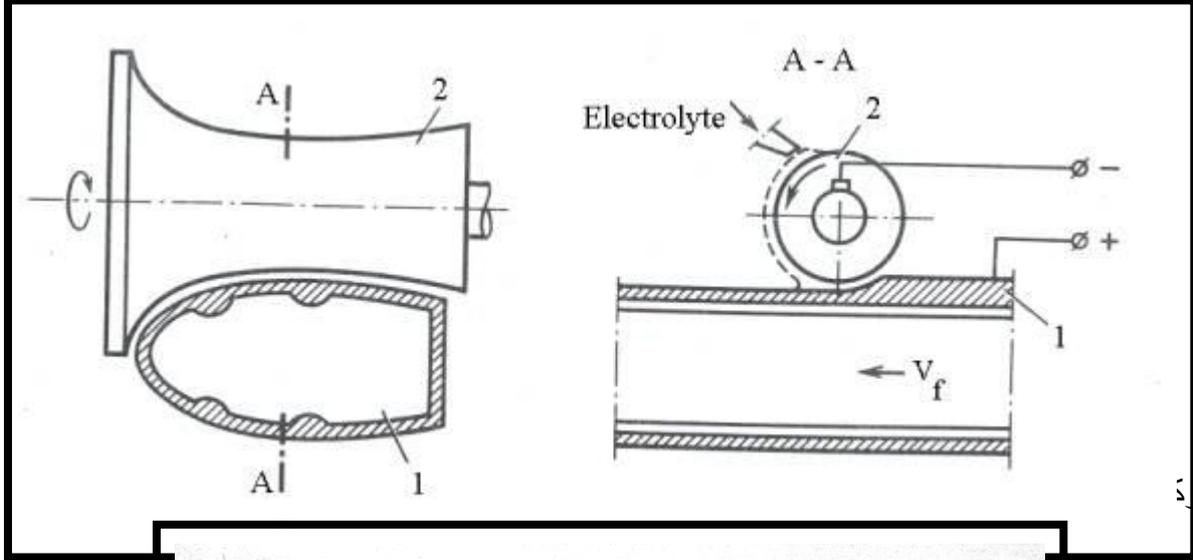
٢-٩: تطبيقات على عملية ECM

تُطبق عملية (ECM) في كثير من المجالات مثل صناعات الفضاء (Aerospace) ، تصنيع أجزاء محركات السيارات (Automotive) ، الاليكترونيات (Electronics) ، ريش التوربين (Turbine blades) ، أغشية المكائن (Engine Casing) ، التروس (Gears) ، صناعة القوالب ، الاجزاء الدقيقة في المفاعلات النووية التي تحتاج الى تشغيل معادن صلبة جداً وبدقة [٦] ، في عمليات الاستنساخ (Duplicating) ، التنقيب (Drilling) ، عمليات التشغيل الغاطس في تصنيع القوالب ، تصنيع الممرات (Passages) وغيرها [١٠] ، شكل (١٧-٢) يوضح التشغيل الغاطس (Sinking)



شكل (١٧-٢) : التشغيل الكهروكيميائي الغاطس [١٠]

وكذلك تستخدم في عمليات التجليخ الكهروكيميائي (Electrochemical Grinding) باستخدام عدة قطع تتحرك حركة دورانية ، شكل (١٨-٢) يوضح ذلك .



3-1: مقدمة Introduction

لغرض إجراء التجارب الخاصة بمنظومة التشغيل الكهروكيميائي وما يتعلق بالسيطرة على الظروف التشغيلية لهذه المنظومة من كثافة التيار (Current Density) ، فولتية (Voltage) ، سرعة (Velocity) ، ضغط (Pressure) ومعدل جريان وغيرها من الظروف ، تطلب تصميم منظومة خاصة بهذا المجال . ان طبيعة عمل مثل هذه المنظومات يتطلب استخدام محاليل اليكترووليتية مختلفة مثل الحوامض والقواعد والمحاليل الملحية ، لذلك كان لابد من اختيار مواد هندسية تقاوم التآكل والفعل الكيميائي لهذه المحاليل ، فإلقد تم اختيار مواد بلاستيكية كمادة بوليمر فانييل كلورايد (P.V.C) وكانت تشكل الجزء الأكبر من المواد المستخدمة في تصميم المنظومة ، كما استخدمت معادن مقاومة للتآكل كمعدن البراص (Brass) وخاصة في صناعة الاقطاب (عدد القطع) .

ان تطبيقات التشغيل الكهروكيميائي كثيرة وواسعة الاستخدام ، فمنها ما يعتمد على كون عدة القطع متحركة بمعدل تغذية معينة ، مثل الثقب الكهروكيميائي (Electrochemical Drilling) والتشغيل الكهروكيميائي الغاطس (Electrochemical Sinking) وغيرها ، ومنها ما يعتمد على كون عدة القطع ثابتة ، أي ان معدل التغذية لعدة القطع = صفر ، وهو ما يسمى بالتشغيل الكهروكيميائي باستخدام عدة قطع ثابتة (ECM with stationary cutting tool) ، وهذه التقنية تستخدم في توسيع الثقوب (Radiuming) ، ازالة الحواف (Deburing) وصل السطوح وغيرها . وفي هذا البحث تم استخدام هذه التقنية .

3-2: منظومة التشغيل الكهروكيميائي

تتكون منظومة التشغيل الكهروكيميائي وكما موضح بالشكل (3-1) ، ومن هيكل مصنوع من مادة بوليمرية مركبة مقاومة للتآكل ، ويتألف هذا الهيكل من حوضين أحدهما سفلي يعتبر كخزان للمحلول الاليكترووليتي ، ويوجد بجانبه قاعدة تُثبت عليها المضخة (Pump) ، أما الحوض العلوي فيعتبر كحوض ثانوي تتجمع فيه مخلفات التشغيل والتي تكون على شكل هيدروكسيدات وكلوريدات المعدن المُشغَّل والتي تُزال بعد التشغيل ، حيث يتم فصل المواد المترسبة من المحلول بواسطة فلتر (Filter) ورقي يوجد في اسفل الحوض . لقد تم تثبيت خلية التشغيل المتكونة من عدة القطع (Cutting Tool) والمشغولة (w.p) والمربوطة مع جهاز القدرة ذو التيار المستمر (D.C.) على قاعدة فولاذية مغطاة بمادة بلاستيكية وتكون القاعدة على شكل حرف (U) مقلوبة والتي تم ربطها باسفل الحوض العلوي .

شكل (٣-١) : منظومة التشغيل الكهروكيميائي

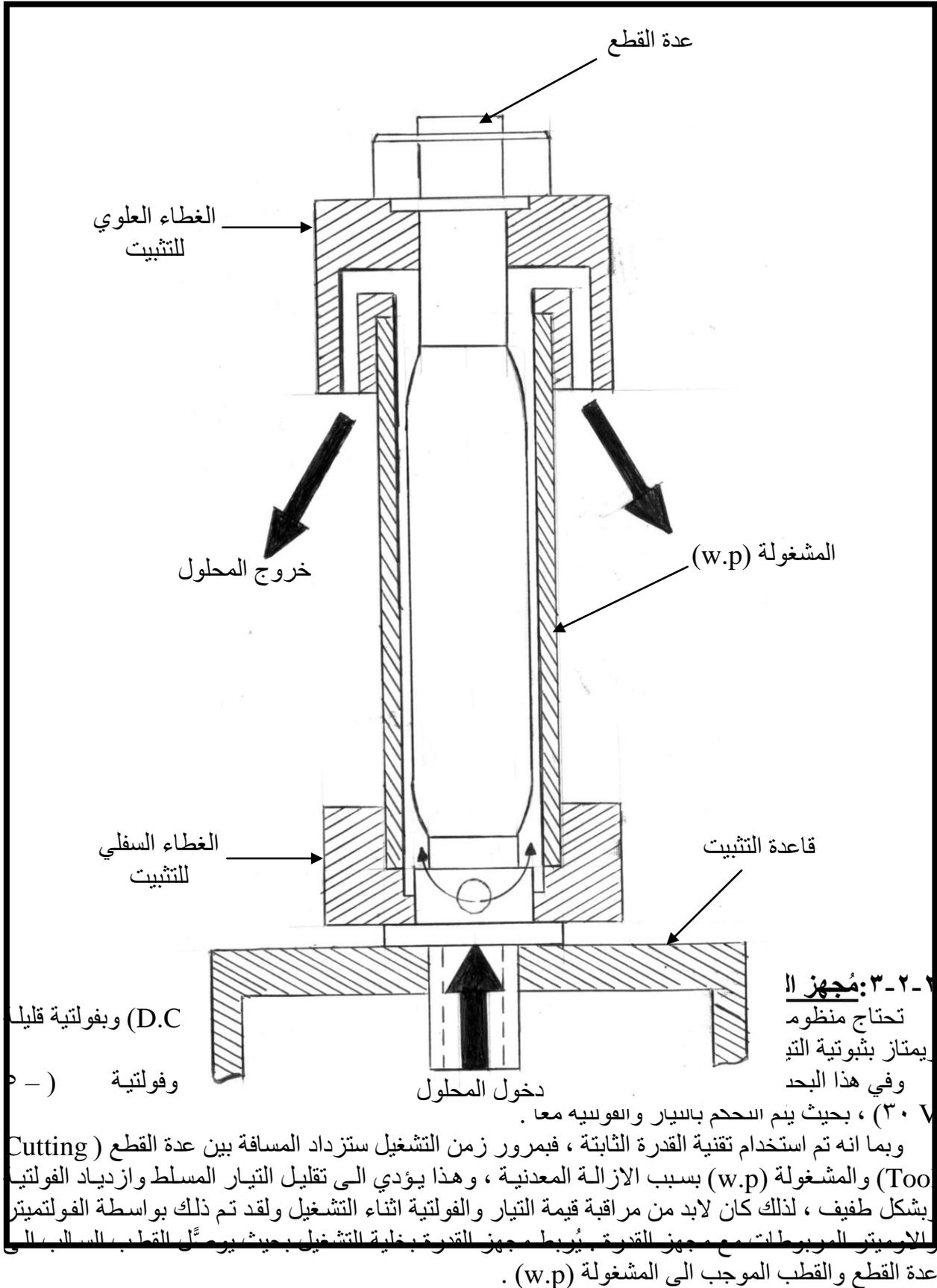
يتم رمي المحلول الاليكتروليتي (Electrolyte) من الحوض السفلي بواسطة المضخة (Pump) الى انبوب الدفع مروراً بصمام تنظيم الضغط فجهاز قياس الضغط (مانوميتر) فجهاز قياس معدل الجريان (فلوميتر) ومن ثم يمر بخلية التشغيل ، حيث يكون محملاً بالمخلفات كالهيدروكسيدات والكلوريدات والتي تستقر في اسفل الحوض العلوي وبواسطة الفلتر الورقي يتم فصل هذه المخلفات وبعدها يرجع المحلول الاليكتروليتي الخالي من المترسبات الى الحوض السفلي وهكذا تستمر دورة المحلول . يُنظف الفلتر من المترسبات بواسطة تيار سريع من الماء بعد انتهاء كل عملية تشغيل كما يُبدل المحلول بعد انتهاء كل عملية ، وفيما يلي تفصيل للمكونات الرئيسية للمنظومة .

٣-٢-١: خلية التشغيل الكهروكيميائي ECM Cell

شكل (٣-٢) يوضح خلية التشغيل الكهروكيميائي والتي تتكون من قطبين ، احدهما يُربط الى القطب السالب لمجهاز القدرة (D.C.) ويمثل عدة القطع (Cutting Tool) ويسمى بقطب الكاثود (Cathode) ، وهو اسطواني الشكل غير مجوف مثبت على القاعدة الفولاذية المغطاة بمادة بلاستيكية ، وقد صُنِعَ من معدن البراص Brass (٣٥% Zn , ٦٥% Cu) وتم تصميمه حسب القياسات المطلوبة ، وتوجد فيه ترتيبية لمرور المحلول الاليكتروليتي النس تسمح بمروره بينه (قطب الكاثود) وبين القطب الآخر (الأنود) وخلال مسافة صغيرة ما بين القطبين والتي تسمى بسمك الفجوة (Gap Thickness) .

أما القطب الآخر فيمثل المشغولة (w.p) الذي يربط الى القطب الموجب لمجهاز القدرة (D.C.) ويسمى بقطب الأنود (Anode) ويكون على شكل اسطوانة مجوفة ، يتم تثبيت المشغولة (w.p) بحيث يكون قطب الكاثود بداخلها ويفصل بينها بمسافة تسمى بسمك الفجوة كما ذُكر . اما طريقة التثبيت فتتم باستخدام غطائين مصنوعة من مادة عازلة تسمى بالتفلون (Teflon) وذلك لمنع تماس القطبين وحدوث انقطاع الدائرة الكهربائية ، يكون احد القطبين سفلي توجد فيه ترتيبية لدخول المحلول والآخر علوي فيه ترتيبية لخروج المحلول .

عند تثبيت القطبين يجب مراعاة كون سمك الفجوة (Gap) ما بينهما متساوية على مساحة قطب الكاثود المواجهة لمساحة المشغولة (w.p) (المساحة المراد تشغيلها) وذلك لتساوي كثافة التيار المسلطة وبالتالي تجانس الازالة المعدنية والذي يقود الى سطح متجانس الخواص من حيث النعومة .



٣-٢-٣: المضخة Pump

تتميز المضخة المستخدمة بكون انبوبي السحب والدفق مصنوعان من مادة بوليمرية وهي بوليمر فانيل كلورايد (P.V.C.) وذلك لمقاومة التآكل .

تعطي هذه المضخة اقل ضغط بقيمة (٠.٥ bar) وبمعدل جريان ($14 \text{ m}^3/\text{hr.}$) وأعلى ضغط (١.٥ bar) بمعدل جريان ($24 \text{ m}^3/\text{hr.}$) .

يُقاس ضغط المحلول الالكتروليتي بواسطة جهاز مانوميتر (Manometer) لقياس الضغط مصنوع من مادة البراص (Brass) ويقاس ضغط (٣.٥ - ٠) ، اما معدل الجريان فتم قياسه بواسطة جهاز فلوميتر

(Flowmeter) لقياس معدل الجريان ومدى قياسه ($8 - 24 \frac{\text{m}^3}{\text{hr.}}$) وهو ايضا مصنوع من البراص .

أما الانابيب المستخدمة فكلها مصنوعة من مادة (P.V.C.) وتتحمل ضغط مقداره (١٠ bar) ، وفيما يلي صورة توضح منظومة التشغيل .



٣-٣: تصه

يُعتبر

هو ان كل

فان كل

مميزاته

، وبذلك

(Rough)

، يكون السطح الناتج على المشغولة ايضا خشن لذلك لابد من الدقة في تصميم عدة القطع .

تم اختيار معدن البراص (Brass) في تصنيع عدة القطع (C.T.) ، لمتانته ومقاومته للتآكل ولتوفره ،

ولقد تم تصنيع نموذجين من عدد القطع وتم اختيار الابعاد لكلا النموذجين على اعتبارهما نماذج مختبرية ،

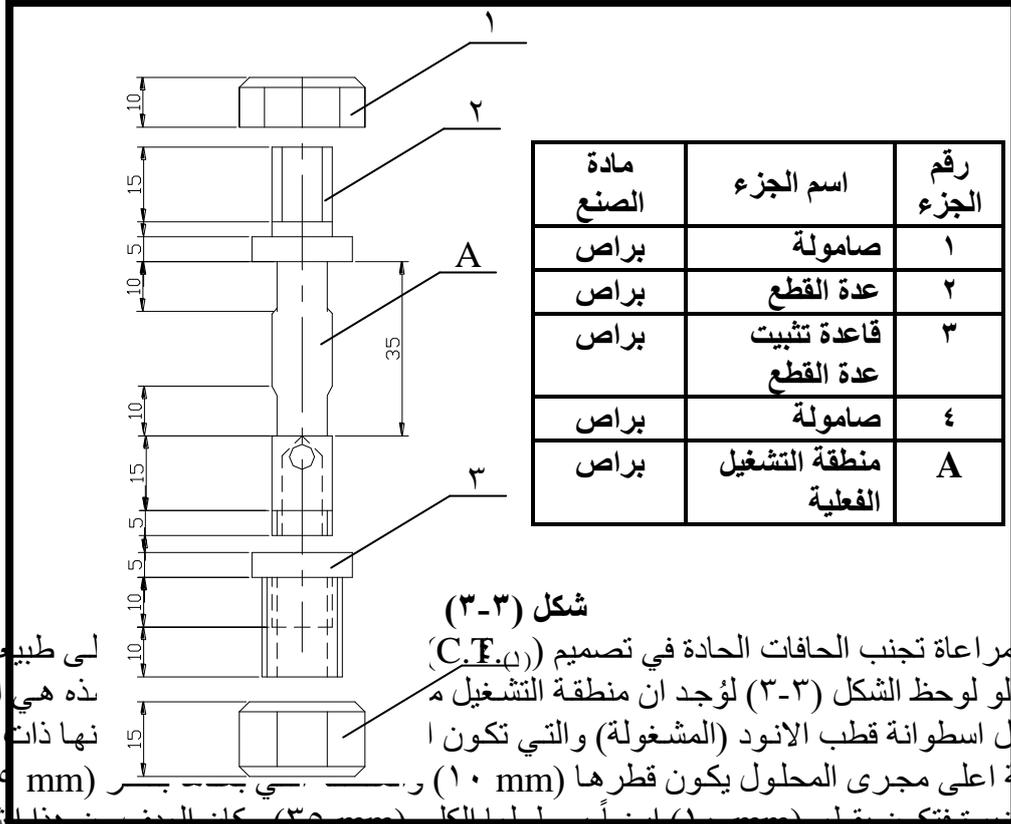
بحيث تكون صغيرة قدر الامكان وذلك للسهولة ، ولقد أجريت عملية التصنيع على ماكينة الخراطة وماكنة

التفريز ، كما تم تحديد ابعاد النموذجين اعتماداً على القياسات المطلوبة للنماذج (المشغولة) المراد تصنيعها .

وفيما يلي تفصيل عن تصميم عدتي القطع .

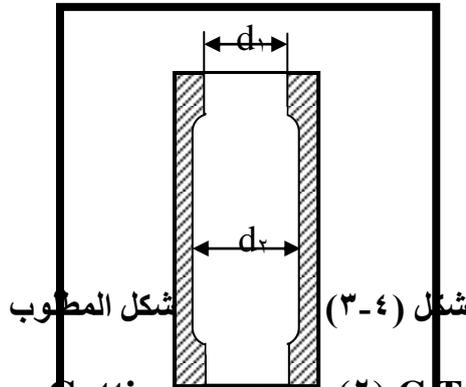
٣-٣-١: عدة القطع رقم (١) C.T._(١) (١) Cutting Tool No.

شكل (٣-٣) يوضح شكل وابعاد C.T._(١) ، تُثبت العدة على القاعدة الفولاذية بواسطة قاعدة خاصة مصنعة من معدن البراص وهذه القاعدة تكون مثبتة على القاعدة الفولاذية بواسطة صامولة وهي مزودة بترتيبية لدخول المحلول حيث يتم ربط انبوب الدفع اليها من الاسفل ، كما تكون القاعدة المصنوعة من البراص ثابتة ، ويمكن ربط أي عدة قطع عليها .



شكل (٣-٣)

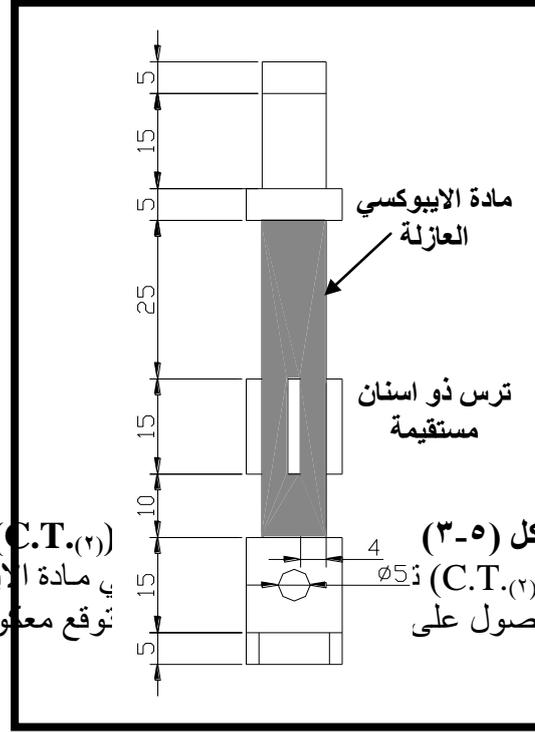
لقد تم مراعاة تجنب الحافات الحادة في تصميم (C.T._(١)) المشغل ، ولو لوحظ الشكل (٣-٣) لوجد ان منطقة التشغيل عكسها داخل اسطوانة قطب الانود (المشغولة) والتي تكون ا في المنطقة اعلى مجرى المحلول يكون قطرها (١٠ mm) و... في... (١٣.٩ mm) أما المنطقة الانودية فتكون بقطر (١٠ mm) أيضاً ، ولولها الكلي (٣٥ mm) وكان الهدف من هذا الشكل ، هو محاولة عكسها داخل قطب الانود الاسطواني (المشغولة) والذي يصعب تصنيعه بطرق التشغيل التقليدية وذلك لدقته . ويمكن توقع الشكل المعكوس بهذا الشكل .



شكل (٣-٤) شكل المطوب

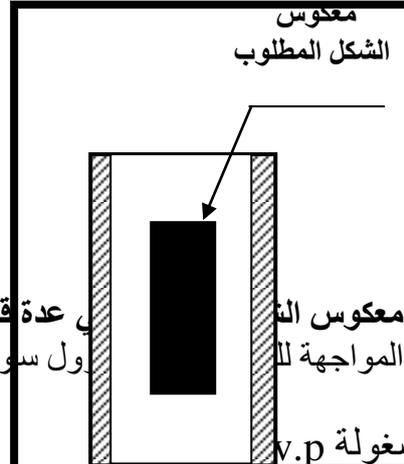
٣-٣-٢: عدة القطع رقم (٢) C.T._(٢) (٢) Cutting Tool No.

تشبه عدة القطع رقم (١) (C.T._(٢)) من حيث الشكل والتصميم ، ما عدا كون منطقة التشغيل الفعلية على شكل ترس ذو اسنان مستقيمة (Spar Gear) ، عددها خمسة اسنان وطول السند الواحد (١٥ mm) وعرضه (٤ mm) ولقد تم تصنيعه على ماكينة التفريز ، شكل (٣-٥) يوضح شكل وابعاد (C.T._(٢)) . اما الهدف الأساسي من هذا الشكل هو عكسها داخل قطب الانود الاسطواني (المشغولة) ، حيث ان هذا الشكل يصعب تصنيعه بالطرق التقليدية .



(C.T.٢) توقع معكوس الشكل داخل قطب الانود في مادة الايبوكسي وذلك لعزل المناطق

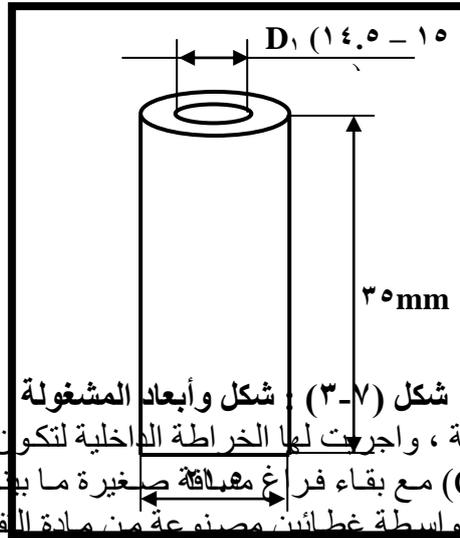
علاوة على ذلك ، في العدة (C.T.٢) $\phi 5$ اسطواناني كما يلي :
غير المرغوب فيها وبالتالي الحصول على



(C.T.٢) في عدة قطع (C.T.٢) في

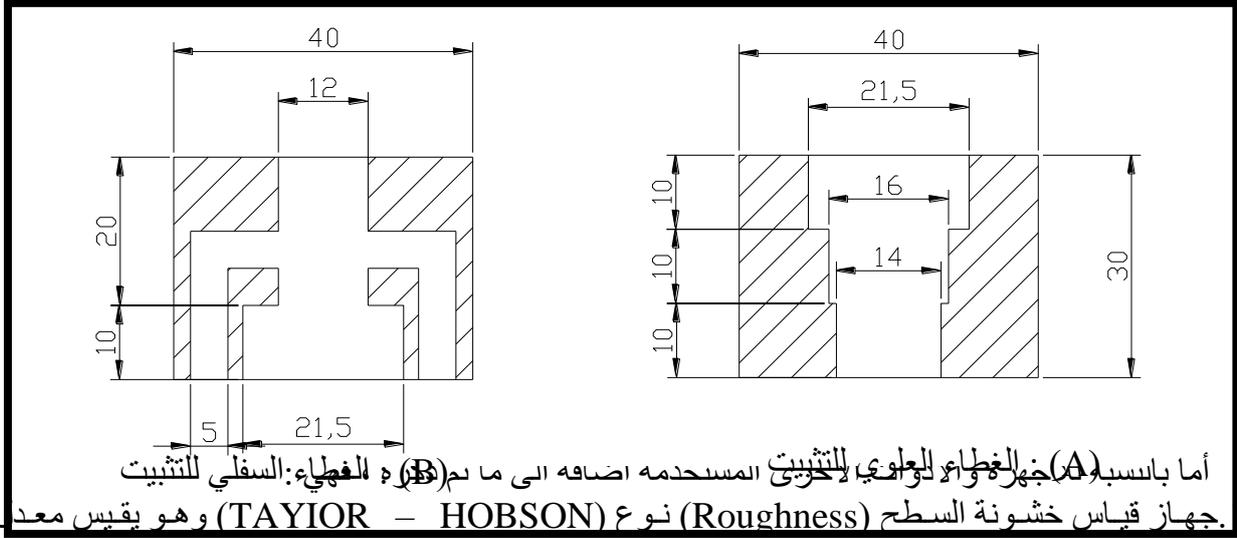
شكل (٣-٦) : معكوس الشكل ، المنطقة المواجهة للمناطق فلا تتأثر .

٣-٤ : القطعة المراد تشغيلها (المشغولة v.p) العينات المراد تشغيلها ، اسطوانية الشكل ومحوفة بطول (٣٤ mm) ، قطر داخلي (١٤.٥ - ١٥ mm) وبقطر خارجي (٢١.٥ mm) وكما في شكل (٣-٧) .



صُنعت العينات بماكنة الخراطة ، واجريت لها الخراطة الداخلية لتكون مهيئة للتشغيل ، تثبت المشغولة حول قطب الكاثود (C.T.) مع بقاء فراغ مغلقة صغيرة ما بينهما وهي بسمك الفجوة (Gap Thickness) لمرور المحلول ، بواسطة غطاءين مصنوعة من مادة الفلون العازلة ، احدهما علوي فيه

ترتبية لخروج المحلول والآخر سفلي فيه ترتيبية لتوجيه المحلول الداخل خلال سمك الفجوة (Gap) ، شكل (٣-٨) يوضح شكل وابعاد الغطائين .



أما بالنسبة لـ (A) فهو الغطاء العلوي للثبتيته المستخدمه اضافة الى ما تم (B) في الفطياء السفلي للثبتيته .
جهاز قياس خشونة السطح (Roughness) نوع (TAYLOR – HOBSON) وهو يقيس معدل الخشونة (Ra) حيث ان :

$$Ra = \frac{R_1 + R_2}{2}$$

٢. آلة قياس الاقطار والعمق نوع (Mitotoyo) بدقة (٠.٠٠٠٠٠ mm) .

٣. الميزان الحساس بدقة (٠.٠٠٠٠ g) نوع (Sartorus) .

٣-٥: التجارب التي أجريت على منظومة التشغيل

يمكن توضيح طريقة اجراء التجارب بالنقاط التالية :

١. تثبيت عدة القطع (C.T.) المطلوبة في مكانها .

٢. تحضير النماذج (المشغولة) وحسب الابعاد المطلوبة وتثبيتها حول عدة القطع في خلية التشغيل بعد ان توزن بالميزان الحساس .

٣. تحضير المحلول الاليكتروليتي وذلك باضافة الاملاح المناسبة لكل معدن وبوحدات تركيز غرام لكل لتر من الماء (gram/leter) مثلاً ملح (NaCl) ، ويتم خلط الملح مع الماء لتجانس تركيز المحلول .

٤. تسليط التيار والفولتية المناسبة للمعدن المراد تشغيله وبعد عملية التشغيل يتم إخراج النماذج (المشغولة) وتنظيفها وقياس نعومة السطح .

لقد تم استخدام ثلاثة معادن وهي الالمنيوم (Al) والبراص (Brass) والفولاذ (Steel) . والجدول التالي يوضح التركيب الكيميائي لكل منها .

أما بالنسبة لمحاليل التنظيف فيستخدم لمعدن الالمنيوم التيار السريع من الماء حيث يكون كافٍ لازالة الهيدروكسيد المتكون على سطحه وكذلك يستخدم لمعدن الفولاذ ، اما معدن البراص فيستخدم محلول (١٠% HCl) المخفف لغرض التنظيف .

جدول يوضح التركيب الكيميائي للمعادن المستخدمة في عملية التشغيل

C %	Mo %	Sb %	Pb %	Ni %	Cr %	Ti %	Zn %	Mg %	Mn %	Cu %	Fe %	Si %	Sn %	Al %	التركيب
---	---	---	٠.٠٠	٠.٠٠	٠.٠٧	٠.٠١	٠.٠٣	١.٠٢٣	٠.٧٥	٠.٠٩	٠.٣٨	٠.٢٨	٠.٠٠	٠.٠٣	Al
---	---	٠.٠٢	١.٠٠	٠.٠٠	---	---	٣.٤٥	---	٠.٠٢	٦.٣٧	٠.٠٣	---	٠.٠٠	٠.٠٠	Brass
٠.٠٠	٠.٠٠	---	---	---	٠.٠٠	---	---	---	٠.٠٠	---	---	٠.٠٠	---	٠.٠٩	Fe

ولقد كان الهدف الرئيس من هذه التجارب هو دراسة تأثير الظروف التشغيلية من ضغط (Pressure) وتيار (Current) وفولتية (Voltage) وغيرها على نعومة السطح المنتج وعلى مدى انعكاسية شكل عدة القطع (C.T.) المطلوب داخل اسطوانة قطب الانود (المشغولة) ، وبالتجربة المستمرة تم التوصل الى تصميم التجارب والذي يتم توضيحه في الفصل اللاحق .

٤-١: التجارب الخاصة بمعادن الألمنيوم

لقد تم اجراء عدد من التجارب باستخدام معدن الألمنيوم (Al) ذو التركيب الكيماوي الموضح بجدول ومن هذه التجارب :

٤-١-١: تأثير كثافة التيار على معدل الازالة

أجريت هذه التجارب بتسليط تيارات مختلفة ولنفس الفترة الزمنية على معدن الألمنيوم ، وبحساب الفرق بالاوزان عند التيارات المختلفة لعينات الألمنيوم ، تم التوصل الى العلاقة بين معدل الازالة الوزني والتيار المسلط ، في هذه التجربة تم استخدام العدة (C.T.(١)) وهي تعطي اشارة لمعدل الازالة باستخدام العدة (C.T.(٢)) وذلك لأنه تم استخدام نفس المعدن . وكانت النتائج العملية كالاتي :

جدول (٤-١)

المعدن	وزن النموذج قبل التشغيل (g) (w ₁)	وزن النموذج بعد التشغيل (g) (w ₂)	الفرق بالوزن Δw = w ₁ - w ₂	التيار المطبق (I) (A)	معدل الازالة الوزني Δw/t g/min	وقت التشغيل min	معدل الازالة الوزني g/sec.
Al	١٤.٤٢٦	١٣.٩٧٩	٠.٤٤٧	٢٠	٠.٢٢٣٥	٢	٣.٧٢٥ * ١٠ ^{-٣}
	١٣.٩٧٩	١٣.١٤٩	٠.٨٣	٤٠	٠.٤١٥	٢	٦.٩١٦٦ * ١٠ ^{-٣}
	١٣.١٤٩	١٢.٠٨٩	١.٠٦	٦٠	٠.٥٣	٢	٨.٨٣٣٣ * ١٠ ^{-٣}
	١٢.٠٨٩	١٠.٥١٧	١.٥٧٢	٨٠	٠.٧٨٦	٢	١٣.١ * ١٠ ^{-٣}
	١٠.٥١٧	٨.٦٥٦	١.٨٦١	١٠٠	٠.٩٣٠٥	٢	١٥.٥٠٨٣ * ١٠ ^{-٣}

وبعد الحصول على النتائج العملية ، لابد من مقارنتها مع النتائج النظرية والتي يتم حسابها كالاتي :

لقد تم حساب معدل الازالة الوزني بالاعتماد على معادلة رقم (٢-٣)

$$\frac{mass}{time} = \frac{I * 1}{F * \sum \left(\frac{X_i Z_i}{A_i} \right)} \Rightarrow \frac{W}{t} = \frac{I * 1}{F * \sum \left(\frac{X_1 Z_1}{A_1} + \frac{X_2 Z_2}{A_2} + \dots + \frac{X_n Z_n}{A_n} \right)} \text{ g/sec.}$$

M* => معادلة (٤-١)

ولقد استخدمت هذه المعادلة لأن معدن الألمنيوم (Al) يتألف من أكثر من عنصر ، ولقد تم ترتيب عناصر المعادلة على شكل جدول .

جدول (٤-٢)

Mn %	Pb %	Ni %	Cr %	Ti %	Zn %	Mg %	Cu %	Fe %	Si %	Sn %	Al %	عناصر المعادلة النسبية المنوية للعنصر (X)
٠.٧٥ ٦	٠.٠٠ ٦	٠.٠٠ ٨	٠.٠٧ ٥	٠.٠١ ٤	٠.٠٣ ١	١.٢٣	٤.٠٩	٠.٣٨ ٦	٠.٢٨	٠.٠٠ ٥	٩٣.١	النسبة المنوية للعنصر (X)
٥٤.٩ ٤	٢٠.٧ ١٩	٥٨.٧ ١	٥١.٩ ٩	٤٧.٩	٥٤.٩ ٤	٢٤.٢ ٣	٦٣.٥ ٧	٥٥.٨ ٥	٢٨.٠ ٩	١١٨. ٦٩	٢٦.٩ ٧	الوزن الذري (A)
٢	٢	٢	٢	٣	٢	٢	١	٢	٤	٢	٣	عدد التكافؤ (Z)

وبتعويض المعادلة

$$M^* = \frac{w}{t} = \frac{20 * (A)}{96500} * \left[\frac{1}{\sum \frac{93.1/100 * 3}{26.97} + \frac{0.005/100 * 2}{118.69} + \frac{0.28/100 * 4}{28.09}} \right]$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{0.386/100 * 2}{55.85} + \frac{4.09/100 * 1}{63.57} + \frac{1.23/100 * 2}{24.32} + \frac{0.031/100 * 2}{54.94} \\
 & + \frac{0.014/100 * 3}{47.9} + \frac{0.075/100 * 2}{51.99} + \frac{0.008/100 * 2}{58.71} + \frac{0.006/100 * 2}{207.19} \\
 & + \frac{0.756/100 * 2}{54.94} \\
 \Rightarrow \frac{w}{t} = \frac{20}{96500} \left[\frac{1}{0.1060791} \right] = \frac{20}{10236.633} = 1.9537 * 10^{-3} \text{ g/sec}
 \end{aligned}$$

$$K = 9.42693 = \frac{1}{\sum \frac{x_i Z_i}{A_i}} \quad \text{وبذلك يكون فيه المقدار}$$

وتكون المعادلة بهذه الصيغة $\frac{w}{t} = \frac{I}{F} * K$ ولكل القيم .
وبذلك أحصيت النتائج النظرية كالآتي :

جدول (٤,٣)

المعدن	التيار (I) (A)	معدل الازالة الوزني النظري $(M^* = \frac{w}{t})$ g/sec.	M^* (g/min.)
Al	٢٠	$1.9537 * 10^{-3}$	٠.٢٣٤٤
	٤٠	$3.9075 * 10^{-3}$	٠.٤٦٨٩
	٦٠	$5.8613 * 10^{-3}$	٠.٧٦٣٣٢
	٨٠	$7.815 * 10^{-3}$	٠.٩٣٧٨
	١٠٠	$9.7688 * 10^{-3}$	١.١٧٢٢٥

ولمعرفة مدى كفاءة الازالة المعدنية ، يتم حساب ما يسمى بكفاءة التيار (Current Efficiency) والتي يمكن تعريفها بانها حاصل قسمة معدل الازالة الوزني الفعلي على معدل الازالة الوزني النظري .

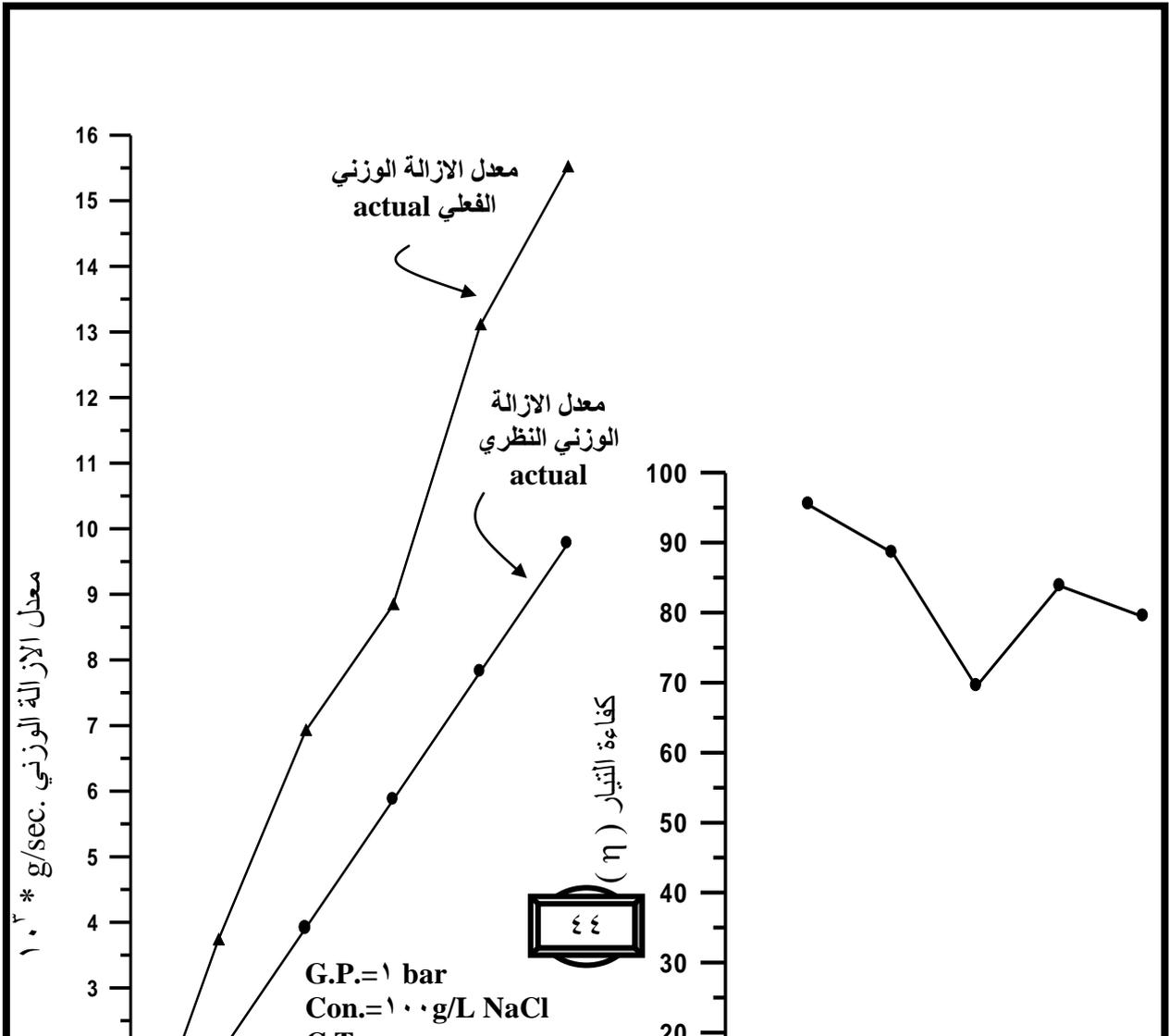
$$\text{كفاءة التيار } (\eta) = \frac{\text{معدل الازالة الوزني الفعلي g/min.}}{\text{معدل الازالة الوزني النظري g/min.}} = \frac{M^*(\text{actual})}{M^*(\text{theoretical})} \dots (٤-١)$$

ومن خلال العلاقة بين كفاءة التيار (η) والتيار المسلط يكون هناك مؤشر عن كفاءة الازالة المعدنية . وبذلك كانت قيم كفاءة التيار كالآتي :

جدول (٤-٤)

المعدن	التيار المسلط	كفاءة التيار (η)
Al	٢٠	٩٥.٣٤٩

٨٨.٥٠٥	٤٠	
٦٩.٤٣٣	٦٠	
٨٣.٨١٣	٨٠	
٧٩.٣٧٧	١٠٠	



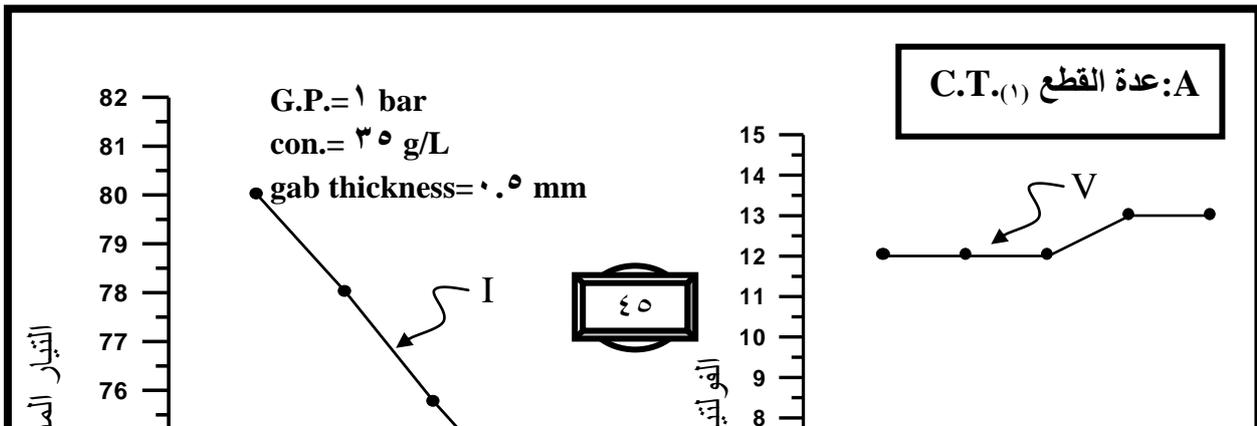
شكل (٤-١) : A: يوضح تغير معدل الازالة مع التيار المسلط
B: يوضح تغير كفاءة التيار مع التيار المسلط

٤-١-٢: تغير الفولتية والتيار مع زمن التشغيل

ان من متطلبات عملية (ECM) ، ثبوت كل من التيار والفولتية اثناء التشغيل [٤] ، وخاصة عند استخدام معدل تغذية ثابت . أما في هذه المنظومة فقد لوحظ حدوث تغيرات في الفولتية والتيار اثناء التشغيل بمرور الزمن ، ولقد تم تثبيت هذه النتائج من خلال مراقبة الفولتميتر والامميتر اثناء التشغيل .

جدول (٤-٥) : نتائج تغير الفولتية والتيار

المعدن	نوع العدة	معدل التيار (A)	معدل الفولتية (V)	زمن التشغيل (min.)	المعدن	نوع العدة	معدل التيار (A)	معدل الفولتية (V)	زمن التشغيل (min.)
Al	C.T.(١)	٨٠	١٢	١	Al	C.T.(٢)	٢٨.٥	١٥.٥	١
		٧٨	١٢	٢			٢٤.٥	١٦	٢
		٧٥.٧٥	١٢	٣			٢٠.٥	١٦.٥	٣
		٧٣.٧٥	١٣	٤			١٩	١٧	٤
		٧١.٢٥	١٣	٥			١٨	١٧	٥
							١٧.٥	١٧	٦
							١٧.٥	١٧	٧
							١٦.٥	١٧	٨



شكل (٤-٢) : A : تغير التيار مع زمن التشغيل باستخدام C.T._(١)

B: تغير الفولتية مع زمن التشغيل باستخدام C.T._(١)

C: تغير الفولتية والتيار مع زمن التشغيل باستخدام C.T._(٢)

٣-١-٤: تأثير الزمن على تغير القطر الداخلي لاسطوانة الانود وتغير سمك الفجوة (gab)

(thickness) اثناء التشغيل

يتغير القطر الداخلي لاسطوانة الانود (المشغولة) عند استخدام العدة C.T._(١) وكذلك يتغير عمق الشكل المراد عكسه داخل اسطوانة الانود (المشغولة) عند استخدام العدة C.T._(٢) بمرور زمن التشغيل وكنتيجة لهذا التغير يتغير سمك الفجوة (gab) . ولقد تم قياس هذا التغير بواسطة آلة القياس الخاصة بقياس الاقطار والاعماق ، هذا من الجانب العملي وكانت نتائج القياسات كالآتي :

جدول (٤-٦) : النتائج العملية لتغير القطر الداخلي وسمك الفجوة

المعدن	نوع العدة	زمن التشغيل min.	التيار (A)	الفولتية (V)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	سمك الفجوة (mm)	نوع العدة	زمن التشغيل min.	معدل التيار (A)	الفولتية (V)	سمك الفجوة (mm)	عمق القطع (mm)
Al	C.T. _(١)	١	٤٣	٦	١٤,٦٥٥	١٤,٦٥٥	٠,٥٧٧٥	C.T. _(١)	٢	٣٠	١٦	٠,٦٢	٠,١٢
		٢	=	=	١٤,٧٧٥	١٤,٨٦٥	٠,٦٣٢٥		٣	٣٠	١٦	٠,٦٥	٠,١٥
		٣	=	=	١٤,٨٢٥٦	١٤,٩٠٠٠	٠,٧		٤	٢٤,٥	١٦,٥	٠,٧	٠,٢
		٤	=	=	١٤,٧٧٥	١٥,١٢٢٥	٠,٨١٢٥		٦	٢٢,٧٥	١٦,٥	٠,٩	٠,٤
		٥	=	=	=	=	=		٨	٢٣	١٦,٥	١,١	٠,٦

أما من الجانب النظري ، فقد تم حساب التغير بالاقطار الداخلية وسمك الفجوة وبالاعتماد على معادلات فاراداي .

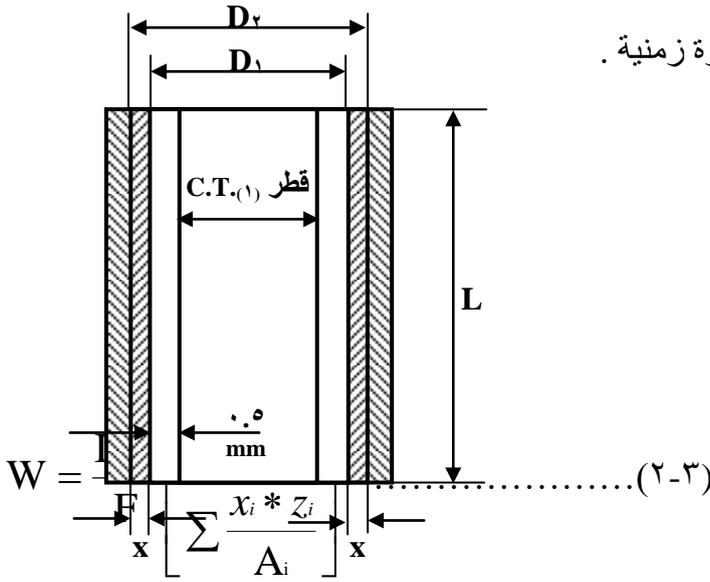
باستخدام معادلة (٢-١)

$$W = \frac{A * I * t}{Z * F} \Rightarrow \frac{W}{t} = \frac{A * I}{Z * F} = M'$$

ولكلا عدتي القطع .

١. عدة القطع C.T._(١)

نفرض بان الجزء المزال من المشغولة على شكل اسطوانة مجوفة وكما في هذا الشكل



D_1 : القطر الداخلي للجزء المزال .
 D_2 : القطر الخارجي للجزء المزال عند أي فترة زمنية .
 x : سمك الجزء المزال عند أي فترة زمنية .
 L : طول الاسطوانة .

وبما ان الكثافة (ρ) = $\frac{\text{الكتلة (m)}}{\text{الحجم (V)}}$ (٤-٢)

حجم المعدن المزال على شكل اسطوانة = المساحة * سمك الاسطوانة

$V = x * \pi * D_1 * L$ (٤-٣)

(m) الكتلة = $\rho * V$

= $\rho * L * D_1 * \pi * x$ (٤-٤)

(ρ) : كثافة الالمنيوم = 2.7 g/cm^3

بتعويض معادلة (٤) في (١)

$$\rho * L * D_1 * \pi * x = \frac{I * t}{F} \left[\frac{1}{\sum \frac{x_i z_i}{A_i}} \right]$$

وبفرض هذا المقدار $K = \left[\frac{1}{\sum \frac{x_i z_i}{A_i}} \right]$ $9.42693 = K$ لمعدن (Al)

$\therefore \rho * L * D_1 * \pi * x = \frac{I * t}{K * F} \Rightarrow \frac{x}{t} = \frac{I * K}{\rho * L * F * \pi * D_1}$ (٤-٥)

وبذلك تم استنتاج معادلة (٤-٦) والتي من خلالها يتم حساب سمك الطبقة المزالة عند أي فترة زمنية .
 وبما ان

$2x = D_2 - D_1$ (٤-٦)

ومن خلال معادلة (٦) يتم حساب (D_2) عند أي فترة زمنية .
 وبتطبيق عناصر المعادلة (٤-٤) تصبح المعادلة :

$$\frac{x}{t} = I * 0.0000226 \left(\frac{\text{mm}}{\text{sec.}} \right)$$

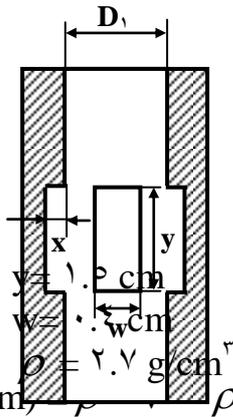
وكانت النتائج النظرية لقيم سمك الفجوة و D_1 كالآتي :

جدول (٤-٧) : النتائج النظرية

D_1	سمك الفجوة (٠.٥+x) (mm)	الفولتية	التيار	زمن التشغيل	المعدن
١٤.٦١٧٠	٠.٥٥٨٥	٦	٤٣	١	Al
١٤.٧٣٤١	٠.٦١٧٠	=	=	٢	
١٤.٨٥١٢	٠.٦٧٥٦	=	=	٣	
١٤.٩٦٨٣	٠.٧٣٤١	=	=	٤	
١٥.٠٨٥٤	٠.٧٩٢٧	=	=	٥	

٢. عدة القطع (C.T.(٢))

لحساب سمك الفجوة باستخدام عدة قطع (C.T.(٢)) ، تم فرض الجزء المزال من المشغولة على شكل أسنان الترس المستقيمة ، والتي تُعكس داخل المشغولة على شكل خمسة مستطيلات بطول (y) وعرض (w) وسمك (x) مع اهمال الأجزاء المعزولة وكما في الشكل .



D_1 : قطر المشغولة الداخلي .

y : طول الجزء المزال .

w : عرض الجزء المزال .

x : سمك الجزء المزال لأي فترة زمنية .

وباستخدام المعادلات (٤-١) و (٤-٢)

وبما ان حجم المعدن المزال = المساحة * سمك المعدن المزال

$$x * w * y =$$

وباستخدام معادلة (٤-٤) نحصل على

$$\rho * y * w * x * 5 \text{ (أسنان) } = \rho * y * w * x * 5 \text{ (الكتلة)}$$

وبالتعويض بمعادلة (٤-١) نحصل على :

$$\rho * y * w * x * 5 = \frac{I * t}{F} * K$$

$$\Rightarrow \frac{x}{t} = \frac{K * I}{\rho * y * w * F * 5} \dots\dots\dots(٤-٧)$$

من معادلة (٤-٧) نحسب قيمة (x) لأي فترة زمنية ، وبالتعويض عناصر المعادلة تصبح :

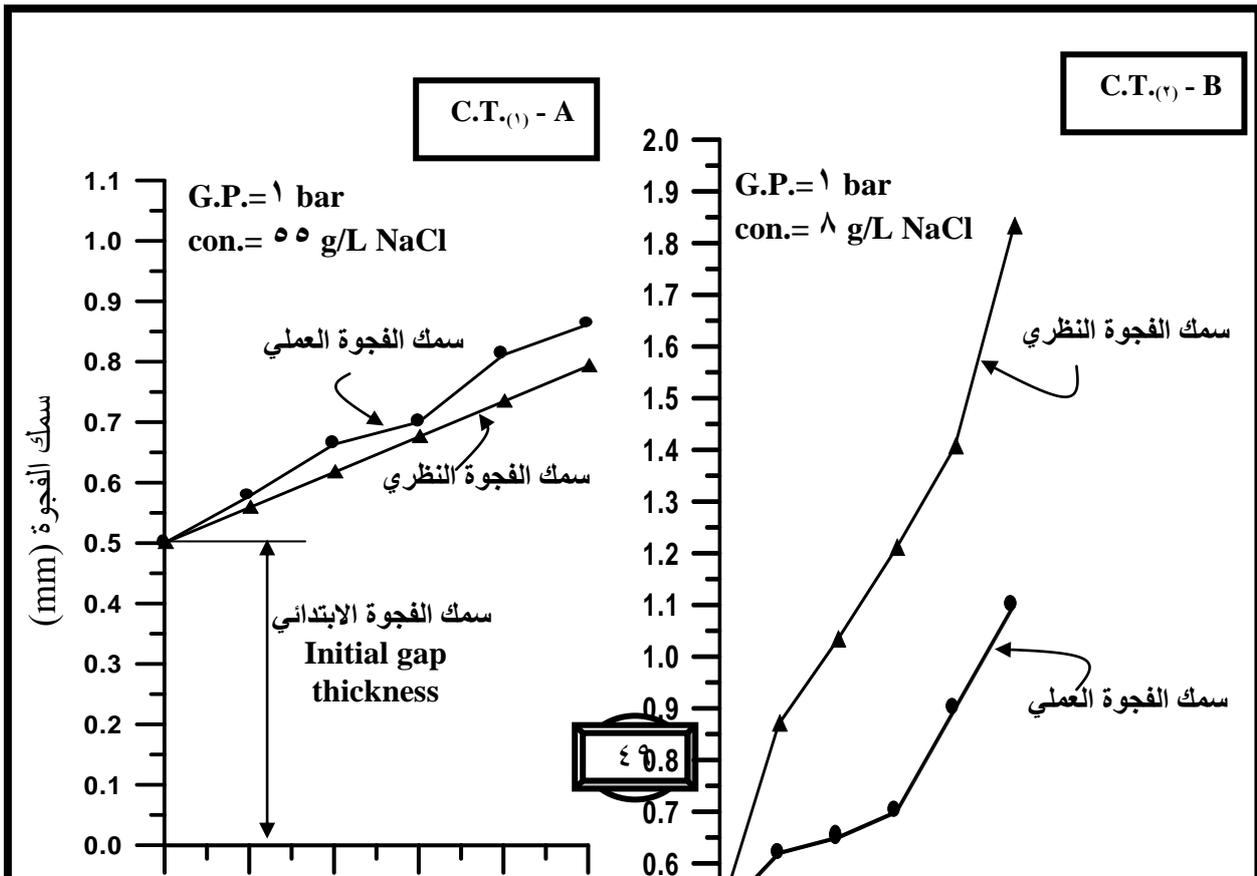
$$\frac{x}{t} = I * 0.0001206 \left(\frac{\text{mm}}{\text{sec.}} \right)$$

جدول (٤-٨) : النتائج النظرية لسمك الفجوة باستخدام (C.T.(٢))

سمك الفجوة (٠.٥ + x) (mm)	عمق القطع (x) (mm)	معدل الفولتية (V)	معدل التيار (A)	زمن التشغيل	المعدن
٠.٨٦٩٠	٠.٣٦٩٠	١٦.٥	٢٥.٥	١٢٠	

١.٠٣١٨	٠.٥٣١٨	١٦.٥	٢٤.٥	١٨٠	
١.٢٠٩١	٠.٧٠٩١	١٦	٢٤.٥	٢٤٠	
١.٤٠٥٤	٠.٩٠٥٤	١٦.٥	٢٢.٧٥	٣٣٠	
١.٨٣١٤	١.٣٣١٤	١٦.٥	٢٣	٤٨٠	

اضافة الى ذلك ، ان محاولة عكس الترس ذو الاسنان المستقيمة باستخدام العدة (C.T._(٧)) بدون استخدام مادة عازلة تكون غير ناجحة ولقد تم اجراء تجارب بدون استخدام مادة عازلة ولم يتم الحصول على المعكوس ، ولكن بعد استخدام مادة الايبوكسي العازلة يعزل الماطق غير المرغوب ازلتها ، حيث تم عزل المناطق ما بين الاسنان وتم الحصول على معكوس الشكل المطلوب داخل اسطوانة قطب الانود والذي يكون على شكل خمسة اسنان مستطيلة .



شكل (٣-٤) A: يوضح تغير سمك الفجوة العملي والنظري مع زمن التشغيل باستخدام C.T._(١)
 B: يوضح تغير سمك الفجوة العملي والنظري مع زمن التشغيل باستخدام C.T._(٢)

٤-١-٤: تأثير الزمن على نعومة السطح المنتج

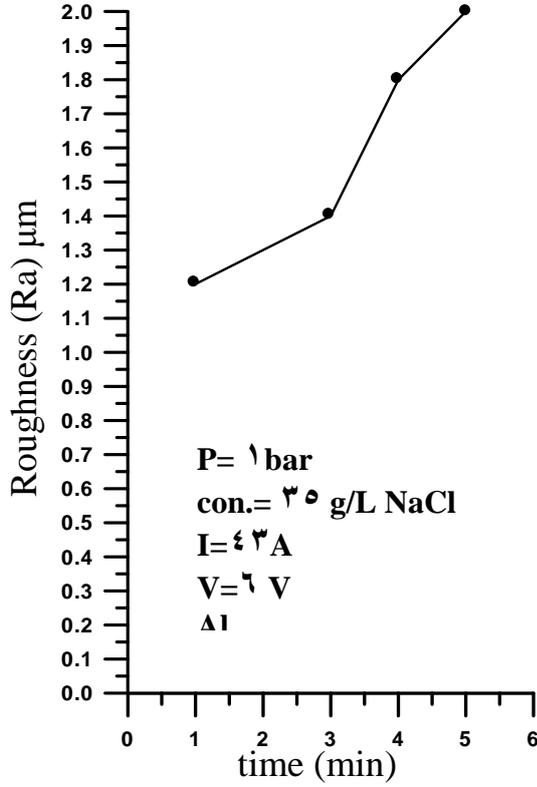
أُجريت هذه التجارب باستخدام تراكيز مختلفة ولكلا عدتي القطع وكان المحلول المستخدم (NaCl)، وكانت النتائج كالاتي:

A. النتائج الخاصة بعدة القطع (C.T._(١)) ويمثلها جدول (٩-٤)

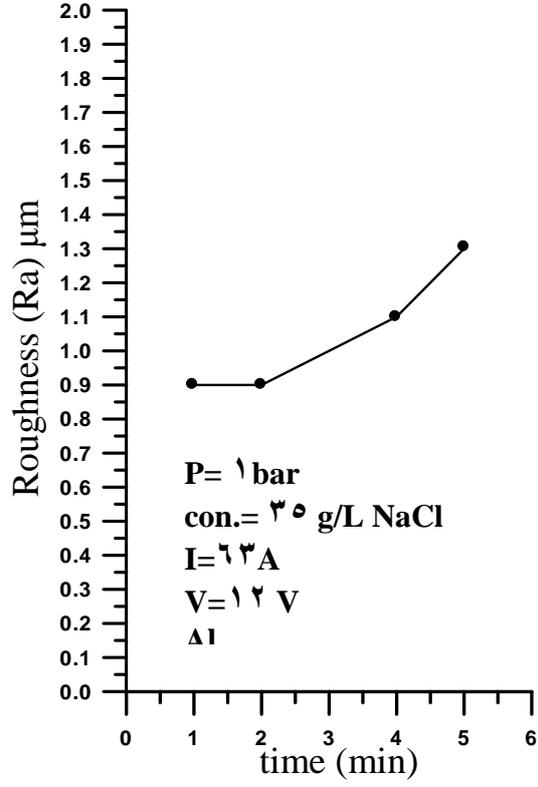
رقم النموذج No.	زمن التشغيل (sec.)	التيار المسلط (A)	الفولتية (V)	معدل الجريان (m ³ / hr.)	خشونة السطح (μm) (Ra)
١	٦٠	٤٣	٦	٢٠	١.٢
٢	١٢٠	=	=	=	١.٦
٣	١٨٠	=	=	=	١.٤
٤	٢٤٠	=	=	=	١.٨
٥	٣٠٠	=	=	=	٢
٦	٦٠	٦٣	=	=	٠.٩
٧	١٢٠	=	=	=	٠.٩
٨	١٨٠	=	=	=	١.١
٩	٢٤٠	=	=	=	١.١
١٠	٣٠٠	=	=	=	١.٣
١١	٦٠	٨٣	١٢	٢١	٠.٩
١٢	١٢٠	=	=	٢١.٥	١
١٣	١٨٠	=	=	٢٢.١	١
١٤	٢٤٠	=	=	٢٢.٣	١.١
١٥	٣٠٠	=	=	٢٢.٥	١.٣

الظروف التشغيلية:

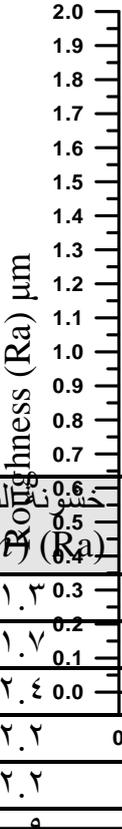
Gauge pressure (G.P) = ١ bar الضغط المستخدم
 con. = ٣٥ g/L NaCl التركيز
 gab width = ٠.٥ mm سمك الفجوة



(A)



(B)



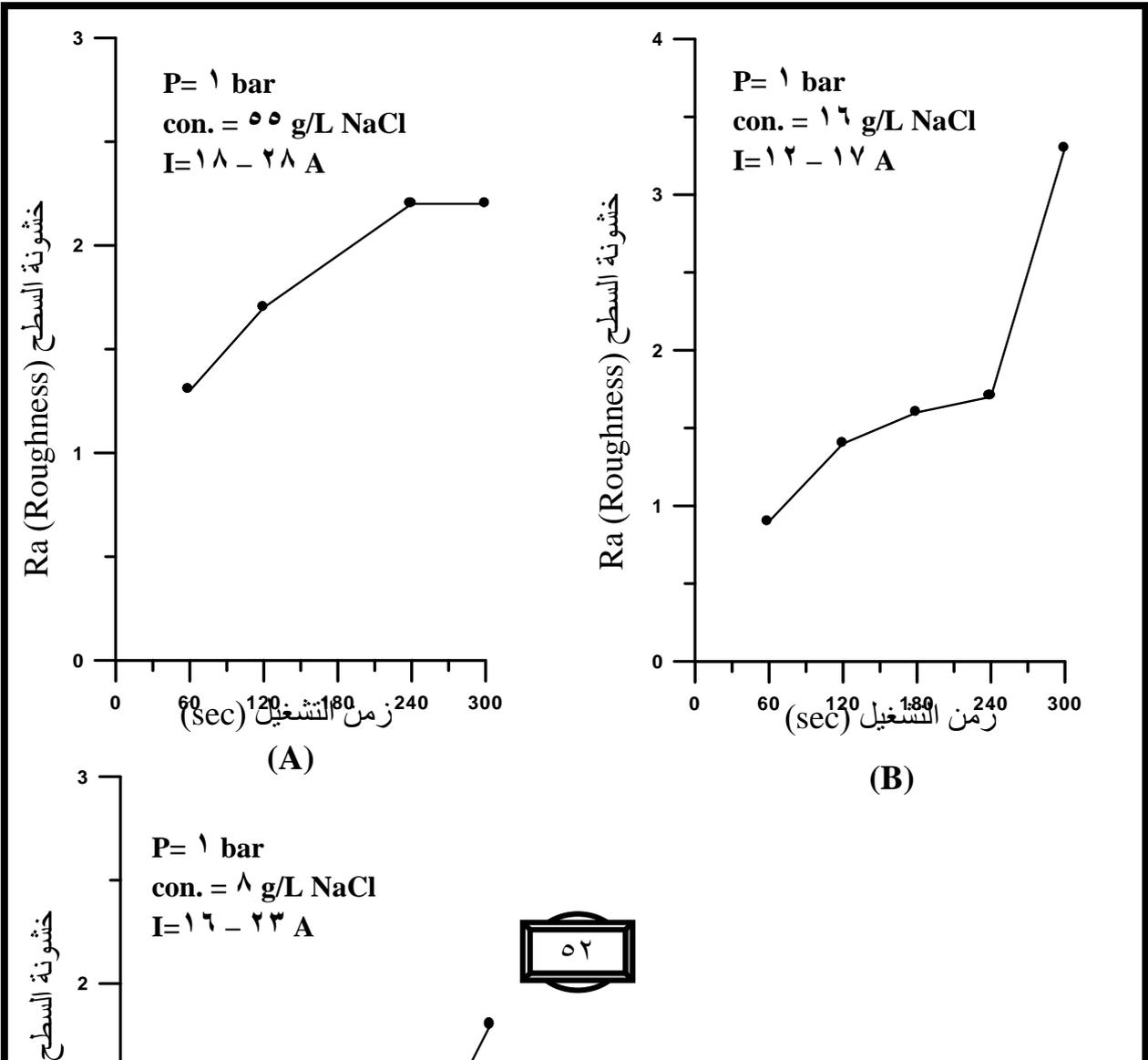
شكل (٤-٤) : A ، B ، C توضح تغير النعومة للسطح المنتج باستخدام (١) C.T. ولتيارات وتراكيز مختلفة

B. النتائج الخاصة بعدة القطع (٢) C.T. ويمثلها جدول (٤-١٠)

رقم النموذج No.	زمن التشغيل (sec.)	التيار المسلط (A)	الفولتية (V)	معدل معدل NaCl (g/L) / (m ³ / hr.)	تيار I (A)	con. = 30 g/L NaCl
١	٦٠	٢٨	١٦.٥	١٦	٤٣	٣٠
٢	١٢٠	٢٥.٥	=	١٧.٥-١٩.٢	٤٣	٣٠
٣	١٨٠	٢٣.٥	=	١٧.٦-١٩.٣	٤٣	٣٠
٤	٢٤٠	٢٣	=	١٧.٥-١٩.٨٦	٤٣	٣٠
٥	٣٠٠	٢٣	=	١٧.٥-٢٠	٤٣	٣٠
٦	٦٠	١٧	٨	١٧.٢	٤٣	٣٠
٧	١٢٠	١٥.٥	=	١٧.٦-١٨	٤٣	٣٠

١.٦		١٧-١٧.٨	=	١٥	١٨٠	٨
١.٧		١٧.٢-١٨.٢	=	١٥	٢٤٠	٩
٣.٣		١٥.٥-١٧.٨	=	١٤.٥	٣٠٠	١٠
٠.٩		٨ g/L NaCl	١٩	١٧	٢٢	٦٠
٠.٩	١٩-١٩.٣		=	٢١.٥	١٢٠	١٢
٠.٩	١٨.٥-١٩.٥		=	٢٠.٥	١٨٠	١٣
١.١	١٩-١٩.٨		=	٢٠	٢٤٠	١٤
١.٨	١٨.٦-١٩.٤		=	١٩.٥	٣٠٠	١٥

Gauge pressure (G.P) = ١ bar الضغط المستخدم
gab width = ٠.٥ mm سمك الفجوة



شكل (٤-٥) : تغير النعومة باستخدام C.T._(٢)

٤-١-٥: تأثير الضغط ومعدل الجريان على خشونة السطح

تم استخدام ضغوط مختلفة ومعدلات جريان مختلفة وبثبوت كل من التيار والفولتية وزمن التشغيل ، وذلك لمعرفة تأثيرها على خشونة السطح المنتج (Roughness) وكانت النتائج كالاتي :

A. النتائج الخاصة بعدة القطع (C.T._(١)) ويمثلها جدول (٤-١١)

رقم النموذج No.	زمن التشغيل (sec.)	التيار المسلط (A)	معدل الجريان (m ³ / hr.)	الضغط المسلط (bar) (G.P)	خشونة السطح (μm) (Ra)
١	٦٠	٨٠	١٦	٠.٤	١.٤
٢	=	=	١٨	٠.٦	١.١
٣	=	=	٢٠	٠.٨	١.٠١
٤	=	=	٢٢	٠.٩	١.٤
٥	=	=	٢٤	١.٢	١

B. النتائج الخاصة بعدة القطع (C.T._(٢)) ويمثلها جدول (٤-١٢)

رقم النموذج No.	زمن التشغيل (sec.)	التيار المسلط (A)	معدل الجريان (m ³ / hr.)	الضغط المسلط (bar) (G.P)	خشونة السطح (μm) (Ra)
١	٦٠	٢٠	١٢.٥	٠.٤	١.٤
٢	=	=	١٤.٥	٠.٦	١.٣
٣	=	=	١٦.٥	٠.٨	١.٦
٤	=	=	١٨	١.٠	١.٣
٥	=	=	٢٠	١.٢	١.١

النموذج الأول C.T._(١)

I=٨٠A
time = ٢ min
con.= ١٠٠ g/L NaCl
gap=٠.٧٥ mm



I=٨٠A
time = ٢ min
con.= ١٠٠ g/L NaCl
gap=٠.٧٥ mm

شكل (٤-٧) : تأثير الضغط ومعدل الجريان على النعومة

٤-٢: التجارب الخاصة بمعدن البراص (Brass)

لقد تم اجراء نفس التجارب على معدن البراص وبنفس الاسلوب المتبع على معدن الالمنيوم وهي كالآتي:

٤-٢-١: تأثير كثافة التيار على معدل الازالة

بعد ان تم اجراء هذه التجارب بنفس الاسلوب المتبع على معدن الالمنيوم ، كانت النتائج العملية كالآتي ويمثلها جدول (٤-١٣)

جدول (٤-١٣) : النتائج العملية

المعدن	وزن النموذج قبل التشغيل (g) (w_1)	وزن النموذج بعد التشغيل (g) (w_2)	الفرق بالوزن $\Delta w = w_1 - w_2$	التيار المسط (A)	معدل الازالة الوزني (g/sec)	معدل الازالة الوزني (g/min)	زمن التشغيل
Brass	٤٧.٤٤٦	٤٦.٠٣٣	١.٤١٣	٢٠	$١٢.٧٧٥ * ١٠^{-٣}$	٠.٧٦٦٥	١٢٠
	٤٦.٠٣٣	٤٣.٥٤٢	٢.٤٩١	٤٠	$٢٠.٧٥٨ * ١٠^{-٣}$	١.٢٤٥٥	=
	٤٣.٥٤٢	٣٩.٩٥٢	٣.٥٩	٦٠	$٢٩.٩١٦ * ١٠^{-٣}$	١.٧٩٥	=
	٣٩.٥٤٢	٣٤.٩٦٨	٤.٩٤٨	٨٠	$٤١.٥٣٣ * ١٠^{-٣}$	٢.٤٩٢	=
	٣٤.٩٦٨	٢٩.٢٠١	٥.٧٦٧	١٠٠	$٤٨.٠٥٨ * ١٠^{-٣}$	٢.٨٨٣٥	=

أما النتائج النظرية فقد تم استخدام نفس المعادلة (٢-١) وتم ترتيب عناصر المعادلة على شكل جدول ، والتي من ضمنها التركيب الكيمياوي لمعدن البراص (Brass) .

جدول (٤-١٤) : معالم معادلة (٤-١)

Mn %	Pb %	Ni %	Cr %	Ti %	Zn %	Sb %	Cu%	Fe %	Si %	Sn %	Al %	العناصر
٠.٠٢	١.١٠	٠.٠٠٢	-	-	٣٤.٩	٠.٠٢٦	٦٣.٧٩٦	٠.١٣٠	-	٠.٠٠٥	٠.٠٢	النسبة المئوية (x)
٥٤.٩٤	٢٠٧.١٩	٥٨.٧١	-	-	٥٤.٩٤	٢٠٨.٩٨	٦٣.٥٧	٥٥.٨٥	-	١١٨.٦٩	٢٦.٩٦	الوزن الذري (A)
٢	٢	٢	-	-	٢	٣	١	٢	-	٢	٣	عدد التكافؤ (z)

وكانت النتائج النظرية كالاتي بعد ان تم حساب قيمة المقدار $\frac{1}{\sum \frac{x_i z_i}{A_i}}$ من معادلة (٤-١)

$$\frac{1}{\sum \frac{x_i z_i}{A_i}} = \frac{1}{0.0228704} = K = 43.7246$$

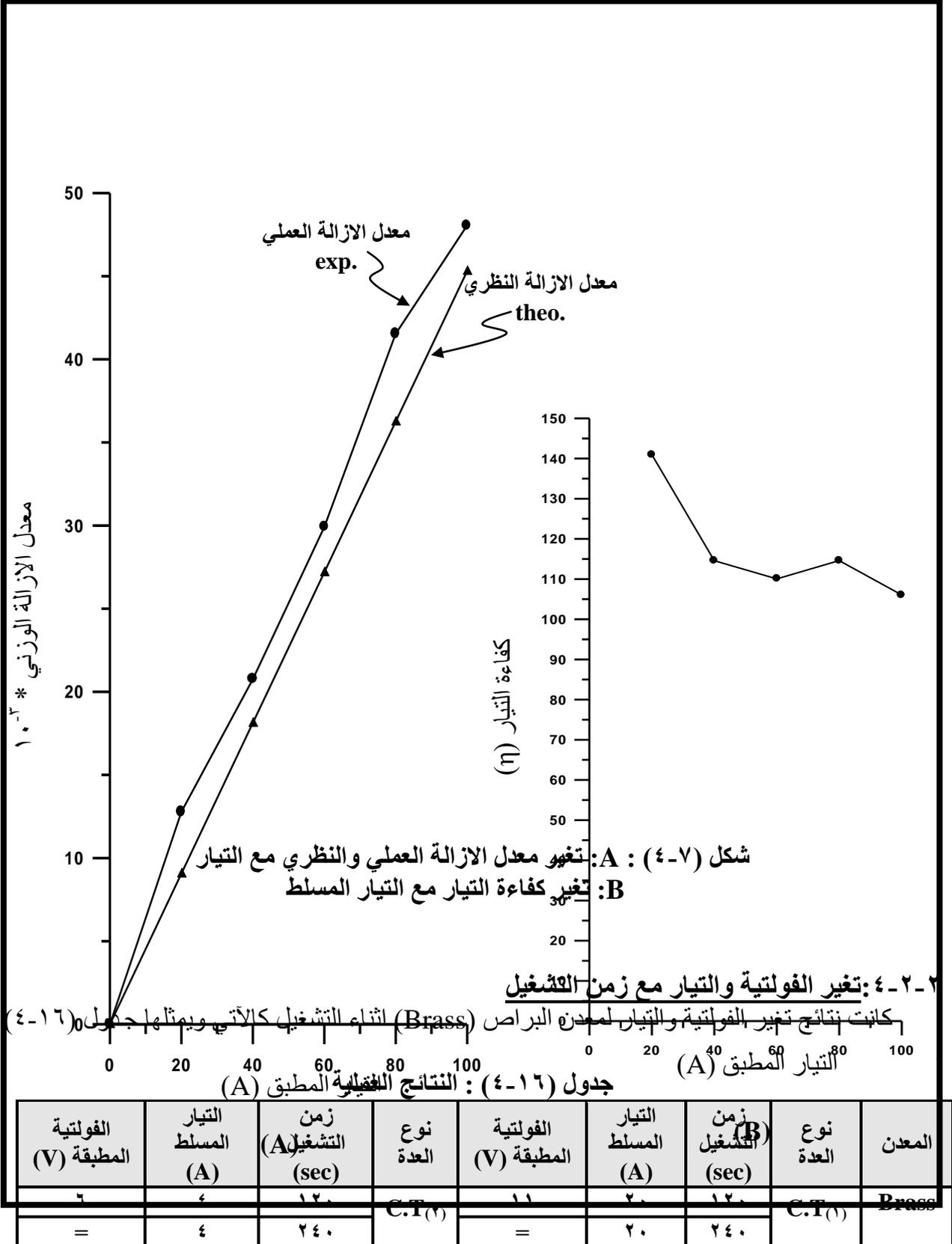
ولقد تم فرضه $K =$ للسهولة .

جدول (٤-١٥)

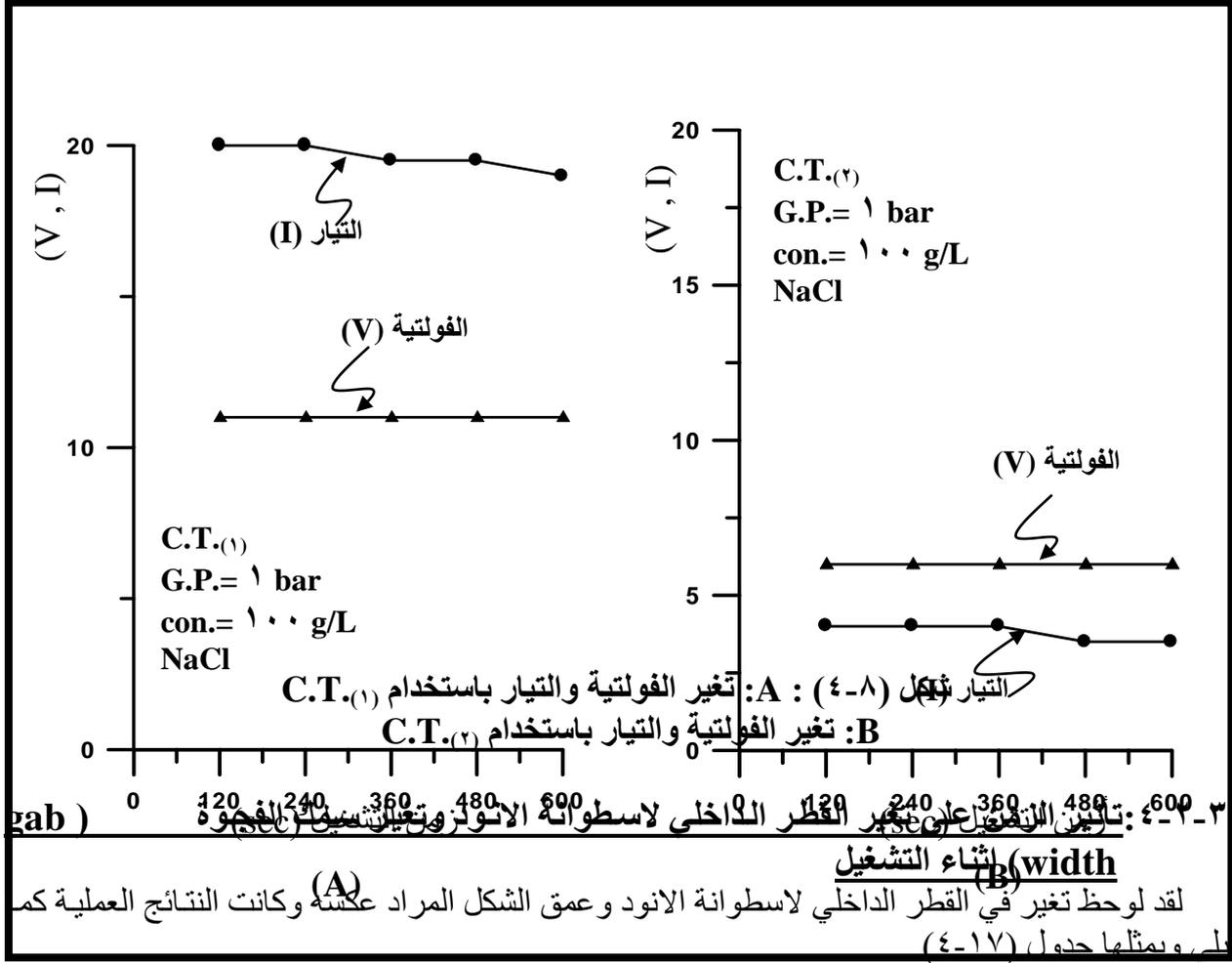
معدل الازالة الوزني النظري (g/min)	معدل الازالة الوزني النظري (g/sec)	التيار المسلط (A)	المعدن
٠.٥٤٣٧	$٩.٠٦٢ * ١٠^{-٣}$	٢٠	Brass
١.٠٨٧	$١٨.١٢٤ * ١٠^{-٣}$	٤٠	
١.٦٣١	$٢٧.١٨٦ * ١٠^{-٣}$	٦٠	
٢.١٧٤	$٣٦.٢٤٨ * ١٠^{-٣}$	٨٠	
٢.٧١٨	$٤٥.٣١٠ * ١٠^{-٣}$	١٠٠	

اضافة الى ذلك تم حساب كفاءة التيار وذلك بتطبيق معادلة (٤-١) وكانت قيم كفاءة التيار كالاتي :

كفاءة التيار (η)	التيار المسلط (A)	المعدن
١٤٠.٩٧	٢٠	Brass
١١٤.٥٨	٤٠	
١١٠.٠٥	٦٠	
١١٤.٦٢	٨٠	
١٠٦.٠٨	١٠٠	



=	٤	٣٦٠	=	١٩.٥	٣٦٠
=	٣.٥	٤٨٠	=	١٩.٥	٤٨٠
=	٣.٥	٦٠٠	=	١٩	٦٠٠



جدول (٤-١٧) : النتائج العملية

سمك الفجوة الابتدائي	عمق القطع (mm)	سمك الفجوة (mm)	الفولتية (V)	التيار (A)	زمن التشغيل sec.	نوع العدة	سمك الفجوة (mm)	d ₂ (mm)	d ₁ (mm)	الفولتية (V)	التيار (A)	زمن التشغيل sec.	نوع العدة	المعدن
٠.٧٥	٠.٠٤	٠.٧٩	٦	٤	١٢٠	C.T.(1)	٠.٨١٢٥	١٥.١٢٥	١٥.٠٦٢٥	١١	٢٠	١٢٠	C.T.(1)	Brass
=	٠.١	٠.٨٥	=	٤	٢٤٠		٠.٨٩٣٧٥	١٥.١٨٧٦	١٥.١٢٥	=	٢٠	٢٤٠		
=	٠.١٥	٠.٩	=	٤	٣٦٠		٠.٨٧٥	١٥.٢٥٠	١٥.١٨٧٦	=	١٩.٥	٣٦٠		
=	٠.٢٥	١	=	٣.٥	٤٨٠		٠.٩٦٨٧	١٥.٤٣٧٥	١٥.٢٥٥	=	١٩.٥	٤٨٠		
=	٠.٣١	١.٠٦	=	٣.٥	٦٠٠		١.٠٦٢٥	١٥.٦٢٥	١٥.٤٣٨٧	=	١٩	٦٠٠		

أما القيم النظرية فقد تم تطبيق معادلة (٤-٥) بالنسبة لعدة القطع C.T.(1) ومعادلة (٤-٧) لعدة القطع C.T.(2) وكانت النتائج كالاتي ويمثلها جدول (٤-١٨) .

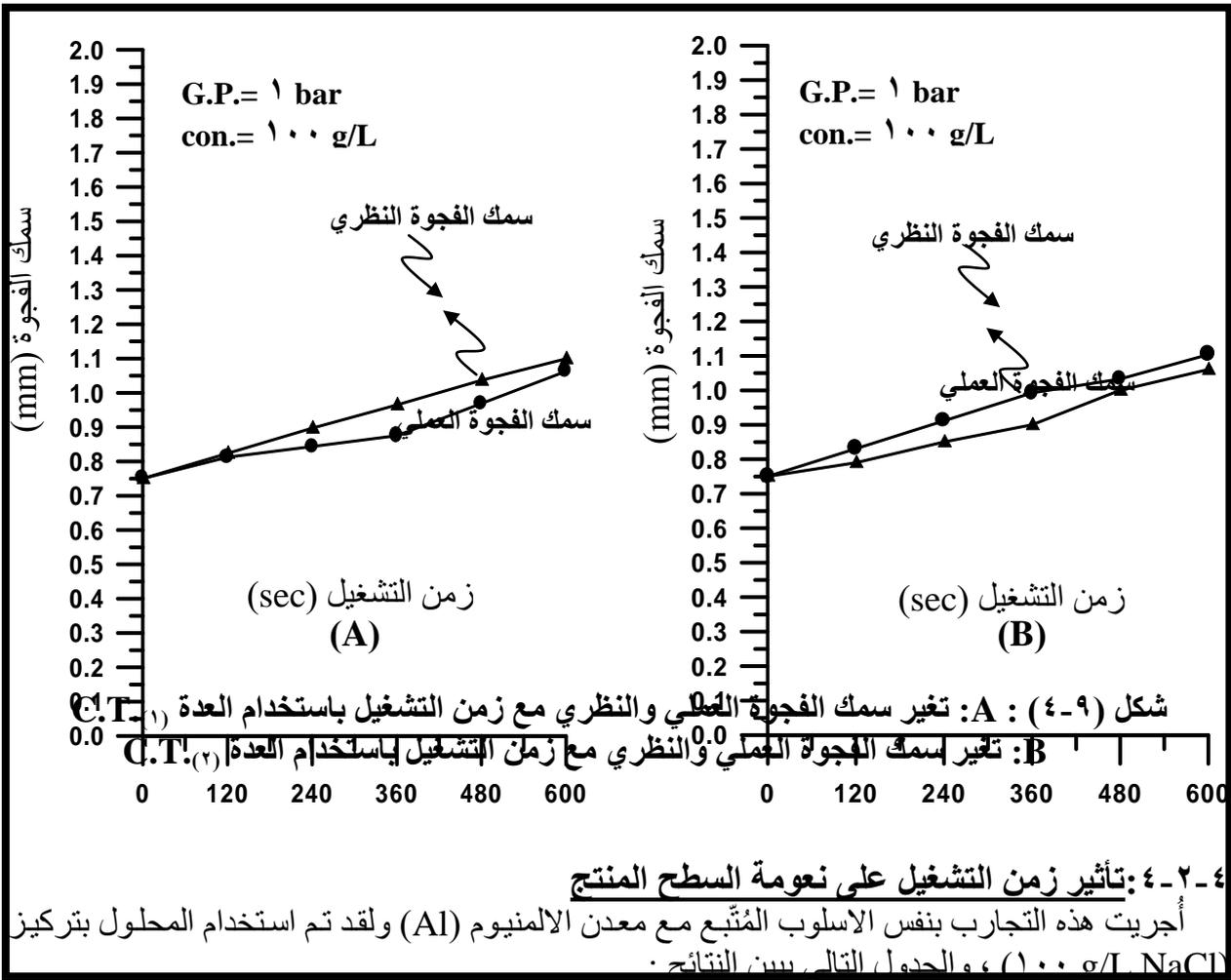
جدول (٤-١٨) : النتائج النظرية

سمك الفجوة (0.70 + X) (mm)	عمق القطع (mm)	الفولتية (V)	التيار (A)	زمن التشغيل sec.	نوع العدة	D.	سمك الفجوة (0.70 + X) (mm)	الفولتية (V)	التيار (A)	زمن التشغيل sec.	نوع العدة	المعدن
٠.٨٣٠٨	٠.٠٨٠٨	٦	٤	١٢٠	C.T.(1)	١٥.١٤٧٠	٠.٨٣٥	١١	٢٠	١٢٠	C.T.(1)	Brass
٠.٩١١٦	٠.١٦١٦	=	٤	٢٤٠		١٥.٢٤٤٠	٠.٨٩٧٠	=	٢٠	٢٤٠		
٠.٩٩٢٤	٠.٢٤٢٤	=	٤	٣٦٠		١٥.٤٢٩٩	٠.٩٦٤٩	=	١٩.٥	٣٦٠		
١.٠٧٣٢	٠.٣٢٣٢	=	٣.٥	٤٨٠		١٥.٥٧٢٣	١.٠٣٦٦	=	١٩.٥	٤٨٠		
١.١٥٤٠	٠.٤٠٤٠	=	٣.٥	٦٠٠		١٥.٦٩٨٢	١.٠٩٩١	=	١٩	٦٠٠		

حيث كانت كثافة البراص = 8.979 g/cm^3 وبتطبيق معاليم كلا المعادلتين تصبح كلاً منها :

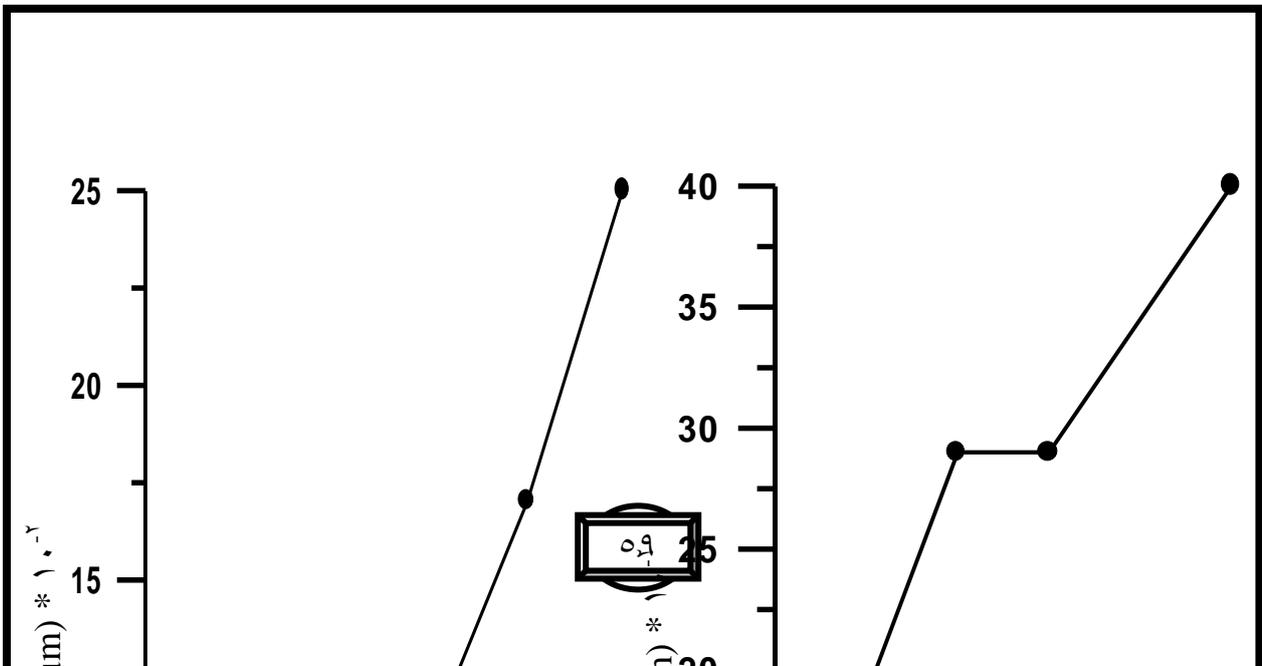
$$\frac{X}{t} = I * 0.0000306 \frac{\text{mm}}{\text{sec}} \dots\dots\dots(٤-٥)$$

$$\frac{X}{t} = I * 0.0001683 \frac{\text{mm}}{\text{sec}} \dots\dots\dots(٤-٧)$$



جدول (٤-١٩)

رقم النموذج	نوع العدة	زمن التشغيل (sec)	التيار المسلط (A)	الفولتية (V)	معدل الجريان f.R m ³ /hr.	خشونة السطح Ra (μm)
7'	C.T.(١)	١٢٠	٢٠	١١	٢٢	٠.٠٨
6'		٢٤٠	٢٠	=	٢٢	٠.٠٨
8'		٣٦٠	١٩.٥	=	٢٢-٢٢.٧	٠.١١
9'		٤٨٠	١٩.٥	=	٢٢-٢٢.٨	٠.١٧
10'		٦٠٠	١٩	=	٢٢-٢٢.٩	٠.٢٥
1"	C.T.(٧)	١٢٠	٤	٦	٢١.٥	٠.١٩
2"		٢٤٠	٤	=	=	٠.٢٩
3"		٣٦٠	٤	=	=	٠.٢٩
4"		٤٨٠	٣.٥	=	=	٠.٤
5"		٦٠٠	٣.٥	=	=	٠.٤



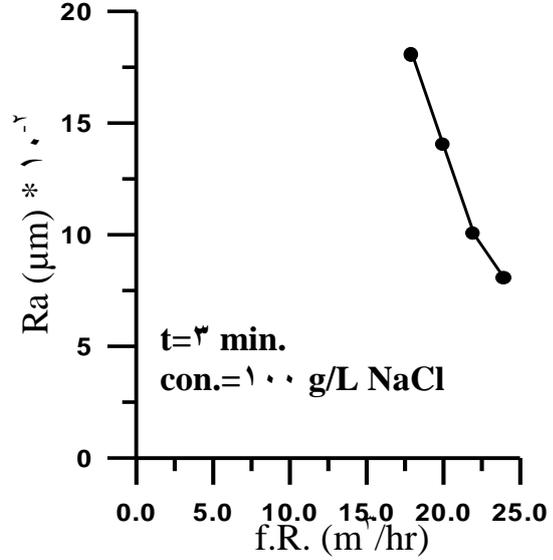
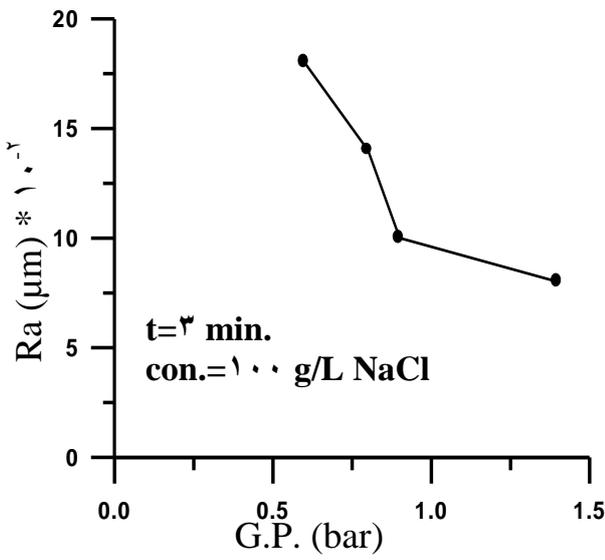
شكل (٤-١٠) : A : تغيير النعومة مع زمن التشغيل باستخدام C.T._(١)
 B : تغيير النعومة مع زمن التشغيل باستخدام C.T._(٢)

٤-٢-٥: تأثير الضغط ومعدل الجريان على نعومة السطح المنتج
 جدول (٤-٢٠) يوضح نتائج هذه التجارب

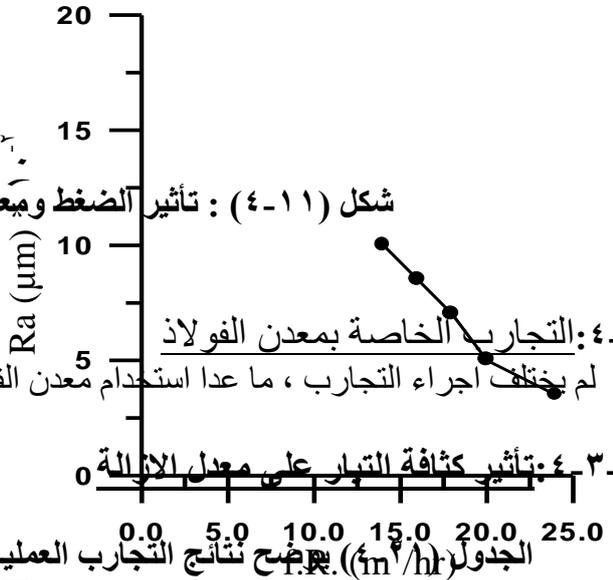
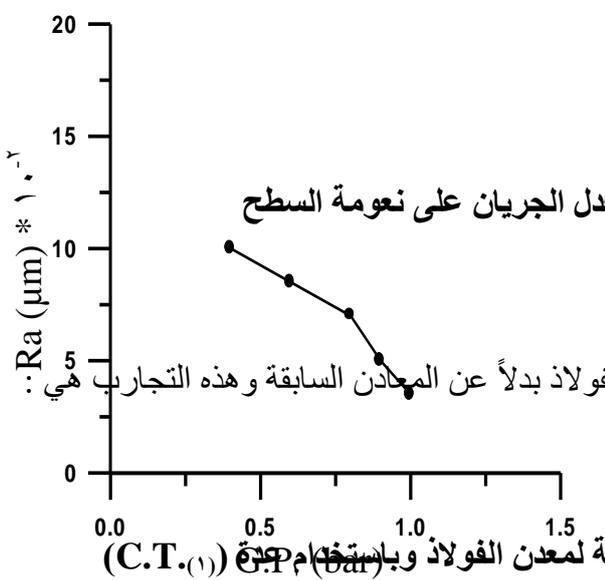
جدول (٤-٢٠)

رقم النموذج	نوع العدة	زمن التشغيل (sec)	التيار المسلط (A)	الفولتية (V)	معدل الجريان f.R m ^٢ /hr.	مقياس الضغط G.P (bar)	خشونة السطح Ra (μm)
1"	C.T. _(١)	١٨٠	٢٠	١١	١٦	٠.٤	٠.١٦
		=	٢٠	=	١٨	٠.٦	٠.١٨
		=	١٩.٥	=	٢٠	٠.٨	٠.١٤
		=	١٩.٥	=	٢٢	٠.٩	٠.١
		=	١٩	=	٢٤	١.٤	٠.٠٨
2"	C.T. _(٢)	١٨٠	٤	٦	١٤	٠.٤	١٠
		=	=	=	١٦	٠.٦	٨.٥
		=	=	=	١٨	٠.٨	٧
		=	=	=	٢٠	٠.٩	٥
		=	=	=	٢٤	١	٣.٥

النموذج الاول (C.T.(1))



النموذج الثاني (C.T.(2))



المعدن	وزن النموذج قبل التشغيل (g) (w ₁)	وزن النموذج بعد التشغيل (g) (w ₂)	الفرق بالوزن Δw = w ₁ - w ₂	التيار المسلط (A)	معدل الازالة الوزني (g/sec)	معدل الازالة الوزني (g/min)	زمن التشغيل
فولاذ	٤١.٣٨٦	٤٠.٤١١	٠.٩٧٥	٢٠	٨.١٢٥ * ١٠ ^{-٣}	٠.٤٨٧٥	١٢٠
	٤٠.٤١١	٣٨.٧٧٢	١.٦٣٩	٤٠	١٣.٦٥٨ * ١٠ ^{-٣}	٠.٨١٩٥	=
	٣٨.٧٧٢	٣٦.٥١٩	٢.٢٥٣	٦٠	١٨.٧٧٥ * ١٠ ^{-٣}	١.١٢٦٥	=
	٣٦.٥١٩	٣٣.٧٨٤	٢.٧٣٥	٨٠	٢٢.٧٩١ * ١٠ ^{-٣}	١.٣٦٧٥	=
	٣٣.٧٨٤	٣٠.٤٦٤	٣.٣٢	١٠٠	٢٧.٦٦٦ * ١٠ ^{-٣}	١.٦٦	=

أما النتائج النظرية لمعدلات الازالة فقد تم حسابها بالاعتماد على معادلة (٤-١) .

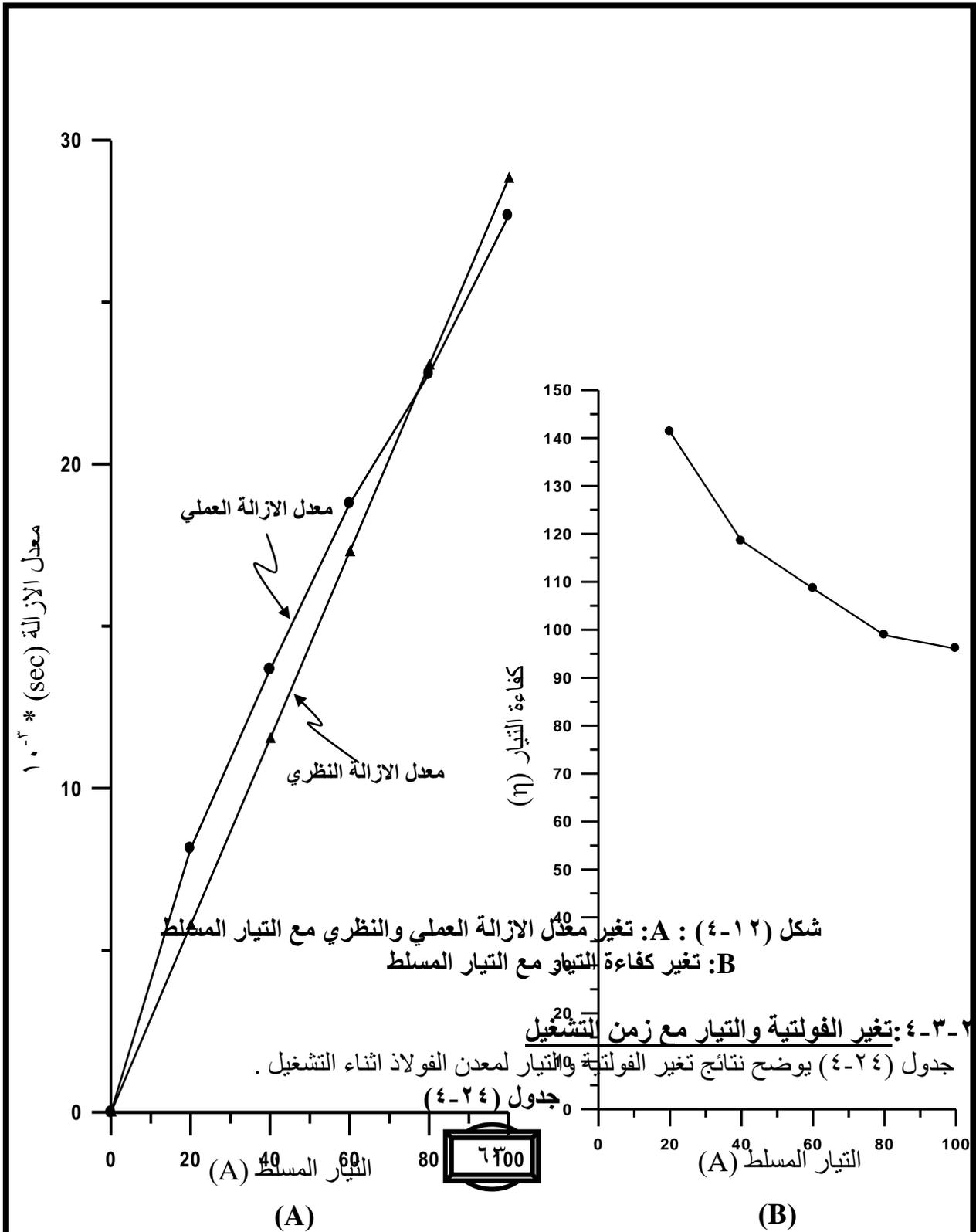
جدول (٤-٢٢) يوضح معالم المعادلة بما فيها التركيب الكيميائي لمعدن الفولاذ

التركيب الكيميائي	C%	Si%	Mn %	Cr%	Mo %	Fe %	$K = \frac{1}{\sum \frac{X_i Z_i}{A_i}} = 27.8077$
النسبة المئوية (X)	٠.٥	٠.٣	٠.٨	٠.١٥	٠.٠١	٩٨.٢٤	
الوزن الذري (A)	-	٢٨.٠٩	٥٤.٩٤	٥١.٨٩	٩٥.٩٣	٥٥.٨٤٧	
عدد التكافؤ	-	٤	٢	٢	٣	٢	

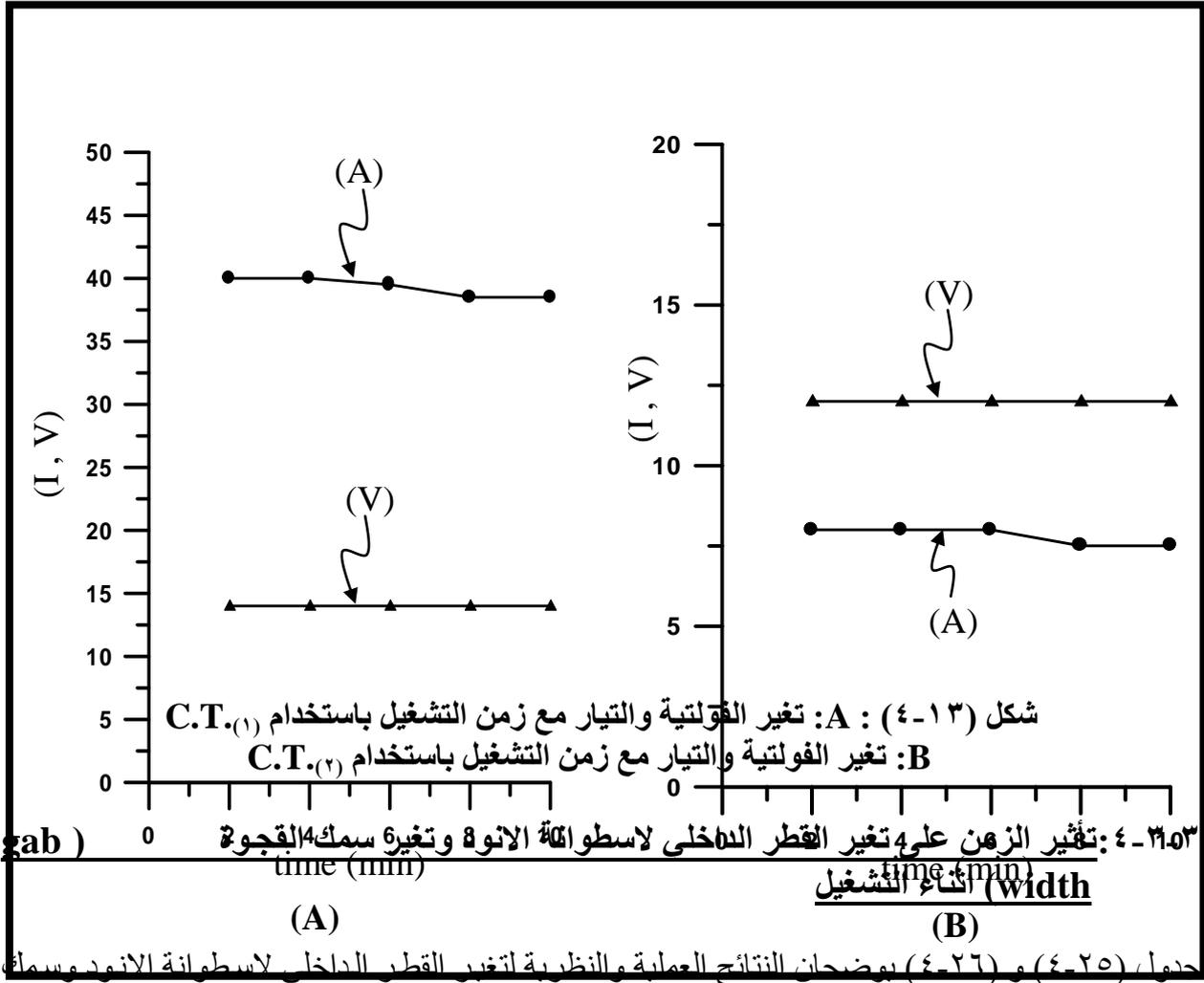
كما تم حساب كفاءة التيار (η) من خلال تطبيق معادلة (٤-١) وجدول (٤-٢٣) يوضح النتائج النظرية لمعدلات الازالة وكفاءة التيار .

جدول (٤-٢٣)

المعدن	التيار المسلط (A)	معدل الازالة الوزني النظري (g/sec)	معدل الازالة الوزني النظري (g/min)	كفاءة التيار
Brass	٢٠	٥.٧٦٣ * ١٠ ^{-٣}	٠.٣٤٥	١٤١.٣٠٤
	٤٠	١١.٥٢٦ * ١٠ ^{-٣}	٠.٦٩١	١١٨.٥٩٦
	٦٠	١٧.٢٨٩ * ١٠ ^{-٣}	١.٠٣٧	١٠٨.٦٣٠
	٨٠	٢٣.٠٥٣ * ١٠ ^{-٣}	١.٣٨٣	٩٨.٨٧٩
	١٠٠	٢٨.٨١٦ * ١٠ ^{-٣}	١.٧٢٨	٩٦.٠٦٤



المعدن	نوع العدة	زمن التشغيل (sec)	التيار المسلط (A)	الفولتية (V)	نوع العدة	زمن التشغيل (sec)	التيار المسلط (A)	الفولتية (V)
فولاذ	C.T ₍₁₎	١٢٠	٤٠	١٤	C.T _(٢)	١٢٠	٨	١٢
		٢٤٠	٤٠	=		٢٤٠	٨	=
		٣٦٠	٣٩.٥	=		٣٦٠	٨	=
		٤٨٠	٣٨.٥	=		٤٨٠	٧.٥	=
		٦٠٠	٣٨.٥	=		٦٠٠	٧.٥	=



جدول (٤-٢٥) و (٤-٢٦) يوضحان النتائج العملية والنظرية لتغير القطر الداخلي لاسطوانة الانود وسمك الفجوة.

جدول (٤-٢٥) النتائج العملية

المعدن	نوع العدة	زمن التشغيل sec.	التيار (A)	الفولتية (V)	سمك الفجوة (mm)	نوع العدة	زمن التشغيل sec.	التيار (A)	الفولتية (V)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	سمك الفجوة (mm)	عمق القطع (mm)	سمك الفجوة الابتدائي	
فولاذ	C.T ₍₁₎	١٢٠	٤٠	١٤	٠.١٢٥	C.T ₍₂₎	١٢٠	٨	١٢	١٤.٦٢٥	١٤.٧٥	٠.٠٥	٠.٠٥	٠.٥	
		٢٤٠	٤٠	=	٠.١٨٧٥		١٤.٨٧٥	١٤.٦٢٥	=	٤٠	٢٤٠	٨	=	٠.١٨	٠.٦٨
		٣٦٠	٣٩.٥	=	٠.٧١٢٥		١٤.٩٢٥	١٤.٨٧٥	=	٣٩.٥	٣٦٠	٨	=	٠.١٩	٠.٦٩
		٤٨٠	٣٨.٥	=	٠.٨١٢٥		١٥.١٢٥	١٤.٨٧٥	=	٣٨.٥	٤٨٠	٧.٥	=	٠.٢	٠.٧
		٦٠٠	٣٨.٥	=	٠.٨٣٧٥		١٥.١٧٥	١٤.٨٧٧	=	٣٨.٥	٦٠٠	٧.٥	=	٠.٢٥	٠.٧٥

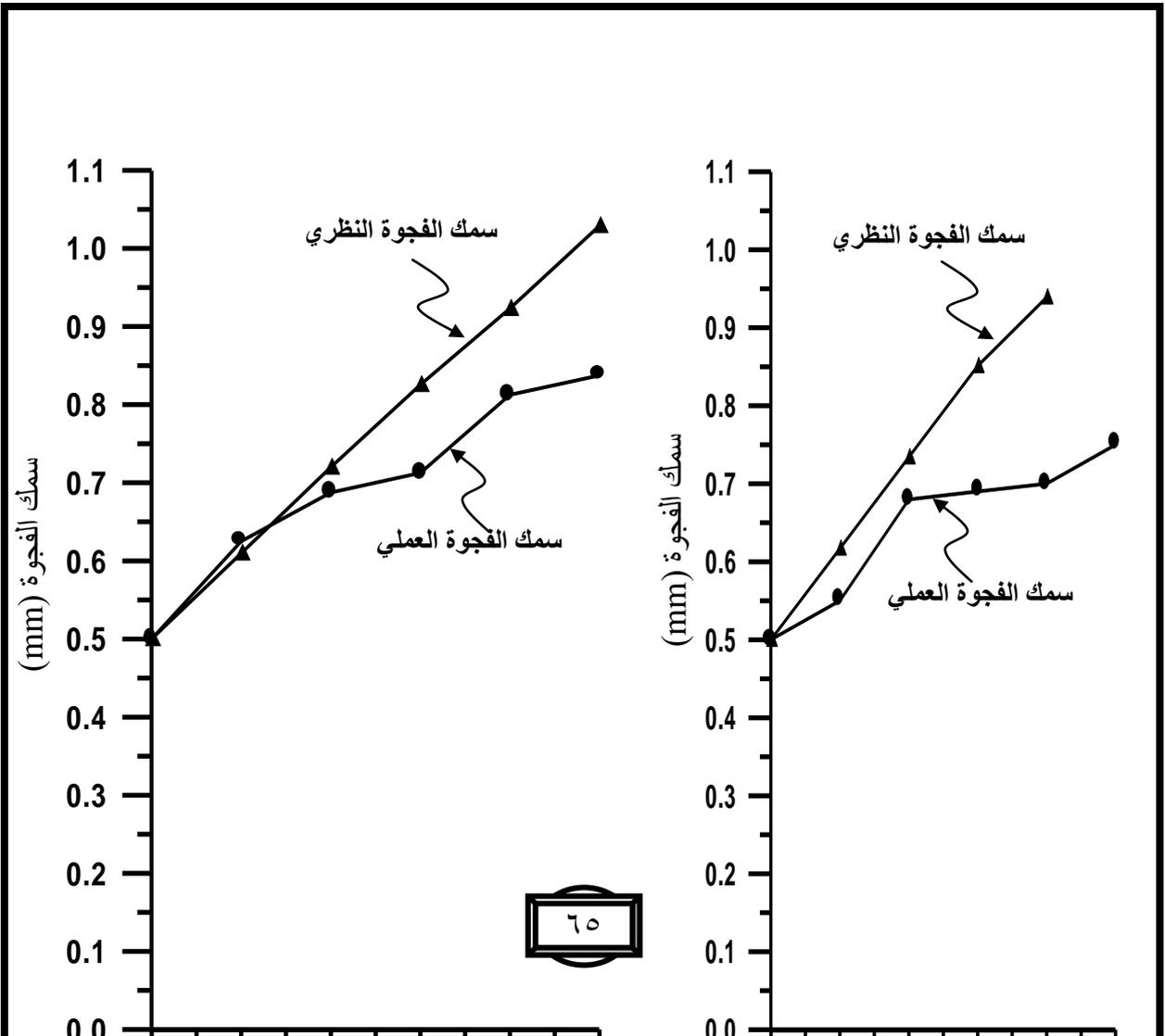
جدول (٢٦-٤) النتائج النظرية

سمك الفجوة (.٧٥ +X) (mm)	عمق القطع (mm)	الفولتية (V)	التيار (A)	زمن التشغيل sec.	نوع العدة	D.	سمك الفجوة (.٧٥ +X) (mm)	الفولتية (V)	التيار (A)	زمن التشغيل sec.	نوع العدة	المعدن
٠.٦١٧	٠.١١٧	١٢	٨	١٢٠	C.T.(١)	١٤.٧١٩	٠.٦٠٩٩	١٤	٤٠	١٢٠	C.T.(١)	فولاذ
٠.٧٣٤	٠.٢٣٤	=	٨	٢٤٠		١٤.٩٣٩	٠.٧١٩٨	=	٤٠	٢٤٠		
٠.٨٥١	٠.٣٥١	=	٨	٣٦٠		١٥.١٥١	٠.٨٢٥٦	=	٣٩.٥	٣٦٠		
٠.٩٦٩	٠.٤٦٩	=	٧.٥	٤٨٠		١٥.٣٤٦	٠.٩٣٣١	=	٣٨.٥	٤٨٠		
٠.١٤٩	٠.٥٤٩	=	٧.٥	٦٠٠		١٥.٥٥٧	١.٠٢٨٩	=	٣٨.٥	٦٠٠		

حيث ان كثافة الفولاذ $(\rho) = 7.869 \text{ g/cm}^3$ وبتطبيق معالم معادلة (٤-٧) و (٤-٩) اصبحت كل منها

$$\frac{X}{t} = I * 0.0000229 \frac{\text{mm}}{\text{sec}} \dots\dots\dots(٤-٥)$$

$$\frac{X}{t} = I * 0.0001222 \frac{\text{mm}}{\text{sec}} \dots\dots\dots(٤-٧)$$



شكل (٤-١٤) : A : تغير سمك الفجوة النظري والعملي مع زمن التشغيل باستخدام C.T.(١)
 B : تغير سمك الفجوة النظري والعملي مع زمن التشغيل باستخدام C.T.(٢)

٤-٣-٤ : تأثير زمن التشغيل على نعومة السطح المنتج
 الجدول (٤-٢٧) يوضح نتائج هذه التجارب ولكلا عدتي القطع .

جدول (٤-٢٧)

المعدن	رقم النموذج	نوع العدة	زمن التشغيل (sec)	التيار (A)	الفولتية (V)	معدل الجريان f.R m ³ /hr.	خشونة السطح Ra (μm)
فولاذ	٣	C.T.(١)	١٢٠	٤٠	١٤	١٦	٢.١
	٤		٢٤٠	٤٠	=	=	٢.٨
	٥		٣٦٠	٣٩.٥	=	=	٢.٩
	٦		٤٨٠	٣٨.٥	=	=	٥.٤
	٧		٦٠٠	٣٨.٥	=	=	٢.٧
فولاذ	١	C.T.(٢)	١٢٠	٨	١٢	١٦	٢.٦
	٢		٢٤٠	٨	=	=	٣.٤
	٣		٣٦٠	٨	=	=	٤.٦
	٤		٤٨٠	٧.٥	=	=	٤.٨
	٥		٦٠٠	٧.٥	=	=	٥.١

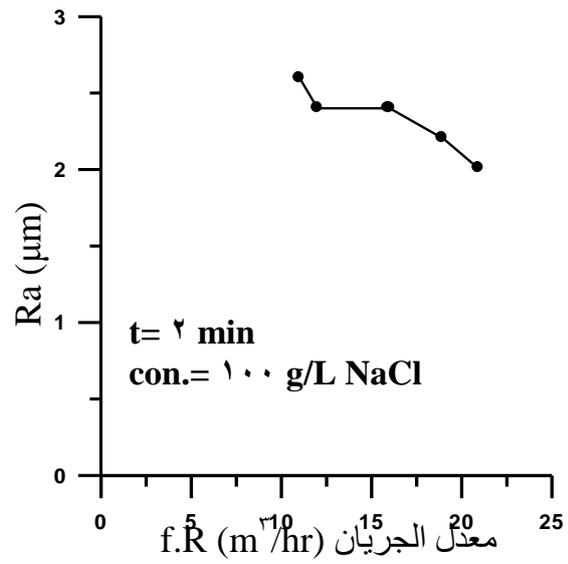
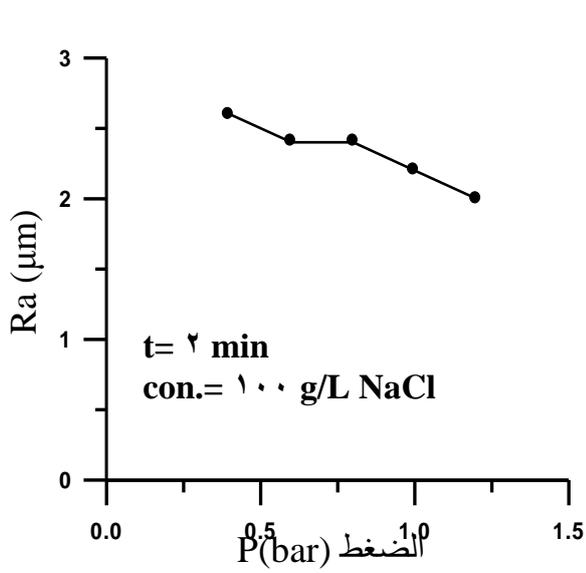
شكل (٤-١٥) A : تغير خشونة السطح مع زمن التشغيل باستخدام C.T._(١)
 B : تغير خشونة السطح مع زمن التشغيل باستخدام C.T._(٢)

٤-٣-٥: تأثير الضغط ومعدل الجريان على نعومة السطح المنتج

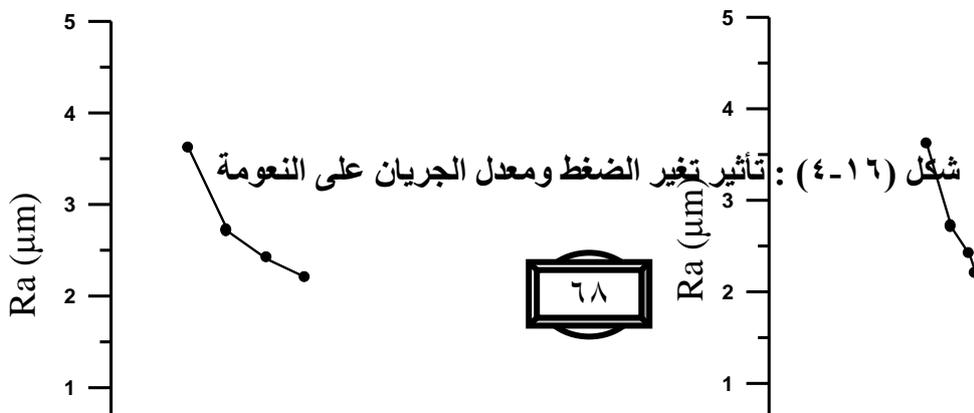
الجدول (٤-٢٨) يوضح نتائج هذه التجارب

المعدن	رقم النموذج	نوع العدة	زمن التشغيل (sec)	التيار (A)	الفولتية (V)	معدل الجريان f.R m ³ /hr.	مقياس الضغط G.P (bar)	خشونة السطح Ra (μm)
فولاذ	١	C.T. _(١)	١٢٠	٤٠	١٤	١١	٠.٤	٢.٦
	٢		=	=	=	١٢	٠.٦	٢.٤
	٣		=	=	=	١٦	٠.٨	٢.٤
	٤		=	=	=	١٩	١	٢.٢
	٥		=	=	=	٢١	١.٢	٢
فولاذ	١	C.T. _(٢)	١٢٠	٨	١٢	١٣	٠.٤	٣.٦
	٢		=	=	=	١٥	٠.٦	٢.٧
	٣		=	=	=	١٦.٥	٠.٨	٢.٤
	٤		=	=	=	١٧	١	٢.٢
	٥		=	=	=	١٩	١.٢	٣.٤

النموذج الأول (١) C.T.



النموذج الثاني (٢) C.T.



٥-١:مقدمة

بما انه تم استخدام ثلاثة معادن في التجارب الخاصة بمنظومة التشغيل الكهروكيميائي حيث ان لكل معدن نتائجه الخاصة ، لذلك فان مناقشة نتائج هذه التجارب تكون كالآتي :

٥-٢:معدن الألمنيوم

لقد أوضحت النتائج الخاصة بمعدل ازالة معدن الألمنيوم في شكل (٤-١) بان معدل الازالة يزداد بزيادة كثافة التيار المسلطة عملياً ونظرياً ، ولكنه يوجد اختلاف بين القيم العملية والنظرية ، حيث تكون نتائج القيم النظرية على شكل خط مستقيم اما العملية فتكون على شكل منحنى وهذا يعود الى تعدد الظروف التشغيلية في العملية ، حيث نادراً ما تكون النتائج العملية والنظرية متطابقة .

شكل (٤-٢) يوضح تغير الفولتية والتيار مع زمن التشغيل باستخدام عدة القطع (C.T._(١)) ، ففي شكل (A ٢ - ٤) أوضحت النتائج ان التيار سيقل بمرور زمن التشغيل أما شكل (B ٢ - ٤) فانه يوضح ثبوت الفولتية لحد الدقيقة (٣) وبعدها تزداد الفولتية ، ويمكن تعليل ذلك بانه بمرور الزمن سوف تحدث الازالة المعدنية وهذا يؤدي زيادة عرض الفجوة (gap width) وبالتالي تزداد مقاومة المحلول وكنتيجه لذلك سوف يقل التيار وتزداد الفولتية ، اما كون الفولتية ثابتة لفترة معينة فهذا يعود الى ان انخفاض التيار يكون في بداية التشغيل قليل ولايؤثر على قيمة الفولتية ، ولكن بمرور الزمن يكون التأثير أكبر . أما شكل (٣-٤) فهو يوضح تغير الفولتية والتيار خلال زمن التشغيل باستخدام عدة القطع (C.T._(٢)) .

وسبب التغير في التيار والفولتية هو نفس السبب الموضح في العدة (C.T._(١)) ما عدا كون التيارات المستخدمة في العدة (C.T._(١)) اكبر من المستخدمة في (C.T._(٢)) ، وذلك لأن مساحة التشغيل في العدة (C.T._(١)) أكبر منها في (C.T._(٢)) .

كما أوضحت النتائج ان انخفاض التيار باستخدام العدة (C.T._(١)) يكون اقل من انخفاض التيار باستخدام العدة (C.T._(٢)) وهذا يعود الى ان مقاومة المحلول في العدة (C.T._(١)) تكون اقل منها باستخدام (C.T._(٢)) وذلك لأن التركيز المستخدم في (C.T._(١)) يكون مساوٍ الى (٣٥g/L) أما المستخدم في (C.T._(٢)) فيكون مساوٍ الى (٨g/L) حيث عندما يقل التركيز تزداد مقاومة المحلول وبالتالي انخفاض كبير في التيار اكبر منه في ما مستخدم في (C.T._(١)) .

أما بالنسبة لكفاءة التيار فكانت موضحة بالشكل (٤-٤) . حيث اوضحت النتائج انخفاض الكفاءة بمرور زمن التشغيل وهذا يعود الى انخفاض تيار التشغيل .

الشكل (٤-٥) يوضح ازدياد عرض الفجوة مع زمن التشغيل عملياً ونظرياً ويوجد اختلاف بينهما ، ويعود ذلك الى حدوث الازالة المعدنية ، أما بالنسبة لاختلاف القيم العملية عن النظرية فيمكن ارجاعه الى تعدد الظروف التشغيلية وتغير معدل الازالة وحسب تركيب المعدن المشغل .

كما اوضح الشكل (٤-٦) زيادة عمق الشكل المعكوس مع زيادة زمن التشغيل باستخدام العدة (C.T._(٢)) ويعود ذلك الى حدوث الازالة المعدنية ، ولقد تم استخدام تركيز مساوٍ الى (٨g/L) وذلك للحصول على معكوس جيد للشكل المطلوب من خلال تقليل التيار وبالتالي تقليل القطع المفرط (Overcut) .

الأشكال (A ٧ - ٤) ، (B ٧ - ٤) ، (C ٧ - ٤) توضح زيادة خشونة السطح مع زمن التشغيل باستخدام العدة (C.T._(١)) حيث كلما يزداد زمن التشغيل تزداد خشونة السطح ، وذلك بسبب كبر عرض الفجوة (gab width) بمرور الزمن بسبب الازالة المعدنية وهذا يؤدي الى انخفاض التيار المسلط وبالتالي حدوث تنقر السطح لعدم انتظامية الازالة من السطح .

كما اوضحت النتائج انه كلما يزداد تركيز المحلول تقل خشونة السطح حيث تم استخدام ثلاثة تراكيز وكما مبينة بالاشكال المذكورة .

أما الاشكال (A ٨ - ٤) ، (B ٨ - ٤) ، (C ٨ - ٤) فهي ايضاً توضح زيادة الخشونة مع زمن التشغيل ولكن باستخدام العدة (C.T._(٢)) ، ولقد كانت أفضل خشونة في شكل (C ٨ - ٤) وذلك لأن التيار المستخدم كان قليلاً ومناسباً للمساحة المشغلة وكذلك كان القطع المفرط قليل .

أما الشكل (B ٨ - ٤) فكانت الخشونة فيه عالية وذلك لأن التيار المستخدم قليل جداً بحيث سبب في تنقر السطح .

أما بالنسبة لتأثير الضغط ومعدل الجريان فلقد بينت النتائج الموضحة بالأشكال (A ٩ - ٤) ، (B ١٠ - ٤) ، (A ١٠ - ٤) ، (B ١٠ - ٤) ، ان خشونة السطح تقل بزيادة كل من الضغط ومعدل الجريان وذلك لأن زيادة الضغط ومعدل الجريان يؤدي الى زيادة انجراف نواتج التشغيل من السطح وبانتظام وبذلك يكون التيار المسلط منتظم وبالتالي يتحسن السطح المنتج .

٥-٣: معدن البراص

الشكل (٤-١١) يوضح معدلات الازالة النظرية والعملية لمعدن البراص ، حيث أوضحت النتائج ان معدلات الازالة العملية والنظرية تزداد بزيادة التيار المسلط مع اختلاف قليل بينها وهو يعود ايضاً لتعدد الظروف التشغيلية وكذلك اختلاف المعادن الداخلة في تركيب سبيكة البراص . كما بينت النتائج ان معدل ازالة البراص اكبر من معدل ازالة الالمنيوم ويمكن ارجاع ذلك الى اختلاف اعداد التكافؤ والاوزان الذرية الداخلة في تركيب كلا المعدنين .

فمثلاً ، سبيكة الالمنيوم تكون فيها نسبة الالمنيوم عالية وعدد تكافؤه اعلى من عدد تكافؤ معدني البراص (الزنك ، النحاس) ، كما ان الوزن الذري للالمنيوم اقل من الوزن الذري لمعدني البراص (Cu - Zn) . وحيث ان معدل الازالة تتناسب طردياً مع الوزن الذري وعكسياً مع عدد التكافؤ ، لذلك يكون معدل ازالة البراص اعلى من الالمنيوم .

أما تغير الفولتية والتيار خلال زمن التشغيل ، فلقد اوضحه الشكل (A ١٢ - ٤) باستخدام العدة (C.T.(١١)) والشكل (B ١٢ - ٤) باستخدام العدة (C.T.(٢١)) ، حيث بينت النتائج ان تغير كلاً من الفولتية والتيار يكون طفيفاً بالنسبة لكلا عدتي القطع على الرغم من اختلاف مساحة التشكيل وهذا يعود الى ان التركيز المستخدم مساوٍ الى (١٠٠g/L) وهو تركيز عالي أي ان مقاومة المحلول تكون قليلة التغير وبالتالي يكون تغير التيار طفيفاً على الرغم من كبر عرض الفجوة خلال التشغيل . أما تيارات التشغيل المستخدمة في العدة (C.T.(١١)) فكانت اعلى من المستخدمة في (C.T.(٢١)) وذلك لأن مساحة التشغيل في (C.T.(١١)) اكبر منها في (C.T.(٢١)) ، ولقد تم استخدام تيارات قليلة في (C.T.(٢١)) للحصول على معكوس جيد للشكل المطلوب ، فعند استخدام تيار عالي يُسبب ذلك زيادة في القطع المفرط وبالتالي يكون معكوس الشكل غير جيد .

كما اوضحت النتائج المبينة بالشكل (٤-١٣) ان عرض الفجوة وعمق الشكل المعكوس يزداد بزيادة زمن التشغيل وهذا يعود الى حدوث الازالة المعدنية .

الشكل (A ١٤ - ٤) والشكل (B ١٤ - ٤) يوضحان زيادة خشونة السطح مع زمن التشغيل للعدة (C.T.(١١)) و (C.T.(٢١)) على التوالي وهذا يعود الى نفس السبب المذكور في معدن الالمنيوم .

أما الأشكال (A ١٥ - ٤) ، (B ١٥ - ٤) ، (A ١٦ - ٤) ، (B ١٦ - ٤) فانها توضح انخفاض الخشونة بزيادة كل من الضغط ومعدل الجريان وهذا يمكن ارجاعه الى نفس السبب المذكور في معدن الالمنيوم ولقد اوضحت النتائج ان خشونة السطح لمعدن البراص تكون قليلة جداً وتصل الى (٠.٠٨ μm) في بداية التشغيل والسبب في ذلك يعود الى ان جهود الاقطاب للمعادن الداخلة في تركيب البراص تكون متقاربة وبالتالي فان الاختلاف بمعدل الازالة يكون قليلاً وتكون الازالة منتظمة على السطح وبالتالي يكون السطح الناتج ناعماً .

أما جهود الاقطاب للمعادن الداخلة في تركيب سبيكة الالمنيوم فتكون مختلفة وذات فرق كبير حيث ان المعدن ذو جهد القطب الأقل يتحلل اولاً والمعدن ذو جهد القطب الأعلى يتحلل أخيراً وبذلك يحدث عدم توازن في معدل الازالة لنفس السطح وبذلك يكون السطح خشناً .

٥-٤: معدن الفولاذ

الشكل (٤-١٧) يوضح ازدياد معدل ازالة الفولاذ بزيادة التيار المسلط عملياً ونظرياً ، ولقد كان معدل ازالة الفولاذ اقل من معدل ازالة البراص وهذا يعود الى اختلاف اعداد التكافؤ والاوزان الذرية الداخلة في تركيب الفولاذ كما ان اختلاف القيم العملية والنظرية يعود ايضاً الى اختلاف الظروف التشغيلية . أما الأشكال (A ١٨ - ٤) ، (B ١٨ - ٤) فهي توضح تغير الفولتية والتيار خلال زمن التشغيل والذي يكون تغيراً طفيفاً وذلك لأن التركيز المستخدم يكون عالٍ وهو مساوٍ الى (١٠٠ g/L NaCl) .

أما كفاءة التيار فهي موضحة بالشكل (٤-١٩) والذي يوضح انخفاض الكفاءة مع زمن التشغيل وذلك بسبب انخفاض التيار خلال التشغيل .

ولقد بينت الأشكال (٤-٢٠) ، (٤-٢١) ازدياد عرض الفجوة وعمق الشكل المعكوس ، بزيادة زمن التشغيل على التوالي وذلك بسبب الازالة المعدنية .

كذلك وكما في المعدنين السابقين ، أظهرت النتائج ان خشونة السطح تزداد بزيادة زمن التشغيل وهي موضحة بالشكلين (٤ - ٢٢ A) ، (٤ - ٢٢ B) باستخدام عدتي القطع (C.T.(١)) ، (C.T.(٢)) على التوالي

ايضاً الاشكال (٤ - ٢٣ A) ، (٤ - ٢٣ B) ، (٤ - ٢٤ A) ، (٤ - ٢٤ B) توضح انخفاض خشونة السطح بزيادة كل من الضغط ومعدل الجريان وكما في المعدنين السابقين ولكلا عدتي القطع .

اضافة الى ذلك ، ان عرض الفجوة المستخدم في معدني الالمنيوم والفولاذ كان مساوٍ الى (٠.٥mm) ، اما معدن البراص فكان عرض الفجوة مساوٍ الى (٠.٧٥ mm) حيث في معدن البراص عند استخدام عرض فجوة اقل من ذلك ، سوف يؤدي الى حدوث تنقر شديد في السطح وذلك بسبب الكثافة العالية للتيار عندما يكون عرض الفجوة صغيراً .

أما درجة الحرارة المستخدمة فكانت ما بين (٢٥ - ٣٠ °C) ولم يتم التطرق الى التغير بدرجة الحرارة ، وذلك لأنها ليست في مجال البحث الحالي .

كذلك لا بد من ذكر تأثير المادة العازلة (الايوكسي) على انعكاس الشكل المطلوب ، حيث بدون استخدام العازل لم يتم الحصول على الشكل المطلوب أي ان ملامح الشكل لم تظهر داخل اسطوانة الانود.

وكذلك ، كانت انعكاسية الشكل في معدن الالمنيوم افضل وأدق من معدني البراص والفولاذ ، ففي معدن البراص كان عرض الفجوة كبيراً (٠.٧٥) والتيار المستخدم (٤ A) والتركيز (١٠٠ g/L) .

وبذلك يكون القطع المفرط كبيراً وبالتالي معكوس غير واضح ، أما معدن الالمنيوم فكان التركيز مساوٍ الى (٨ g/L) والتيار تقريباً (٣٠ - ١٦ A) وكان القطع المفرط قليلاً وكذلك عرض الفجوة قليل (٠.٥ mm) وهذه ساعدت على كون الشكل المعكوس اكثر دقة .

كبر عرض الفجوة وهذا يؤدي الى تنقر السطح .

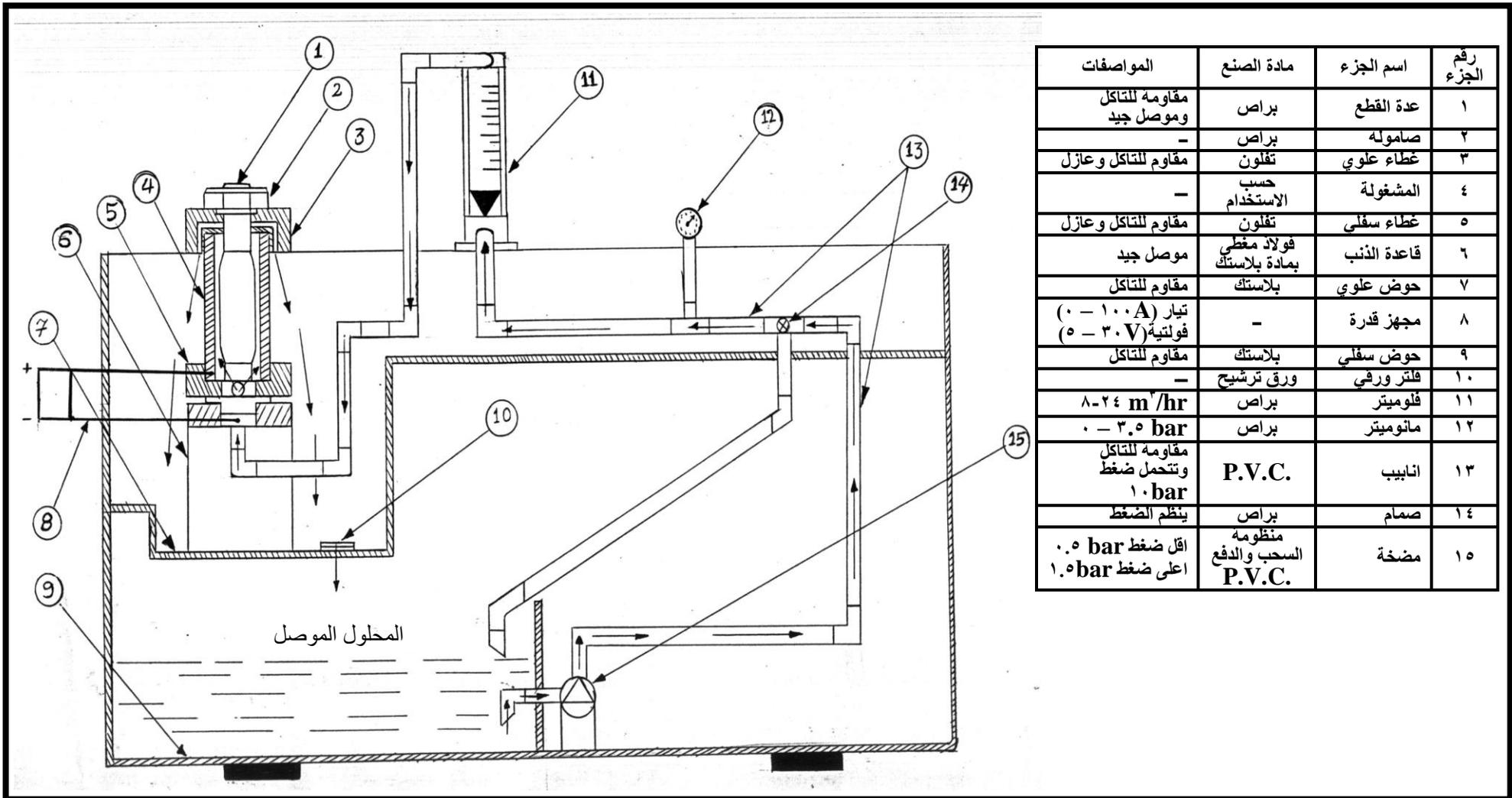
أما بالنسبة لتأثير الضغط ومعدل الجريان فلقد اوضحت الاشكال (٤ - ١٧ A) ، (٤ - ١٧ B) ، (٤ - ١٨) ، (٤ - ١٨ B) ، (A) ان خشونة السطح تنخفض بزيادة الضغط ومعدل الجريان ولكلا عدتي القطع والسبب في ذلك هو مشابه لمعدني البراص والالمنيوم .

٦-١: الاستنتاجات Conclusion

١. يمكن تقليل التغير في قيمة التيار والفولتية اثناء التشغيل وذلك من خلال زيادة تركيز المحلول بحيث تقل مقاومة المحلول وخلال سمك ازالة معين بحيث لايتجاوز (٢mm) من القطر الداخلي لاسطوانة الانود .
٢. يمكن تقليل الانخفاض في كفاءة التيار وذلك بزيادة التركيز وللمعادن الثلاثة .
٣. تختلف معدلات الازالة المعدنية اعتماداً على الوزن الذري وعدد التكافؤ للمعدن .
٤. يزداد عرض الفجوة بزيادة زمن التشغيل وتختلف من معدن لآخر وحسب معدل الازالة .
٥. تزداد خشونة السطح المشغّل بزيادة زمن التشغيل وللمعادن الثلاثة .
٦. يمكن الحصول على افضل نعومة في معدن البراص (Brass) وقد بلغت ($0.08 \mu m$) .
٧. تنخفض خشونة السطح بزيادة كل من معدل الجريان والضغط المسلط وللمعادن الثلاثة .
٨. أفضل معكوس للشكل المطلوب يمكن الحصول عليه عند تشغيل معدن الالمنيوم .

٦-٢: التوصيات Recommendations

١. دراسة تأثير محاليل موصلة مثل محلول نترات الصوديوم ($NaNO_3$) على نعومة السطح المشغّل .
٢. دراسة تأثير معدل التغذية على خشونة السطح ومعدلات الازالة وذلك باستخدام عدة قطع متحركة .
٣. دراسة تأثير درجات الحرارة على نعومة السطح وخواص المعدن .
٤. محاولة البحث في تصميم عدد قطع ذات اشكال معقدة مثل المسننات ومحاولة عكسها داخل اسطوانة الانود .



رقم الجزء	اسم الجزء	مادة الصنع	المواصفات
١	عدة القطع	براص	مقاومة للتآكل وموصل جيد
٢	صامولة	براص	-
٣	غطاء علوي	تفلون	مقاوم للتآكل وعازل
٤	المشغولة	حسب الاستخدام	-
٥	غطاء سفلي	تفلون	مقاوم للتآكل وعازل
٦	قاعدة الذئب	فولاذ مغطي بمادة بلاستيك	موصل جيد
٧	حوض علوي	بلاستيك	مقاوم للتآكل
٨	مجهز قدرة	-	تيار (A) ٠ - ١٠٠ فولتية (V) ٥ - ٣٠
٩	حوض سفلي	بلاستيك	مقاوم للتآكل
١٠	فلتر ورقي	ورق ترشيح	-
١١	فلوميتر	براص	٨-٢٤ m ³ /hr
١٢	مانوميتر	براص	٠ - ٣.٥ bar
١٣	انابيب	P.V.C.	مقاومة للتآكل وتحمل ضغط ١٠ bar
١٤	صمام	براص	ينظم الضغط
١٥	مضخة	منظومة السحب والدفع P.V.C.	اقل ضغط ٠.٥ bar اعلى ضغط ١.٥ bar

٢-١: التشغيل الكهروكيميائي Electrochemical machining

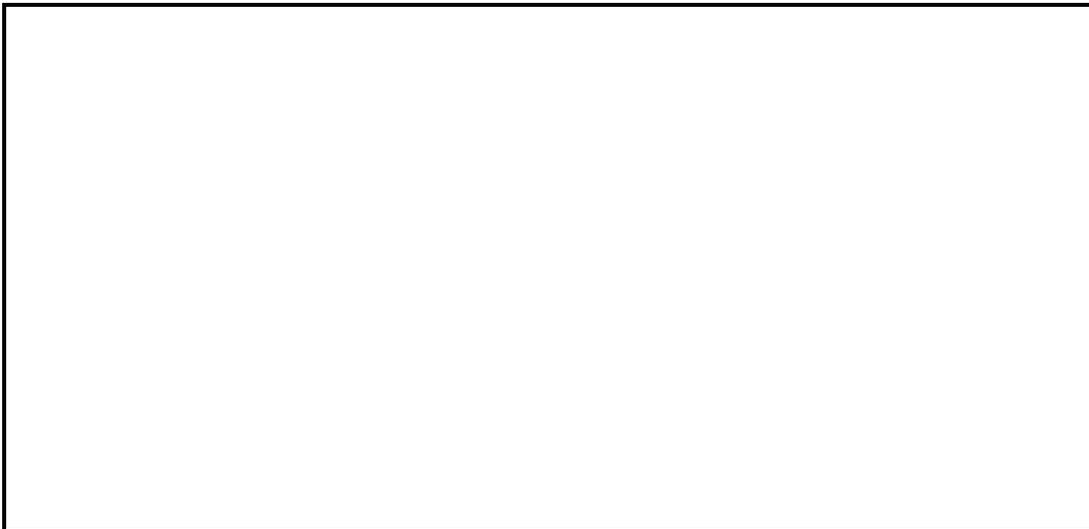
وهو عملية ازالة معدنية مسيطر عليها بواسطة الفعل الاليكتروليتي وبدون مساعدة ميكانيكية [٣] ، واحياناً يسمى بالتشغيل البارد (Cold machining) [١٤] ، حيث وجد العالم مايكل فاراداي (M.F) عند وضع قطبين في حيز يحتوي بداخله محلول موصل وبوجود فرق جهد مستمر (D.C) مطبق على القطبين ، فان قطب الانود سيتحلل كاسياً قطب الكاثود وهذه العملية تسمى بالاذابة الانودية (Anodic dissolution) [١٢] .

ان الصقل الكهربائي (electropolishing) هو احد الامثلة على عملية الاذابة الانودية ، ففي عملية الصقل ، القطعة المراد تشغيلها (المشغولة w.p) هي التي تصقل وتمثل قطب الانود في خلية اليكتروليتيية ، حيث تُدَوَّبُ النتوءات الموجودة على سطح المشغولة (w.p) وبذلك يُصبح السطح ناعم وصقيل . ان كثافة التيار

المثالية في هذه العملية تكون $(0.1 \frac{A}{cm^2})$ ، كما ان النتوءات السطحية التي تتم ازلتها هي اصغر من

$(10\mu m)$ وفي هذه العملية [١٠] وعملية الطلاء الكهربائي ام ان يتحرك المحلول بسرعه قليلة جداً او يكون ساكن (لايتحرك) [١٢] .

يشبه التشغيل الكهروكيميائي ، عملية الصقل الكهروكيميائي ، وهو ايضاً عملية اذابة انودية كهروكيميائية باستخدام تيار مستمر (D.C) وبكثافة عالية (High density) وفولتية منخفضة مسلطة على المشغولة (w.p) والعدة المشكله (عدة القطع) [١٥] . حيث يتحلل المعدن عند سطح المشغولة (w.p) على شكل ايونات معدنية بواسطة تفاعل الطلاء ، ولهذا فان شكل العدة سوف يُطبع عليها ، وبذلك فان التعديلات التي أُجريت على كل من عمليتي الطلاء والصقل الكهربائي هو جعل المحلول ينساب بقوة خلال المسافة الفاصلة بين القطبين والتي تسمى بعرض الفجوة (gab width) ، وبسرعة عالية وعادة اكبر من $(5 m/s)$ ليزداد انتقال الشحنة / الكتلة خلال الطبقة القريبة من سطح الانود ولطرد النواتج المذابة كهيدروكسيد المعدن والحرارة وفقاعات الغاز المتولدة [٩] ، وفي عمليات التشغيل المثالية تتحرك عدة القطع (cutting tool) باتجاه المشغولة (w.p) مع الحفاظ على عرض الفجوة ثابتة وصغيرة وكما في شكل (٢-١) الذي يوضح مبدأ عملية التشغيل [١٠] .



يعتبر تصميم عدة القطع من العوامل المهمة في عملية (ECM) ، والتي تمثل قطب الكاثود (cathode) ، حيث ان شكل العدة يؤثر بصورة مباشرة على دقة القطعة المشغولة (w.p) ، لذا فان شكل المنتج لا يمكن ان يكون اكثر دقة من العدة التي انتجته ، ونفس الشيء يمكن تطبيقه على الانهاء السطحي للعدة ، فاذا كان الانهاء السطحي للعدة رديء فان الانهاء السطحي للمشغولة (w.p) يكون رديء ايضاً ، وذلك لأن سطح العدة سوف يُطبع على المشغولة بما فيه من تعرجات وحزوز [١٦] .

عدة القطع في عملية (ECM) لا تبلى ولا تتآكل وذلك بسبب عدم وجود اتصال فيزيائي بين العدة (tool) والمشغولة (w.p) [١٧] ، وعند مقارنتها مع العدة المستخدمة في طرق التشغيل التقليدية ، نجد ان عدة واحدة في (ECM) يمكن ان تنتج آلاف من المشغولات ، وهذا يعود الى طبيعة التشغيل في هذه العملية [١٨] . تتميز عدة القطع بميزات خاصة ، لا بد من توفرها للعدة الجيدة وهي :

١. ان تكون ذات توصيلية حرارية وكهربائية جيدة [١٦] .
٢. مادة العدة سهلة التشغيل [١٦] .
٣. تقاوم التآكل الكيميائي وان تكون مقاومة للتشوه (distortion) والاهتزاز بسبب الضغط العالي لانسياب المحلول [١٧] .

٤. ان يكون لها مقطع عرضي كافٍ، ليوصل تيارات التشغيل بالكمية المطلوبة .
٥. الدقة العالية في تصنيعها بالابعاد القياسية المطلوبة ودقة الانهاء السطحي لأن دقة شكل العدة هو دالة لدقة المشغولة (w.p) [١٧] .

يعتمد اختيار مادة عدة القطع على الخواص الكهروكيميائية والخواص الميكانيكية المطلوبة [١٩] ، كما وجد بان المواد التي لها استخدام واسع في تصنيع عدد القطع في عملية (ECM) هي الالمنيوم (Al) ، البراس (Brass) ، البرونز (Bronze) ، النحاس (Cu) ، الكاربون (C) والفولاذ المقاوم للصدأ (st. steel) وغيرها من المواد ، هذه المواد سهلة التشغيل ويكون تصنيع العدة اعتماداً على شكل المشغولة (w.p) أي ان لكل مشغولة عدة قطع خاصة [٨] ، وجدول رقم (٢-١) يوضح خواص المواد المستخدمة في تصنيع عدد القطع الخاصة بـ (ECM) .

جدول (٢-١) : خواص ومزايا المواد المستخدمة في تصنيع عدد القطع [١٠]

التوصيلية الحرارية cal/cm ^٢	معامل المرونة (M/E) Kpa	مقاومة الشد Mpa	الكلفة Cost	المقاومة الكهربائية ele. Resistance at ٢٠ μ.ohm.cm 'C	المادة Material
٠.٩٣٤	١٢١*١٠ ^٤	٤٦٠	متوسطة	١.٧١	النحاس Copper
٠.٢٨٧	١.٠٣*١٠ ^٤	٥١٧	منخفضة	٦.٦٣	براص النافال Naval Brass (٦٠)Cu,(٣٩)Zn
٠.٤٧٩	١.٠٣*١٠ ^٤	٦٠٦	متوسطة	٣.٦	البرونز Bronze
٠.٠٣٩	٢٠٠*١٠ ^٤	٥٦٥	عالية	٧٣.٠	فولاذ مقاوم للصدأ الاوستنيتي

٢-٢-٢: المحلول الاليكتروليتي Electrolyte

وهو محلول موصل للكهربائية ، مُكوّن من مواد كيميائية مذابة في الماء بتراكيز معينة مثل محلول كلوريد الصوديوم (NaCl) ونترات الصوديوم (NaNO_٣) المستخدمة بشكل شائع في تشغيل المعادن [٣] .

٢-٢-٢-١: خصائص المحلول الاليكتروليتي

- للمحلول الأليكتروليتي في عملية (ECM) خصائص عديدة منها :
١. توفير شروط الأذابة الأتودية لمادة المشغولة (w.p) [١٠] .
 ٢. حمل التيار الكهربائي وذلك لغرض اكمال الدائرة الكهربائية بين العدة والمشغولة [١٠] .
 ٣. يمنع طلاء عدة القطع من خلال ابعاد نواتج التفاعلات الكهروكيميائية من الفجوة (gab) ما بين العدة والمشغولة [١٢] .
 ٤. حمل الحرارة المتولدة بعيداً وبالتالي بقاء الحرارة ثابتة تقريباً في منطقة التشغيل [٢٠] .

٢-٢-٢-٢: متطلبات المحلول الرئيسية

ان أهم متطلبات المحلول هي كالاتي :

١. يجب ان تتمكن الأيونات السالبة (anions) الموجودة في المحلول الأليكتروليتي من ترك الأتود (Anode) المتحلل بانتظام عند السرعة العالية ، وان لا تتفاعل مع معدن الأتود وتكوين طبقة خاملة على سطحه ومن هذه الأيونات السالبة (ClO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) [١٠] .
٢. عدم السماح للأيونات الموجبة (cations) بالترسب على سطح الكاثود ، وبهذا فان شكل الكاثود يبقى دون تغير ، ولتحقيق هذا الهدف تستخدم المحاليل الحاوية على الأيونات الموجبة المعدنية القاعدية (alkaline) كالبيوتاسيوم والصوديوم [١٠] .
٣. يجب ان يكون للمحلول توصيلية كهربائية عالية ولزوجة منخفضة ، وذلك لتقليل الفقدان بالطاقة التي تؤدي الى مقاومة المحلول وتوليد الحرارة وكذلك للحصول على انسياب جيد للمحلول خلال عرض الفجوة (gab width) [١٢] .
٤. ان يكون مستقراً من ناحية التركيب وقيمة الـ (ph) خلال دورة التشغيل وان تكون توصيلته ولزوجته قليلة التغير بدرجة الحرارة .
٥. يجب ان لا يكون ساماً او يسبب تآكلاً او تلفاً سريعاً بالنسبة لأجزاء التشغيل التي تكون في حالة تماس وان يكون متوفراً ورخيص الثمن [١٩] .

٢-٢-٢-٣: إختبار المحاليل الأليكتروليتيية Selections of Electrolyte

يتم إختيار المحاليل الأليكتروليتيية على اساس ، مادة القطعة المراد تشغيلها ، الانهاء السطحي المرغوب ، الإنتاجية المرغوبة ، تسامح (tolerance) البعد المرغوب [١٠] .

ان اكثر المحاليل استخداماً في (ECM) هما ، محلول كلوريد الصوديوم (NaCl) و نترات الصوديوم ($NaNO_3$) ، ولقد وُجد ان محلول (NaCl) يكون أكّالاً مقارنة مع المحاليل الأخرى ، اما محلول ($NaNO_3$) فهو يتميز بخواص مفضلة وهو اقل أكّالية من محلول (NaCl) ولكنه يميل الى سلبية التفاعل الكيميائي ونوعاً ما يُقلل التوصيلية الكهربائية [١٢] ، كما تستخدم الألكالين الكيميائي (القاعدة) مثل نترات البوتاسيوم وكرومات الصوديوم وغيرها ، وفي بعض الأحيان يُستخدم خليط من محلولين او اكثر ، اما المحاليل الحامضية الضعيفة مثل حامض الكبريتيك فتستخدم لانتاج انهاء سطحي جيد [١٠] ، وجدول (٢-٢) يوضح المحاليل الأليكتروليتيية المستخدمة لتشغيل المعادن .

جدول (٢-٢) : المحاليل الأليكتروليتيية المستخدمة في تشغيل المعادن [١١]

معدن المشغولة	نوع المحلول الأليكتروليتي المستخدم	تركيز المحلول (كغم / لتر)
صلب سبائكي نيكل - كوبلت	كلوريد الصوديوم NaCl KCl	٠.٢٦٨
	نترات الصوديوم NaNO ₃	٠.٥٣٧

٠.٧٠٠٠	سيانيد الصوديوم NaClO_3	صلب العدد المقسى
٠.٢٦٨	كلوريد الصوديوم NaCl نترات الصوديوم NaNO_3	حديد الزهر الرمادي
٠.٥٣٧	نترات الصوديوم NaNO_3	حديد الزهر الابيض
٠.٥٣٧	نترات الصوديوم NaNO_3 كلوريد الصوديوم او البوتاسيوم	الالمنيوم وسبائكه
٠.٢٦٨	كلوريد الصوديوم او البوتاسيوم	سبائك التيتانيوم
٠.١٠٧	هيدروكسيد الصوديوم NaOH	التكستن (W)
٠.١٦١	هيدروكسيد الصوديوم NaOH	موليبدينوم (Mo)
٠.٢٦٨	كلوريد الصوديوم او البوتاسيوم نترات الصوديوم NaNO_3	النحاس وسبائكه
٠.٥٣٧		

٢-٢-٣: القطعة المراد تشغيلها او المشغولة (Work Piece (w.p)

تمثل المشغولة (w.p) قطب الانود (Anode) ، الذي يتحلل بفعل التفاعلات الكهروكيميائية الحادثة ، ويكون التحلل اختبارياً وحسب ما مطلوب ، ويمكن تشغيل أي مادة بعملية (ECM) ، بشرط ان تكون موصلة للكهربائية .

تؤثر الخواص الكيميائية للمشغولة (w.p) على معدل ازالة المعدن ، حيث ان معدل الازالة يتناسب طردياً مع الوزن الذري وعكسياً مع تكافؤ معدن الشغلة [١٢] .

كما يؤثر وجود الشوائب في معدن الشغلة على معدل الازالة ومثال على ذلك حديد الزهر وذلك لأنه يحتوي على الكرافيت الحر (Free Graphite) ، حيث ان وجود الكرافيت يسبب عدم انتظامية في معدل الازالة وبالتالي خشونة عالية [١١] اضافة الى ذلك ، ان معدل الازالة لايعتمد على الخواص الميكانيكية للمشغولة مثل الصلادة والمتانة ، ولكن هو دالة لمعدل التبادل الايوني ، وبذلك يمكن تشغيل المعادن الصلدة وبمعدل ازالة اكبر من معدل الازالة بالطرق التقليدية [٢١] .

تثبت المشغولة (w.p) بواسطة مثبتات مصنوعة من مواد عازلة مثل راتنجات الايبوكسي (epoxy rysen) وراتنجات الالياف الزجاجية (fiber glass rysen) وهي ضرورية لهذا الغرض ، وهناك مواد اخرى رخيصة الثمن مثل مادة (PVC) بولي فانييل كلورايد ، وهي تمتلك استقرارية حرارية جيدة وخاصة امتصاص رطوبة منخفضة [١٢] .

٢-٣: الاساس الكهروكيميائي لعملية (ECM) Elec. Basis of ECM

يتعلق الاساس الكهروكيميائي بالتأثيرات الفيزيائية والكيميائية الحادثة عند وضع قطبين موصلين في محلول موصل يُعرف بالاليكتروليت (electrolyte) وهو لا يشبه الموصلات المعدنية او المواد الموصلة كالكرافيت (Graphite) التي يمر التيار فيها بواسطة حركة الاليكترونات خلال البناء الشبكي لها (Lattice Structure) ، أما مرور التيار في المحلول الموصل فانه يتم بواسطة حركة المادة (الايونات) اضافة الى الاليكترونات وهذا ما يسمى بالتحلل الكهربائي (electrolysis) [٣] .

يكون التوصيل الكهربائي ممكناً خلال المحلول الموصل ، وذلك بسبب تفكك جزيئات المادة المذابة كلها او بعضها الى جسيمات موجبة وسالبة والتي تسمى بالايونات (Ions) ، وتكون هذه الايونات حرة وتتحرك بعشوائية خلال المحلول بسبب تكسر قوى الربط نتيجة الذوبان في المحلول [٣] .

عند تسليط المجال الكهربائي وبفولتية معينة ، سوف يسبب حركة الايونات نسبة الى الآخر بحيث تتجه الايونات الموجبة (cations) الى القطب السالب (cathode) وتتجه الايونات السالبة (anions) الى القطب الموجب (Anode) ولأن هذه الايونات مشحونة كهربائياً ، فهذا يسبب انتقال التيار الكهربائي أي ان تبادل الاليكترونات بين الايونات (Ions) والأقطاب (electrodes) يُكمل الدائرة الكهربائية ويسبب ظاهرة الاذابة

الانودية عند قطب الانود (Anode) وهي اساس عملية (ECM) ، شكل (٢-٢) الذي يوضح الازابة الانودية للفولاذ باستخدام محلول كلوريد الصوديوم وهو مثال بسيط للتشغيل الكهروكيميائي [١٢] .

شكل (٢-٢) : التفاعلات الكهروكيميائية خلال عملية (ECM) لتشغيل الحديد في محلول كلوريد الصوديوم (NaCl) [١٠]

ان نتيجة التحلل الاليكتروليتي توضح بالمعادلتين التاليتين :



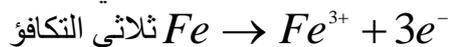
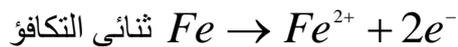
وبذلك فان الايونات السالبة (anions) هي (Cl^-) ، (OH^-) تتجه نحو قطب الانود ، والايونات الموجبة (cations) هي (H^+) ، (Na^+) تتجه نحو قطب الكاثود وبهذا تكتمل الدائرة الكهربائية [٣] ومما موضح بالشكل ، وهناك تفاعلات تجري خلال عملية التشغيل والتي توضح كالتالي .

٢-٣-١: التفاعلات الكهروكيميائية في عملية (ECM) Elec. Reaction in ECM

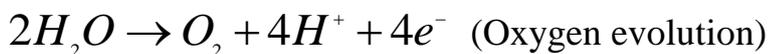
عند اكتمال الدائرة الكهربائية وكما موضح بالشكل هناك تفاعلات تحدث خلال العملية وهي كالاتي :

A. التفاعلات الانودية (Anodic Reactions)

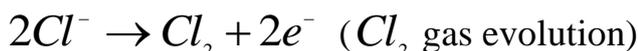
وهي التفاعلات التي تحدث عند سطح قطب الانود ، ومن هذه التفاعلات تفاعل تحلل معدن قطب الانود مثل تحلل الفولاذ .



وقد يكون هذا التفاعل مصحوباً بتفاعل تحلل الماء والذي يكون بمدى محدد جداً وناتج التفاعل هو تحرر غاز الاوكسجين (Oxygen evolution) وتكوين ايونات الهيدروجين (H^+) والذي يسبب زيادة موضعية في حامضية المحلول وكما في المعادلة :

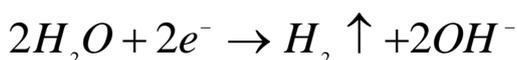


وهناك تفاعل آخر ، وهو تفاعل تحرر غاز الكلور (Cl_2) [١٢] .

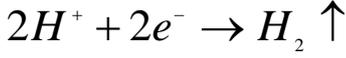


B. التفاعلات الكاثودية (Cathodic Reactions)

وهي التفاعلات التي تحدث عند سطح قطب الكاثود (Cathode) ، ففي المحاليل القاعدية (basis) والمحاليل المتعادلة (neutral) ، يعتبر التفاعل الرئيسي عند الكاثود هو التحلل الكهربائي للماء والذي يسبب تحرر غاز الهيدروجين (H_2) وكذلك تكوين ايونات الهيدروكسيل (OH^-) والتي تؤدي الى زيادة موضعية في القاعدية (alkaline) وكما في المعادلة :



وهناك تفاعل آخر وهو تحرر غاز الهيدروجين ، وذلك بمعادلة الشحنة على ايونات الهيدروجين وهو تفاعل رئيسي في المحاليل الحامضية [٢٢] وكما في المعادلة :



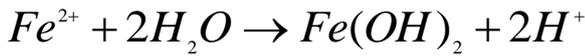
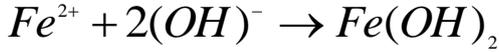
أما التفاعل الاخير ، هو تفاعل تحول ايونات المعدن المتحلل الى ذرات وترسبها على قطب الكاثود وخاصة في المحاليل الحامضية .



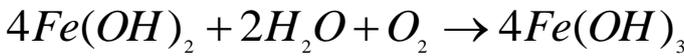
هذه الترسبات تميل الى الالتصاق وتتكون ببطئ اذا كان المحلول ضعيفاً في ايونات المعدن ، لذلك في المحاليل يستخدم نظام لعكس اتجاه تيار التحلل وبصورة دورية لازالة الترسبات المتراكمة على قطب الكاثود [١٢] .

C. التفاعلات التي تحدث في المحلول الاليكتروليتي Electrolyte Reactions

عند ذوبان ذرات المعدن على شكل ايونات (Fe^{2+}) مثلاً ، وكما موضح في شكل ، هذه الايونات ستتحج الى داخل المحلول الاليكتروليتي والتي تتفاعل اما مع الماء او تتفاعل مع ايون الهيدروكسيل ، ويكون ناتج التفاعلين هو هيدروكسيد الحديدوز وكما في المعادلتين [١٠] .



هيدروكسيد الحديدوز المتكون ذو لون اخضر مسود وهو مترسب ، وان ترسبه ليس له اهمية في التفاعلات الكهروكيميائية ، ولكن ترسبه على عدة القطع غير مرغوب به جداً ، وتتم ازالة هذه الترسبات من المحلول بواسطة طريقة الفصل بالطرد المركزي مثلاً ، او بواسطة مرشحات خاصة (Filters) وبالتالي لايتغير المحلول خلال العملية . كما ان هيدروكسيد الحديدوز بدوره ايضاً يتفاعل مع الماء وبوجود الاوكسجين (O_2) ليكوّن هيدروكسيد الحديدك وهو ذو لون احمر داكن او بني محمر ، وكما في المعادلة :



حيث يُزال كل من الهيدروجين المتحرر والهيدروكسيد المترسب بواسطة قوة جريان المحلول [١٢] .

٢-٤: معدل الازالة المعدنية (MRR) Metal Removal Rate

يُطلق على وزن المعدن المزال خلال فترة زمنية ، بمعدل ازالة المعدن وعادة تُؤخذ بوحدة ($\frac{g}{min}$)

الغرام لكل دقيقة ، ويكون معدل الازالة متغيراً من معدن الى آخر حيث يعتمد على التركيب الكيميائي للمعدن [٣] .

ولقد وضع العالم مايكل فاراداي قانونين يحكمان معدل ازالة المعدن وهما :

١. كمية المعدن المتحلل او المترسب تعتمد على كمية التيار الكهربائي المار .

٢. كمية المعدن المتحلل او المترسب ولنفس التيار الكهربائي يعتمد على الوزن المكافئ الكيميائي للمعدن ،

ومن خلال هذين القانونين نحصل على معدل الازالة النظري للمعدن (Theoretical metal removal rate) [٢٠] والذي يكون بهذه الصيغة :

$$M \propto I * t * \left(\frac{A}{Z}\right)$$

$$\Rightarrow M = \frac{I * t * (A)}{F(Z)} \dots\dots\dots(٢-١)$$

ان ثابت هذه المعادلة يسمى بثابت فاراداي ويرمز له بالرمز (F) ويكون مساوياً الى 96500 (A.sec) وهو كمية الكهربائية اللازمة لازالة ما مقداره ($\frac{A}{Z}$) بالغرام من المادة . ان معادلة رقم (٢-١) تكون صحيحة بالنسبة للمعدن الذي يمتلك تكافؤ واحد ، ومن خلالها يتم حساب كمية المعدن المتحللة او المترسبة ، وبقسمة كمية المعدن المتحللة او المترسبة على الزمن ، يتم الحصول على معدل الازالة الوزني النظري والذي تمثله معادلة (٢-٢) :

$$\frac{mass}{time} = \frac{M}{t} = \frac{I * A}{F * Z} = M_{(m)} \dots\dots\dots(٢-٢)$$

ان اكثر المواد الهندسية هي سبائك تتكون من اكثر من عنصر لذلك فان معادلة رقم (٢-٢) تم تعديلها الى صيغة معينة بحيث تشمل السبائك في حساب معدل الازالة ، على فرض ان عناصر السبك هي ١ ، ٢ ، ٣ ، ، n ، ولها اوزان ذرية (A_1, A_2, A_n) وذات تكافؤات (Z_1, Z_2, Z_n) ، وكل منها

موجود بنسبة مئوية معينة في السبيكة ($x_1\% , x_2\% , \dots , x_n\%$) ولأن ($1F$) يزيل ($\frac{A}{Z}$) غرام من المادة [٢٣] . أي ان (١) غرام من المادة سوف يُزال من الانود بواسطة .

$$F \left[\frac{x_1 Z_1}{A_1} + \frac{x_2 Z_2}{A_2} + \dots + \frac{x_n Z_n}{A_n} \right] C(\text{Coulomb})$$

وبذلك فان معدل الازالة الوزني للسبيكة يكون بهذه الصيغة :

$$M_{(a)} = \frac{mass}{time} = \frac{I}{F} \left[\frac{x_1 Z_1}{A_1} + \frac{x_2 Z_2}{A_2} + \dots + \frac{x_n Z_n}{A_n} \right]^{-1} g / sec \dots\dots\dots(٢-٣)$$

تعتبر كثافة التيار من العوامل المؤثرة على معدل ازالة المعدن في عملية (ECM) ، كما يؤثر عرض الفجوة (gab width) وبصورة مباشرة على كثافة التيار وبالتالي على معدل الازالة ، فعندما يكون عرض الفجوة صغيراً كانت كثافة التيار عالية وهذا يؤدي الى معدل ازالة عالي وبالعكس ، كما يجب تجنب كون عرض الفجوة صغيراً جداً ، لأنه من المحتمل ان تتسبب مخلفات التشغيل بانسداد عرض الفجوة وبالتالي حدوث قطع للدائرة الكهربائية والتي تؤدي الى تلف العدة والمشغولة ، كما يؤثر عدد التكافؤ ونوع المحلول على معدل ازالة المعدن [٨] .

اما معدل الازالة الحجمي (Volumetric Removable Rate) فيمكن الحصول عليه من معادلة رقم (٢-٢)

$$(٢) ، \text{ و اذا كانت كثافة معدن الانود } \left(\rho = \frac{g}{cm^3} \right) \text{ فان معدل الازالة يكون}$$

$$Q_{(m)} = \frac{A * I}{\rho * F * Z} \dots\dots\dots(٢-٤) \quad \text{معدل الازالة الحجمي للمعدن}$$

معادلة (٢-٤) تُطبق اذا كان المعدن يمتلك عدد تكافؤ واحد ، اما اذا كان المعدن سبيكة يتألف من اكثر من عنصر أي له اكثر من تكافؤ ، عند ذلك يمكن ايجاد معدل الازالة الحجمي باعتبار الشحنة اللازمة تُزيل وحدة حجم لكل عنصر ، على فرض ان عناصر السبك هي (١ ، ٢ ، ٣ ، ، n) واوزانها الذرية (A_1, A_2, A_n) ، وذات تكافؤات (Z_1, Z_2, Z_n) وموجودة بنسب وزنية ($x_1\% , x_2\% , \dots$)

(%) x_n فان حجم السبيكة المزال ($\frac{v\rho x}{100}$) (vcm³) غرام للعنصر [٢٣] ، وبما ان (ρ) كثافة السبيكة (g/cm^٣) ، فان الشحنة اللازمة لازالة كل عنصر في الحجم (v) تعطى بالصيغة :

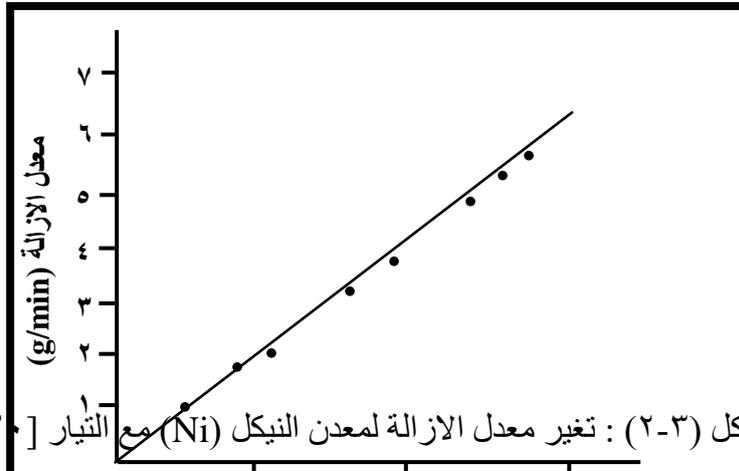
$$\left[\frac{v\rho x}{100} * \frac{Z_1 F}{A_1} \right]$$

وبذلك فان حجم السبيكة المزال لكل وحدة شحنة يكون

$$Q_{(a)} = \frac{100}{\rho * F} \left[\frac{1}{\sum \frac{(x_2^- * Z_2^-)}{A_2^-}} \right] \text{cm}^3/\text{amp.sec} \dots\dots\dots(2-5)$$

وهو معدل الازالة الحجمي للسبيكة $Q_{(a)}$.

ففي عملية (ECM) الفعلية ، يوجد عدد من العوامل التي تؤثر على معدل الازالة ، كما انه نادراً ما تكون العملية مثالية ، كنتيجة لذلك ، فان معدل الازالة الفعلي يمكن ان يختلف قليلاً عن معدل الازالة النظري الذي نحصل عليه من معادلة (2-4) ، شكل (2-3) يوضح معدل الازالة النظري والفعلي لمعدن النيكل كمثال على ذلك [23].



ان معدل الازالة النظري يعتمد على تذبذب ثنائي التكافؤ (divalent) وعندما يكون التيار اعلى فهذا يعني ان التذبذب يحدث عند فرق جهد اعلى ، يحدث ايضا تذبذب ثلاثي التكافؤ ، لذلك عند التيارات العالية ، القيمة النظرية تميل ان تكون اعلى من القيمة الفعلية كما ان تكافؤ التذبذب (dissolution) في بعض الاحيان يعتمد على المحاليل ، فمثلاً يتحلل النحاس بشكل متعدد التكافؤ في محاليل الكلورايد (chloride) ، بينما في محاليل النترات يحدث التذبذب بالحالة الثنائية التكافؤ ، جدول (2-3) يوضح بعض العناصر المهمة [23].

جدول (2-3) يوضح الوزن الذري الغرامي ، الكثافة والتكافؤ لبعض المعادن المهمة [23]

المعدن	الوزن الذري الغرامي	تكافؤ التذبذب	الكثافة (g/cm ³)
الالمنيوم	26.97	3	2.67
الكروم	51.99	2-3-6	7.19
الكوبلت	58.93	2-3	8.85
النحاس	63.57	1-2	8.96
الحديد	55.85	2-3	7.86

النيكل	٥٨.٧١	٢ - ٣	٨.٩٠
القصدير	١١٨.٦٩	٢ - ٤	٧.٣٠
النتيانيوم	٤٧.٩	٣ - ٤	٤.٥١
التنكستن	١٨٣.٨٥	٦ - ٨	١٩.٣
الزنك	٦٥.٣٧	٢	٧.٣
السليكون	٢٨.٠٩	٤	٢.٣٣
المغنيز	٥٤.٩٤	٢ - ٤ - ٦ - ٧	٧.٤٣

٢-٥: كفاءة التيار (η) Current efficiency

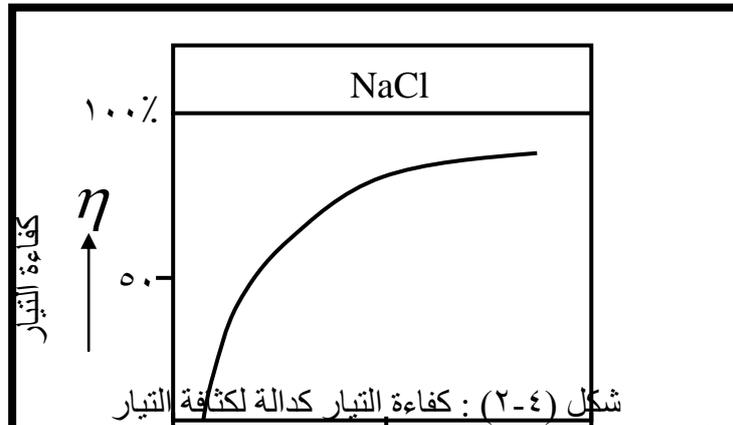
وهي معدل الازالة الفعلية نسبة الى معدل الازالة النظرية المحسوبة حسب قانون فاراداي وتكون :

$$\text{كفاءة التيار } (\eta) = \frac{\text{معدل الازالة الفعلية (g/min)}}{\text{معدل الازالة النظرية (g/min)}} \cdot 100\%$$

تعتمد كفاءة التيار على :

١. مادة المشغولة ٢. المحلول الايكتروليتي ٣. كثافة التيار

فمثلاً محلول نترات الصوديوم (NaNO_3) عند استخدامه لتشغيل الفولاذ (steel) ، تتكون الطبقة الانودية الخاملة على المشغولة وهذا يؤثر على معدل الازالة وبالتالي على كثافة التيار والتي عند انخفاضها تؤدي الى انخفاض كفاءة التيار ، اما عند كثافات التيار العالية فان تأثير الطبقة الانودية يكون قليلاً وبذلك تزداد كفاءة التيار ، اما بالنسبة لمحلول (NaCl) فان كفاءة التيار فيه لاتعتمد على كثافة التيار وذلك بسبب عدم تكوّن الطبقات الانودية الخاملة عند استخدامه [٢٤] وكما في شكل (٢-٤) الذي يوضح كفاءة التيار كدالة لكثافة التيار في التشغيل الكهروكيميائي للفولاذ في محلولي (NaCl و NaNO_3) ، ففي محلول (NaCl) لاتعتمد كفاءة التيار على كثافة التيار وتكون ١٠٠٪ ، اما في محلول (NaNO_3) فان الكفاءة تنخفض عند انخفاض كثافة التيار [٤] .

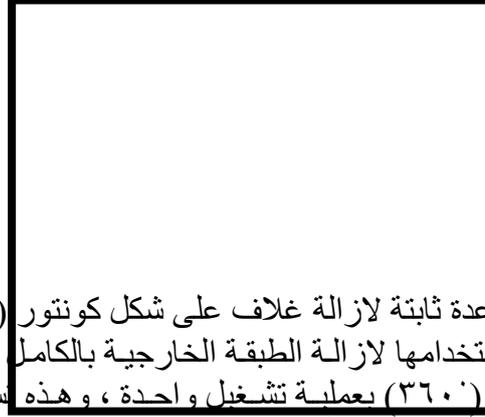


٢-٥: التشغيل الكهروكيميائي الثابت Static ECM Machining

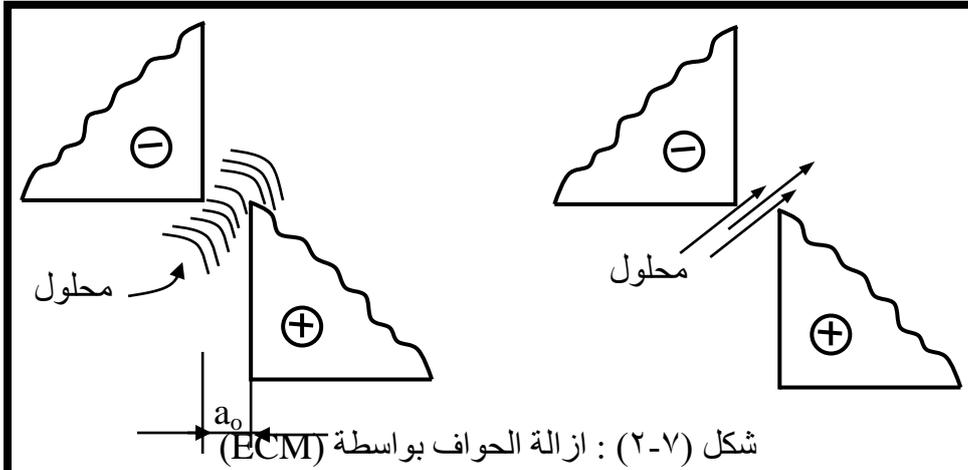
وهو أحد تطبيقات التشغيل الكهروكيميائي بالإضافة الى التشغيل المتحرك ، ويطلق عليه ايضاً بالتشغيل الكهروكيميائي باستخدام عدة قطع ثابتة (ECM With Stationary Test Electrode) وتستخدم هذه الطريقة لازالة اعماق قليلة من المادة . تطبق في كثير من عمليات الانهاء (Finishing Operations) ، ازالة الحواف (deburring) ، توسيع الثقوب وتستخدم في تعديل زوايا الاجزاء المشغلة وجعلها غير حادة ومدوّرة (radiating) [١٠] .

وبصورة عامة تعتبر هذه الطريقة كعملية نهائية لانهاء السطح المنتج بطرق التشغيل التقليدية ، بحيث تُزال طبقة ذات سمك قليل من معدن المنتج كما ان الفجوات المنتجة بهذه الطريقة وذات عمق اكبر من (٢.٥ mm) اما ان تكون ذات شكل منتظم (uniform) وكما موضح بالشكل

شكل (٢-٥) : عدة ثابتة لازالة طبقة منتظمة على شكل غلاف من المادة [٣] او ان تكون غير منتظمة الشكل وعلى شكل كونتور (Contour) متغير وشكل (٢-٦) يوضح ذلك



شكل (٢-٦) : عدة ثابتة لازالة غلاف على شكل كونتور (Contour) ولأن عدة القطع ثابتة ، يمكن استخدامها لازالة الطبقة الخارجية بالكامل والتي تكون على شكل غلاف (envelope) ويمكن تشغيلها بـ (٣٦٠°) بعملية تشغيل واحدة ، وهذه تستخدم لتشغيل ريشة التوربين (Turbine blades) [٣] ومن تطبيقاتها ايضاً ، ازالة الزوائد والحواف للتروس (deburring of gear) واجزاء الانظمة الهيدروليكية ، اجزاء المحركات وشكل (٢-٧) يوضح ازالة الحواف بواسطة (ECM) .



وعندما يُراد ازالة معدنية من الجزء المطلوب بعمق اكبر من (٢٥ mm) قبل التشغيل الحالة تستخدم مجموعة من عدد القطع الثابتة ، أي تتم الازالة الاولى بالعدة الاولى حيث يُزال المعدن بعمق معين وبعدها تستخدم العدة الثانية لتكتمل الازالة بالمقاس المطلوب ويمكن ان يشبه الشكل المطلوب. وفيما يلي نعرض شرح الاجزاء المشغلة بواسطة عدة قطع ثابته [٣] .



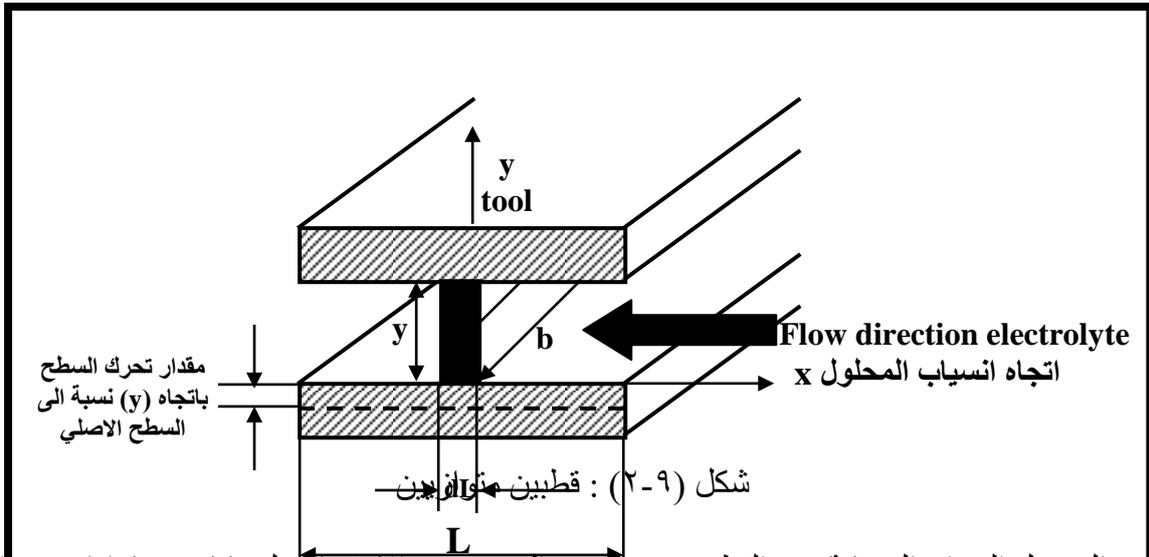
شكل (٢-٨) : أمثلة على اجزاء مُشغلة بعد عملية ازالة الحواف (deburing) باستخدام عدة قطع ثانية [١٠]

تختلف تقنية التشغيل الكهروكيميائي الثابت (Static machining) عن بقية التطبيقات الاخرى ، يكون معدل التعرية لعدة قطع مساوية للصفر أي ان حركة عدة القطع باتجاه المشغولة تكون معدومة ، وهذا يؤدي الى زيادة عرض الفجوة بين العدة والمشغولة وكنتيجة لذلك سوف تنخفض كثافة التيار (C.D) ويقل معدل ازالة المعدن ويمكن توضيح ذلك كالآتي [٤] .

٢-٥-١:تغير المسافة بين القطبين (عرض الفجوة gab width) مع زمن التشغيل

Change the Gab Width with Machining Time

الشكل (٢-٩) يوضح قطبين متوازيين يوصل بينهما بمسافة وهي عرض الفجوة والتي يمر منها المحلول الاليكتروليتي ، القطب الأعلى يمثل عدة القطع والقطب الاسفل يمثل المشغولة ، تتحرك عدة القطع بمعدل تغذية (feed rate) وسرعة ثابتة (constant velocity) وباتجاه (y) عمودي على سطح القطب الآخر .



لغرض التوصل الى ان المسافة بين القطبين تتغير مع الزمن ، تم الاعتماد على قانون فاراداي في ازالة المعدن وذلك بافتراض المسألة باتجاه واحد (One Directional) ، وان المسافة بين سطحي القطبين (الأنود والكاثود) هي (y) ، وبأخذ شريحة صغيرة من عرض الفجوة بسمك (dl) وارتفاع (y) ويعرض (b) ، وباستخدام معادلة رقم (٢-٢) وبافتراض ان المعدن نقي (Pure Metal) . فعند تسليط الفولتية على القطبين تحدث ازالة المعدنية ، وهذا يؤدي الى تحرك سطح المشغولة نسبة الى السطح الأصلي [٢٣] .
 باشتقاق معادلة (٢-٢) نسبة الى الزمن نحصل على :

$$\frac{dM}{dt} = \frac{dl}{Z * F / A} \quad \text{g/sec.} \quad \dots\dots\dots(٢ - ٦)$$

$$\dots\dots\dots(٢ - ٧) \rho = \frac{M}{V} \quad \text{وبما ان الكثافة} = \frac{\text{الكتلة}}{\text{الحجم}}$$

$$v = bdLy \dots\dots(٢-٨)$$

وان حجم شريحة عرض الفجوة (v) = (bdLy) بتعويض معادلة (٢-٨) في (٢-٧) نحصل على :

$$M = \rho * (b * dL * y) \dots\dots\dots(٢-٩)$$

$$\frac{dM}{dt} = \rho * bdL * \frac{dy}{dt} \quad \text{باشتقاق معادلة (٢-٩)}$$

$$I = \frac{V}{R} \dots\dots\dots(٢-٢٠) \quad \leftarrow \frac{\text{الفولتية}}{\text{المقاومة}} = \text{التيار} \leftarrow [V]$$

ومن قانون اوم [V] = التيار * المقاومة

وبما ان المقاومة (R) = [V] / طول المقاومة (y) / مساحة عرض الفجوة (a) * ثابت التوصيلية الكهربائية للمحلول (k)

$$\therefore R = \frac{y}{k * a} \dots\dots\dots(٢-١١)$$

$$a = (bdL)$$

وبتعويض معادلة (٢-١١) في (٢-١٠)

$$\Rightarrow I = \frac{v * k * a}{y} \dots\dots\dots(٢-١٢)$$

$$dI = \frac{v * k * b * dL}{y} \dots\dots\dots(٢-١٣) \quad \leftarrow \text{وباشتقاق معادلة (٢-١٢)}$$

ومن خلال معادلة (٢-٦) و (٢-٩) و (٢-١٣) يتم الحصول على

$$dI = \frac{v * k * b * dL}{y} = \rho * bdL * \frac{Z * F}{A} * \frac{dy}{dt}$$

$$\therefore \frac{dy}{dt} = \frac{v * k * A}{\rho_m * y * F * Z} \dots\dots\dots(٢-١٤)$$

$$\lambda = \frac{v * k * A}{\rho_m * Z * F} \quad \text{على فرض ان المقدار}$$

$$\therefore \frac{dy}{dt} = \frac{\lambda}{y} \dots\dots\dots(٢-١٥)$$

وبما ان عدة القطع تتحرك بمعدل تغذية وسرعة ثابتة لذلك فان معادلة (٢-١٥) تصبح :

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\lambda}{y} - f \dots\dots\dots(٢-١٦)$$

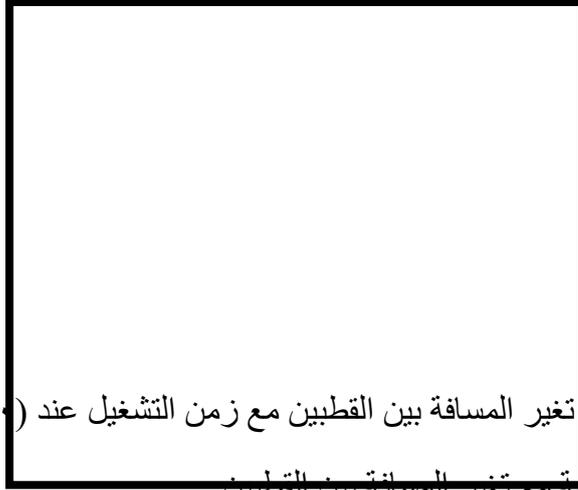
هذه المعادلة تشير الى تغير قيمة المسافة بين القطبين (y) بوجود التغذية (f) . وفي حالة كون التغذية مساوية للصفر (f=٠) بعملية التشغيل الكهروكيميائي الثابت فان المعادلة تصبح :

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\lambda}{y}$$

اذا كان عرض الفجوة الابتدائي (initial gap) = y_٠ فان حل معادلة (٢-١٥) يكون :

$$y = \sqrt{2\lambda t + y_0^2} \dots\dots\dots (2-17)$$

ومن معادلة (2-17) نجد ان الـ (gab) يزداد بزيادة زمن التشغيل وكما في شكل (2-10) الذي يوضح زيادة الـ (gab) مع الزمن لقيم مختلفة من (λ) .



شكل (2-10) : تغير المسافة بين القطبين مع زمن التشغيل عند ($f=0$) [23]

2-5-2: تغير كثافة التيار المسلطة مع تغير المسافة بين القطبين

تنخفض كثافة التيار المسلطة بازدياد المسافة بين القطبين وكما في معادلة (2-18) :

$$C.D(J) = \frac{J_0}{\sqrt{1 + \frac{2\lambda}{y_0^2} * t}} \dots\dots\dots (2-18)$$

$$J_0 = k \frac{v_0 - \Delta v}{y_0} \dots\dots\dots (2-19)$$

حيث ان

وكنتيجة لانخفاض كثافة التيار المسلطة سوف يقل معدل ازالة المعدن واذا كان مجهز القدرة يعمل بحالة تيار ثابت ، فان الفولتية تنخفض مع زمن التشغيل ويكون معدل ازالة المعدن ثابت تقريباً [10] .

2-6: تصميم عدد القطع (Cutting Tool Design)

تختلف عملية (ECM) عن طرق التشغيل التقليدية ، حيث ان كل شكل يُراد تصنيعه يحتاج الى عدة قطع خاصة فالثقب الدائري يحتاج الى عدة قطع ذات مقطع دائري والثقب المربع يحتاج الى عدة ذات مقطع مربع ، والشكل غير المنتظم (الكونتور Contour) يحتاج الى عدة غير منتظمة وغيرها ، لذلك لا بد من الدقة في تصنيع العدة وخاصة في تصنيع الأشكال المعقدة ، وهناك جانبين رئيسيين لتصميم عدة القطع [11] .

1. الجانب الأول : يتعامل مع إيجاد شكل عدة القطع المناسبة بظروف تشغيلية مُثلى لانتاج المشغولة المناسبة (أي التكهن بشكل المشغولة التي يمكن الحصول عليها بواسطة عدة القطع عند الظروف المُثلى) [26] .

2. الجانب الثاني : يتعامل مع تصميم وتصنيع عدة القطع مع الأخذ بنظر الاعتبار إختيار المادة المناسبة للعدة ، التصميم المناسب لانسياب المحلول الايكتروليتي ، العزل الجيد لأجزاء العدة لمنع القطع المفرط (Over cutting) في المناطق غير المرغوبة والمقاومة المطلوبة لعدة القطع [27] .

2-6-1: متغيرات التصميم Design Changes

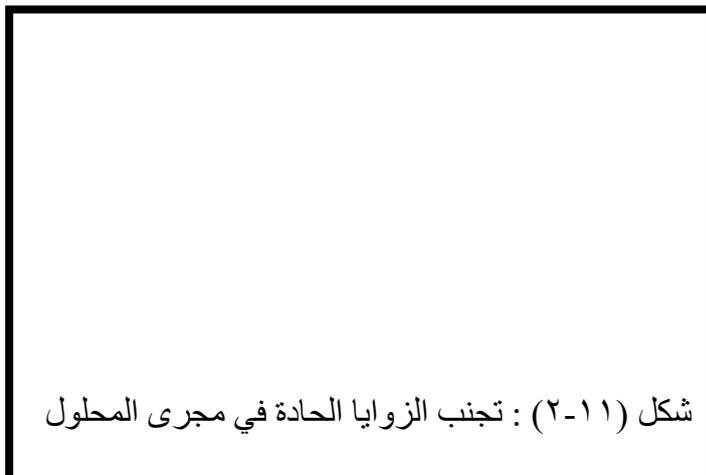
ان كل شكل من اشكال عدد القطع له مشاكل خاصة ، ولا بد من التعامل معها بدقة [٣] ، منها حدوث ظاهرة الخواء (Cavitation) والركود (Stagnation) وهذه بدورها تؤدي الى رداءة السطح ، هذه المشاكل متعلقة بعدة امور وهي :

١. تصميم انسياب المحلول
٢. تصميم عزل العدة [٢٣]

٢-٦-١-١: تصميم انسياب المحلول Design for Electrolyte Flow

ان انسياب المحلول بشكلٍ كافٍ بين العدة والشغلة ضروري لحمل الحرارة المتولدة ونواتج التشغيل بعيداً ليساعد عملية التشغيل عند معدل التغذية المطلوب ، ولانتاج سطح جيد يجب تجنب كل من ظاهرة الخواء (Cavitation) والركود (Stagnation) [٢٣] .

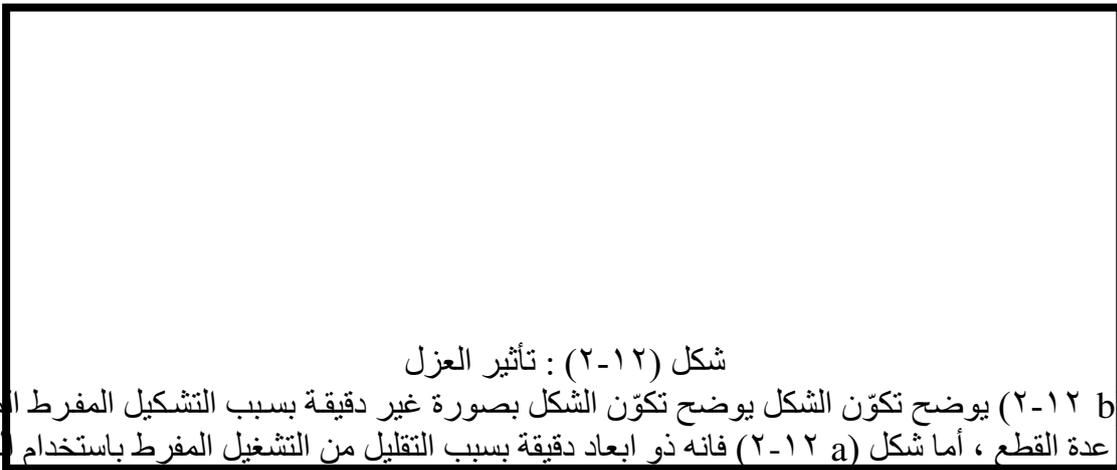
ان وجود الزوايا الحادة يسبب اعاقه لجريان المحلول وهذا بدوره يؤدي الى عدم انسياب المحلول بشكلٍ كافٍ وبالتالي يسبب ظاهرة الخواء والركود وللتخلص من هذه المشاكل لابد من تجنب الزوايا الحادة (sharp corners) في مجرى المحلول وجعلها مدورة وبقطر اقل من (٠.٨ - ٠.٧ mm) وكما في شكل (٢-١١) :



شكل (٢-١١) : تجنب الزوايا الحادة في مجرى المحلول

٢-٦-١-٢: تصميم العازل Design of Insulation

العازل (Insulation) : هو عبارة عن مادة غير موصلة للكهرباء ، وتكون اما عضوية (Organic) مثل الايبوكسي (Epoxy) أو غير عضوية (Inorganic) مثل الطلاء بالخرزف (Porcelain enamel) ، وتستخدم في عزل عدد القطع لمنع مرور تيار التشغيل الى المنطقة غير المرغوب في ازالتها [٣] . يجب ان يكون العازل متيناً (tough) ويثبت بصورة جيدة على سطح العدة ، ويمكن تحقيق ذلك بواسطة ضبط تقوية المادة البلاستيكية الصلبة بالعدة بمثبت مثل راتنجات الايبوكسي والبراعي البلاستيكية ، كما يجب ان لاتتعرض حدود طبقة العزل الى سرعة المحلول العالية وذلك لأنها قد تسبب تمزق الطبقة المصمغة (المتينة) ، كما يُستخدم العازل للحفاظ على جوانب الثقوب مستقيمة ومتوازية وكما في شكل (٢-١١) [٢٠] .



شكل (٢-١٢) : تأثير العزل

شكل (٢-١٢ b) يوضح تكوّن الشكل يوضح تكوّن الشكل بصورة غير دقيقة بسبب التشكيل المفرط المقابل لأوجه عدة القطع ، أما شكل (٢-١٢ a) فإنه ذو ابعاد دقيقة بسبب التقليل من التشغيل المفرط باستخدام العازل وبالتالي الحفاظ على جوانب الشكل مستقيمة ومن الأمثلة ايضاً شكل (٢-١٣) [٢٣] .

شكل (١٣-٢): التيارات الشاردة عند عدم عزل العدة والتي تسبب القطع المفرط [٢٣] لغرض نجاح عملية التشغيل ودقتها يجب ان يبقى العازل مضبوطاً وغير تالف على العدة ، لأن تلف العازل يسبب عدم دقة المشغولة (w.p) وقد يسبب تلف العدة ، لذلك يجب ان تكون المادة العازلة متينة ومثبتة جيداً على العدة كما ان فاعلية المادة العازلة (Effectiveness of Material Insulation) تعتمد على كمية الطلاء ، مادة الطلاء وعلى دقة الطلاء [٢٨] .

٢-٧: الظروف التشغيلية في عملية التشغيل الكهروكيميائي Machining Condition in ECM

هناك مجموعة من العوامل (Parameters) تؤثر تأثيراً مباشراً على عملية ECM [٣] ، فهي تؤثر على منتجات العملية مثل دقة أبعاد المنتج ، الانهاء السطحي (Surface finish) ومعدلات الازالة وغيرها وبناءً على ذلك فان فهم هذه العوامل أمر ضروري ومن هذه العوامل [١٢] .

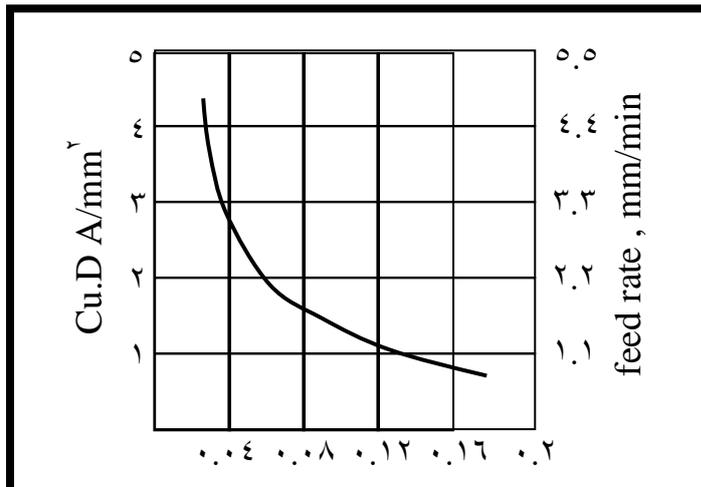
١. الفولتية المسلطة بين عدة القطع والمشغولة .
٢. ضغط المحلول الداخل والخارج او معدل الجريان ودرجة حرارته .
٣. تركيز المحلول الاليكتروليتي .
٤. معدل تغذية التشغيل ، هذا العامل لامجال لذكره ، وذلك لأنه تم استخدام التشغيل الكهروكيميائي الثابت [١٠] .

٢-٧-١: الفولتية المسلطة Applied Voltage

حتى تتم عملية الازالة المعدنية ، فان فرق جهد مستمر (D.C) سوف يسلط على كل من العدة والمشغولة ، وهذه الفولتية تكون منخفضة وبحدود معينة ما بين (V ٣٠ - ٥) [١٥] ، وبذلك فان التباين الشديد في فولتية التشغيل سيؤثر على القطع المفرط (Overcut) ، حيث ان الفولتية العالية تسبب قطع مفرط كبير والفولتية المنخفضة تسبب قطع مفرط قليل وللحصول على افضل دقة لابد ان يكون التغيير بالفولتية طفيف قدر الامكان [١٢] .

ومن الجدير بالذكر ان هناك علاقة وثيقة ما بين الفولتية المسلطة وعرض الفجوة (gab width) [٢٣] ، كما ان تطبيق عملية (ECM) قاد الى استنتاج ان عدم دقة التشغيل تكون متناسبة مع عرض الفجوة (gap) ولتحسين دقة المنتج يجب ان يكون عرض الفجوة صغيراً قدر الامكان مع ملاحظة عدم قطع الدائرة الكهربائية بسبب انسداد الفجوة بمخلفات التشغيل . ان ثبات عرض الفجوة ضروري لتقليل عدم انتظامية التوصيلية الكهربائية والعوامل الفيزيائية الاخرى مثل درجة الحرارة والضغط وسرعة الجريان ذات الاهمية في عملية الازالة [١٠] .

تتم السيطرة على عرض الفجوة بواسطة السيطرة على معدل التغذية ، فعندما يزداد معدل التغذية ، عرض الفجوة سوف يقل وتنخفض مقاومة المحلول ، وهذا يؤدي الى كثافة تيار عالية وفولتية منخفضة ومعدل ازالة عالي وبالعكس ، هذا بالنسبة لعدة القطع المتحركة وكما موضح بشكل (١٤-٢) .



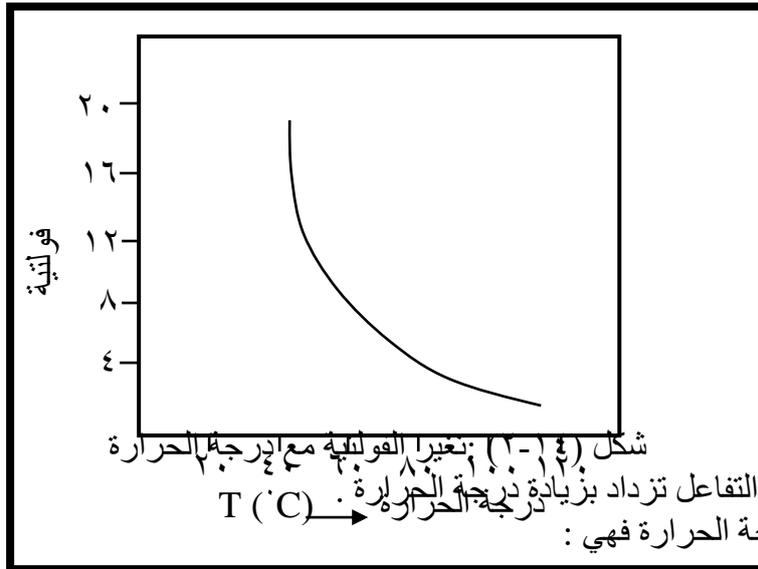
شكل (٢-١٣): العلاقة بين كثافة التيار ومعدل التغذية وعرض الفجوة (gap) [٧] .
أما بالنسبة للعدة الثانية فقد تم توضيحه آنفاً .

٢-٧-٢: ضغط المحلول الداخلى ودرجة الحرارة

يعتبر ضغط المحلول دالة لمعدل الجريان ، فكلما يزداد الضغط يزداد معدل الجريان ، كما ان معدل الجريان له حدود معينة فعند الخروج عنها تنجم بعض المشاكل والتي تتمثل بحدوث ظاهرة الخواء (Cavitation) نتيجة لتبخر المحلول وخصوصاً في مناطق تعوّ الاتجاه والمناطق التي يسود فيها الضغط المنخفض والذي يساعد على حدوث الخواء عند استخدام كثافة تيار عالية ، وهذا يؤثر على طبيعة السطح المُشغّل وعدم استقرارية عملية التشغيل [١١] .

ان اختلاف درجة حرارة المحلول عند دخوله وخروجه من عرض الفجوة ، يُعتبر عاملاً مهماً ، لأن هذا الاختلاف يؤدي الى خفض المقاومة النوعية للمحلول ممثلاً محلول (١٠٪ NaCl) تنخفض مقاومته بمقدار ٥٠٪ عند اختلاف درجة الحرارة وهذا التغيير يؤثر على معدل الجريان وضغط المحلول ، كما يجب تجنب التسخين المفرط للمحلول والذي يؤدي الى التبخر في منطقة التشغيل وبالتالي رداءة السطح المنتج ، كما يمكن استخدام المحلول الساخن ، وله مميزات ومنها :

١. عند ارتفاع درجة الحرارة تزداد تفاعلات القطب وتقل الفولتية المطلوبة وكما في شكل (٢-١٤) [١٢].



٣. لزوجة المحلول الاليكتروليتي وتعتبر المقاومة الاومية هي المصدر الرئيسي ، هذه المصادر تعتبر رافعات اضافية لدرجة الحرارة [٢٤] . ولخفض درجة الحرارة تستخدم أقطاب ذات توصيلية حرارية عالية ليساعد على تسريب درجة الحرارة .

٢-٧-٣: تركيز المحلول الاليكتروليتي Concentration of Electrolyte

ان معدل تشغيل المواد كهروكيميائياً يعتمد على كثافة تيار التحلل الكهربائي وحسب قوانين فاراداي وان اعلى كثافة تيار تكون عند اقل مقاومة اومية للمحلول خلال الفجوة (gap) ، وان التشغيل بفجوة صغيرة جداً يؤدي الى تقليل المقاومة الاومية وبالتالي كثافة تيار عالية ولكن يكون محدداً بعدة عوامل وهي :

١. حجم المترسبات (المخلفات) .

٢. متانة القدرة والشغلة .

٣. توزيع انسياب المحلول [١٠] .

ان موصلية المحلول تتحدد بكمية المادة الموصلة المذابة فيه ، فكلما تزداد الكمية المذابة (التركيز) تزداد الموصلية وبالتالي فان المحلول ذو التوصيلية الجيدة يسمح بالتشغيل بمعدل تغذية عالٍ (كثافات تيار عالية)

باستخدام عرض فجوة مناسب وفولتية معتدلة [١٠] ، أي ان المحلول المركز يسبب انخفاض المقاومة الاومية للمحلول ومن مساوي المحاليل المركزة هو تبلور الأملاح خارج المحلول ويؤدي الى اعاقه المساحات الضيقة في المشغولة ، اما المحاليل المخففة فهي مفيدة في حالات معينة ، فهي مفيدة بالنسبة لانتهاء السطحي للمشغولة وكذلك تُستخدم في حالة الفولتية العالية كما تستخدم مع عرض الفجوة الصغير بدلاً عن الفولتية المنخفضة والمحلول العالي التركيز [٨] .

إضافة الى تأثير التركيز على الموصلية ، فان هناك عوامل تسبب تغير الموصلية وهي ارتفاع درجة الحرارة ، تحرير فقاعات الهيدروجين (H_2) وتكوين المترسبات وهذا العامل تأثيره قليل ، جميع هذه العوامل تؤدي الى عدم انتظامية كثافة التيار على طول انسياب المحلول بتأثيرها على الموصلية [٢٣] .

٨-٢: خشونة السطح المنتج بعملية (ECM)

تتم عملية التشغيل الكهروكيميائي بدون وجود اتصال مباشر بين العدة والمشغولة مختلفة بذلك عن طرق التشغيل الميكانيكية [٢] ، وكذلك بدون توليد حرارة عالية في منطقة التشغيل ، لذلك فان سطح المعدن لا يتعرض الى التشويه الميكانيكي (Mechanical Distortion) ، اجهادات الضغط (Comp. stresses) ، الشقوق (Cracks) والتشوه الحراري (Thermal Distortion) ، وهذا يعود الى كون السطح الناتج جيد وذو خشونة قليلة وتكون ما بين ($0.1 - 2.0 \mu m$) عند الظروف المثالية [٥] .

تختلف خشونة السطح من معدن لآخر ، فمثلاً السبائك التي اساسها نيكل (Nickel base) والتي اساسها كوبلت (Cobalt base) وذات اساس فولاذ مقاوم للصدأ (st. steel) تقترب خشونتها من ($0.1 - 0.5 \mu m$) ، أما التي اساسها حديد (Iron) وفولاذ (steel) تكون ما بين ($2 - 0.5 \mu m$) بعد تشغيلها كهروكيميائياً [١٢] .

تعتمد خشونة السطح على عدة عوامل ومنها ، درجة الحرارة ، تركيب المحلول الاليكتروليتي ، كثافة التيار ، بنية وتركيب مادة المشغولة [٣] اضافة الى ذلك تأثير المعادلة الحرارية حيث تعتبر كعامل يستخدم لتحسين خشونة السطح قبل التشغيل [٢٣] .

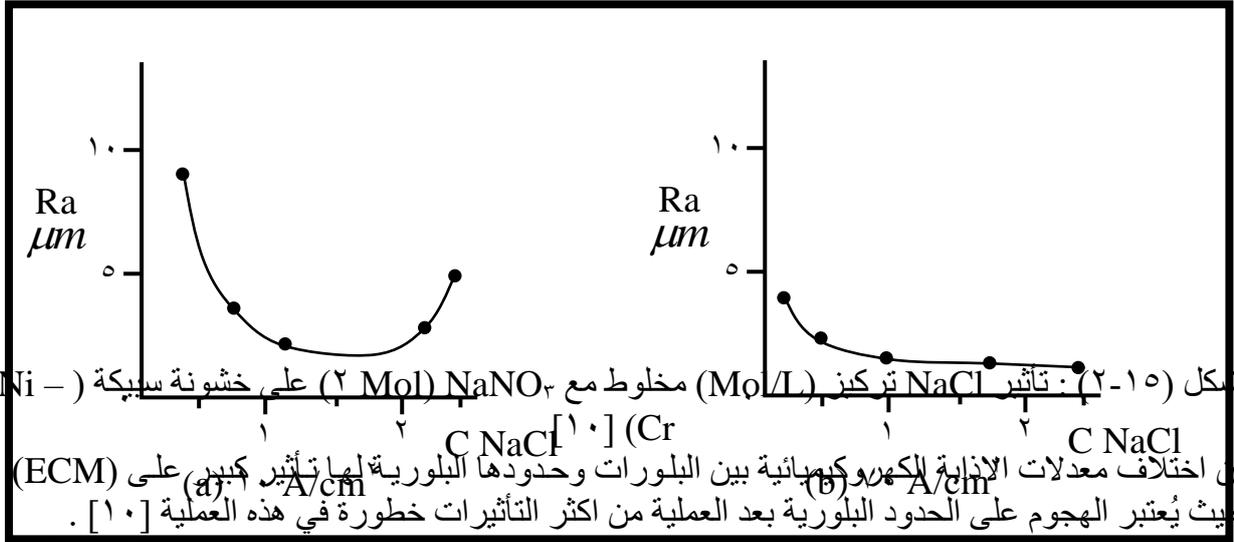
تتميز المعادن المسبوكة بكون سطحها الناتج بعد عملية (ECM) خشن ، لأن هذه السبائك تتكون بنيتها البلورية من مركبات مختلفة او اطوار وهذه المركبات والاطوار مختلفة في الحجم البلوري والشكل والخواص الكهروكيميائية ، حيث ان الحجم البلوري له تأثير على خشونة السطح ، فعندما يكون الحجم البلوري كبير يكون السطح الناتج خشن وبالعكس ، وتتم معالجة ذلك باجراء المعاملة الحرارية لتصغير الحجم الحبيبي [١٠] ، ولقد اجريت دراسات عديدة في هذا المجال ، ومن هذه الدراسات ماتوصل اليه العالمان (V. Radhakrishna , O.V. Krishnaiahchety) بصدد تأثير الحجم الحبيبي (Grain Size) وسرعة المحلول (velocity) على خشونة السطح ، فلقد وُجد ان كبر الحجم الحبيبي يؤدي الى خشونة السطح وكذلك وُجد انه كلما تزداد سرعة المحلول تقل خشونة السطح وبالعكس [٣٠] ، حيث عند سرعة أكبر من (10 m/s) يصبح تأثير الحجم الحبيبي غير مهم على خشونة السطح [١٠] .

كما ان لجهد القطب تأثيراً على الخشونة (Roughness) ، حيث يُعرف بانه فرق الجهد الموجود بين نقطة موجودة على سطح المعدن (القطب) وأقرب نقطة في المحلول الاليكتروليتي وهو يعتمد على كل من القطب والمحلول [٢٣] .

فالاطوار ذات الجهد المنخفض تتحلل كهربائياً بسرعة ، اما الاطوار ذات الجهد العالي فتتحلل ببطئ ، وتنزل الى المحلول [٢٣] . وبهذا فان تأثير جهد القطب والحجم البلوري يكون مباشراً على الخشونة .

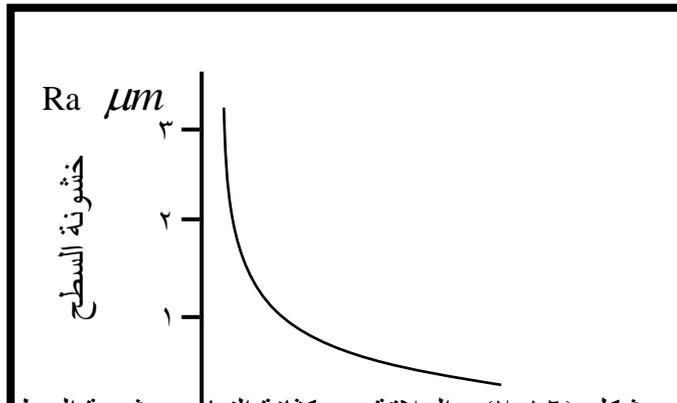
كما ان اختلاف ميل مكونات السبيكة الى تكوين طبقة الخمولية [١٠] (passivation film) وهي الطبقة الاوكسيدية الرقيقة جداً التي تتكون في الهواء او عند غمر المعدن في محلول حامضي والتي تمكّن بعض المعادن من مقاومة التآكل [٣] ، اثناء التشغيل تؤثر على خشونة السطح [١٠] ، فمثلاً يتحلل احد الأطوار او المركبات اسرع من الثاني عندما يكون ميله للخمولية قليل ويمكن اهماله ، اما الطور او المركب الثاني فيكون خاملاً ولا يتحلل وهذا يؤثر على الخشونة [١٠] ، ولقد وُجد انه يمكن تقليل خشونة السطح للسبائك التي تتكون من اكثر من طورين والمختلفة في قابلية الخمولية باستخدام محاليل تتكون من مركبين ، وكمثال على ذلك سبيكة نيكل - كروم الفائقة (Ni - Cr super alloy) وفيها طورين ، الاول يمثل اساس السبيكة ويكون على شكل محلول جامد (Ni - Cr) والثاني يمثل طور (g') ، يذوب هذين الطورين بجهود مختلفة في كلا

المحلولين (NaNO_3 ، NaCl) ، اما عند استخدام محلول موصل يتكون من هذين الملحيتين ، فان جهود الازابة تكون قريبة أي ان الاختلاف يكون قليلاً وهذا يقود الى انخفاض الخشونة ، وكما في شكل (٢-١٥) الذي يوضح تأثير خليط NaNO_3 ، NaCl على سطح سبيكة نيكل - كروم .



شكل (٢-١٥) : تأثير NaCl تركيز (Mol/L) مخلوط مع NaNO_3 (٢ Mol) على خشونة سبيكة (Ni -) (a) ، ان اختلاف معدلات الازابة الكهروكيميائية بين البلورات وحدودها البلورية لها تأثير كبير على (ECM) ، حيث يُعتبر الهجوم على الحدود البلورية بعد العملية من اكثر التأثيرات خطورة في هذه العملية [١٠] . كذلك تؤثر المعاملة الحرارية على خشونة السطح من خلال تصغير الحجم الحبيبي ومن الامثلة على ذلك ، سبائك التيتانيوم والفولاذ الكاربوني (٠.٤٢ %) فعند اجراء معاملة تصغير الحجم الحبيبي يؤدي ذلك الى انخفاض الخشونة .

ومن العوامل الاخرى المؤثرة على الخشونة ، هي كثافة التيار فكلما تزداد كثافة التيار تنخفض خشونة السطح وبالعكس حيث يؤدي الى تنقر السطح [٢٢] وكما في شكل (٢-١٦) .



شكل (٢-١٦) : العلاقة بين كثافة التيار و خشونة السطح [١٠]

كما ان مدى الفولتية المستخدم في (ECM) كما هو معرّف ما بين (٣٠ - ٥٠ V) وعند تسليط فولتية اعلى من هذا المدى يعطي سطحاً خشناً أقل من هذا المدى يستخدم للتشغيل النهائي [٣٢] . ومن البحوث التي قُدمت في هذا المجال ، هو البحث الذي قدمه العالم في سنة ١٩٧٨ (V. RAD HAKRISHNAN, O.V.K.) ، فلقد توصلوا الى ان خشونة السطح تنخفض عند ازدياد كثافة التيار وكذلك تنخفض خشونة السطح عند زيادة تركيز المحلول الاليكتروليتي [٣٤] .

كما ان زيادة معدل التغذية والذي يصاحبه زيادة كثافة التيار والانحدار الشديد في منحنى الجهد وزيادة زمن التشغيل يؤدي الى تحسن الانتهاء السطحي [٣] ، وللحصول على سطح لماع تستخدم مثلاً كثافة تيار عالية

$$\text{تقريباً } \left(100 \frac{A}{cm^2} \right) [٣٥] .$$

ولقد وُجد ان زمن التشغيل يؤثر على خشونة السطح ، فمثلاً وجد العالمان (١٩٧٨) (V.R , O.V) عند دراستهما لتأثير الزمن على تعديل سطح الانود ، انه بمرور زمن التشغيل وبمعدل تغذية منتظم سوف تقل

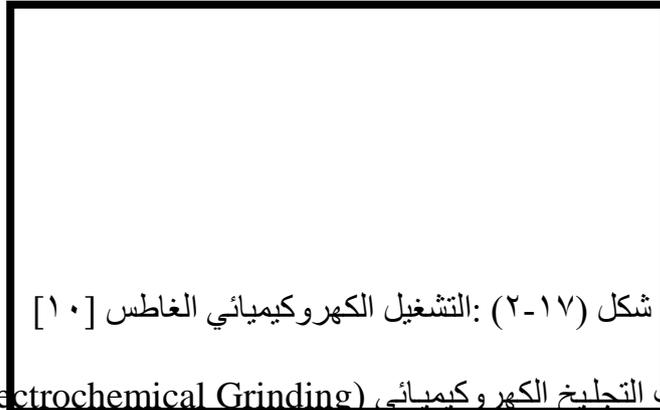
خشونة السطح [٣٦] . كما يؤثر معدل الجريان على خشونة السطح ، فكلما يزداد معدل الجريان يؤدي الى انخفاض خشونة السطح [٣٢] .

ومن العوامل الاخرى التي تؤثر على خشونة السطح هي تحرر غاز الهيدروجين اثناء التشغيل ، فعندما يوجد (H_2) بالمحلل الموصل ، يعمل على انخفاض الموصلية النوعية للمحلل وهذا التأثير يزداد بزيادة (H_2) وبالتالي يعمل على تدني الانهاء السطحي أي زيادة الخشونة [٣٧] .

علاوة على ذلك ، وُجد ان فتحة تجهيز المحلول الاليكتروليتي لها تأثير على تكوّن المنطقة المدببة المقابلة للفتحة في عمليات الثقب غير النافذة ، وبذلك يكون السطح غير مستوٍ بسبب وجود هذه المنطقة ، ولقد وجد العلماء (G.K ، V.J ، P.S) أنه كلما قلّ قطر فتحة التجهيز ، قلّ حجم الرأس المدبب (Spike) المتكون على السطح [٣٥] .

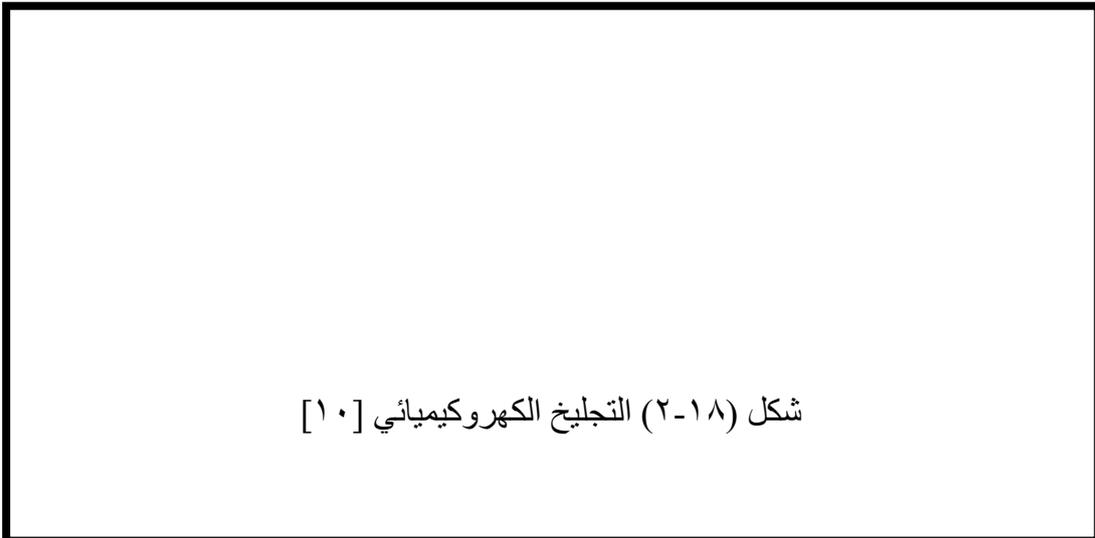
٢-٩: تطبيقات على عملية ECM

تُطبق عملية (ECM) في كثير من المجالات مثل صناعات الفضاء (Aerospace) ، تصنيع أجزاء محركات السيارات (Automotive) ، الاليكترونيات (Electronics) ، ريش التوربين (Turbine blades) ، أغطية المكائن (Engine Casing) ، التروس (Gears) ، صناعة القوالب ، الاجزاء الدقيقة في المفاعلات النووية التي تحتاج الى تشغيل معادن صلبة جداً وبدقة [٦] ، في عمليات الاستنساخ (Duplicating) ، التنقيب (Drilling) ، عمليات التشغيل الغاطس في تصنيع القوالب ، تصنيع الممرات (Passages) وغيرها [١٠] ، شكل (٢-١٧) يوضح التشغيل الغاطس (Sinking)



شكل (٢-١٧): التشغيل الكهروكيميائي الغاطس [١٠]

وكذلك تستخدم في عمليات التخليخ الكهروكيميائي (Electrochemical Grinding) باستخدام عدة قطع تتحرك حركة دورانية ، شكل (٢-١٨) يوضح ذلك .



شكل (٢-١٨) التخليخ الكهروكيميائي [١٠]

وكذلك تستخدم في توسيع الثقوب وازالة الحواف باستخدام عدة قطع ثابتة [٦].

شكل (٢٠-٢): يوضح بعض الاشكال المشغلة بواسطة (ECM) [١٧]

٣-١: مقدمة Introduction

لغرض إجراء التجارب الخاصة بمنظومة التشغيل الكهروكيميائي وما يتعلق بالسيطرة على الظروف التشغيلية لهذه المنظومة من كثافة التيار (Current Density) ، فولتية (Voltage) ، سرعة (Velocity) ، ضغط (Pressure) ومعدل جريان وغيرها من الظروف ، تطلب تصميم منظومة خاصة بهذا المجال . ان طبيعة عمل مثل هذه المنظومات يتطلب استخدام محاليل اليكتروليتيية مختلفة مثل الحوامض والقواعد والمحاليل الملحية ، لذلك كان لا بد من اختيار مواد هندسية تقاوم التآكل والفعل الكيميائي لهذه المحاليل ، فلقد تم اختيار مواد بلاستيكية كمادة بوليمر فانيل كلورايد (P.V.C) وكانت تشكل الجزء الأكبر من المواد المستخدمة في تصميم المنظومة ، كما استخدمت معادن مقاومة للتآكل كمعدن البراص (Brass) وخاصة في صناعة الاقطاب (عدد القطع) .

ان تطبيقات التشغيل الكهروكيميائي كثيرة وواسعة الاستخدام ، فمنها ما يعتمد على كون عدة القطع متحركة بمعدل تغذية معينة ، مثل الثقب الكهروكيميائي (Electrochemical Drilling) والتشغيل الكهروكيميائي الغاطس (Electrochemical Sinking) وغيرها ، ومنها ما يعتمد على كون عدة القطع ثابتة ، أي ان معدل التغذية لعدة القطع = صفر ، وهو ما يسمى بالتشغيل الكهروكيميائي باستخدام عدة قطع ثابتة (ECM) (with stationary cutting tool) ، وهذه التقنية تستخدم في توسيع الثقوب (RADIUSING) ، ازالة الحواف (Deburing) وصل السطوح وغيرها . وفي هذا البحث تم استخدام هذه التقنية .

٣-٢: منظومة التشغيل الكهروكيميائي

تتكون منظومة التشغيل الكهروكيميائي وكما موضح بالشكل (٣-١) ، ومن هيكل مصنوع من مادة بوليمرية مركبة مقاومة للتآكل ، ويتألف هذا الهيكل من حوضين أحدهما سفلي يعتبر كخزان للمحلول الاليكتروليتي ، ويوجد بجانبه قاعدة تثبت عليها المضخة (Pump) ، أما الحوض العلوي فيعتبر كحوض ثانوي تتجمع فيه مخلفات التشغيل والتي تكون على شكل هيدروكسيدات وكلوريدات المعدن المُشغَّل والتي تُزال بعد التشغيل ، حيث يتم فصل المواد المترسبة من المحلول بواسطة فلتر (Filter) ورقي يوجد في اسفل الحوض . لقد تم تثبيت خلية التشغيل المتكونة من عدة القطع (Cutting Tool) والمشغولة (w.p) والمربوطة مع جهاز القدرة ذو التيار المستمر (D.C.) على قاعدة فولاذية مغطاة بمادة بلاستيكية وتكون القاعدة على شكل حرف (U) مقلوبة والتي تم ربطها باسفل الحوض العلوي .

شكل (٣-١) : منظومة التشغيل الكهروكيميائي

يتم رمي المحلول الأليكترووليتي (Electrolyte) من الحوض السفلي بواسطة المضخة (Pump) الى انبوب الدفع مروراً بصمام تنظيم الضغط فجهاز قياس الضغط (مانوميتر) فجهاز قياس معدل الجريان (فلوميتر) ومن ثم يمر بخلية التشغيل ، حيث يكون محملاً بالمخلفات كالهيدروكسيدات والكلوريدات والتي تستقر في اسفل الحوض العلوي وبواسطة الفلتر الورقي يتم فصل هذه المخلفات وبعدها يرجع المحلول الأليكترووليتي الخالي من المترسبات الى الحوض السفلي وهكذا تستمر دورة المحلول .
يُنظف الفلتر من المترسبات بواسطة تيار سريع من الماء بعد انتهاء كل عملية تشغيل كما يُبدّل المحلول بعد انتهاء كل عملية ، وفيما يلي تفصيل للمكونات الرئيسية للمنظومة .

٣-٢-١: خلية التشغيل الكهروكيميائي ECM Cell

شكل (٣-٢) يوضح خلية التشغيل الكهروكيميائي والتي تتكون من قطبين ، احدهما يُربط الى القطب السالب لمجهاز القدرة (D.C.) ويمثل عدة القطع (Cutting Tool) ويسمى بقطب الكاثود (Cathode) ، وهو اسطواني الشكل غير مجوف مثبت على القاعدة الفولاذية المغطاة بمادة بلاستيكية ، وقد صُنِعَ من معدن اليراص Brass (٣٥% Zn , ٦٥% Cu) وتم تصميمه حسب القياسات المطلوبة ، وتوجد فيه ترتيبية لمرور المحلول الأليكترووليتي التمسح بمروره بينه (قطب الكاثود) وبين القطب الآخر (الأنود) وخلال مسافة صغيرة ما بين القطبين والتي تسمى بسمك الفجوة (Gap Thickness) .

أما القطب الآخر فيمثل المشغولة (w.p) الذي يربط الى القطب الموجب لمجهاز القدرة (D.C.) ويسمى بقطب الأنود (Anode) ويكون على شكل اسطوانة مجوفة ، يتم تثبيت المشغولة (w.p) بحيث يكون قطب الكاثود بداخلها ويفصل بينها بمسافة تسمى بسمك الفجوة كما ذُكر . اما طريقة التثبيت فنتم باستخدام غطائين مصنوعة من مادة عازلة تسمى بالتفلون (Teflon) وذلك لمنع تماس القطبين وحدوث انقطاع الدائرة الكهربائية ، يكون احد القطبين سفلي توجد فيه ترتيبية لدخول المحلول والآخر علوي فيه ترتيبية لخروج المحلول .

عند تثبيت القطبين يجب مراعاة كون سمك الفجوة (Gap) ما بينهما متساوية على مساحة قطب الكاثود المواجهة لمساحة المشغولة (w.p) (المساحة المراد تشغيلها) وذلك لتساوي كثافة التيار المسالطة وبالتالي تجانس الازالة المعدنية والذي يقود الى سطح متجانس الخواص من حيث النعومة .

شكل (٣-٢) : يوضح خلية التشغيل الكهروكيميائي

٣-٢-٢: مُجهز القدرة Power Supply

تحتاج منظومات التشغيل الكهروكيميائي الى مجهز قدرة يُعطي تياراً مستمراً عالٍ (D.C) وبفولتية قليلة ويمتاز بثبوتية التيار والفولتية اثناء التشغيل .

وفي هذا البحث تم استخدام مجهز قدرة يعطي تياراً مستمراً (D.C) (١٠٠ A – ٠) وفولتية (٣٠ V – ٥) ، بحيث يتم التحكم بالتيار والفولتية معاً .

وبما انه تم استخدام تقنية القدرة الثابتة ، فبمرور زمن التشغيل ستزداد المسافة بين عدة القطع (Cutting Tool) والمشغولة (w.p) بسبب الازالة المعدنية ، وهذا يؤدي الى تقليل التيار المسلط وازدياد الفولتية وبشكل طفيف ، لذلك كان لابد من مراقبة قيمة التيار والفولتية اثناء التشغيل ولقد تم ذلك بواسطة الفولتمتر والامپتر المربوطات مع مجهز القدرة . يُربط مجهز القدرة بخلية التشغيل بحيث يوصل القطب السالب الى عدة القطع والقطب الموجب الى المشغولة (w.p) .

٣-٢-٣: المضخة Pump

تتميز المضخة المستخدمة بكون انبوبي السحب والدفع مصنوعان من مادة بوليمرية وهي بوليمر فانيل كلورايد (P.V.C.) وذلك لمقاومة التآكل .

تعطي هذه المضخة اقل ضغط بقيمة (0.5 bar) وبمعدل جريان ($14 \text{ m}^3/\text{hr.}$) وأعلى ضغط (1.5 bar) بمعدل جريان ($24 \text{ m}^3/\text{hr.}$) .

يُقاس ضغط المحلول الالكتروليتي بواسطة جهاز مانوميتر (Manometer) لقياس الضغط مصنوع من مادة البراص (Brass) ويقاس ضغط (0 - 3.5 bar) ، اما معدل الجريان فتم قياسه بواسطة جهاز فلوميتر

(Flowmeter) لقياس معدل الجريان ومدى قياسه ($8 - 24 \frac{\text{m}^3}{\text{hr.}}$) وهو ايضاً مصنوع من البراص .

أما الانابيب المستخدمة فكلها مصنوعة من مادة (P.V.C.) وتتحمل ضغط مقداره (10 bar) ، وفيما يلي صورة توضح منظومة التشغيل .

3.3: تصميم اداة القطع Design of Cutting Tool

يُعتبر تصميم عدة القطع من الامور المهمة في عملية التشغيل الكهروكيميائي ، وذلك لأن من مميزاته هو ان كل شكل يُراد تصنيعه يحتاج الى عدة قطع خاصة ، ويكون شكل العدة هو عكس ما مطلوب ، وبذلك فان كل ما موجود على العدة سوف يُعكس على المشغولة (w.p) ، فمثلاً لو كان سطح العدة خشناً (Rough) ، يكون السطح الناتج على المشغولة ايضاً خشناً لذلك لابد من الدقة في تصميم عدة القطع

تم اختيار معدن البراص (Brass) في تصنيع عدة القطع (C.T.) ، لمتانته ومقاومته للتآكل ولتوفره ، ولقد تم تصنيع نموذجين من عدد القطع وتم اختيار الابعاد لكلا النموذجين على اعتبارهما نماذج مختبرية ، بحيث تكون صغيرة قدر الامكان وذلك للسهولة ، ولقد أُجريت عملية التصنيع على ماكينة الخراطة وماكنة التفريز ، كما تم تحديد ابعاد النموذجين اعتماداً على القياسات المطلوبة للنماذج (المشغولة) المراد تصنيعها . وفيما يلي تفصيل عن تصميم عدتي القطع .

3-3-1: عدة القطع رقم (1) C.T.(1) Cutting Tool No.(1)

شكل (3-3) يوضح شكل وابعاد C.T.(1) ، تُثبت العدة على القاعدة الفولاذية بواسطة قاعدة خاصة مصنوعة من معدن البراص وهذه القاعدة تكون مثبتة على القاعدة الفولاذية بواسطة صامولة وهي مزودة بترتيبة لدخول المحلول حيث يتم ربط انبوب الدفع اليها من الاسفل ، كما تكون القاعدة المصنوعة من البراص ثابتة ، ويمكن ربط أي عدة قطع عليها .

شكل (٣-٣)

لقد تم مراعاة تجنب الحافات الحادة في تصميم (C.T.(١)) وذلك لأن لها تأثيراً سلبياً على طبيعة السطح المشغّل ، ولو لوحظ الشكل (٣-٣) لوجد ان منطقة التشغيل محددة وهي المنطقة (A) وهذه هي التي يُراد عكسها داخل اسطوانة قطب الانود (المشغولة) والتي تكون اسطوانية الشكل وتتميز بكونها ذات قطرين ، ففي المنطقة اعلى مجرى المحلول يكون قطرها (١٠ mm) والمنطقة التي بعدها بقطر (١٣.٥ mm) أما المنطقة الاخيرة فتكون بقطر (١٠ mm) ايضاً ، وطولها الكلي (٣٥ mm) وكان الهدف من هذا الشكل ، هو محاولة عكسه داخل قطب الانود الاسطواني (المشغولة) والذي يصعب تصنيعه بطرق التشغيل التقليدية وذلك لدقته . ويمكن توقع الشكل المعكوس بهذا الشكل .

شكل (٣-٤) : معكوس الشكل المطلوب

٣-٣-٢: عدة القطع رقم (٢) C.T.(٢) Cutting Tool No.(٢)

تشبه عدة القطع رقم (١) (C.T.(٢)) من حيث الشكل والتصميم ، ما عدا كون منطقة التشغيل الفعلية على شكل ترس ذو اسنان مستقيمة (Spar Gear) ، عددها خمسة اسنان وطول السند الواحد (١٥ mm) وعرضه (٤ mm) ولقد تم تصنيعه على ماكينة التفريز ، شكل (٣-٥) يوضح شكل وابعاد (C.T.(٢)) . اما الهدف الأساسي من هذا الشكل هو عكسه داخل قطب الانود الاسطواني (المشغولة) ، حيث ان هذا الشكل يصعب تصنيعه بالطرق التقليدية .

شكل (٣-٥) : شكل وأبعاد عدة القطع (C.T.(٢))

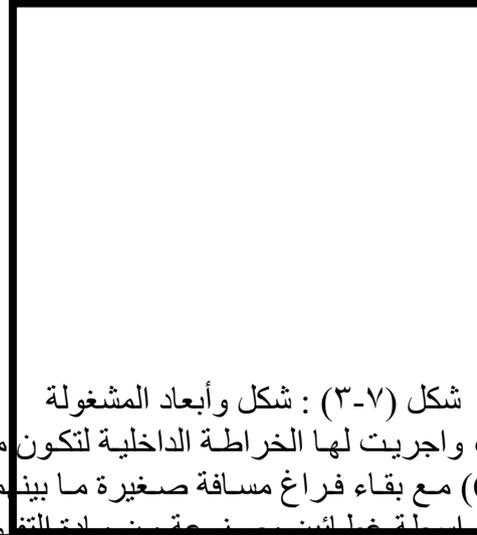
علاوة على ذلك ، في العدة (C.T.(٢)) تم استخدام مادة عازلة وهي مادة الايبوكسي وذلك لعزل المناطق غير المرغوب فيها وبالتالي الحصول على معكوس الشكل ، ويمكن توقع معكوس الشكل داخل قطب الانود الاسطواني كما يلي :

شكل (٣-٦) : معكوس الشكل المطلوب في عدة قطع (C.T.(٢))

حيث يُلاحظ من الشكل ، المنطقة المواجهة للجزء غير المعزول سوف تُعكس داخل الاسطوانة اما بقية المناطق فلا تتأثر .

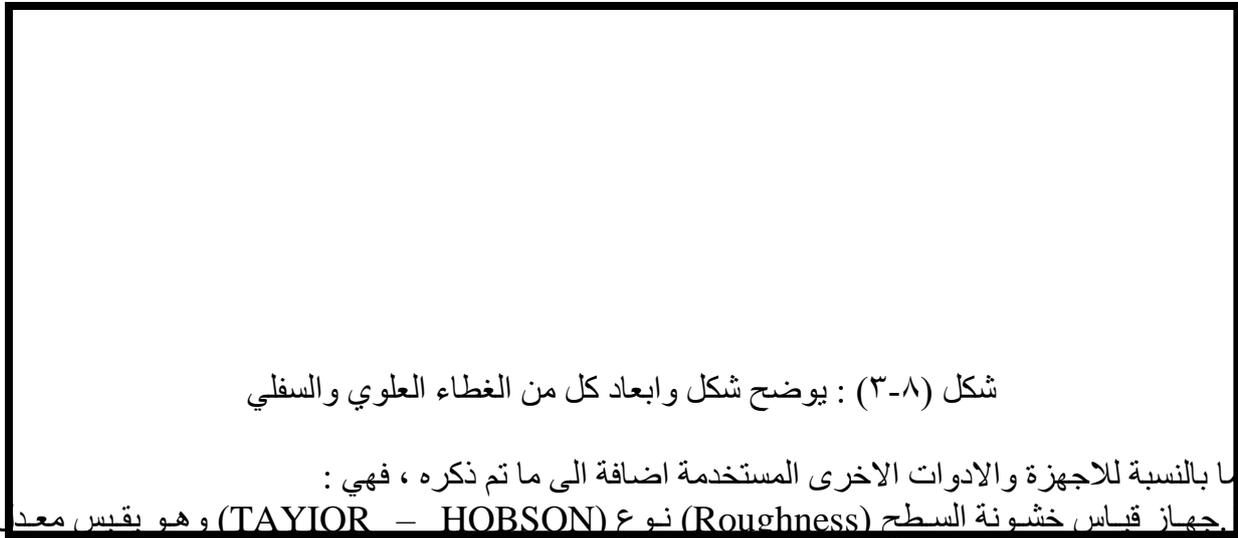
٣-٤: القطعة المراد تشغيلها (المشغولة w.p)

العينات المراد تشغيلها ، اسطوانية الشكل ومجوفة بطول (٣٥ mm) ، قطر داخلي (١٥ mm) وبقطر خارجي (٢١.٥ mm) وكما في شكل (٣-٧) .



شكل (٣-٧) : شكل وأبعاد المشغولة

صُنعت العينات بماكنة الخراطة ، واجريت لها الخراطة الداخلية لتكون مهيئة للتشغيل ، نُثبتت المشغولة (w.p) حول قطب الكاثود (C.T.) مع بقاء فراغ مسافة صغيرة ما بينهما وهي بسمك الفجوة (Gap Thickness) لمرور المحلول ، بواسطة خلائين من مادة التتاون العازلة ، احدهما علوي فيه ترتيبية لخروج المحلول والآخر سفلي فيه ترتيبية لتوجيه المحلول الداخل خلال سمك الفجوة (Gap) ، شكل (٣-٨) يوضح شكل وابعاد الغطائين .



شكل (٣-٨) : يوضح شكل وابعاد كل من الغطاء العلوي والسفلي

أما بالنسبة للاجهزة والادوات الاخرى المستخدمة اضافة الى ما تم ذكره ، فهي :
جهاز قياس خشونة السطح (Roughness) نوع (TAYLOR - HOBSON) وهو يقيس معدل الخشونة (Ra) حيث ان :

$$Ra = \frac{R_1 + R_2}{2}$$

٢. آلة قياس الاقطار والعمق نوع (Mitotoyo) بدقة (٠.٠٠٠٠٠ mm) .
٣. الميزان الحساس بدقة (٠.٠٠٠ g) نوع (Sartorus) .

٣-٥: التجارب التي أُجريت على منظومة التشغيل
يمكن توضيح طريقة اجراء التجارب بالنقاط التالية :
١. تثبيت عدة القطع (C.T.) المطلوبة في مكانها .

٢. تحضير النماذج (المشغولة) وحسب الابعاد المطلوبة وثبيتها حول عدة القطع في خلية التشغيل بعد ان توزن بالميزان الحساس .

٣. تحضير المحلول الاليكتروليتي وذلك باضافة الاملاح المناسبة لكل معدن وبوحدات تركيز غرام لكل لتر من الماء (gram/leter) مثلاً ملح (NaCl) ، ويتم خلط الملح مع الماء لتجانس تركيز المحلول .

٤. تسليط التيار والفولتية المناسبة للمعدن المراد تشغيله وبعد عملية التشغيل يتم إخراج النماذج (المشغولة) وتنظيفها وقياس نعومة السطح .

لقد تم استخدام ثلاثة معادن وهي الالمنيوم (Al) والبراص (Brass) والفولاذ (Steel) . والجدول التالي يوضح التركيب الكيميائي لكل منها .

أما بالنسبة لمحاليل التنظيف فيستخدم لمعدن الالمنيوم التيار السريع من الماء حيث يكون كافٍ لازالة الهيدروكسيد المتكون على سطحه وكذلك يستخدم لمعدن الفولاذ ، اما معدن البراص فيستخدم محلول (١٠٪ HCl) المخفف لغرض التنظيف .

جدول يوضح التركيب الكيميائي للمعادن المستخدمة في عملية التشغيل

C %	Mo %	Sb %	Pb %	Ni %	Cr %	Ti %	Zn %	Mg %	Mn %	Cu %	Fe %	Si %	Sn %	Al %	الرمز
---	---	---	٠.٠	٠.٠	٠.٧	٠.٠	٠.٠	١.٠	٠.٠	٤.٠	٠.٠	٠.٠	٠.٠	٩	Al
---	---	---	٠.٠	٠.٠	٥	٠.١	٠.٣	٢٣	٧٥	٠.٩	٣٨	٢٨	٠.٠	٣	Brass
---	---	٠.٠	١.٠	٠.٠	---	---	٣٤	---	٠.٠	٦٣	٠.٠	---	٠.٠	٠.٠	Fe
٠.٠	٠.٠	---	---	---	٠.٠	---	---	---	٠.٠	---	---	٠.٠	---	٩	Fe

ولقد كان الهدف الرئيس من هذه التجارب هو دراسة تأثير الظروف التشغيلية من ضغط (Pressure) وتيار (Current) وفولتية (Voltage) وغيرها على نعومة السطح المنتج وعلى مدى انعكاسية شكل عدة القطع (C.T.) المطلوب داخل اسطوانة قطب الانود (المشغولة) ، وبالتجربة المستمرة تم التوصل الى تصميم التجارب والذي يتم توضيحه في الفصل اللاحق .

٤-١: التجارب الخاصة بمعدن الألمنيوم

لقد تم اجراء عدد من التجارب باستخدام معدن الألمنيوم (Al) ذو التركيب الكيماوي الموضح بجدول ومن هذه التجارب :

٤-١-١: تأثير كثافة التيار على معدل الازالة

أجريت هذه التجارب بتسليط تيارات مختلفة ولنفس الفترة الزمنية على معدن الألمنيوم ، وبحساب الفرق بالاوزان عند التيارات المختلفة لعينات الألمنيوم ، تم التوصل الى العلاقة بين معدل الازالة الوزني والتيار المسلط ، في هذه التجربة تم استخدام العدة (C.T.(١)) وهي تعطي اشارة لمعدل الازالة باستخدام العدة (C.T.(٢)) وذلك لأنه تم استخدام نفس المعدن . وكانت النتائج العملية كالاتي :

جدول (٤-١)

المعدن	وزن النموذج قبل التشغيل (g) (w ₁)	وزن النموذج بعد التشغيل (g) (w ₂)	الفرق بالوزن Δw = w ₁ - w ₂	التيار المطبق (I) (A)	معدل الازالة الوزني Δw/t g/min	وقت التشغيل min	معدل الازالة الوزني g/sec.
Al	١٤.٤٢٦	١٣.٩٧٩	٠.٤٤٧	٢٠	٠.٢٢٣٥	٢	٣.٧٢٥ * ١٠ ^{-٣}
	١٣.٩٧٩	١٣.١٤٩	٠.٨٣	٤٠	٠.٤١٥	٢	٦.٩١٦٦ * ١٠ ^{-٣}
	١٣.١٤٩	١٢.٠٨٩	١.٠٦	٦٠	٠.٥٣	٢	٨.٨٣٣٣ * ١٠ ^{-٣}
	١٢.٠٨٩	١٠.٥١٧	١.٥٧٢	٨٠	٠.٧٨٦	٢	١٣.١ * ١٠ ^{-٣}
	١٠.٥١٧	٨.٦٥٦	١.٨٦١	١٠٠	٠.٩٣٠٥	٢	١٥.٥٠٨٣ * ١٠ ^{-٣}

وبعد الحصول على النتائج العملية ، لا بد من مقارنتها مع النتائج النظرية والتي يتم حسابها كالاتي :
لقد تم حساب معدل الازالة الوزني بالاعتماد على معادلة رقم (٢-٣)

$$\frac{mass}{time} = \frac{I * 1}{F * \sum \left(\frac{X_i Z_i}{A_i} \right)} \Rightarrow \frac{W}{t} = \frac{I * 1}{F * \sum \left(\frac{X_1 Z_1}{A_1} + \frac{X_2 Z_2}{A_2} + \dots + \frac{X_n Z_n}{A_n} \right)} \text{ g/sec.}$$

M* => معادلة (٤-١)

ولقد استخدمت هذه المعادلة لأن معدن الألمنيوم (Al) يتألف من أكثر من عنصر ، ولقد تم ترتيب عناصر المعادلة على شكل جدول .

Mn %	Pb %	Ni %	Cr %	Ti %	Zn %	Mg %	Cu %	Fe %	Si %	Sn %	Al %	عناصر المعادلة
٠.٧٥ ٦	٠.٠٠ ٦	٠.٠٠ ٨	٠.٠٧ ٥	٠.٠١ ٤	٠.٠٣ ١	١.٢٣	٤.٠٩	٠.٣٨ ٦	٠.٢٨	٠.٠٠ ٥	٩٣.١	النسبة المئوية للعنصر (X)
٥٤.٩ ٤	٢٠.٧ ١٩	٥٨.٧ ١	٥١.٩ ٩	٤٧.٩	٥٤.٩ ٤	٢٤.٢ ٣	٦٣.٥ ٧	٥٥.٨ ٥	٢٨.٠ ٩	١١٨. ٦٩	٢٦.٩ ٧	الوزن الذري (A)
٢	٢	٢	٢	٣	٢	٢	١	٢	٤	٢	٣	عدد التكافؤ (Z)

جدول (٤-٢)

وبتعويض المعادلة

$$M^* = \frac{w}{t} = \frac{20 * (A)}{96500} * \left[\frac{1}{\sum \frac{93.1/100 * 3}{26.97} + \frac{0.005/100 * 2}{118.69} + \frac{0.28/100 * 4}{28.09}} \right]$$

$$+ \frac{0.386/100 * 2}{55.85} + \frac{4.09/100 * 1}{63.57} + \frac{1.23/100 * 2}{24.32} + \frac{0.031/100 * 2}{54.94}$$

$$+ \frac{0.014/100 * 3}{47.9} + \frac{0.075/100 * 2}{51.99} + \frac{0.008/100 * 2}{58.71} + \frac{0.006/100 * 2}{207.19}$$

$$+ \frac{0.756/100 * 2}{54.94}$$

$$\Rightarrow \frac{w}{t} = \frac{20}{96500} \left[\frac{1}{0.1060791} \right] = \frac{20}{10236.633} = 1.9537 * 10^{-3} \text{ g/sec}$$

$$K = 9.42693 = \frac{1}{\sum \frac{x_i Z_i}{A_i}} \quad \text{وبذلك يكون فيه المقدار}$$

وتكون المعادلة بهذه الصيغة $\frac{w}{t} = \frac{I}{F} * K$ ولكل القيم .

وبذلك أُحصيت النتائج النظرية كالاتي :

جدول (٤,٣)

المعدن	التيار (I) (A)	معدل الازالة الوزني النظري ($M^* = \frac{w}{t}$) g/sec.	(g/min.) M^*
Al	٢٠	$1.9537 * 10^{-3}$	٠.٢٣٤٤
	٤٠	$3.9075 * 10^{-3}$	٠.٤٦٨٩
	٦٠	$5.8613 * 10^{-3}$	٠.٧٦٣٣٢
	٨٠	$7.815 * 10^{-3}$	٠.٩٣٧٨
	١٠٠	$9.7688 * 10^{-3}$	١.١٧٢٢٥

ولمعرفة مدى كفاءة الازالة المعدنية ، يتم حساب ما يسمى بكفاءة التيار (Current Efficiency) والتي يمكن تعريفها بانها حاصل قسمة معدل الازالة الوزني الفعلي على معدل الازالة الوزني النظري .

$$\text{كفاءة التيار } (\eta) = \frac{\text{معدل الازالة الوزني الفعلي g/min.}}{\text{معدل الازالة الوزني النظري g/min.}} = \frac{M^*_{\text{actual}}}{M^*_{\text{theoretical}}} \quad \text{.....(٤-١)}$$

ومن خلال العلاقة بين كفاءة التيار (η) والتيار المسلط يكون هناك مؤشر عن كفاءة الازالة المعدنية . وبذلك كانت قيم كفاءة التيار كالاتي :

جدول (٤-٤)

المعدن	التيار المسلط	كفاءة التيار (η)
Al	٢٠	٩٥.٣٤٩

٨٨.٥٠٥	٤٠
٦٩.٤٣٣	٦٠
٨٣.٨١٣	٨٠
٧٩.٣٧٧	١٠٠

٤-١-٢: تغيير الفولتية والتيار مع زمن التشغيل

ان من متطلبات عملية (ECM) ، ثبوت كل من التيار والفولتية اثناء التشغيل [٤] ، وخاصة عند استخدام معدل تغذية ثابت . أما في هذه المنظومة فقد لوحظ حدوث تغيرات في الفولتية والتيار اثناء التشغيل بمرور الزمن ، ولقد تم تثبيت هذه النتائج من خلال مراقبة الفولتميتر والامميتر اثناء التشغيل .

جدول (٤-٥) : نتائج تغيير الفولتية والتيار

المعدن	نوع العدة	معدل التيار (A)	معدل الفولتية (V)	زمن التشغيل (min.)	المعدن	نوع العدة	معدل التيار (A)	معدل الفولتية (V)	زمن التشغيل (min.)
Al	C.T.(١)	٨٠	١٢	١	Al	C.T.(٢)	٢٨.٥	١٥.٥	١
		٧٨	١٢	٢			٢٤.٥	١٦	٢
		٧٥.٧٥	١٢	٣			٢٠.٥	١٦.٥	٣
		٧٣.٧٥	١٣	٤			١٩	١٧	٤
		٧١.٢٥	١٣	٥			١٨	١٧	٥
				٦			١٧.٥	١٧	٦
				٧			١٧.٥	١٧	٧
				٨			١٦.٥	١٧	٨

٤-١-٣: تأثير الزمن على تغيير القطر الداخلي لاسطوانة الانود وتغيير سمك الفجوة (gab thickness) اثناء التشغيل

يتغير القطر الداخلي لاسطوانة الانود (المشغولة) عند استخدام العدة (C.T.(١)) وكذلك يتغير عمق الشكل المراد عكسه داخل اسطوانة الانود (المشغولة) عند استخدام العدة (C.T.(٢)) بمرور زمن التشغيل وكنتيجة لهذا التغير يتغير سمك الفجوة (gab) . ولقد تم قياس هذا التغير بواسطة آلة القياس الخاصة بقياس الاقطار والاعماق ، هذا من الجانب العملي وكانت نتائج القياسات كالآتي :

جدول (٤-٦) : النتائج العملية لتغير القطر الداخلي وسمك الفجوة

المعدن	نوع العدة	زمن التشغيل min.	التيار (A)	الفولتية (V)	سمك الفجوة (mm)	عمق القطع (mm)
Al	C.T.(١)	١	٤٣	١٦	١٤.٦٥٥	٠.١٢
		٢	=	١٦	١٤.٦٧٧	٠.١٥
		٣	=	١٦.٥	١٤.٨٢٦	٠.٢
		٤	=	٢٤.٥	١٤.٩٠٠	٠.٣
		٥	=	٢٢.٧٥	١٥.١٢٢	٠.٤
		٨	=	٢٣	١٦.٥	٠.٦

أما من الجانب النظري ، فقد تم حساب التغير بالاقطار الداخلية وسمك الفجوة وبالاتماد على معادلات فاراداي .

باستخدام معادلة (٢-١)

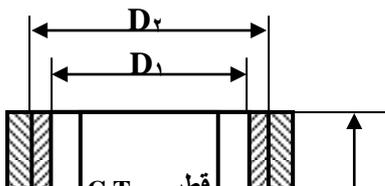
$$W = \frac{A * I * t}{Z * F} \Rightarrow \frac{W}{t} = \frac{A * I}{Z * F} = M'$$

ولكلا عدتي القطع .

١. عدة القطع (C.T.(١))

نفرض بان الجزء المزال من المشغولة على شكل اسطوانة مجوفة وكما في هذا الشكل

D_١ : القطر الداخلي للجزء المزال .



D_2 : القطر الخارجي للجزء المزال عند أي فترة زمنية .
 x : سمك الجزء المزال عند أي فترة زمنية .
 L : طول الاسطوانة .

$$W = \frac{I * t}{F} \left[\frac{1}{\sum \frac{x_i * z_i}{A_i}} \right] \dots\dots\dots(2-3)$$

وبما ان الكثافة (ρ) = $\frac{\text{الكتلة (m)}}{\text{الحجم (V)}}$ (2-4)

حجم المعدن المزال على شكل اسطوانة = المساحة * سمك الاسطوانة

$$V = x * \pi * D_1 * L \dots\dots\dots(3-4)$$

$$\text{الكتلة (m)} = \rho * V$$

$$= \rho * L * D_1 * \pi * x \dots\dots\dots(4-4)$$

(ρ) : كثافة الالمنيوم = 2.7 g/cm^3
بتعويض معادلة (4) في (1)

$$\rho * L * D_1 * \pi * x = \frac{I * t}{F} \left[\frac{1}{\sum \frac{x_i z_i}{A_i}} \right]$$

$$\text{وبفرض هذا المقدار } K = \left[\frac{1}{\sum \frac{x_i z_i}{A_i}} \right] = 9.42693 \text{ لمعدن (Al)}$$

$$\therefore \rho * L * D_1 * \pi * x = \frac{I * t}{K * F} \Rightarrow \frac{x}{t} = \frac{I * K}{\rho * L * F * \pi * D_1} \dots\dots\dots(5-4)$$

وبذلك تم استنتاج معادلة (6-4) والتي من خلالها يتم حساب سمك الطبقة المزالة عند أي فترة زمنية .
وبما ان

$$2x = D_2 - D_1 \dots\dots\dots(6-4)$$

ومن خلال معادلة (6) يتم حساب (D_2) عند أي فترة زمنية .
وبتطبيق عناصر المعادلة (4-4) تصبح المعادلة :

$$\frac{x}{t} = I * 0.0000226 \left(\frac{\text{mm}}{\text{sec.}} \right)$$

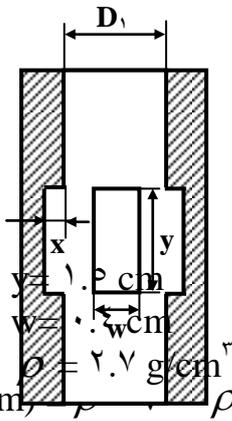
وكانت النتائج النظرية لقيم سمك الفجوة و D_2 كالآتي :

جدول (٤-٧): النتائج النظرية

المعدن	زمن التشغيل	التيار	الفولتية	سمك الفجوة (٠.٥+x) (mm)	D _٢
Al	١	٤٣	٦	٠.٥٥٨٥	١٤.٦١٧٠
	٢	=	=	٠.٦١٧٠	١٤.٧٣٤١
	٣	=	=	٠.٦٧٥٦	١٤.٨٥١٢
	٤	=	=	٠.٧٣٤١	١٤.٩٦٨٣
	٥	=	=	٠.٧٩٢٧	١٥.٠٨٥٤

٢. عدة القطع (C.T._(٢))

لحساب سمك الفجوة باستخدام عدة قطع (C.T._(٢)) ، تم فرض الجزء المزال من المشغولة على شكل أسنان الترس المستقيمة ، والتي تُعكس داخل المشغولة على شكل خمسة مستطيلات بطول (y) وعرض (w) وسمك (x) مع اهمال الأجزاء المعزولة وكما في الشكل .



D_١ : قطر المشغولة الداخلي .

y : طول الجزء المزال .

w : عرض الجزء المزال .

x : سمك الجزء المزال لأي فترة زمنية .

وباستخدام المعادلات (٤-١) و (٤-٢)

وبما ان حجم المعدن المزال = المساحة * سمك المعدن المزال

$$x * w * y =$$

وباستخدام معادلة (٤-٤) نحصل على

$$\rho * y * w * x * 5 \text{ (أسنان) } = \rho * y * w * x * 5$$

وبالتعويض بمعادلة (٤-١) نحصل على :

$$\rho * y * w * x * 5 = \frac{I * t}{F} * K$$

$$\Rightarrow \frac{x}{t} = \frac{K * I}{\rho * y * w * F * 5} \dots\dots\dots(٤-٧)$$

من معادلة (٤-٧) نحسب قيمة (x) لأي فترة زمنية ، وبتعويض عناصر المعادلة تصبح :

$$\frac{x}{t} = I * 0.0001206 \left(\frac{\text{mm}}{\text{sec.}} \right)$$

جدول (٤-٨) : النتائج النظرية لسمك الفجوة باستخدام (C.T._(٢))

المعدن	زمن التشغيل	معدل التيار (A)	معدل الفولتية (V)	عمق القطع (x) (mm)	سمك الفجوة (٠.٥ + x) (mm)
	١٢٠	٢٥.٥	١٦.٥	٠.٣٦٩٠	٠.٨٦٩٠
	١٨٠	٢٤.٥	١٦.٥	٠.٥٣١٨	١.٠٣١٨
	٢٤٠	٢٤.٥	١٦	٠.٧٠٩١	١.٢٠٩١
	٣٣٠	٢٢.٧٥	١٦.٥	٠.٩٠٥٤	١.٤٠٥٤
	٤٨٠	٢٣	١٦.٥	١.٣٣١٤	١.٨٣١٤

إضافة الى ذلك ، ان محاولة عكس الترس ذو الاسنان المستقيمة باستخدام العدة (C.T.(٢٢)) بدون استخدام مادة عازلة تكون غير ناجحة ولقد تم اجراء تجارب بدون استخدام مادة عازلة ولم يتم الحصول على المعكوس ، ولكن بعد استخدام مادة الايبوكسي العازلة يعزل الماطق غير المرغوب ازلتها ، حيث تم عزل المناطق ما بين الاسنان وتم الحصول على معكوس الشكل المطلوب داخل اسطوانة قطب الانود والذي يكون على شكل خمسة اسنان مستطيلة .

٤-١-٤: تأثير الزمن على نعومة السطح المنتج

أجريت هذه التجارب باستخدام تراكيز مختلفة ولكلا عدتي القطع وكان المحلول المستخدم (NaCl) ، وكانت النتائج كالآتي :

A. النتائج الخاصة بعدة القطع (C.T.(١١)) ويمثلها جدول (٤-٩)

رقم النموذج No.	زمن التشغيل (sec.)	التيار المسلط (A)	الفولتية (V)	معدل الجريان (m ³ / hr.)	خشونة السطح (Ra) (μ m)
١	٦٠	٤٣	٦	٢٠	١.٢
٢	١٢٠	=	=	=	١.٦
٣	١٨٠	=	=	=	١.٤
٤	٢٤٠	=	=	=	١.٨
٥	٣٠٠	=	=	=	٢
٦	٦٠	٦٣	=	=	٠.٩
٧	١٢٠	=	=	=	٠.٩
٨	١٨٠	=	=	=	١.١
٩	٢٤٠	=	=	=	١.١
١٠	٣٠٠	=	=	=	١.٣
١١	٦٠	٨٣	١٢	٢١	٠.٩
١٢	١٢٠	=	=	٢١.٥	١
١٣	١٨٠	=	=	٢٢.١	١
١٤	٢٤٠	=	=	٢٢.٣	١.١
١٥	٣٠٠	=	=	٢٢.٥	١.٣

الظروف التشغيلية :

Gauge pressure (G.P) = ١ bar الضغط المستخدم

con. = ٣٥ g/L NaCl التركيز

gab width = ٠.٥ mm سمك الفجوة

B. النتائج الخاصة بعدة القطع (C.T.(٢٢)) ويمثلها جدول (٤-١٠)

رقم النموذج No.	زمن التشغيل (sec.)	التيار المسلط (A)	الفولتية (V)	معدل الجريان (m ³ / hr.)	تركيز المحلول (g/L)	خشونة السطح (Ra) (μ m)
١	٦٠	٢٨	١٦.٥	١٦	٥٥ g/L NaCl	١.٣
٢	١٢٠	٢٥.٥	=	١٧.٥-١٩.٢		١.٧
٣	١٨٠	٢٣.٥	=	١٧.٥-١٩.٣		٢.٤
٤	٢٤٠	٢٣	=	١٧.٥-١٩.٨		٢.٢
٥	٣٠٠	٢٣	=	١٧.٥-٢٠		٢.٢
٦	٦٠	١٧	٨	١٧.٢	١٦ g/L NaCl	٠.٩
٧	١٢٠	١٥.٥	=	١٧.٦-١٨		١.٤
٨	١٨٠	١٥	=	١٧-١٧.٨		١.٦

١.٧	٨ g/L NaCl	١٧.٢-١٨.٢	=	١٥	٢٤٠	٩
٣.٣		١٥.٥-١٧.٨	=	١٤.٥	٣٠٠	١٠
٠.٩		١٩	١٧	٢٢	٦٠	١١
٠.٩		١٩-١٩.٣	=	٢١.٥	١٢٠	١٢
٠.٩		١٨.٥-١٩.٥	=	٢٠.٥	١٨٠	١٣
١.١		١٩-١٩.٨	=	٢٠	٢٤٠	١٤
١.٨		١٨.٦-١٩.٤	=	١٩.٥	٣٠٠	١٥

Gauge pressure (G.P) = ١ bar الضغط المستخدم
gab width = ٠.٥ mm سمك الفجوة

٤-١-٥: تأثير الضغط ومعدل الجريان على خشونة السطح

تم استخدام ضغوط مختلفة ومعدلات جريان مختلفة وبنوت كل من التيار والفولتية وزمن التشغيل ، وذلك لمعرفة تأثيرها على خشونة السطح المنتج (Roughness) وكانت النتائج كالاتي :

A. النتائج الخاصة بعدة القطع (C.T.(١)) ويمثلها جدول (٤-١١)

رقم النموذج No.	زمن التشغيل (sec.)	التيار المسلط (A)	معدل الجريان (m ³ / hr.)	الضغط المسلط (bar) (G.P)	خشونة السطح (μm) (Ra)
١	٦٠	٨٠	١٦	٠.٤	١.٤
٢	=	=	١٨	٠.٦	١.١
٣	=	=	٢٠	٠.٨	١.٠١
٤	=	=	٢٢	٠.٩	١.٤
٥	=	=	٢٤	١.٢	١

B. النتائج الخاصة بعدة القطع (C.T.(٢)) ويمثلها جدول (٤-١٢)

رقم النموذج No.	زمن التشغيل (sec.)	التيار المسلط (A)	معدل الجريان (m ³ / hr.)	الضغط المسلط (bar) (G.P)	خشونة السطح (μm) (Ra)
١	٦٠	٢٠	١٢.٥	٠.٤	١.٤
٢	=	=	١٤.٥	٠.٦	١.٣
٣	=	=	١٦.٥	٠.٨	١.٦
٤	=	=	١٨	١.٠	١.٣
٥	=	=	٢٠	١.٢	١.١

٤-٢: التجارب الخاصة بمعدن البراص (Brass)

لقد تم اجراء نفس التجارب على معدن البراص وبنفس الاسلوب المتبع على معدن الالمنيوم وهي كالاتي:

٤-٢-١: تأثير كثافة التيار على معدل الازالة

بعد ان تم اجراء هذه التجارب بنفس الاسلوب المتبع على معدن الالمنيوم ، كانت النتائج العملية كالاتي ويمثلها جدول (٤-١٣)

المعدن	وزن النموذج قبل التشغيل (g) (w ₁)	وزن النموذج بعد التشغيل (g) (w ₂)	الفرق بالوزن $\Delta w = w_1 - w_2$	التيار المسلط (A)	معدل الازالة الوزني (g/sec)	معدل الازالة الوزني (g/min)	زمن التشغيل
Brass	٤٧.٤٤٦	٤٦.٠٣٣	١.٤١٣	٢٠	١٢.٧٧٥ * ١٠ ^{-٣}	٠.٧٦٦٥	١٢٠

=	١.٢٤٥٥	٢٠.٧٥٨ * ١٠ ^{-٣}	٤٠	٢.٤٩١	٤٣.٥٤٢	٤٦.٠٣٣
=	١.٧٩٥	٢٩.٩١٦ * ١٠ ^{-٣}	٦٠	٣.٥٩	٣٩.٩٥٢	٤٣.٥٤٢
=	٢.٤٩٢	٤١.٥٣٣ * ١٠ ^{-٣}	٨٠	٤.٩٤٨	٣٤.٩٦٨	٣٩.٥٤٢
=	٢.٨٨٣٥	٤٨.٠٥٨ * ١٠ ^{-٣}	١٠٠	٥.٧٦٧	٢٩.٢٠١	٣٤.٩٦٨

أما النتائج النظرية فقد تم استخدام نفس المعادلة (٢-١) وتم ترتيب عناصر المعادلة على شكل جدول ، والتي من ضمنها التركيب الكيميائي لمعدن البراص (Brass) .

جدول (٤-١٤) : معالم معادلة (٤-١)

Mn %	Pb %	Ni %	Cr %	Ti %	Zn %	Sb %	Cu %	Fe %	Si %	Sn %	Al %	العناصر
٠.٠٢	١.١٠	٠.٠٠٢	-	-	٣٤.٩	٠.٠٢٦	٦٣.٧٩٦	٠.١٣٠	-	٠.٠٠٥	٠.٠٢	النسبة المئوية (x)
٥٤.٩٤	٢٠٧.١٩	٥٨.٧١	-	-	٥٤.٩٤	٢٠٨.٩٨	٦٣.٥٧	٥٥.٨٥	-	١١٨.٦٩	٢١.٩٦	الوزن الذري (A)
٢	٢	٢	-	-	٢	٣	١	٢	-	٢	٣	عدد التكافؤ (z)

وكانت النتائج النظرية كالاتي بعد ان تم حساب قيمة المقدار $\frac{1}{\sum \frac{x_i z_i}{A_i}}$ من معادلة (٤-١)

$$\frac{1}{\sum \frac{x_i z_i}{A_i}} = \frac{1}{0.0228704} = K = 43.7246$$

ولقد تم فرضه K = للسهولة .

جدول (٤-١٥)

معدل الازالة الوزني النظري (g/min)	معدل الازالة الوزني النظري (g/sec)	التيار المسلط (A)	المعدن
٠.٥٤٣٧	٩.٠٦٢ * ١٠ ^{-٣}	٢٠	Brass
١.٠٨٧	١٨.١٢٤ * ١٠ ^{-٣}	٤٠	
١.٦٣١	٢٧.١٨٦ * ١٠ ^{-٣}	٦٠	
٢.١٧٤	٣٦.٢٤٨ * ١٠ ^{-٣}	٨٠	
٢.٧١٨	٤٥.٣١٠ * ١٠ ^{-٣}	١٠٠	

اضافة الى ذلك تم حساب كفاءة التيار وذلك بتطبيق معادلة (٤-١) وكانت قيم كفاءة التيار كالاتي :

كفاءة التيار (η)	التيار المسلط (A)	المعدن
١٤٠.٩٧	٢٠	Brass
١١٤.٥٨	٤٠	
١١٠.٠٥	٦٠	
١١٤.٦٢	٨٠	
١٠٦.٠٨	١٠٠	

٢-٢-٤: تغير الفولتية والتيار مع زمن التشغيل

كانت نتائج تغير الفولتية والتيار لمعدن البراص (Brass) اثناء التشغيل كالاتي ويمثلها جدول (٤-١٦) .

المعدن	نوع العدة	زمن التشغيل (sec)	التيار المسط (A)	الفولتية المطبقة (V)	نوع العدة	زمن التشغيل (sec)	التيار المسط (A)	الفولتية المطبقة (V)
Brass	C.T ₍₁₎	١٢٠	٢٠	١١	C.T _(٢)	١٢٠	٤	٦
		٢٤٠	٢٠	=		٢٤٠	٤	=
		٣٦٠	١٩.٥	=		٣٦٠	٤	=
		٤٨٠	١٩.٥	=		٤٨٠	٣.٥	=
		٦٠٠	١٩	=		٦٠٠	٣.٥	=

٤-٢-٣: تأثير الزمن على تغير القطر الداخلي لاسطوانة الانود وتغير سمك الفجوة (gab width) اثناء التشغيل
لقد لوحظ تغير في القطر الداخلي لاسطوانة الانود وعمق الشكل المراد عكسه وكانت النتائج العملية كما يلي ويمثلها جدول (٤-١٧)

المعدن	نوع العدة	زمن التشغيل sec.	التيار (A)	الفولتية (V)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	سمك الفجوة (mm)	نوع العدة	زمن التشغيل sec.	التيار (A)	الفولتية (V)	سمك الفجوة الابتدائي	عمق القطع (mm)	سمك الفجوة
Brass	C.T ₍₁₎	١٢٠	٢٠	١١	١٥.١٢٥	١٥.١٢٥	٠.٨١٢٥	C.T _(٢)	١٢٠	٤	٦	٠.٧٥	٠.٠٤	٠.٧٩
		٢٤٠	٢٠	=	١٥.١٢٥	١٥.١٨٧٦	٠.٨٩٣٧٥		٢٤٠	٤	=	٠.١	٠.٨٥	
		٣٦٠	١٩.٥	=	١٥.١٨٧٦	١٥.٢٥٠	٠.٨٧٥		٣٦٠	٤	=	٠.١٥	٠.٩	
		٤٨٠	١٩.٥	=	١٥.٢٥٥	١٥.٤٣٧٥	٠.٩٦٨٧		٤٨٠	٣.٥	=	٠.٢٥	١	
		٦٠٠	١٩	=	١٥.٤٣٨٧	١٥.٦٢٥	١.٠٦٢٥		٦٠٠	٣.٥	=	٠.٣١	١.٠٦	

أما القيم النظرية فقد تم تطبيق معادلة (٤-٥) بالنسبة لعدة القطع C.T₍₁₎ ومعادلة (٤-٧) لعدة القطع C.T_(٢) وكانت النتائج كالاتي ويمثلها جدول (٤-١٨).

المعدن	نوع العدة	زمن التشغيل sec.	التيار (A)	الفولتية (V)	سمك الفجوة (mm)	D	نوع العدة	زمن التشغيل sec.	التيار (A)	الفولتية (V)	عمق القطع (mm)	سمك الفجوة (mm)	سمك الفجوة (mm)
Brass	C.T ₍₁₎	١٢٠	٢٠	١١	٠.٨٣٥	١٥.١٤٧٠	C.T _(٢)	١٢٠	٤	٦	٠.٠٨٠٨	٠.٨٣٠٨	٠.٨٣٠٨
		٢٤٠	٢٠	=	٠.٨٥٧٠	١٥.٢٤٤٠		٢٤٠	٤	=	٠.١١١٦	٠.١١١٦	٠.١١١٦
		٣٦٠	١٩.٥	=	٠.٩٤٤٩	١٥.٤٢٩٩		٣٦٠	٤	=	٠.١٩٢٤	٠.٢٤٢٤	٠.١٩٢٤
		٤٨٠	١٩.٥	=	١.٠٣٦٦	١٥.٥٧٣٣		٤٨٠	٣.٥	=	٠.٢٨٢٨	٠.٢٨٢٨	٠.٢٨٢٨
		٦٠٠	١٩	=	١.٠٩٩١	١٥.٦٩٨٢		٦٠٠	٣.٥	=	٠.٣٥٣٥	٠.٣٥٣٥	٠.٣٥٣٥

حيث كانت كثافة البراص = ٨.٩٧٩ g/cm^٣ وتطبيق معاليم كلا المعادلتين تصبح كلاً منها :

$$\frac{X}{t} = I * 0.0000306 \frac{\text{mm}}{\text{sec}} \dots\dots\dots(٤-٥)$$

$$\frac{X}{t} = I * 0.0001683 \frac{\text{mm}}{\text{sec}} \dots\dots\dots(٤-٧)$$

٤-٢-٤: تأثير زمن التشغيل على نعومة السطح المنتج

أجريت هذه التجارب بنفس الاسلوب المُتَّبَع مع معدن الالمنيوم (Al) ولقد تم استخدام المحلول بتركيز (١٠٠ g/L NaCl) ، والجدول التالي يبين النتائج :

جدول (٤-١٩)

رقم النموذج	نوع العدة	زمن التشغيل (sec)	التيار المسط (A)	الفولتية (V)	معدل الجريان f.R m ^٣ /hr.	خشونة السطح Ra (μm)
7'	C.T ₍₁₎	١٢٠	٢٠	١١	٢٢	٠.٠٨
6'		٢٤٠	٢٠	=	٢٢	٠.٠٨
8'		٣٦٠	١٩.٥	=	٢٢-٢٢.٧	٠.١١
9'		٤٨٠	١٩.٥	=	٢٢-٢٢.٨	٠.١٧
10'		٦٠٠	١٩	=	٢٢-٢٢.٩	٠.٢٥

٠.١٩	٢١.٥	٦	٤	١٢٠	C.T.(٢)	1"
٠.٢٩	=	=	٤	٢٤٠		2"
٠.٢٩	=	=	٤	٣٦٠		3"
٠.٤	=	=	٣.٥	٤٨٠		4"
٠.٤	=	=	٣.٥	٦٠٠		5"

٤-٢-٥: تأثير الضغط ومعدل الجريان على نعومة السطح المنتج
جدول (٤-٢٠) يوضح نتائج هذه التجارب

جدول (٤-٢٠)

رقم النموذج	نوع العدة	زمن التشغيل (sec)	التيار المسلط (A)	الفولتية (V)	معدل الجريان f.R m ² /hr.	مقياس الضغط G.P (bar)	خشونة السطح Ra (μm)
1"	C.T.(١)	١٨٠	٢٠	١١	١٦	٠.٤	٠.١٦
2"		=	٢٠	=	١٨	٠.٦	٠.١٨
3"		=	١٩.٥	=	٢٠	٠.٨	٠.١٤
4"		=	١٩.٥	=	٢٢	٠.٩	٠.١
5"		=	١٩	=	٢٤	١.٤	٠.٠٨
1"	C.T.(٢)	١٨٠	٤	٦	١٤	٠.٤	١٠
2"		=	=	=	١٦	٠.٦	٨.٥
3"		=	=	=	١٨	٠.٨	٧
4"		=	=	=	٢٠	٠.٩	٥
5"		=	=	=	٢٤	١	٣.٥

٤-٣: التجارب الخاصة بمعدن الفولاذ

لم يختلف اجراء التجارب ، ما عدا استخدام معدن الفولاذ بدلاً عن المعادن السابقة وهذه التجارب هي :

٤-٣-١: تأثير كثافة التيار على معدل الازالة

الجدول (٤-٢١) يوضح نتائج التجارب العملية لمعدن الفولاذ وباستخدام عدة (C.T.(١))

المعدن	وزن النموذج قبل التشغيل (g) (w ₁)	وزن النموذج بعد التشغيل (g) (w ₂)	الفرق بالوزن Δw = w ₁ - w ₂	التيار المسلط (A)	معدل الازالة الوزني (g/sec)	معدل الازالة الوزني (g/min)	زمن التشغيل
فولاذ	٤١.٣٨٦	٤٠.٤١١	٠.٩٧٥	٢٠	٨.١٢٥ * ١٠ ^{-٣}	٠.٤٨٧٥	١٢٠
	٤٠.٤١١	٣٨.٧٧٢	١.٦٣٩	٤٠	١٣.٦٥٨ * ١٠ ^{-٣}	٠.٨١٩٥	=
	٣٨.٧٧٢	٣٦.٥١٩	٢.٢٥٣	٦٠	١٨.٧٧٥ * ١٠ ^{-٣}	١.١٢٦٥	=
	٣٦.٥١٩	٣٣.٧٨٤	٢.٧٣٥	٨٠	٢٢.٧٩١ * ١٠ ^{-٣}	١.٣٦٧٥	=
	٣٣.٧٨٤	٣٠.٤٦٤	٣.٣٢	١٠٠	٢٧.٦٦٦ * ١٠ ^{-٣}	١.٦٦	=

أما النتائج النظرية لمعدلات الازالة فقد تم حسابها بالاعتماد على معادلة (٤-١) .

جدول (٤-٢٢) يوضح معالم المعادلة بما فيها التركيب الكيماوي لمعدن الفولاذ

التركيب الكيماوي	C%	Si%	Mn %	Cr%	Mo %	Fe %	K = $\frac{1}{\sum \frac{X_i Z_i}{A_i}} = 27.8077$
النسبة المئوية (X)	٠.٥	٠.٣	٠.٨	٠.١٥	٠.٠١	٩٨.٢٤	

	٥٥.٨٤٧	٩٥.٩٣	٥١.٨٩	٥٤.٩٤	٢٨.٠٩	-	الوزن الذري (A)
	٢	٣	٢	٢	٤	-	عدد التكافؤ

كما تم حساب كفاءة التيار (η) من خلال تطبيق معادلة (٤-١) وجدول (٤-٢٣) يوضح النتائج النظرية لمعدلات الازالة وكفاءة التيار .

جدول (٤-٢٣)

المعدن	التيار المسلط (A)	معدل الازالة الوزني النظري (g/sec)	معدل الازالة الوزني النظري (g/min)	كفاءة التيار
Brass	٢٠	$٥.٧٦٣ * ١٠^{-٣}$	٠.٣٤٥	١٤١.٣٠٤
	٤٠	$١١.٥٢٦ * ١٠^{-٣}$	٠.٦٩١	١١٨.٥٩٦
	٦٠	$١٧.٢٨٩ * ١٠^{-٣}$	١.٠٣٧	١٠٨.٦٣٠
	٨٠	$٢٣.٠٥٣ * ١٠^{-٣}$	١.٣٨٣	٩٨.٨٧٩
	١٠٠	$٢٨.٨١٦ * ١٠^{-٣}$	١.٧٢٨	٩٦.٠٦٤

٤-٣-٢: تغير الفولتية والتيار مع زمن التشغيل

جدول (٤-٢٤) يوضح نتائج تغير الفولتية والتيار لمعدن الفولاذ اثناء التشغيل .

جدول (٤-٢٤)

المعدن	نوع العدة	زمن التشغيل (sec)	التيار المسلط (A)	الفولتية (V)	نوع العدة	زمن التشغيل (sec)	التيار المسلط (A)	الفولتية (V)
فولاذ	C.T.(١)	١٢٠	٤٠	١٤	C.T.(٢)	١٢٠	٨	١٢
		٢٤٠	٤٠	=		٢٤٠	=	
		٣٦٠	٣٩.٥	=		٣٦٠	=	
		٤٨٠	٣٨.٥	=		٤٨٠	=	
		٦٠٠	٣٨.٥	=		٦٠٠	=	

٤-٣-٣: تأثير الزمن على تغير القطر الداخلي لاسطوانة الانود وتغير سمك القجوة (gab width) اثناء التشغيل

جدول (٤-٢٥) و (٤-٢٦) يوضحان النتائج العملية والنظرية لتغير القطر الداخلي لاسطوانة الانود وسمك القجوة .

جدول (٤-٢٥) النتائج العملية

المعدن	نوع العدة	زمن التشغيل sec.	التيار (A)	الفولتية (V)	سمك القجوة (mm)	نوع العدة	زمن التشغيل sec.	التيار (A)	الفولتية (V)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	سمك القجوة (mm)	عمق القطع (mm)	سمك القجوة الابتدائي (mm)	
فولاذ	C.T.(١)	١٢٠	٤٠	١٤	٠.٦٢٥	C.T.(٢)	١٢٠	٨	١٢	١٤.٦٢٥	١٤.٧٥	٠.١٢٥	٠.١٠٥	٠.٥	
		٢٤٠	٤٠	=	٠.٦٢٥		٢٤٠	=	٨	=	١٤.٦٢٥	١٤.٨٧٥	٠.١٨	٠.١٨	=
		٣٦٠	٣٩.٥	=	٠.٦٢٥		٣٦٠	=	٨	=	١٤.٨٧٥	١٤.٩٢٥	٠.١٩	٠.١٩	=
		٤٨٠	٣٨.٥	=	٠.٦٢٥		٤٨٠	=	٧.٥	=	١٤.٨٧٥	١٥.١٢٥	٠.٢	٠.٧	=
		٦٠٠	٣٨.٥	=	٠.٦٢٥		٦٠٠	=	٧.٥	=	١٤.٨٧٧	١٥.١٧٥	٠.٢٥	٠.٧٥	=

جدول (٤-٢٦) النتائج النظرية

المعدن	نوع العدة	زمن التشغيل sec.	التيار (A)	الفولتية (V)	سمك القجوة (mm)	D.	نوع العدة	زمن التشغيل sec.	التيار (A)	الفولتية (V)	سمك القجوة (mm)	عمق القطع (mm)	سمك القجوة (mm)
فولاذ	C.T.(١)	١٢٠	٤٠	١٤	٠.٦٠٩٩	١٤.٧١٩	C.T.(٢)	١٢٠	٨	١٢	٠.١١٧	٠.٦١٧	٠.٦١٧
		٢٤٠	٤٠	=	٠.٧١٩٨	١٤.٩٣٩		٢٤٠	٨	=	٠.١١٧	٠.٧٣٤	٠.٧٣٤

٠.٨٥١	٠.٣٥١	=	٨	٣٦٠	١٥.١٥١	٠.٨٢٥٦	=	٣٩.٥	٣٦٠
٠.٩٣٩	٠.٤٣٩	=	٧.٥	٤٨٠	١٥.٣٤٦	٠.٩٢٣١	=	٣٨.٥	٤٨٠
٠.٠٤٩	٠.٥٤٩	=	٧.٥	٦٠٠	١٥.٥٥٧	١.٠٢٨٩	=	٣٨.٥	٦٠٠

حيث ان كثافة الفولاذ $(\rho) = 7.869 \text{ g/cm}^3$ وبتطبيق معاليم معادلة (٤-٧) و (٤-٩) اصبحت كل منها

$$\frac{X}{t} = I * 0.0000229 \frac{\text{mm}}{\text{sec}} \dots\dots\dots(٤-٥)$$

$$\frac{X}{t} = I * 0.0001222 \frac{\text{mm}}{\text{sec}} \dots\dots\dots(٤-٧)$$

٤-٣-٤: تأثير زمن التشغيل على نعومة السطح المنتج
الجدول (٤-٢٧) يوضح نتائج هذه التجارب ولكلا عدتي القطع .

جدول (٤-٢٧)

المعدن	رقم النموذج	نوع العدة	زمن التشغيل (sec)	التيار (A)	الفولتية (V)	معدل الجريان f.R m ³ /hr.	خشونة السطح Ra (μm)
فولاذ	٣	C.T.(١)	١٢٠	٤٠	١٤	١٦	٢.١
	٤		٢٤٠	٤٠	=	=	٢.٨
	٥		٣٦٠	٣٩.٥	=	=	٢.٩
	٦		٤٨٠	٣٨.٥	=	=	٥.٤
	٧		٦٠٠	٣٨.٥	=	=	٢.٧
فولاذ	١	C.T.(٢)	١٢٠	٨	١٢	١٦	٢.٦
	٢		٢٤٠	٨	=	=	٣.٤
	٣		٣٦٠	٨	=	=	٤.٦
	٤		٤٨٠	٧.٥	=	=	٤.٨
	٥		٦٠٠	٧.٥	=	=	٥.١

٤-٣-٥: تأثير الضغط ومعدل الجريان على نعومة السطح المنتج

الجدول (٤-٢٨) يوضح نتائج هذه التجارب

المعدن	رقم النموذج	نوع العدة	زمن التشغيل (sec)	التيار (A)	الفولتية (V)	معدل الجريان f.R m ³ /hr.	مقياس الضغط G.P (bar)	خشونة السطح Ra (μm)
فولاذ	١	C.T.(١)	١٢٠	٤٠	١٤	١١	٠.٤	٢.٦
	٢		=	=	=	١٢	٠.٦	٢.٤
	٣		=	=	=	١٦	٠.٨	٢.٤
	٤		=	=	=	١٩	١	٢.٢
	٥		=	=	=	٢١	١.٢	٢
فولاذ	١	C.T.(٢)	١٢٠	٨	١٢	١٣	٠.٤	٣.٦
	٢		=	=	=	١٥	٠.٦	٢.٧
	٣		=	=	=	١٦.٥	٠.٨	٢.٤

۲.۲	۱	۱۷	=	=	=		۴	
۳.۴	۱.۲	۱۹	=	=	=		۵	

٥-١: مقدمة

بما انه تم استخدام ثلاثة معادن في التجارب الخاصة بمنظومة التشغيل الكهروكيميائي حيث ان لكل معدن نتائجه الخاصة ، لذلك فان مناقشة نتائج هذه التجارب تكون كالآتي :

٥-٢: معدن الألمنيوم

لقد أوضحت النتائج الخاصة بمعدل ازالة معدن الألمنيوم في شكل (١-٤) بان معدل الازالة يزداد بزيادة كثافة التيار المسلطة عملياً ونظرياً ، ولكنه يوجد اختلاف بين القيم العملية والنظرية ، حيث تكون نتائج القيم النظرية على شكل خط مستقيم اما العملية فتكون على شكل منحنى وهذا يعود الى تعدد الظروف التشغيلية في العملية ، حيث نادراً ما تكون النتائج العملية والنظرية متطابقة .

شكل (٢-٤) يوضح تغير الفولتية والتيار مع زمن التشغيل باستخدام عدة القطع (C.T.(١)) ، ففي شكل (٤ - ٢ A) أوضحت النتائج ان التيار سيقبل بمرور زمن التشغيل أما شكل (٢ B - ٤) فانه يوضح ثبوت الفولتية لحد الدقيقة (٣) وبعدها تزداد الفولتية ، ويمكن تعليل ذلك بانه بمرور الزمن سوف تحدث الازالة المعدنية وهذا يؤدي زيادة عرض الفجوة (gap width) وبالتالي تزداد مقاومة المحلول وكنتيجه لذلك سوف يقل التيار وتزداد الفولتية ، اما كون الفولتية ثابتة لفترة معينة فهذا يعود الى ان انخفاض التيار يكون في بداية التشغيل قليل ولا يؤثر على قيمة الفولتية ، ولكن بمرور الزمن يكون التأثير أكبر . أما شكل (٣-٤) فهو يوضح تغير الفولتية والتيار خلال زمن التشغيل باستخدام عدة القطع (C.T.(٢)) .

وسبب التغير في التيار والفولتية هو نفس السبب الموضح في العدة (C.T.(١)) ما عدا كون التيارات المستخدمة في العدة (C.T.(١)) أكبر من المستخدمة في (C.T.(٢)) ، وذلك لأن مساحة التشغيل في العدة (C.T.(١)) أكبر منها في (C.T.(٢)) .

كما أوضحت النتائج ان انخفاض التيار باستخدام العدة (C.T.(١)) يكون اقل من انخفاض التيار باستخدام العدة (C.T.(٢)) وهذا يعود الى ان مقاومة المحلول في العدة (C.T.(١)) تكون اقل منها باستخدام (C.T.(٢)) وذلك لأن التركيز المستخدم في (C.T.(١)) يكون مساوٍ الى (٣٥g/L) أما المستخدم في (C.T.(٢)) فيكون مساوٍ الى (٨g/L) حيث عندما يقل التركيز تزداد مقاومة المحلول وبالتالي انخفاض كبير في التيار اكبر منه في ما مستخدم في (C.T.(١)) .

أما بالنسبة لكفاءة التيار فكانت موضحة بالشكل (٤-٤) . حيث اوضحت النتائج انخفاض الكفاءة بمرور زمن التشغيل وهذا يعود الى انخفاض تيار التشغيل .

الشكل (٥-٤) يوضح ازدياد عرض الفجوة مع زمن التشغيل عملياً ونظرياً ويوجد اختلاف بينهما ، ويعود ذلك الى حدوث الازالة المعدنية ، أما بالنسبة لاختلاف القيم العملية عن النظرية فيمكن ارجاعه الى تعدد الظروف التشغيلية وتغير معدل الازالة وحسب تركيب المعدن المشغّل .

كما اوضح الشكل (٦-٤) زيادة عمق الشكل المعكوس مع زيادة زمن التشغيل باستخدام العدة (C.T.(٢)) ويعود ذلك الى حدوث الازالة المعدنية ، ولقد تم استخدام تركيز مساوٍ الى (٨g/L) وذلك للحصول على معكوس جيد للشكل المطلوب من خلال تقليل التيار وبالتالي تقليل القطع المفرط (Overcut) .

الأشكال (A ٧ - ٤) ، (B ٧ - ٤) ، (C ٧ - ٤) توضح زيادة خشونة السطح مع زمن التشغيل باستخدام العدة (C.T.(١)) حيث كلما يزداد زمن التشغيل تزداد خشونة السطح ، وذلك بسبب كبر عرض الفجوة (gab width) بمرور الزمن بسبب الازالة المعدنية وهذا يؤدي الى انخفاض التيار المسلط وبالتالي حدوث تنقر السطح لعدم انتظامية الازالة من السطح .

كما اوضحت النتائج انه كلما يزداد تركيز المحلول تقل خشونة السطح حيث تم استخدام ثلاثة تراكيز وكما مبينة بالاشكال المذكورة .

أما الأشكال (A ٨ - ٤) ، (B ٨ - ٤) ، (C ٨ - ٤) فهي ايضاً توضح زيادة خشونة مع زمن التشغيل ولكن باستخدام العدة (C.T.(٢)) ، ولقد كانت أفضل خشونة في شكل (C ٨ - ٤) وذلك لأن التيار المستخدم كان قليلاً ومناسباً للمساحة المشغلة وكذلك كان القطع المفرط قليل .

أما الشكل (B ٨ - ٤) فكانت الخشونة فيه عالية وذلك لأن التيار المستخدم قليل جداً بحيث سبب في تنقر السطح .

أما بالنسبة لتأثير الضغط ومعدل الجريان فلقد بينت النتائج الموضحة بالاشكال (A ٩ - ٤) ، (B ٩ - ٤) ، (A ١٠ - ٤) ، (B ١٠ - ٤) ، ان خشونة السطح تقل بزيادة كل من الضغط ومعدل الجريان وذلك لأن

زيادة الضغط ومعدل الجريان يؤدي الى زيادة انجراف نواتج التشغيل من السطح وبانتظام وبذلك يكون التيار المسلط منتظم وبالتالي يتحسن السطح المنتج .

٣-٥: معدن البراص

الشكل (١١-٤) يوضح معدلات الازالة النظرية والعملية لمعدن البراص ، حيث اوضحت النتائج ان معدلات الازالة العملية والنظرية تزداد بزيادة التيار المسلط مع اختلاف قليل بينها وهو يعود ايضاً لتعدد الظروف التشغيلية وكذلك اختلاف المعادن الداخلة في تركيب سبيكة البراص . كما بينت النتائج ان معدل ازالة البراص اكبر من معدل ازالة الالمنيوم ويمكن ارجاع ذلك الى اختلاف اعداد التكافؤ والاوزان الذرية الداخلة في تركيب كلا المعدنين . فمثلاً ، سبيكة الالمنيوم تكون فيها نسبة الالمنيوم عالية وعدد تكافؤه اعلى من عدد تكافؤ معدني البراص (الزنك ، النحاس) ، كما ان الوزن الذري للالمنيوم اقل من الوزن الذري لمعدني البراص (Cu - Zn) . وحيث ان معدل الازالة تتناسب طردياً مع الوزن الذري وعكسياً مع عدد التكافؤ ، لذلك يكون معدل ازالة البراص اعلى من الالمنيوم .

أما تغير الفولتية والتيار خلال زمن التشغيل ، فلقد اوضحه الشكل (A ١٢ - ٤) باستخدام العدة (C.T.(١)) والشكل (B ١٢ - ٤) باستخدام العدة (C.T.(٢)) ، حيث بينت النتائج ان تغير كلاً من الفولتية والتيار يكون طفيفاً بالنسبة لكلا عدتي القطع على الرغم من اختلاف مساحة التشكيل وهذا يعود الى ان التركيز المستخدم مساوٍ الى (١٠٠ g/L) وهو تركيز عالي أي ان مقاومة المحلول تكون قليلة التغير وبالتالي يكون تغير التيار طفيفاً على الرغم من كبر عرض الفجوة خلال التشغيل . أما تيارات التشغيل المستخدمة في العدة (C.T.(١)) فكانت اعلى من المستخدمة في (C.T.(٢)) وذلك لأن مساحة التشغيل في (C.T.(١)) اكبر منها في (C.T.(٢)) ، ولقد تم استخدام تيارات قليلة في (C.T.(٢)) للحصول على معكوس جيد للشكل المطلوب ، فعند استخدام تيار عالي يسبب ذلك زيادة في القطع المفرط وبالتالي يكون معكوس الشكل غير جيد . كما اوضحت النتائج المبينة بالشكل (١٣-٤) ان عرض الفجوة وعمق الشكل المعكوس يزداد بزيادة زمن التشغيل وهذا يعود الى حدوث الازالة المعدنية .

الشكل (A ١٤ - ٤) والشكل (B ١٤ - ٤) يوضحان زيادة خشونة السطح مع زمن التشغيل للعدة (C.T.(١)) و (C.T.(٢)) على التوالي وهذا يعود الى نفس السبب المذكور في معدن الالمنيوم . أما الأشكال (A ١٥ - ٤) ، (B ١٥ - ٤) ، (A ١٦ - ٤) ، (B ١٦ - ٤) فانها توضح انخفاض الخشونة بزيادة كل من الضغط ومعدل الجريان وهذا يمكن ارجاعه الى نفس السبب المذكور في معدن الالمنيوم ولقد اوضحت النتائج ان خشونة السطح لمعدن البراص تكون قليلة جداً وتصل الى (٠.٠٨ μm) في بداية التشغيل والسبب في ذلك يعود الى ان جهود الاقطاب للمعادن الداخلة في تركيب البراص تكون متقاربة وبالتالي فان الاختلاف بمعدل الازالة يكون قليلاً وتكون الازالة منتظمة على السطح وبالتالي يكون السطح الناتج ناعماً .

أما جهود الاقطاب للمعادن الداخلة في تركيب سبيكة الالمنيوم فتكون مختلفة وذات فرق كبير حيث ان المعدن ذو جهد القطب الأقل يتحلل اولاً والمعدن ذو جهد القطب الأعلى يتحلل أخيراً وبذلك يحدث عدم توازن في معدل الازالة لنفس السطح وبذلك يكون السطح خشناً .

٤-٥: معدن الفولاذ

الشكل (١٧-٤) يوضح ازدياد معدل ازالة الفولاذ بزيادة التيار المسلط عملياً ونظرياً ، ولقد كان معدل ازالة الفولاذ اقل من معدل ازالة البراص وهذا يعود الى اختلاف اعداد التكافؤ والاوزان الذرية الداخلة في تركيب الفولاذ كما ان اختلاف القيم العملية والنظرية يعود الى اختلاف الظروف التشغيلية . أما الأشكال (A ١٨ - ٤) ، (B ١٨ - ٤) فهي توضح تغير الفولتية والتيار خلال زمن التشغيل والذي يكون تغيراً طفيفاً وذلك لأن التركيز المستخدم يكون عالٍ وهو مساوٍ الى (١٠٠ g/L NaCl) . أما كفاءة التيار فهي موضحة بالشكل (١٩-٤) والذي يوضح انخفاض الكفاءة مع زمن التشغيل وذلك بسبب انخفاض التيار خلال التشغيل .

ولقد بينت الأشكال (٢٠-٤) ، (٢١-٤) ازدياد عرض الفجوة وعمق الشكل المعكوس ، بزيادة زمن التشغيل على التوالي وذلك بسبب الازالة المعدنية .

كذلك وكما في المعدنين السابقين ، أظهرت النتائج ان خشونة السطح تزداد بزيادة زمن التشغيل وهي موضحة بالشكلين (A ٢٢ - ٤) ، (B ٢٢ - ٤) باستخدام عدتي القطع (C.T.(١)) ، (C.T.(٢)) على التوالي

أيضاً الأشكال (A ٢٣ - ٤) ، (B ٢٣ - ٤) ، (A ٢٤ - ٤) ، (B ٢٤ - ٤) توضح انخفاض خشونة السطح بزيادة كل من الضغط ومعدل الجريان وكما في المعدنين السابقين ولكلا عدتي القطع . إضافة الى ذلك ، ان عرض الفجوة المستخدم في معدني الألمنيوم والفولاذ كان مساوياً الى (٠.٥mm) ، اما معدن البراص فكان عرض الفجوة مساوياً الى (٠.٧٥ mm) حيث في معدن البراص عند استخدام عرض فجوة اقل من ذلك ، سوف يؤدي الى حدوث تنقر شديد في السطح وذلك بسبب الكثافة العالية للتيار عندما يكون عرض الفجوة صغيراً .

أما درجة الحرارة المستخدمة فكانت ما بين (C ٣٠ - ٢٥) ولم يتم التطرق الى التغير بدرجة الحرارة ، وذلك لأنها ليست في مجال البحث الحالي .

كذلك لا بد من ذكر تأثير المادة العازلة (الايوكسي) على انعكاس الشكل المطلوب ، حيث بدون استخدام العازل لم يتم الحصول على الشكل المطلوب أي ان ملامح الشكل لم تظهر داخل اسطوانة الانود .

وكذلك ، كانت انعكاسية الشكل في معدن الألمنيوم افضل وأدق من معدني البراص والفولاذ ، ففي معدن البراص كان عرض الفجوة كبيراً (٠.٧٥) والتيار المستخدم (A ٤) والتركيز (g/L ١٠٠) .

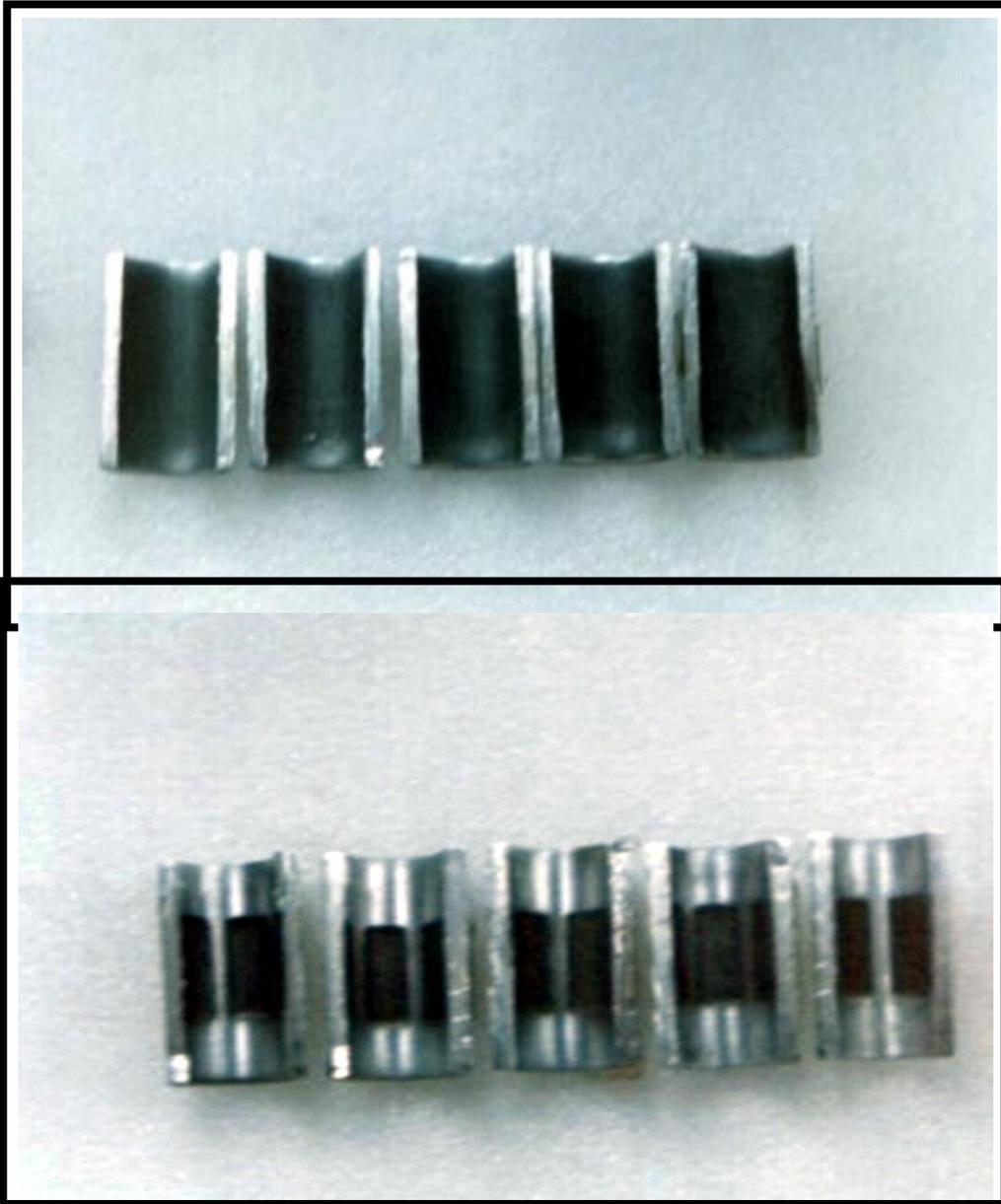
وبذلك يكون القطع المفرط كبيراً وبالتالي معكوس غير واضح ، أما معدن الألمنيوم فكان التركيز مساوياً الى (g/L ٨) والتيار تقريباً (A ٣٠ - ١٦) وكان القطع المفرط قليلاً وكذلك عرض الفجوة قليل (٠.٥ mm) وهذه ساعدت على كون الشكل المعكوس اكثر دقة .

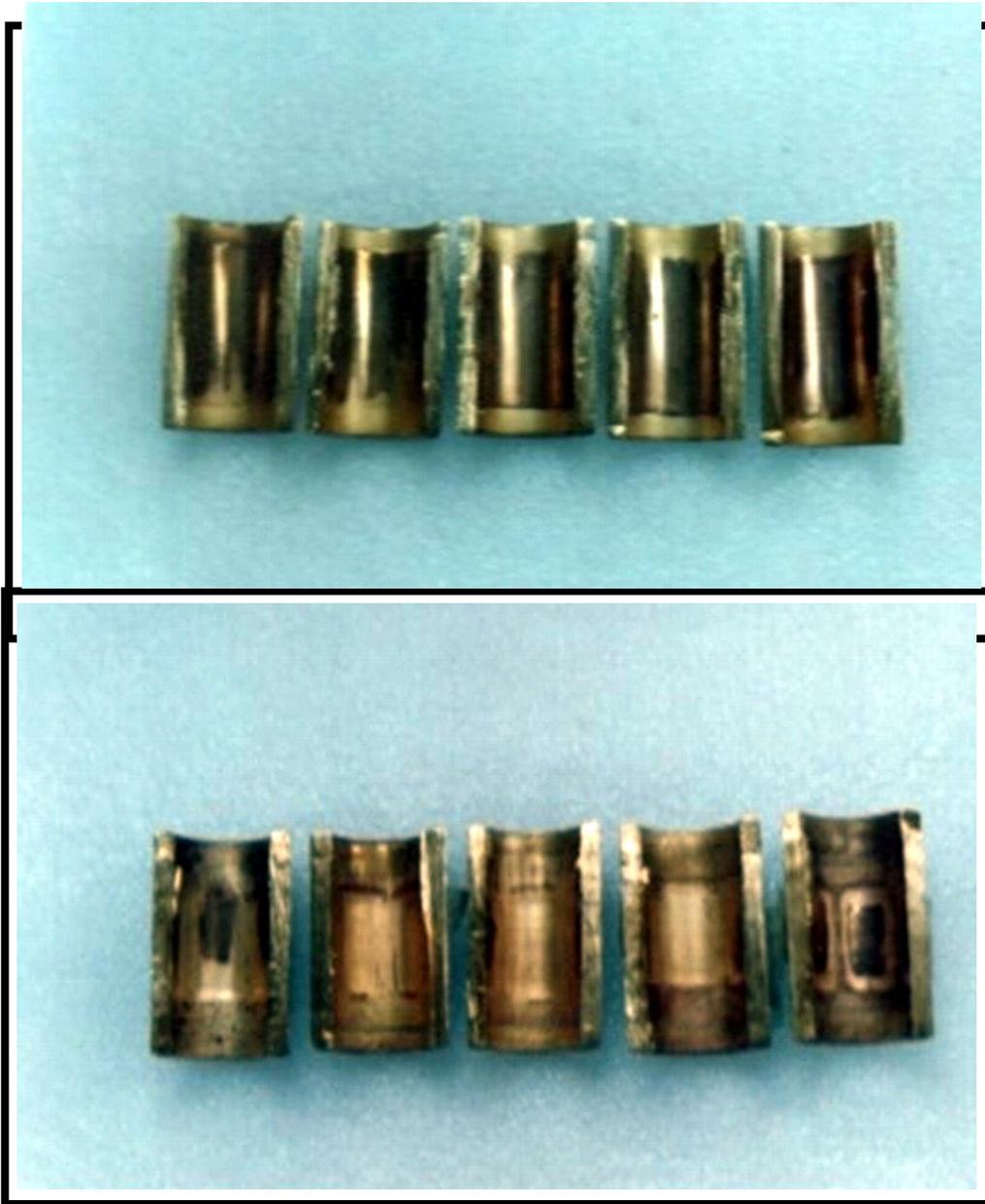
كبر عرض الفجوة وهذا يؤدي الى تنقر السطح .

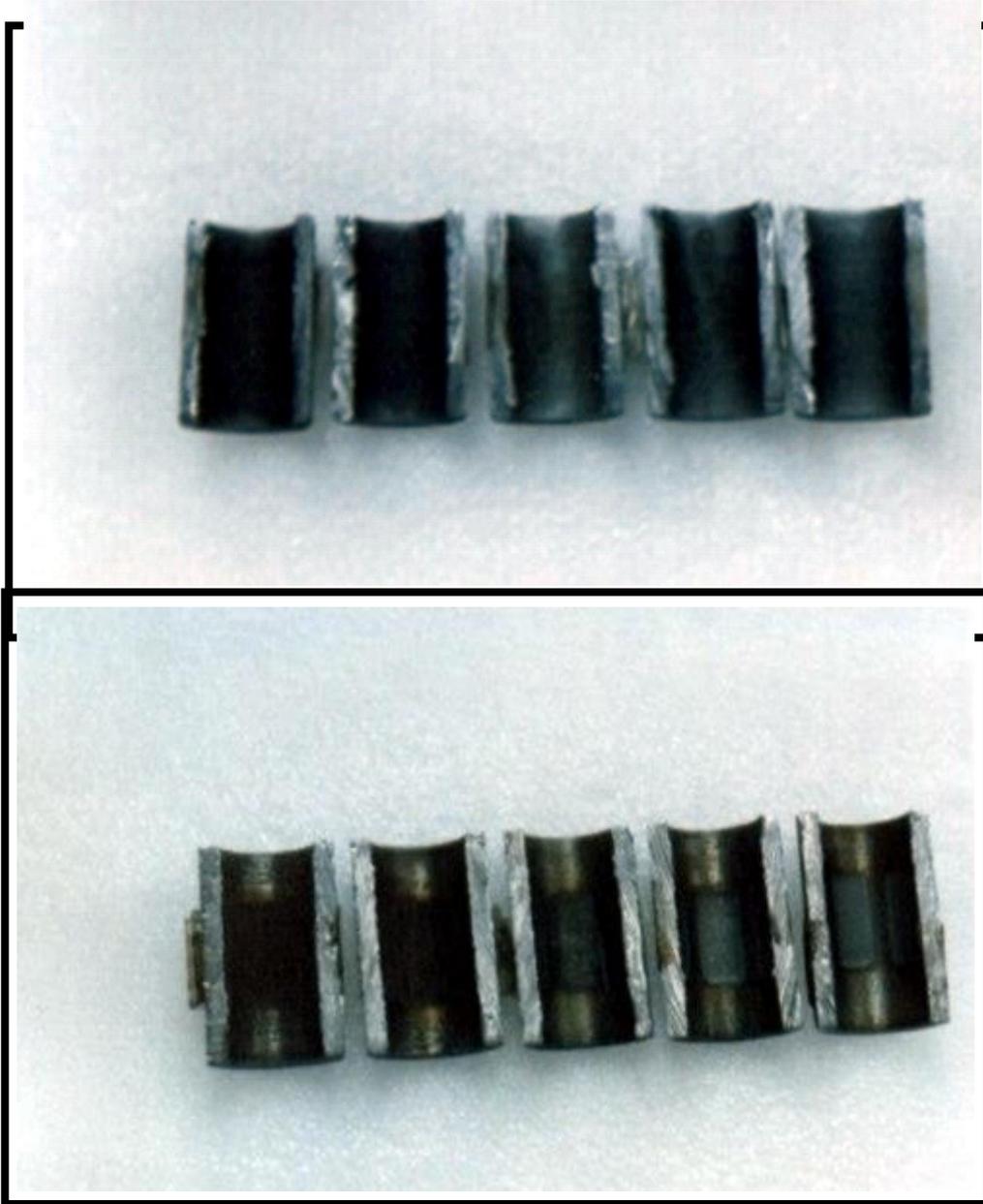
أما بالنسبة لتأثير الضغط ومعدل الجريان فلقد اوضحت الأشكال (A ١٧ - ٤) ، (B ١٧ - ٤) ، (A ١٨ - ٤) ، (B ١٨ - ٤) ان خشونة السطح تنخفض بزيادة الضغط ومعدل الجريان ولكلا عدتي القطع والسبب في ذلك هو مشابه لمعدني البراص والألمنيوم .

قائمة الرموز

الوحدة	الرمز	المصطلح
g	A	الوزن الذري
mm	a	مساحة الشريحة المواجهة للعدة
mm	b	عرض المساحة المواجهة للعدة
-	C.T ₍₁₎	عدة القطع رقم (1)
-	C.T ₍₂₎	عدة القطع رقم (2)
-	ECM	التشغيل الكهروكيميائي
-	D.C	التيار المستمر
mm/sec	f	معدل التغذية
A.sec	F	ثابت فاراداي
A	I	التيار المسلط
A/mm	J ₀	كثافة التيار الابتدائية
A/mm	J	كثافة التيار
Ω /mm	K	التوصيلية الكهربائية
mm	L	طول المساحة المواجهة للعدة
g	M	وزن المعدن المتحلل
g/sec	(m) M'	معدل الازالة الوزني النظري
-	P.V.C.	بوليمر فانيل كلورايد
g	M	الكتلة
cm ³ /amp.sec	Q(m)	معدل الازالة الحجمي
μ m	R _a	معدل خشونة السطح
μ m	R _v	خشونة السطح الابتدائية
μ m	R _f	خشونة السطح النهائية
sec	t	زمن التشغيل
m	v	الحجم
V	V	الفولتية
V	V ₀	الفولتية الابتدائية
-	w.p.	المشغولة
-	x _n %	النسبة المئوية للعنصر
mm	Y	عرض الفجوة
Mm	y ₀	عرض الفجوة الابتدائي
-	Z	عدد التكافؤ
g/cm ³	ρ_m	كثافة المعدن المشغل
-	η	كفاءة التيار







References

- ١.V.K. JAIN , VINOD.K.JAIN and P.C. PANDEY , Experimental investigation into reproduction accuracy in transition zone during ECHole sinking operation , Indian Institute of technology KANPUR (India) , ١٩٨٤ .
- ٢.F.CHOOBINEH and V.K.JAIN , “A fuzzy sets approach for selecting optimum parameters for an ECM process” , processing of advanced materials , ١٩٩٣ .
- ٣.J.F. WILSON , practice and theory of ECM , ١٩٧١ .
- ٤.C.Van Osen bruggen and C.deregt , electrochemical machining (ECM) , Philips Tech. Rev. ٤٢.No;١, ١٩٨٥ .
- ٥.M.S.HEWIDY and V.K.JAIN , “On the production of elliptical holes by ECM , INT.J.PROD.RES, Vol,٢٥ No.٣, ١٩٨٧ .
- ٦.J.KOZAK and others , Modeling and analysis of pulse electrochemical machining (PECM) , Transaction of the ASME , Vol.١١٦ , ١٩٩٤ .
٧. V.K.JAIN and P.C.Pandey , Tooling Design for ECM – A finite element Approach , Journal of engineering for Industry Vol.١٠٣ , No.١٨٣ , ١٩٨١ .
- ٨.P.C.Pandey and H.S.SHAN , Modern Machining Process , University of Roorkee , ١٩٨٠ .
- ٩.J.Kozak and others , electrochemical machining,([http :// www . meil . pw . edu . pl / ~ ecm /](http://www.meil.pw.edu.pl/~ecm/)) , ٢٠٠٢ .
- ١٠.S.D. EL Wakil , Processes and Design For Manufacturing , Sautheastern Massachusetts University , ١٩٨٩ .
- ١١.العمليات الصناعية (تشغيل وفحص الانتاج) ترجمة عبد المنعم حمودة وعبد الفتاح قدوري قدو ، جامعة بغداد ، ١٩٨٧ .
- ١٢.S.Kalpakjian , Manufacturing processes for engineering materials , Illinois Institute of technology , ١٩٨٤ .
- ١٣.H.W.YANKEE , Manufacturing Processes , ١٩٧٩ .
- ١٤.G.BOOTHROYD , Fundamentals of metal machining and machining tools , University of Massachusetts , ١٩٧٥ .
- ١٥.M.ADITHAN and A.B.GUPTA , Manufacturing technology , ١٩٩٦ .
- ١٦.L.E.DOYLE , Manufacturing Processes and materials for engineering , University of Illinois , ١٩٨٤ .
- ١٧.التشغيل الكهروكيميائي للكاريبيدات المستقرة ، برير احمد عبد الأمير ، الجامعة التكنولوجية ، ١٩٧٨ .
- ١٨.E.P.DeGarma and others , Materials and Processes in manufacturing , ١٩٩٩ .
- ١٩.P.A.Brook and R.K.Flatt , electrical method of machining , forming and cutting , University of Nottingham , ١٩٨٠ .
- ٢٠.A.Ghosh , A.K. Mallik , Manufacturing Science , Indian Institute of technology , Kanpur , ١٩٩٤ .
- ٢١.G.L. BALADWIN and others , electrochemical machining (Nomograms for prediction of process parameters) , the engineer , Vol.٢٢٥ , ١٩٦٨ .
- ٢٢.V.K.JAIN and others , Prediction of anode profile in ECBD and ECD operations , Int.J.Mach . Tools Manufact. Vol.٢٧ , No.١ , ١٩٨٦ .
- ٢٣.M.S.Reddy and others , Tool Design for ECM ; Correction factor method , Journal of engineering for industry , Vol.١١٠/١١١ , ١٩٨٨ .

References

- ୨୧.P.S.SREEJITH and others , experimental investigation into spike profile obtained during ECD of blind holes in HSS , Processing of Advanced Materials Vol.୧ , ୧୯୯୧ .
- ୨୦.V.K.JAIN and P.C. PANDEY , some investigation into electrochemical Boring (ECB) using , BITTYPE of tool , Advanced in machining tool design and manufacturing technology , ୧୯୮୨ .
- ୨୬.V.K. JAIN and S.MURUGAN , Investigation into the effect of cathode material on temperature distribution during ECM , INT.J.PROD, RES , Vol.୨୧ , No.୨ , ୧୯୮୬ .
- ୨୮.J.M.Fitz – Gerald and J.A.McGeough , A model for the mechanism controlling surface finish in ECM , electrical methods of machining forming and coating , ୧୯୮୦ .
- ୨୮.H.Dietz and others , electrochemical machining ; calculation of side gap with respect to Hydrogen evolution , ANN , CIRP , Vol.୨୩ , ୧୯୮୧ .
- ୨୯.S.C.TAM and others , ECM – abrasive polishing of metals , INT.J.PROD, Res , Vol.୨୮ , No.୧୦ , ୧୯୮୯ .
- ୩୦.C.L.FAUST , ECM of metals , BATTele Tech. Rev. , Vol.୧୨ , ୧୯୬୩ .
- ୩୧.M.S. HEWIDY and M. Fattoutt , electrochemical cutting using tubular cathodes ; response surface approach , INT , J.PROD . Res , Vol.୨୮ , No.୬ , ୧୯୮୯ .
- ୩୨.V.K.JAIN and others , Corner Reproduction Accuracy in electrochemical drilling (ECD) of Blind Holes , Journal of engineering for Industry , Vol.୧୦୬/୦୦ , ୧୯୮୧ .
- ୩୩.T.GURUMURTHY , and others , smoothing of initial roughness in ECM , INT.J.PROD. , Res , Vol.୧୬ , No.୬ , ୧୯୮୮ .
- ୩୧.O.V. KRISHNAIAH CHETTY and V.RADHAKRISHNAN , Surface Studies in ECM using Relocating Machining Fixture , INT.J.Mach , Tool Des. Res. , Vol.୧୮ , ୧୯୮୮ .
- ୩୦.O.V.KRISHNAIAH and V.RADHAKRISHNAN , A study on the influence of Grain size in electrochemical machining , Int.J.Mach. tool Des. , Res. , Vol.୧୨ , No.୧ , ୧୯୮୧ .
- ୩୬.A.B.Maszyn , Optimization of the ECM Process from the point of view of geometrical accuracy , corrosion science , Vol.୨୨ , ୧୯୮୦ .
- ୩୮.J.P.HOARES and C.R. Wiese , Current Efficiency During the ECM of IRON and NICKEL , corrosion science , Vol.୧୦ , ୧୯୮୦ .

6-1: الاستنتاجات Conclusion

1. يمكن تقليل التغير في قيمة التيار والفولتية اثناء التشغيل وذلك من خلال زيادة تركيز المحلول بحيث تقل مقاومة المحلول وخلال سمك ازالة معين بحيث لايتجاوز (2mm) من القطر الداخلي لاسطوانة الانود .
2. يمكن تقليل الانخفاض في كفاءة التيار وذلك بزيادة التركيز وللمعادن الثلاثة .
3. تختلف معدلات الازالة المعدنية اعتماداً على الوزن الذري وعدد التكافؤ للمعدن .
4. يزداد عرض الفجوة بزيادة زمن التشغيل وتختلف من معدن لآخر وحسب معدل الازالة .
5. تزداد خشونة السطح المشغّل بزيادة زمن التشغيل وللمعادن الثلاثة .
6. يمكن الحصول على افضل نعومة في معدن البراص (Brass) وقد بلغت ($0.08 \mu m$) .
7. تنخفض خشونة السطح بزيادة كل من معدل الجريان والضغط المسلط وللمعادن الثلاثة .
8. أفضل معكوس للشكل المطلوب يمكن الحصول عليه عند تشغيل معدن الالمنيوم .

6-2: التوصيات Recommendations

1. دراسة تأثير محاليل موصلة مثل محلول نترات الصوديوم ($NaNO_3$) على نعومة السطح المشغّل .
2. دراسة تأثير معدل التغذية على خشونة السطح ومعدلات الازالة وذلك باستخدام عدة قطع متحركة .
3. دراسة تأثير درجات الحرارة على نعومة السطح وخواص المعدن .
4. محاولة البحث في تصميم عدد قطع ذات اشكال معقدة مثل المسننات ومحاولة عكسها داخل اسطوانة الانود .