



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
المدرسة العليا لأساتذة التعليم التكنولوجي - سكيكدة -



قسم التكنولوجيا

التخصص: هندسة ميكانيكية

مذكرة التخرج لنيل شهادة أستاذ التعليم الثانوي

بعنوان

التوصيف والبنية المعدنية لسبائك الألمنيوم عن طريق اختبارات الالتواء

من اعداد:

- وناسي ريمة - بتيت إيمان

تحت إشراف الأستاذ:

• د. فنيديس محمد

لجنة المناقشة:

د. بن ساسي محمود	أستاذ محاضر - ب - رئيسا	م.ع.أ.ت.ت. سكيكدة
د. فنيديس محمد	أستاذ محاضر - أ - مشرفا	م.ع.أ.ت.ت. سكيكدة
د. خريف نصر الدين محمد	أستاذ محاضر - أ - مناقشا	م.ع.أ.ت.ت. سكيكدة

السنة الجامعية 2024/2023

# شكر و عرفان

الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على أشرف الأنبياء والمرسلين ومن تبعهم بإحسان إلى يوم الدين، أما بعد:

الشكر لله والثناء عليه بما يليق بكماله وجلاله الذي وفقنا وأعاننا على إنجاز هذا العمل المتواضع فله الحمد أولاً وآخراً.

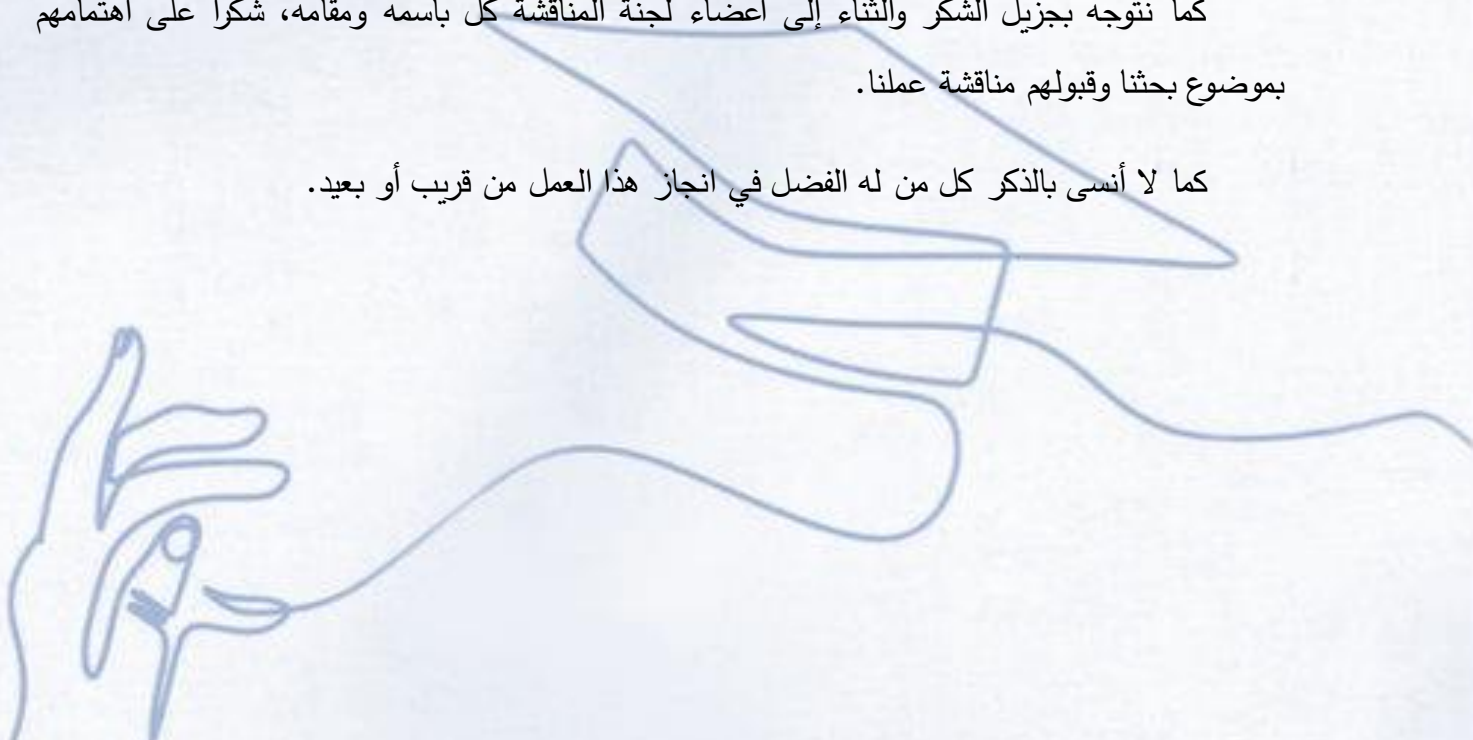
عرفنا بالجميل لأهل العطاء نتقدم بأرقى كلمات الثناء وصادق الدعاء الى كل من كان له فضلا علينا للوصول إلى هذا العمل المتواضع.

وفي مقدمتهم من كان مشرفا على انجاز مذكرة تخرجنا الدكتور "فنيديس محمد" على كل ما قدمه لنا من توجيهات ومعارف قيمة، وأفاض علينا بخبرته فشكرا وامتنانا له وجزاه الله عنا خير الجزاء.

والشكر موصول لكل القائمين على المدرسة العليا للأساتذة وأخص بالذكر السيد المدير "بوجعدار جمال" والسيد رئيس قسم التكنولوجيا "رحموني صالح"، وجميع أساتذة قسم التكنولوجيا عامة والهندسة الميكانيكية خاصة الذين أشرفوا على تكويننا، بارك الله فيهم ووفقهم لأداء مهامهم.

كما نتوجه بجزيل الشكر والثناء إلى أعضاء لجنة المناقشة كل باسمه ومقامه، شكرا على اهتمامهم بموضوع بحثنا وقبولهم مناقشة عملنا.

كما لا أنسى بالذكر كل من له الفضل في إنجاز هذا العمل من قريب أو بعيد.



## الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

{ وَأَخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنْ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ }

الحمد لله حبا وشكرا وامتنانا، الذي بفضلله ها أنا اليوم أنظر إلى حلما طال انتظاره وقد أصبح واقعا أفتخر به.

أهدي ثمرة جهدي المتواضع:

إلى من دعمني بلا حدود... وأعطاني بلا مقابل... إلى من حصد الأشواك عن دربي ليمهد لي طريق العلم وعلمي  
أن الدنيا كفاح وسلاحها العلم والمعرفة... إلى قوتي وقوتي... من علمي الصبر والتضحية.

إلى أبي الغالي حفظه الله

إلى من ساندتني في دعائها... الحزن الدافئ... إلى القلب الحنون والشمعة التي كانت لي في الليالي المظلمات  
سر قوتي ونجاحي... إلى الإنسانية العظيمة التي لطلما تمت أن تقر عينها لرؤيتي في يوم كهذا.

إلى أروع امرأة في الوجود أمي الغالية حفظها الله .

إلى الكتف الذي أستند عليه ومعهم يطيب همي وتعبي وهم أستمد قوتي إخوتي: محمد الصالح، عصام، إسلام  
إلى توأمي ورفيقة دربي من آمنت بقدراتي أختي الغالية... صبرينة... إلى الغالية زوجة أخي... كريمة. إلى سكر  
أيامي أجمل براءة أبناء أخي أنس ورحاب.

إلى من شاركنني هذا العمل... صديقتي الغالية ريمة

إلى من قضيت معهم السنين وسطرت بوجودهم أجمل الذكريات... إلى صديقات العمر: إيمان، ملاك، هناء ،  
أحلام ، إكرام ، حياة ، رباب

إلى الأقلام التي لا تحف والعطاء الذي لا ينقطع... إلى المحسنين في البدل والصابرين على العناء لمن حملوا راية  
العلم وتعلمنا منهم الكثير... أساتذتي الكرام

وأخيرا كل من ساعدني وكان له دور من قريب أو من بعيد في إتمام هذه الدراسة سائلة المولى عزوجل أن يجزي  
الجميع خير الجزاء في الدنيا والآخرة .

إيمان

# إهداء

الحمد لله على لذة الانجاز والحمد لله عند البدء وعند الختام...

الى نفسي العزيزة التي لم ترضى الا بما تستحق .

الى والدي الذي اضاء دربي وطريقي وقدوتي في كل خطوة اخطوها.

الى الداعمة الابدية لكل خطواتنا ونجاحاتنا ،الحضن الدافئ وسمائي التي لم تتركني يوما

ولا يكتمل يومي بدونها الى امي الحنونة .

الى اخواتي الاتي كن معي دائما خير السند خلال مسيرتي التعليمية (سمونة، حنان، إكرام).

الى فرحة العائلة وخير مكاسب الدنيا اخوي (خالد، ديدين).

الى رفقاء الدرب الطويل ومؤنسيه كل باسمه وعزيز مقامه.

اهديكم جميعا ثمرة جهدي والله ولي التوفيق.

وناسي ريمة.



## الملخص

تمثل هذه الدراسة مساهمة كبيرة في فهم سلوك المواد السطحية وتقديم تطورات في نماذج الاتصال سواء بوجود احتكاك أو بدونه، بهدف تحسين دقة هندسة القطع بعد التشوه البلاستيكي، مع اعتماد قانون الاحتكاك المعروف باسم "التموجات البلاستيكية".

يعكس هذا البحث خبرة تمتد لسنوات في تحسين ظروف إعادة التشكيل. يتضمن التقرير تطوير اختبارات الالتواء ودراسة فحص المعادن، مع تحديد الخواص الميكانيكية لعينات اسطوانية من سبائك الألومنيوم (AISI12).

تم التحقق من صحة اختبارات الالتواء على عينات سبائك الألومنيوم (AISI12) بنسبة 3/1 من التشوه، 3/2 من التشوه، وحتى الكسر، والتي سمحت بتحديد معامل يونغ ومعامل القص. كما تمت دراسة فحص المعادن وتحديد معامل تصلب التوتر ومعامل المقاومة بالاعتماد على قانون هولومون .

**الكلمات الرئيسية:** المرونة، اللدونة، اختبار الالتواء، الدراسة التعدينية، التصلب.

## Résumé

Cette étude représente une contribution majeure à la compréhension du comportement des matériaux de surface et à l'introduction de développements dans les modèles de contact, qu'il y ait friction ou non, dans le but d'améliorer la précision de l'ingénierie des pièces après la déformation plastique, en adoptant la loi de frottement connue sous le nom de "vague plastiques".

Cette recherche reflète une expérience s'étendant sur plusieurs années dans l'amélioration des conditions de reformage. Le rapport comprend le développement de tests de torsion et l'étude de l'analyse métallurgique, avec la détermination des propriétés mécaniques d'échantillons cylindriques d'alliage d'aluminium (AlSi12).

La validité des tests de torsion sur des échantillons d'alliage d'aluminium a été vérifiée à des taux de déformation de 1/3, 2/3 et jusqu'à la rupture. Ce qui a permis de déterminer le module de Young et le module de cisaillement. L'étude de l'analyse métallurgique et la détermination du module de rigidité à la traction et du module de résistance ont également été réalisées (loi d'Hollomon).

**Mots clés :** Élasticité, Ductilité, Test de Torsion, Étude Métallurgique, écoulement.

## **summary**

This study represents a contribution to understanding the behavior of surface materials and the development of contact models with or without friction, aiming to predict the accuracy of part engineering after plastic deformation, while considering the friction law known as "plastic wave."

This research benefits from years of experience in improving reforming conditions. In this report, we present the development of torsion tests, the study of metal inspection, and the determination of the mechanical properties of cylindrical samples of aluminum alloys (AlSi12).

We verified the validity of torsion tests on aluminum alloy samples at 1/3 deformation, 2/3 deformation, and until sample failure. These tests enabled us to determine the Young's modulus, shearing modulus, ; to proceed to the metallographic study and the determination of the coefficient of work hardening and the coefficient of resistance of this alloy.( Hollomon 's Law)

**Key words:** Elasticity, Ductility, Torsion Test, Metallurgical Study, work hardening.

الفهرس

الصفحة	العنوان
1	مقدمة عامة.
	الفصل ا. دراسة بليوغرافية.
3	1.1. مقدمة.
3	2.1. السلوك الميكانيكي للمواد.
3	1.2.1. التشوه المرن (Déformation élastique).
3	1.1.2.1. الأصل المادي للمرونة (Origine physique de l'élasticité)
4	2.1.2.1. تعميم قانون هوك (Généralisation de la loi de Hooke).
5	3.1.2.1. تباين خواص المرونة (Anisotropie élastique).
5	4.1.2.1. مفهوم قوة الخضوع (Notion de limite d'élasticité).
6	2.2.1. التشوه البلاستيكي (Déformation plastique).
6	1.2.2.1. مفهوم الخلع (Notion de dislocation)
7	2.2.2.1. معيار اللدونة (Critère de plasticité).
8	3.2.2.1. التصلب أو المرونة المرنة (Ecroutissage ou élastoplasticité).
9	4.2.2.1. اللدونة المرنة (L'élastoviscoplasticité).
11	3.1. المعادن.
11	1.3.1. المعادن الحديدية.
11	1.1.3.1. الفولاذ.
13	2.1.3.1. حديد الزهر.
14	2.3.1. المعادن الغير حديدية.
14	1.2.3.1. الالمنيوم وسبائكته.

21	2.2.3.1. النحاس وسبائكه.
24	4.1. الخواص الميكانيكية الرئيسة.
25	5.1. الأبحاث العلمية.
27	6.1. خاتمة.
	الفصل II. تقنيات توصيف المواد.
28	1.1. مقدمة.
28	2.1. اختبار المواد الهندسية .
28	2.1. 1. الاختبارات الإتلافية للمواد (Essais destructifs)
28	2.1. 1.1. اختبار الشد (Essai de traction)
31	2.1. 2. اختبار الضغط (Essai de compression)
37	2.1. 3. اختبار الالتواء (Essai de torsion)
39	2.1. 4. اختبار الصدم (Essai d'impact)
41	2.1. 5. اختبار الصلادة (Essai de dureté)
47	2.2. 2. الاختبارات الغير إتلافية للمواد (Contrôle non destructif)
48	3. الهدف من تعريض المعادن لمختلف الاختبارات
48	4. الخاتمة
	الفصل III. الإجراءات التجريبية
49	1.1. مقدمة
49	2. المعدات المستخدمة
49	1. 2. العينات
50	2.2. 3. الآلات
50	2.2. 1. مخرطة متوازية

51	2.2.2.III. آلة تغريز
52	3.2.III. فرن كهربائي (Controlab)
53	III. 2. 4. لقم القطع وحامل الأدوات
53	III. 2. 5. المجهر (Microscope métallographique)
54	III. 2. 6. آلة اختبار الالتواء (Machine de torsion)
55	III. 2. 7. معدات أخرى.
55	III. 3. بروتوكول الاختبار.
55	III. 1. 3. معايير قبول الاختبارات.
56	III. 2. 3. اختبارات الالتواء (Essais de torsion).
56	III. 3. 3. المعالجة الحرارية.
57	III. 4. 3. الدراسة التعدينية (Structure métallographique)
59	III. 5. 3. تحديد معاملات التصلب ومعامل المقاومة.
60	III. 4. الخاتمة.
	الفصل IV. نتائج الاختبارات.
61	IV. 1. مقدمة.
61	IV. 2. إختبارات الإلتواء.
62	IV. 1. 2. سجلات الإختبار.
69	IV. 2. 2. تطور عزم الدوران كدالة لزاوية الالتواء.
69	IV. 3. 2. تطور إجهاد القص كدالة لزاوية وحدة الالتواء.
73	IV. 4. 2. تطور الإجهاد $\sigma$ المكافئ لـ Von Mises كدالة تشوه Hencky $\epsilon$
77	IV. 5. 2. اختبار 3/1 و 3/2 من الكسر.
79	IV. 3. الدراسة التعدينية (Etude métallographique).

79	IV. 3. 1. تشوه العينة المصلدة عند 33% مقارنة بالاستطالة عند الكسر.
80	IV. 3. 2. عينة صلبة غير مشوهة.
81	IV. 3. 3. تشوه العينة المصلدة إلى 66% مقارنة بالاستطالة.
82	IV. 3. 4. عينة صلبة مشوهة حتى تمزق.
83	IV. 4. تحديد معامل التصلب (coefficient d'écrouissage) ومعامل المقاومة (coefficient de résistance).
85	IV. 4. 1. اختبار الكسر الأول.
86	IV. 4. 2. اختبار الكسر الثاني.
87	IV. 4. 3. اختبار الكسر 3/2 الأول.
88	IV. 5. خاتمة.
89	الخاتمة العامة.
90	المراجع.

الصفحة	الشكل
4	الشكل 1.1: القوة الرابطة كدالة للمسافة بين الذرات.
6	الشكل 2.1: مثال على علاقة الإجهاد والتشوه لمادة ذات سلوك مرن.
7	الشكل 3.1: مثال على حركة الخلع.
10	الشكل 4.1: المنحنى المميز للمجالات الثلاثة زحف إلى كسر.
17	الشكل 5.1: فرن لإجراء التحليل الكهربائي.
29	الشكل 1.11: ماكينة اختبار الشد.
29	الشكل 2.11: عينات قياسية لاختبار الشد.
31	الشكل 3.11: منحنى الاجهاد والانفعال لمعدن مطيل مبينا المناطق المختلفة.
31	الشكل 4.11: منحنى الاجهاد والانفعال لمعدن مطيل مبينا شكل العينة عند فترات مختلفة من الشد.
32	الشكل 11.5: شكل العينة في اختبار الضغط.
33	شكل 11.6: حدوث الشكل البرميلي للمعادن المطبقة في اختبار الضغط.
35	الشكل 11.7: منحنيات الاجهاد والانفعال الهندسي و الحقيقي في اختبار الضغط.
35	الشكل 11.8: شكل العينات القياسية لاختبار الضغط.
37	الشكل 11.9: عزم الالتواء نتيجة قوتين متوازيتين ومتساويتين ومتعاكستين في الاتجاه.
38	الشكل 10.11: ماكينة اختبار الالتواء.

- 38 الشكل 11.11: عينة اختبار الالتواء.
- 39 الشكل 12.11: الرسم البياني لعزم الالتواء وزاوية الالتواء اي الحمل والتشكيل .
- 40 الشكل 13.11: ماكينة اختبار الصدم.
- 40 الشكل 14.11: شكل عينة اختبار الصدم.
- 41 الشكل 15.11: تثبيت عينات اختبار شاربي.
- 41 الشكل 16.11: تثبيت عينات اختبار ايزود.
- 43 الشكل 17.11: جهاز اختبار الصلادة.
- 43 الشكل 18.11: اختبار برينل للصلادة: اداة الاختبار، قطر وعمق الاثر (أ) والشاشة المكبرة بالجهاز التي عليها ميكرومتر مجهري لقياس قطر الاثر (ب).
- 45 الشكل 19.11: إختبار فيكرس للصلادة: وضعية الاختبار وشكل الاثر.
- 46 الشكل 20.11: اختبار روكويل للصلادة.
- 49 الشكل 1. III: عينات اختبار الالتواء.
- 51 الشكل 2. III: مخروطة متوازية (SN 40 C).
- 52 الشكل 3a.III: آلة التفريز المستخدمة (آلة تفريز شاقولية).
- 52 الشكل 3b.III: تشغيل الأسطح المستوية للعينات.
- 53 الشكل 4.III: فرن كهربائي.
- 53 الشكل 5.III: ترتيب قطع الاختبار داخل الفرن.

- 53 الشكل. III. 6: اللقم وحاملات الأدوات المستخدمة.
- 54 الشكل. III. 7: المجهر الضوئي الفلزي (يورو مكس).
- 55 الشكل. III. 8: آلة الالتواء.
- 56 الشكل. III. 9: عينة عند الكسر.
- 58 الشكل. III. 10: الأسطح المصقولة.
- 59 الشكل. III. 11: التقاط الصور المجهرية.
- 69 الشكل. IV. 1: منحنى عزم الدوران بدلالة زاوية الالتواء للعينة عند اختبار الكسر الأول.
- 70 الشكل. IV. 2: منحنى وحدة زاوية الالتواء بدلالة إجهاد القص.
- 71 الشكل. IV. 3: تكبير التشوهات الصغيرة لاختبار الكسر الأول.
- 72 الشكل. IV. 4: تكبير التشوهات الصغيرة لاختبار الكسر الأول عند 3/1.
- 72 الشكل. IV. 5: تكبير التشوهات الصغيرة لاختبار الكسر الأول عند 3/2.
- 73 الشكل. IV. 6: تكبير التشوهات الصغيرة لاختبار الكسر الثاني عند 3/2.
- 73 الشكل. IV. 7: تكبير التشوهات الصغيرة لاختبار الكسر الثالث عند 3/2.
- 75 الشكل. IV. 8: منحنى الإجهاد  $\sigma$  المكافئ لـ Von Mises كدالة تشوه Hencky  $\epsilon$  عند الكسر.
- 75 الشكل. IV. 9: اختبار الكسر الأول.
- 76 الشكل. IV. 10: تكبير التشوهات الصغيرة لاختبار الكسر الثالث.
- 77 الشكل. IV. 11: منحنى الإجهاد  $\sigma$  المكافئ لـ Von Mises كدالة تشوه Hencky  $\epsilon$  عند 3/1 و 3/2 من الكسر.

- 78 الشكل. 12.IV: منحنى الإجهاد  $\sigma$  المكافئ لـ Von Mises كدالة تشوه Hencky  $\epsilon$  عند 3/1 من الكسر.
- 78 الشكل. 13.IV: منحنى الإجهاد  $\sigma$  المكافئ لـ Von Mises كدالة تشوه Hencky  $\epsilon$  عند 3/2 من الكسر.
- 79 الشكل. 14.IV: منحنى الإجهاد  $\sigma$  المكافئ لـ Von Mises كدالة تشوه Hencky  $\epsilon$  عند 3/1 و 3/2 من الكسر.
- 80 الشكل. 15a .IV: عينة صلبة مشوهة إلى 33% (centre zoom X40).
- 80 الشكل. 15b . IV: عينة صلبة مشوهة إلى 33% (centre zoom X40).
- 80 الشكل. 15c. IV: عينة صلبة مشوهة إلى 33% (centre zoom X100).
- 80 الشكل. 16. IV: عينة صلبة مشوهة إلى 33% (périphérie zoom X40).
- 81 الشكل. 17. IV: عينة صلبة غير مشوهة (centre zoom X40).
- 81 الشكل. 18a. IV: عينة صلبة مشوهة إلى 66% (centre zoom X40).
- 81 الشكل. 18 b. IV: عينة صلبة مشوهة إلى 66% (centre zoom X40).
- 82 الشكل. 18c. IV: عينة صلبة مشوهة إلى 66% (centre zoom X100).
- 82 الشكل. 19. IV: عينة صلبة مشوهة إلى 66% (périphérie zoom X100).
- 82 الشكل. 20a .IV: عينة صلبة مشوهة للتمزق (périphérie zoom X10).
- 82 الشكل. 20b .IV: عينة صلبة مشوهة للتمزق (périphérie zoom X10).
- 83 الشكل. 20 c. IV: عينة صلبة مشوهة للتمزق (périphéri zoom X10).
- 83 الشكل. 21. IV: عينة صلبة مشوهة للتمزق (centre zoom X10).
- 85 الشكل. 22. IV: تحول منحنى الإجهاد والانفعال للكسر الأول.
- 86 الشكل. 23. IV: تحول منحنى الإجهاد والانفعال للكسر الثاني.
- 87 الشكل. 24. IV: تحول منحنى الإجهاد والانفعال للتمزق عند 3/2.

الصفحة	الجدول
13	الجدول 1.1: تصنيف الفلزات غير الحديدية.
22	الجدول 2.1: سبائك النحاس ومكوناتها.
23	الجدول 3.1: المعادن المستخدمة في تصنيع الأشياء التقنية.
51	الجدول 1.111: التكوين الكيميائي لسبيكة الألمنيوم (AISI12).
51	الجدول 111.2: الخصائص الميكانيكية المتوسطة الموحدة.
51	الجدول 111.3: الخصائص الفيزيائية.
53	الجدول 111.4: متطلبات المعالجة الحرارية.
63	الجدول 1.111.1: اختبار الكسر.
64	الجدول 111.2: الاختبار الأول عند التمزق 3/1.
65	الجدول 111.3: الاختبار الثاني عند التمزق 3/1.
66	الجدول 111.4: الاختبار الثالث عند التمزق 3/1.
67	الجدول 111.5: الاختبار الأول عند التمزق 3/2.
68	الجدول 111.6: الاختبار الثاني عند التمزق 3/2.
69	الجدول 111.7: الاختبار الثالث عند التمزق 3/2.

## الجدول

- 76 الجدول 8.IV: القيم النظرية المستخرجة من [www.matweb.com](http://www.matweb.com)
- 85 الجدول 9.IV: قيم  $\ln(\sigma)$  كدالة لـ  $\ln(\varepsilon)$  للكسر الأول.
- 86 الجدول 10.IV: قيم  $\ln(\sigma)$  كدالة لـ  $\ln(\varepsilon)$  للكسر الثاني.
- 87 الجدول 11.IV: قيم  $\ln(\sigma)$  كدالة لـ  $\ln(\varepsilon)$  للتمزق عند  $3/2$ .
- 88 الجدول 12.IV: قيم معامل التصلب ومعامل المقاومة.

## قائمة الرموز

موتر الإجهاد.	$\sigma_{ij}$
موتر التشوهات.	$\epsilon_k$
موتر المرونة.	$C_{ijkl}$
موتر الرضا المرن.	$S_{ijkl}$
معامل يونغ (Module d'Young).	E
معامل بواسون.	$\nu$
معامل زينر.	$A_{Zene}$
القوة الرابطة.	$F_m$
المقاومة النظرية للخضوع.	$\sigma_e$
ناقل برغر.	$\vec{b}$
المعيار المكافئ للدونة.	$\bar{\sigma}$
الموتر الدافياتوري للضغط.	$\underline{s}$
الإجهاد البلاستيكي الحقيقي.	$\epsilon$
درجة حرارة إنصهار المادة ( $C^0$ ).	$T_f$
الفولاذ الميكانيكي.	E
فولاذ خاص للمعالجة الحرارية.	C
الصلب المصبوب.	G
رمز تعيين فولاذ عالي السبائك.	X
حديد زهر الجرافيت الرقائق.	GJL
حديد زهر الجرافيت الكروي.	GJS

## قائمة الرموز

القوة المطبقة (N).	P أو F
الإجهاد الطبيعي.	$\sigma$
مساحة مقطع العينة الأصلي ( $mm^2$ ).	$A_0$
التشكيل.	$\Delta L$
الإنفعال.	e
الطول الأصلي للعينة (mm).	$L_0$
الطول النهائي للعينة (mm).	$L_f$
الإجهاد الأقصى للضغط.	$\sigma_{max}$
حد المقاومة القصوى.	$F_{max}$
الإجهاد الحقيقي في الضغط.	$\sigma_{tr}$
مساحة أكبر مقطع مستعرض للعينة عند تأثير الحمل.	$A_i$
قطر العينة. (mm).	d أو $\Phi$ أو D
الأثر الناتج من إختبار برينل للصلادة.	d
حمل ابتدائي .	$F_0$
الحمل الكلي النهائي.	$F_1$
الطول الإجمالي لعينة الالتواء.	L
الطول المتوسط لعينة الالتواء.	l
معامل المقاومة للمادة (MPa).	K
معامل التصلب.	n

## قائمة الرموز

وحدة زاوية الالتواء .	$\theta$
العزم التربيعي .	$I_0$
إجهاد القص .	$\tau_{max}$
عزم الالتواء (Nm) .	Mt
زاوية الالتواء (درجة) .	$\alpha$
المسافة بين الفكين .	L
معامل القص (module de cisaillement) (Mpa)	G
الاجهاد المكافئ لـ Von Mises .	$\sigma_{\acute{e}qui VM}$
زاوية الانزلاق (درجة) .	$\gamma$
تشوه HENCKY .	$\epsilon_{HENCKY}$
معامل التحديد (Coefficient de détermination) .	R <sup>2</sup>
حد المرونة .	$\sigma_0$
التشوهات البلاستيكية المكافئة .	$\epsilon_p$
إجهاد العتبة (Contrainte seuil)	$\sigma_s$
معدل الإجهاد .	$\dot{\epsilon}$

## مقدمة عامة

تتعلق دراسة السلوك الميكانيكي للمواد بفهم كيفية استجابة المواد للقوى الميكانيكية مثل الضغط، الشد، الالتواء، والعزوم. يتضمن ذلك دراسة الخصائص الميكانيكية مثل الصلادة، والقوة، والمرونة، واللدونة.

فهم سلوك وخصائص المواد الميكانيكية أمر بالغ الأهمية في مجالات الصناعة، حيث يتم اختيار واستخدام المواد بناءً على خصائصها الميكانيكية لضمان أداء وأمان متفوقين. اختيار المواد المناسبة للتطبيقات المختلفة، يساعد في ضمان أداء موثوق وآمن للأنظمة والهياكل الهندسية.

تتأثر هذه الخصائص بعوامل عديدة مثل التركيب الجزيئي، وطريقة التصنيع، والمعالجات الحرارية، والظروف البيئية. يهدف الباحثون في علم المواد إلى تطوير وتحسين المواد من خلال فهم العلاقة بين التركيب الداخلي والسلوك الميكانيكي، وذلك من خلال استخدام تقنيات التصنيع والاختبار المتقدمة.

تحدث الاختبارات الميكانيكية للمواد تغييرات في التركيب البلوري والهيكلي للمواد، وقد تؤدي إلى تغير في الخصائص الميكانيكية مثل الصلابة والمرونة. يمكن أن تحدث تشققات وتغيرات في الهيكل البلوري للمعدن، مما يؤثر على قوته ومتانته. وهذه الاختبارات هي الخطوة الأساسية للوصول إلى الكميات المميزة للمواد، من معامل يونج إلى حد المرونة، و معامل القص.

وخصص الفصل الأول للبحث الببليوغرافي لتعريف بعض المواد المعدنية ودراسة سلوكها. في هذا الفصل، نحن بحاجة إلى معرفة السلوك الميكانيكي للمواد المستخدمة في الهياكل المختلفة. يتم تعريف قوانين السلوك بطريقة عامة وقابلة للتكوين حسب المادة المدروسة. وتختلف التشوهات باختلاف المنطقة المدروسة (المنطقة المرنة، المنطقة اللدنة).

وفي الفصل الثاني نقدم تقنيات توصيف المواد. تستخدم في المختبرات الجامعية والصناعية: اختبارات أحادية المحور (شبه الساكنة والديناميكية).

الفصل الثالث عرضنا فيه المعدات اللازمة للاختبار، البروتوكولات والظروف التجريبية المختارة.

أما الفصل الرابع فقد تناول نتائج اختبارات الالتواء وكذلك الدراسة التعدينية على العينات.

وأخيرا نختم بخاتمة عامة وقائمة المراجع الببليوغرافية التي تم الرجوع إليها كجزء من هذا العمل.

# الفصل 1

## الدراسة البيبايوغرافية

**1.1. مقدمة**

السلوك الميكانيكي للمواد، وعلى وجه الخصوص المواد المعدنية، يعد من المواضيع الحيوية في عالم الهندسة والعلوم المادية. يتناول هذا المجال دراسة تفاعل المواد مع القوى الخارجية، وكيفية استجابتها لها، سواء تحت تأثير الشد، الضغط، الانحناء، أو أي قوة أخرى. يركز السلوك الميكانيكي للمواد المعدنية على فهم خصائصها الميكانيكية التي تحدد تفاعلها مع القوى.

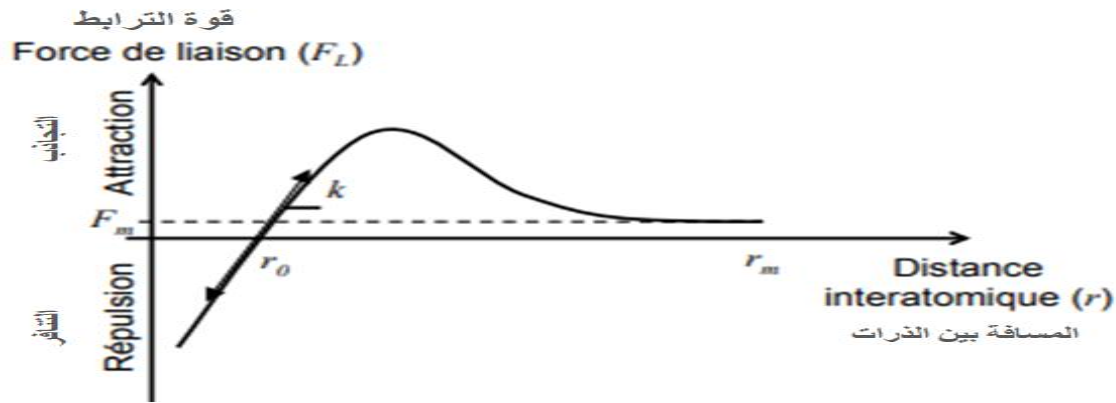
**2.1. السلوك الميكانيكي للمواد**

عندما يتعرض الجسم لقوى خارجية، تنشأ إجهادات داخلية ترتبط بالتشوهات. يمكن وصف السلوك الميكانيكي للمادة من خلال إنشاء علاقات بين الضغوط والتشوهات المرتبطة بهذه المادة. ومع ذلك، فإن آليات التشوه تختلف اعتمادًا على نوع المادة والإجهاد المطبق. إذا كان التشوه قابلاً للعكس وعادت المادة إلى حالتها الأصلية عند إزالة القوة، يُعرف ذلك بالسلوك المرن، وإذا لم تعد المادة إلى حالتها الأولية، يُعرف ذلك بالسلوك البلاستيكي. وأخيراً، هناك الكسر إذا تم تدمير المادة بسبب الضغط الزائد. وبالتالي، لوضع قانون السلوك لمادة ما، يجب دراسة التشوه الميكانيكي كدالة للقوة المطبقة [1].

**1.2.1. التشوه المرن (Déformation élastique)****1.1.2.1. الأصل المادي للمرونة (Origine physique de l'élasticité)**

تعتمد خصائص المواد بشدة على الروابط بين الذرات وكثافة المكس الذري (l'empilement atomique). هذه الروابط تحدد العديد من الخصائص مثل طاقة التماسك، والقوة المطلوبة لفصل الذرات عن بعضها، ومرونة المواد، وقدرتها على توصيل الحرارة والكهرباء، واستقرارها في الطور، وتفاعليتها. تختلف هذه الروابط وكيفية تغيرها مع المسافة بين الذرات بشكل كبير وذلك يعتمد بشكل كبير على الروابط الكيميائية الموجودة. يمكن تصنيف هذه الروابط إلى نوعين رئيسيين: الروابط القوية مثل الأيونية والتساهمية والمعدنية، والروابط الضعيفة مثل روابط الهيدروجين (مثل روابط Van der Waals). عند التوازن وبدون إجهاد، يكون هناك مسافة معينة بين الذرات تسمى الراحة. وعند تمديد الروابط (سحب)، يظهر قوة تقاوم السحب، وعند زيادة الضغط، يظهر تقارب بين الذرات بقوة التنافر. هذه العلاقات تحدد صلابة الروابط، وتسمح نظريًا بحساب المواد

المرنة بشرط دراسة الهيكل البلوري. يمكن استخدام قانون هوك (loi de Hooke) لتحديد صلابة المواد العيانية كدالة على صلابة الروابط المجهرية.



الشكل 1.1: القوة الرابطة كدالة للمسافة بين الذرات.

### 2.1.2.1. تعميم قانون هوك (Généralisation de la loi de Hooke)

تعميم قانون هوك في سياق المرونة الخطية متساوية الحرارة لتشوهات صغيرة لمادة بلورية تمت عن طريق كوشي. وقد اقترح كوشي التعبير الذي يعتبر كل مكون من مكونات موتر الإجهاد  $\sigma_{ij}$  كدالة خطية للمكونات من موتر التشوهات  $\epsilon_{kl}$  بناءً على ذلك، يكتب قانون هوك على النحو التالي:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \epsilon_{kl} \quad (1.1)$$

$$\epsilon_{kl} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{ij} \quad (2.1)$$

$S_{ijkl}$  و  $C_{ijkl}$  هي موترات من الدرجة الرابعة تسمى موترات الصلابة وموتر المرونة وموتر الرضا المرن للمادة على التوالي. في حالة وجود مادة صلبة مرنة خطية متباينة الخواص، يتم تخفيض عدد الثوابت المرنة إلى 21. وبناءً على تركيب البلورة للمادة، يمكن تقليل عدد الثوابت المرنة مع مراعاة تماثلات البلورة. يجب أن نشير إلى أن الألومنيوم والنيكل لهما هيكل مكعب. على سبيل المثال، في حالة التماثل المكعب، يشار عادة إلى المكونات المستقلة الثلاثة  $C_{ijkl}$  بواسطة:

$$\sigma_{11} = (\sigma_{1111}) \quad \sigma_{12} = (\sigma_{1212}) \quad \sigma_{44} = (\sigma_{4444})$$

إلى اثنين باستخدام العلاقة :

$$C_{44} = 1/2(C_{11} - C_{12}) \quad (3.1)$$

بعد ذلك يمكن التعبير عن هذه الثوابت المرنة بأشكال مختلفة. على سبيل المثال، يمكن تعبيرها باستخدام معامل يونغ  $E$  ومعامل بواسون  $\nu$  بالشكل التالي:

$$C_{11}=E \quad (4.1)$$

$$C_{11}/C_{12}=\nu \quad (5.1)$$

### 3.1.2.1. تباين خواص المرونة (Anisotropie élastique)

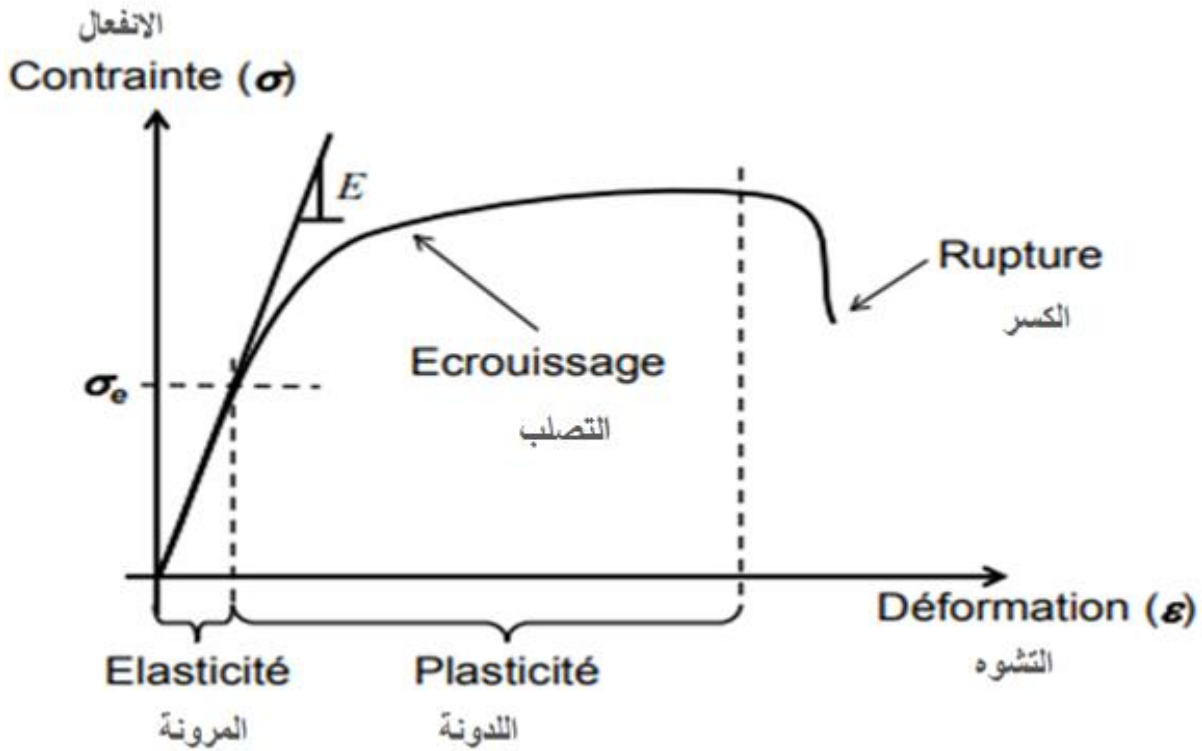
في حالة وجود مادة صلبة مكعبة متباينة الخواص، لم تعد المعادلة  $C_{44}=1/2(C_{11}-C_{12})$  صالحة. وبالتالي، يمكن تحديد نسبة تباين الخواص المرنة باستخدام معامل زينر المعروف بالشكل التالي:

$$A_{Zener}=2 \cdot C_{44}/(C_{11}-C_{12}) \quad (6.1)$$

باستخدام قيم الثوابت المرنة، تم العثور على معامل تباين الخواص يبلغ 1.22 للألمنيوم و 2.67 للنكل وبالتالي يمكن اعتبار الألمنيوم متساوي الخواص بشكل مرن، ومعامل زينر قريب من 1.

### 4.1.2.1. مفهوم قوة الخضوع (Notion de limite d'élasticité)

في حالة تمدد الرابطة بشكل مفرط، تزداد قوة الرابطة حتى تصل إلى القيمة القصوى  $F_m$  عند طول  $r_m$ ، وهي القيمة التي يتم فيها تفكك الرابطة (الشكل 2.1). إذا قمنا بنمذجة الدالة  $\sigma(r)$  كتقريب أولي باستخدام دالة جيبية، يمكننا تقدير المقاومة النظرية للخضوع  $\sigma_e$  بالتقريب من  $E \cdot \lambda / \pi$ ، حيث  $\lambda$  هو جزء من المسافة بين الذرات. بالنسبة لمعظم المواد السيراميكية، عند قياس الحد التجريبي للمرونة، نحصل على قيمة تقريبية تعادل  $E/2\pi$  ومع ذلك، في حالة المعادن، تكون قيم قوة الخضوع التجريبية أقل بكثير من القيمة النظرية. لذلك، هناك آليات أخرى لشرح تدفق البلاستيك في المعادن. بشكل عام، تنشأ مرونة المعادن من انتشار العيوب الخطية العناصر الأولية الموجودة في الهياكل البلورية، وتسمى هذه العيوب بالاضطرابات.



الشكل 2.1: مثال على علاقة الإجهاد والتشوه لمادة ذات سلوك مرن.

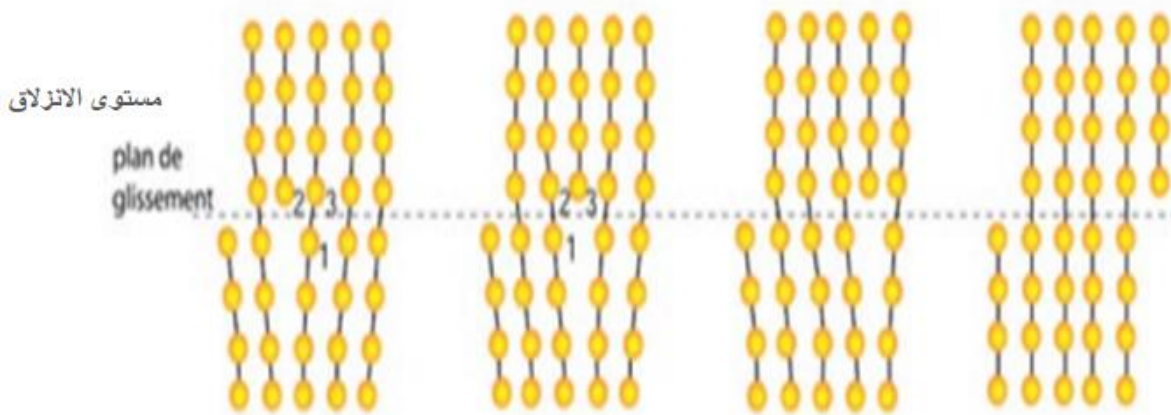
### 2.2.1. التشوه البلاستيكي (Déformation plastique)

بعد أن تعرفنا على أساسيات التشوه المرن للمواد ومفهوم الحد من حيث المرونة، سننتقل الآن إلى شرح التشوه البلاستيكي في المعادن.

#### 1.2.2.1 مفهوم الخلع (Notion de dislocation)

الخلع هو عيب خطي يحدث عندما ينقطع الترتيب البلوري في المادة، ويتسبب في تشوهات مرنة في غياب الإجهادات المطبقة. يتميز الخلع باتجاه الخط  $L$  والمتجه  $\vec{b}$ ، الذي يعرف أيضًا بـ "ناقل برجر (vecteur de Burgers)". عندما يكون متجه البرغر موازيًا للخط المستقيم، يُعرف الخلع بالخلع اللولبي، وإذا كان عموديًا، يُعرف بخلع الزاوية. في الواقع، يتم تداخل الاضطرابات مع أجزاء المسامير والزواوية. ينزلق الخلع المتجه للبرغر (المسامير) على مستوى المستوي، وتشكل جميع المستويات المنزلة نظام انزلاق. عادةً ما تكون المستويات المنزلة "السهلة" هي تلك ذات الكثافة الذرية الأعلى (أدنى قوة احتكاك) واتجاهات الانزلاق هي الاتجاهات البلورية الأكثر كثافة (أدنى تشوه). لذلك، يوجد عدد قليل من أنظمة الانزلاق السهلة عند النظر إلى البنية البلورية. يحتوي الهيكل الذي يحتوي على أنظمة انزلاق سهلة أكثر على بلورات أكثر مرونة (على الرغم من أن

المرونة تعتمد أيضًا على عوامل أخرى مثل النقاء وحجم الحبوب وما إلى ذلك). على العكس من ذلك، يكون الهيكل الذي يحتوي على عدد قليل من أنظمة الانزلاق السهلة هشا بطبيعته (حيث تنكسر المواد بدون تشوه بلاستيكي) كما هو موضح في (الشكل 3.1) مثال على حركة الخلع في مستوى منزلق مما يسبب قص البلورة تحت حمولة معينة، ليست جميع الاضطرابات في المادة تكون متحركة. نتيجة لذلك، قد تكون هناك اضطرابات ثابتة يمكن أن تكون عوائق أمام حركة الاضطرابات المتحركة، ومن الجانب الآخر، قد تتداخل الاضطرابات المتحركة مع بعضها البعض أثناء حركتها. وبالتالي، تعتبر الاضطرابات حواجز وعوائق أمام التشوه البلاستيكي. أثناء تشوه المادة البلاستيكية، يحدث زيادة في كثافة الاضطرابات (وهي آلية فرانك-ريد)، وتكون هناك تقاطعات بين أنظمة عدم الانزلاق المستوية. وبالتالي، تزداد القوة المطلوبة لحركة الاضطرابات المتحركة مع تشوه المادة البلاستيكية، وتصل إلى حد التصلب للمواد. يُشار إلى هذا التصلب المتزايد مع تشوه المادة البلاستيكية بـ "التصلب". ومع ذلك، يجب تحديد معيار قابل للملاحظة أولاً لتحديد ما إذا كانت المادة البلاستيكية معرضة للإجهاد المحدد.



الشكل 3.1: مثال على حركة الخلع.

### 2.2.2.1. معيار اللدونة (Critère de plasticité)

على المستوى المجهرى، يتوافق الوصول إلى اللدونة مع اللحظة التي يتجاوز فيها العمل على الاضطرابات عتبة تعكس مقاومة العقبات. وعلى المستوى العياني، يتم تحديد ما إذا كانت المادة قد لدنت أم لا بواسطة قوة الخضوع  $\sigma_e$  المقارنة بالضغط المكافئ المطبق على المادة. يُعتبر هذا الإجهاد أو المعيار المكافئ لللدونة عددًا قياسيًّا، وعادةً ما يُشار إليه بـ  $\bar{\sigma}$  ويُعطى بواسطة دالة الشحن  $f$  التي تعتمد على موتر الإجهاد. وبالتالي، يُدمج في تعريفه الآثار المحتملة لتباين الخواص. إذا كانت الدالة  $f(\bar{\sigma})$  سالبة، فإننا في نظام مرن

ويحكم سلوك المواد قانون هوك. ومن ناحية أخرى، إذا كانت  $f(\bar{\sigma})$  تساوي صفرًا، فإننا في نظام بلاستيك. هناك العديد من معايير اللدونة في المؤلفات بما في ذلك معايير Mises Von Tresca، أو Drucker-Prager لخواص المواد، Hill و Tsai للمواد ذات الخواص المتباينة.

يُستخدم معيار Von Mises بشكل شائع للمعادن، ويعتمد على الثابت الثاني لموتر الدافياتوري للضغوط  $S$  يمكن تعريفه بشكل مباشر كدالة لأولين من ثوابت موتر الإجهاد، أو بشكل مباشر كدالة لوظيفية مكوناته الرئيسية  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  (القيم الذاتية لموتر الإجهاد)، بغض النظر عن الضغط الهيدروستاتيكي .

$$f(\bar{\sigma}) = \bar{\sigma}_{VM} - \sigma_e \quad (7.1)$$

$$\bar{\sigma}_{VM} = \sqrt{\left(\frac{3}{2} sij \cdot sij\right)}, \quad sij = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \sigma_{ij} \quad (8.1)$$

$$\bar{\sigma}_{VM} = \sqrt{\left[1/2[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] \right]} \quad (9.1)$$

معياري Tresca، الذي يأخذ في الاعتبار ضغوط القص الحرجة، هو أقرب تفسيرًا مجهريًا لحركة الاضطرابات، ولكن المعيار يعتبر تقريبًا ممتازًا له. ومن الأسهل بكثير تنفيذه بدلاً من تنفيذ سطح الشحنة المتعدد السطوح مع "الزوايا"، حيث يكون سطح الشحنة إهليلجيًا.

### 3.2.2.1. التصلب أو المرونة المرنة (Ecrouissage ou élastoplasticité)

هو عملية تصلب المعدن نتيجة لتشوهه البلاستيكي عبر الزمن (انظر الشكل 2.1) يمكن أن يؤدي التصلب إلى تغيير في الخواص أو الحركية للمادة. يتميز التصلب الخاص بالخواص بتمدد السطح الحامل بواسطة الانتقال ، بينما يتميز التصلب الحركي بتحريك مركز نطاق المرونة. ومع ذلك، يقتصر نطاق هذه الدراسة على تصلب الخواص فقط. تعتبر نمذجة التصلب واحدة من المجالات التي لا تزال مفتوحة إلى حد كبير في نظرية الخلع. ومع ذلك، هناك العديد من الأوصاف المتاحة للتصلب المرن، والتي تعتبر "عملية" للغاية. من بين القوانين الشائعة لتصلب الخواص هي النماذج التي تم تطويرها من خلال اختبارات الشد، والتي يتم توضيحها في القوانين ذات الصلة أدناه.

$$\sigma = \sigma_0 + K \epsilon^{n_0} \quad \text{(Ludwick)} \quad (10.1)$$

$$\sigma = K_1 \epsilon^{n_1} \quad \text{(Hollomon)} \quad (11.1)$$

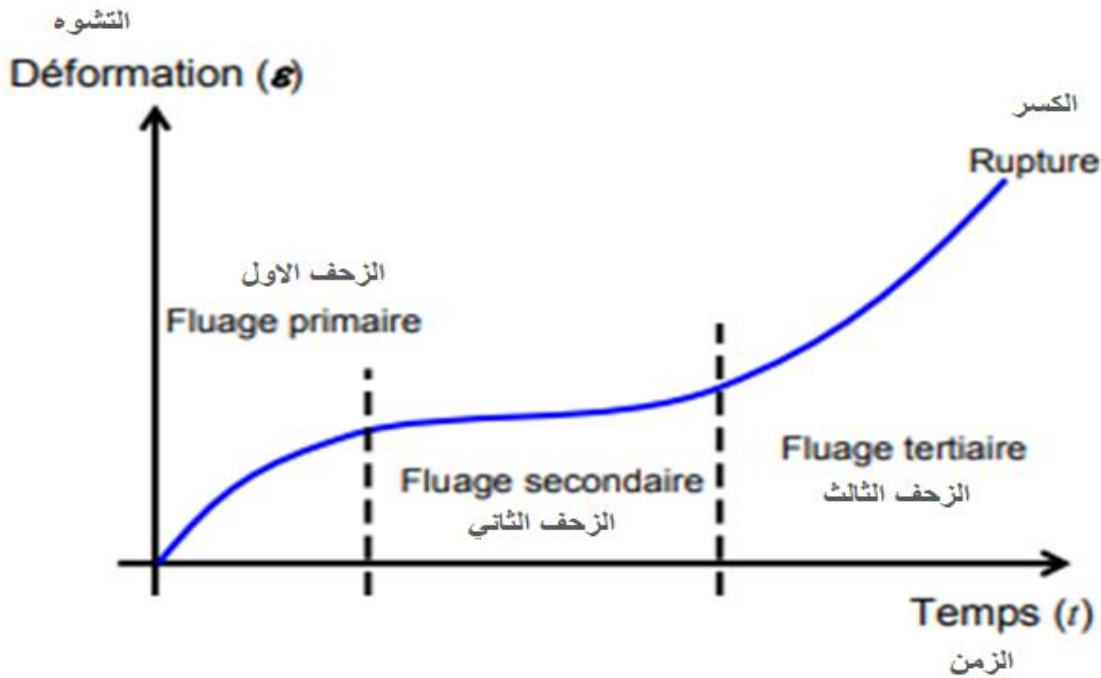
$$\sigma = K_2 (\epsilon + \epsilon_0)^{n_2} \quad \text{(Swift)} \quad (12.1)$$

$$\sigma = B - (B - A) \exp(-n_3 \cdot \epsilon) \quad \text{(Voce)} \quad (13.1)$$

حيث  $\sigma$  الضغط الحقيقي،  $\epsilon$  الإجهاد البلاستيكي الحقيقي والمعلومات الأخرى للثوابت، من اللافت للانتباه أن المعلمة  $n_1$  في علاقة (Hollomon) تُعرف عادةً بمعامل التصلب. يجب أن نلاحظ أيضًا أن المعلومات مثل الزمن أو درجة الحرارة أو عدد الدورات يمكن أن تؤثر بشكل كبير على السلوك الميكانيكي للمواد. في سياق هذه الدراسة، تُجرى اختبارات توصيف المواد بشكل متكرر وتنفذ في درجة حرارة الغرفة. ومع ذلك، نظرًا لأن عملية الإدراج الدقيقة تتم في درجة حرارة وضغط مستمر لفترة طويلة، فإن لزوجة المواد يمكن أن تلعب دورًا هامًا في مستويات التشوه النهائية. لذلك، يهتم الجزء التالي بوصف خصائص اللدونة المرنة.

#### 4.2.2.1. اللدونة المرنة (L'élastoviscoplasticité)

اللدونة المرنة أو اللزوجة تشير إلى التشوه الذي لا يمكن استعادته، ويعمل الزمن على منع التشوهات البلاستيكية الفورية في لزوجة المادة، مما يجعل هذا السلوك يعتمد على سرعة التحميل وثبات الحمل. السلوك اللزج يتميز بتحلل التشوه إلى جزء مرن وجزء لزج غير مرن، وعادةً ما يتم تجاهل المرونة العكسية في المكون اللزج. يتم العثور على السلوك اللزج بشكل رئيسي في المعادن والسبائك المعرضة لدرجات الحرارة العالية (قيم أكبر من  $0.3 T_f$ )، حيث تعتبر  $T_f$  درجة حرارة انصهار المادة في درجات الحرارة المرتفعة، يرتبط هذا السلوك بظواهر الانتشار مثل الاضطرابات وحدود الحبوب وغيرها. يُطلق على التشوه الناتج عن الإمساك المستمر للمادة بين درجة الحرارة والإجهاد اسم "الزحف". يجب أن يؤخذ زحف المادة في الاعتبار عند النظر فيه، خاصة عندما تكون درجة حرارة التشغيل قريبة من أو أكبر من  $0.2 T_f$ ، أو إذا كانت هناك إجهادات كبيرة في حالتنا. درجات حرارة انصهار المواد التي تمت دراستها هي  $T_f(\text{Al})=933.15\text{K}$  أي  $660^\circ\text{C}$ ،  $T_f(\text{Ni}) = 1728.2\text{K}$  أي  $1455^\circ\text{C}$ ،  $T_f(\text{Al}_2\text{O}_3)= 2327.2\text{K}$  أي  $2054^\circ\text{C}$  ومع ذلك، يتم إجراء الإدخال الدقيق عند درجة حرارة  $393.15\text{K}$  أي  $120^\circ\text{C}$ ، وهذا يعادل حوالي  $0.4 T_f$  للألمنيوم، وهذا يشجعنا على تقييم ما إذا كانت التشوهات المتعلقة بالزحف تؤثر في العمل في ذلك.



الشكل 4.1: المنحنى المميز للمجالات الثلاثة زحف إلى كسر.

عمومًا، هناك ثلاث مراحل رئيسية للزحف. المرحلة الأولى هي المرحلة العابرة، حيث ينخفض معدل الزحف بمرور الوقت. المرحلة الثانية هي المرحلة الثابتة، حيث يكون معدل الزحف ثابتًا. والمرحلة الثالثة هي المرحلة التي يزداد فيها معدل التشوه حتى تنكسر المادة. يتم تمثيل الزحف الأساسي عادة بواسطة توزيع الطاقة (علاقة Andrade)، حيث يكون لدينا:

$$\varepsilon = At^\alpha \quad (14.1)$$

يتم تحديد قيمة  $\alpha$  بشكل عام بواقع 3/1، و  $A$  هو معامل يربط خصائص المادة بآليات الزحف. عندما يزداد الضغط يطول الزحف الأولي وينخفض الزحف الثانوي. قانون نيوتن للزحف هو الأكثر استخدامًا، حيث يكون لدينا:

$$\dot{\varepsilon} = A\sigma^P \quad (15.1)$$

حيث تعتمد قيمة الأس  $P$  على طبيعة المادة وتتراوح عادة بين 3 و 10 للاجهادات الأكبر، يفضل استخدام التعبير

$$\dot{\varepsilon} = A e^{a\sigma} \quad (16.1)$$

يمكن أيضًا عرض "اللزوجة في درجات الحرارة المنخفضة"، والتي تتعلق بتثبيط حراري لتشوه البلاستيك. وبالتالي، لدرجات الحرارة أقل من  $T_f 0.3$ ، لا يتم ملاحظة المراحل الثلاث للزحف، حيث ينخفض معدل التشوه بشكل مستمر من بداية الزحف ويتجه نحو الصفر تقريبًا. هذا يعرف بزحف لوغاريتمي، ويمكن تمثيله بالصيغة.

$$\varepsilon = A \cdot \ln(1+t/t_0) \quad (17.1)$$

### 3.1. المعادن

المعادن هي مواد ترتبط ذراتها معًا بواسطة روابط فلزية [2]. تتميز هذه المواد بأنها مادة صلبة وغير شفافة ولامعة، وتتمتع بقدرة جيدة على توصيل الحرارة والكهرباء. كما أنها عادة ما تكون مرنة، مما يعني أنه يمكن تشكيلها أو طردها دون تكسيرها. بعض المواد التي لا تصنف عادة كمعادن قد تكتسب خصائص معدنية عند تعرضها لضغوط عالية في الضغط الجوي. تستخدم المعادن في العديد من التطبيقات المشتركة، وقد أصبح استهلاكها شائعًا جدًا منذ ثمانينات القرن العشرين.

#### 1.3.1. المعادن الحديدية

المعادن الحديدية هي سبائك تتكون أساسًا من الحديد، والحديد هو واحد من أكثر العناصر انتشارًا في قشرة الأرض. إنه معدن قابل للسحب والتشكيل (يمكن تمديده وتشكيله إلى صفائح) وله خواص مغناطيسية. ومع ذلك، في حالتها النقية، ليس الحديد مقاومًا للتآكل. عند مزجه مع الكربون، يمكننا زيادة المقاومة الميكانيكية وصلابة الحديد، وذلك بناءً على نسب الحديد والكربون في السبيكة. ستم تعديل الخصائص بطرق مختلفة [2]. نظرًا لقابلية تغييرها المنخفضة ومقاومتها الميكانيكية المنخفضة، لم يعد الحديد يستخدم في الصناعة. المعادن الأكثر استخدامًا في البناء هي حديد الزهر والصلب، حيث تتمتع بالمزايا التالية: قوة عالية، لدونة، موصلية حرارية عالية، وقابلية للتجميع بواسطة اللحام. ومن ناحية أخرى، تحتوي هذه المواد أيضًا على بعض العيوب، مثل التآكل في وجود الماء والتشوه الملحوظ مع زيادة درجة الحرارة [11].

#### 1.1.3.1. الفولاذ

الفولاذ هو سبيكة معدنية تتألف أساسًا من الحديد والكربون، حيث تتراوح نسبة الكربون بين 0.02% و 2% من الكتلة [3]. إنها مادة شائعة وتتميز بمقاومة عالية للتآكل والصلابة، مما يجعلها مثالية للاستخدام في الهياكل الصغيرة والأدوات المتنوعة [4].

## ✓ تصنيف الفولاذ

يستخدم الفولاذ في الصناعة بعدة أنواع، وفقاً للاحتياجات المختلفة. الأنواع المشتركة تشمل:

1. الفولاذ غير السبائكي لأغراض عامة : يشكل ما يقرب من 70% من الفولاذ في الصناعة، ويتميز بانخفاض الكربون. يستخدم في البناء (S) والصناعات الميكانيكية (E).

مثال: S355-E320

-E320:(E:الفولاذ الميكانيكي، 320:قوة الشد المرنة [MPa] أو [N/mm<sup>2</sup>]).

2. فولاذ خاص غير مسبك من النوع C: مخصص للمعالجة الحرارية ويمنح خصائص تشغيل عالية الأداء. يستخدم في المسبوكات والتروس والشفرات وغيرها، يكون التعيين بالحرف C متبوعاً بنسبة الكربون مضروبة في 100 وبعدها المؤشرات.

مثال: GC35

-GC35:(C:فولاذ خاص للمعالجة الحرارية، G:الصلب المصبوب 0.35% كربون)

3. الفولاذ منخفض السبائك : يستخدم عندما تكون القوة العالية مطلوبة. لا يتجاوز اي عنصر مضاف 5%. يستخدم في حالة التسليم أو مع المعالجة.

يكون التعيين النسبة المئوية للكربون مضروبة في 100 ، متبوعاً بالرموز الكيميائية لعناصر الإضافة الرئيسية بترتيب تنازلي. النسب المئوية لهذه العناصر مضروبة في 4 أو 10 أو 100 أو 1000 حسب (الجدول 1.1).

مثال: G 35 Ni Cr Mo 16-8

-G 35 Ni Cr Mo 16-8:(G:الصلب المصبوب، 35:0.35% كربون، 4% نيكيل، 2% كروم، وشوائب من الموليبدنوم).

الجدول 1.1: تصنيف الفلزات غير الحديدية

العنصر	الرمز الكيميائي	الرمز المعدني	عامل مضاعفا
Aluminium	Al	A	10
Azote	N	N	100
Bore	B	B	1000
Chrome	Cr	C	4
Cobalt	Co	K	4
Cuivre	Cu	U	10
Magnésium	Mg	G	10
Manganèse	Mn	M	4
Molybdène	Mo	D	10
Nickel	Ni	N	4
Phosphore	P	P	100
Plomb	Pb	Pb	10
Silicium	Si	S	4
Soufre	S	F	100
Titane	Ti	T	10
Tungstène	W	W	4
Vanadium	V	V	10

**4. فولاذ عالي السبائك :** مخصص للإستخدامات المحددة مثل المقاومة للحرارة أو الصدأ. يحتوي على عناصر إضافية بنسبة تتجاوز 5%. ويكون التعيين بالحرف X يرمز إلى الأسرة متبوعا بالرموز الكيميائية لعناصر الاضافة الرئيسية بترتيب تنازلي مع عدم وجود مضاعف النسبة المئوية لعناصر الاضافة.

مثال: 11-18 Ti Ni Cr 6 X G

11-18 Ti Ni Cr 6 X G: الفولاذ المصبوب، X: نسبة الفولاذ عالي السبائك 0.06% كربون، 18% كروم، 11% نيكيل وشوائب من التيتانيوم).

### 2.1.3.1. حديد الزهر

إذا كانت سبائك الحديد والكربون تحتوي على نسبة الكربون التي تزيد عن 2%، فإنها تعرف بـ "حديد الزهر". بالإضافة إلى الحديد والكربون، تحتوي هذه السبائك أساسًا على السيليكون والمنغنيز والفوسفور والكبريت. وفي حالة حديد الزهر غير السبيكي، يتم إضافة الكروم والموليبدنوم والألومنيوم وغيرها في حالة السبائك. تتمتع هذه السبائك بقابلية ممتازة للانزلاق، مما يسمح بالحصول على مسبوكات بأشكال معقدة. ومع ذلك، فإنها تكون هشّة تمامًا وصعبة للحام، ولكنها تتمتع بقابلية جيدة للآلات.

## ✓ أنواع الحديد الزهر

تصنف أنواع حديد الزهر وفقاً لشكل الجرافيت وظروف تكوينه.

1- يتم استخدام حديد الزهر الجرافيت الرقائقي ، المعروف أيضاً بالحديد الزهر الرمادي، على نطاق واسع بسبب اقتصاديته وقدرته على تخميد الاهتزازات وقابليته للتدفق والآلية. كما أنه يتمتع بمقاومة جيدة للتآكل الاحتكاكي والضغط العالية. يستخدم في تصنيع علب المرافق والإطارات وكتل المحرك وقطع الغيار لأشكال معقدة. يتم تعيينه باستخدام البادئة "EN" والرمز "GJL" تليها القيمة في [MPa] لقوة الكسر بالامتداد. مثال على ذلك هو EN-GJL-300: حديد الزهر الجرافيت الرقائقي بقوة كسر دنيا تبلغ 300MPa.

2- أما الحديد الزهر الجرافيت الكروي، فيتم الحصول عليه عن طريق إضافة كمية صغيرة من المغنيسيوم قبل الصب. يتمتع بوزن أخف وقوة ميكانيكية أفضل من الحديد الزهر الرمادي. يستخدم في ملاقط الفرامل وأعمدة الكرنك والأنابيب المعرضة لضغط عال. يتم تعيينه باستخدام البادئة "EN" والرمز "GJMW" أو "GJMB" أو "GJS" تليها القيمة في [MPa] لقوة الكسر بالامتداد ونسبة الاستطالة بعد التمزق. مثال على ذلك هو EN-GJS-400-18: حديد الزهر الجرافيت الكروي بقوة كسر دنيا تبلغ 400MPa ونسبة استطالة تبلغ 18% [5].

## 2.3.1. المعادن الغير حديدية

المعادن غير الحديدية هي تلك التي لا تحتوي على الحديد وتتكون من مزيج من المعادن الأخرى. بالإضافة إلى السبائك التي تحتوي على الحديد، هناك معادن أخرى في الطبيعة يمكن أن تتحد معاً لتشكل سبائك غير حديدية. هذه السبائك لا تتجذب للمغناطيس [2].

## 1.2.3.1. الألمنيوم وسبائكه

يعتبر الألمنيوم عنصراً من المجموعة الثالثة في جدول العناصر الدوري، حيث يكون له عدد ذري يساوي 13 وكتلة ذرية تقريبية تبلغ حوالي 27. يتميز الألمنيوم بعدة خصائص مهمة، منها كثافته المنخفضة التي تبلغ حوالي  $2.7 \text{ Kg/cm}^3$ ، بينما تبلغ كثافة الحديد حوالي  $7.8 \text{ Kg/cm}^3$  والنحاس حوالي  $9 \text{ Kg/cm}^3$ . يشكل الألمنيوم حوالي 7.5% من كتلة قشرة الأرض. ما زال الألمنيوم وسبائكه يلعبان دوراً مهماً في مجالات مختلفة من الصناعة. يزداد استخدامه يوماً بعد يوم بفضل خصائصه الخاصة، مثل خفة الوزن والقوة الجيدة، مما يجعله مناسباً للاستخدام في البناء الميكانيكي. كما يتمتع بموصلية جيدة للحرارة والكهرباء، ومقاومة جيدة للتآكل بفضل

تكوين طبقة رقيقة على سطحه. يتفاعل الألمنيوم مع الأكسجين في الهواء لتكوين طبقة أكسيدية تحميه من التآكل الكيميائي. يمكن استخدام الألمنيوم على نطاق واسع في الصناعات الكيميائية بسبب مقاومته العالية للتأثير الجوي. بالإضافة إلى ذلك، يتميز الألمنيوم بسهولة التشوه والقدرة على اللحام.

### ✓ معالجة الألومنيوم

يتم استخدام البوكسيت كخام في إنتاج الألومنيوم. يحتوي البوكسيت على شوائب مثل السيليكا وأكسيد الحديد وأكسيد التيتانيوم. المكون الأساسي للبوكسيت هو الألمنيوم المرطب بأشكال مختلفة مثل  $Al_2O_3 \cdot H_2O$  و  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$  هناك نوعان من البوكسيت:

-البوكسيت الأحمر الذي يحتوي على نسبة عالية نسبياً من أكسيد الحديد.

-البوكسيت الأبيض الذي يحتوي على قليل من الحديد وكثير من السيليكا.

عادةً ما يتم استخدام البوكسيت الأحمر في إنتاج الألومنيوم بسبب انخفاض محتواها من السيليكا <5%. التركيب الكيميائي المتوسط للبوكسيت الأحمر هو كما يلي:

- $Al_2O_3$ : 53%

- $SiO_2$ : 4%

- $H_2O$ : 13%

- $Fe_2O_3$ : 25%

- $TiO_2$ : 3%

يتم استخدام البوكسيت الأبيض في صناعة الأسمنت والكشط والمنتجات الحرارية.

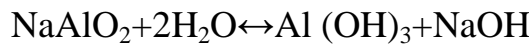
عادةً ما يتم إعداد البوكسيت وفقاً لعملية BAYER والخطوات التالية:

1. سحق البوكسيت: يتم سحق البوكسيت وربما سحقه بعد التجفيف.

2. هجوم البوكسيت بواسطة الصودا المركزة (NaOH): تتم العملية في أوتوكلايف عند درجة حرارة  $T=170C$  وضغط من 7 غلاف جوي. يذوب البوكسيت على شكل ألومينات الصوديوم. حديد لا يذوب، بينما يمر حمض السيليسيك عبر سيليكات Na و Al .

في عملية مستمرة عن طريق المرور عبر سلسلة من الأوتوكلاف لمدة 6 إلى 8 ساعات. يحتوي المنظف الذي تم الحصول عليه بالإضافة إلى الصودا المركزة على  $270g$  من  $Al_2O_3$  لكل l.

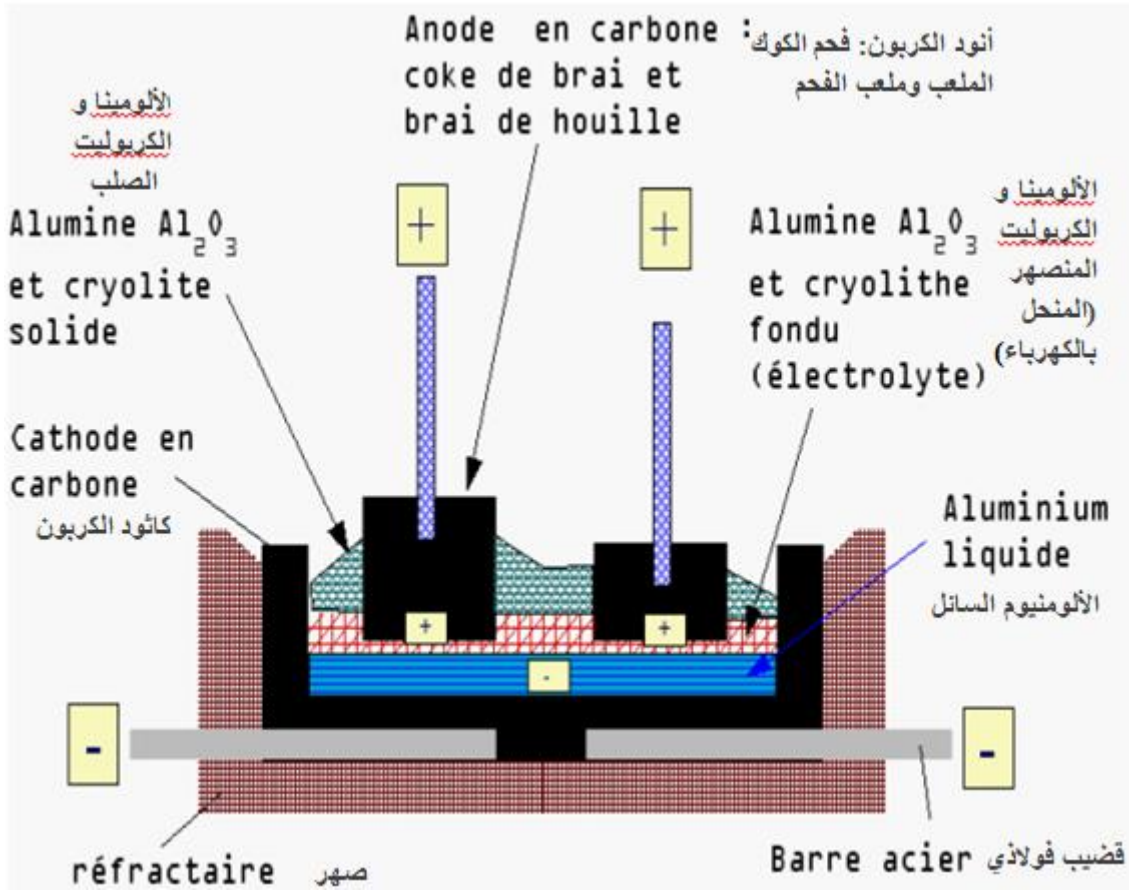
3. فصل ألومينات الصوديوم وتساقط الألومينا: يتم استخراج المنظف من الأوتوكلايف ليتم تخفيفه للحصول على تركيز المحلول المتبقي والحمأة. بعد التخفيف والتركيز والترشيح يتم الحصول على خمور شفافة يتم فيها إذابة الألومنيوم، ثم يتم الحصول عليها في خزانات هطول الأمطار حيث تحدث درجة حرارة  $60 C^\circ$ ، وهو التشغيل المعاكس لتفاعل الحل.



يحدث تبلور الألومينا النقية ببطء شديد. في غضون خمسة أيام، يتم ترسيب حوالي 60% من الألومينا الموجودة في الألومينات. لتسريع عملية ترسيب هيدروكسيد الألومنيوم الصلب، يتم إضافة الخمور الصافية (وسيلة التوليد). في النهاية، يتم تبلور  $Al(OH)_3$  ويتم امتصاصه وتصفيته من الغسيل وتجفيفه، ثم نقله إلى الأفران الدوارة. تخضع بقايا الترشيح لعملية التركيز بواسطة التبخر قبل استخدامها كصودا مركزة .

4. حساب الألومينا : يتم حساب الألومنيوم المرطب، بعد التجفيف، في أفران دوارة عند درجة حرارة  $1200C^\circ$ ، يتم الحصول على الألومينا بمحتوى  $Al_2O_3$  من 99.2 إلى 99.5%.

5. يستخدم التحليل الكهربائي للألومينا بسبب تقارب الألمنيوم للأكسجين العالي، حيث لا يمكن تخفيض الألمنيوم باستخدام المخفضات المعتادة مثل الكربون أو الكوبالت. في هذه العملية، يتم ذوبان الألومينا في حمام من الكريوليت ( $Na_3AlF_6$ ) عند درجة حرارة تتراوح بين  $920 C^\circ$  و  $950 C^\circ$ . يتم إضافة  $Al_2F_3$  لتحديد العناصر القلوية المصاحبة للألومينا وتحقيق إلكتروليت منخفض الحموضة، وأخيراً يتم خفض درجة حرارة ذوبان الكريوليت. يجب أن يكون تركيب الألومينا الكيميائي مع  $Fe_2O_3$  أقل من 0.04% و  $SiO_2$  أقل من 0.3%، حيث أن كلا المركبين يكونان غير قابلين للذوبان في الألومينا ويمكن فصلهما أثناء التحليل الكهربائي. يتم إجراء التحليل الكهربائي في فرن، حيث يعمل الكربون ككاتود وتوضع الأنودات في الجزء العلوي من الفرن.



الشكل 5.1: فرن لإجراء التحليل الكهربائي [6].

لإنتاج طن من الألمنيوم، يتطلب العمل الآتي:

- جهد عمل بقيمة 4.5V والتيار يتراوح بين 30,000A إلى 100,000A.

- تراكم الألمنيوم في قاع الفرن وتشكيل الكاثود بشكل عملي.

- جمع الألمنيوم وصبه في سبائك أو خلطات.

- استخدام 2000 Kg من الألومينا.

- استخدام 30 Kg من الكريوليت.

- استخدام 30 Kg من فلوريد الألومينا.

- استخدام 550 Kg من أنود الكربون.

-استهلاك الحمل الكهربائي بمعدل 15 إلى 20 MW. h ميجاوات ساعة [6].

### ✓ تصنيف سبائك الألومنيوم

يتم تصنيف سبائك الألومنيوم بعدة طرق، بما في ذلك:

1. تصنيف حسب الهيكل : يتم تصنيفها إلى سبائك صلبة هيكلًا وسبائك غير مقواة هيكلًا.
2. تصنيف حسب النوع: يتم تصنيفها إلى سبائك مطاوعة وسبائك سباكة وسبائك مسحوق المعادن.
3. تصنيف حسب المكون الرئيسي.
4. تصنيف حسب مجال الاستخدام.

❖ سبائك بدون تصلب هيكلية: تعتبر غير صلبة، وتعتمد خصائصها الميكانيكية على معدل تصلب العمل أو محتوى الإضافة. يتم تحقيق التصلب عن طريق تأثير تصلب العمل وتأثير التلدين. تستخدم لتحل محل الألومنيوم النقي عندما يكون هناك حاجة لزيادة طفيفة في الخصائص الميكانيكية. تظهر مقاومة ممتازة للأجواء الرطبة والبحرية. تشمل السلسلة التالية - :

-سلسلة 1000 : الألومنيوم النقي.

-سلسلة 3000 : سبائك الألومنيوم والمنغنيز.

-سلسلة 5000 : سبائك الألومنيوم والمغنيسيوم.

❖ السبائك الصلبة هيكلية: تعتبر غير صلبة، ويعود تصلبها الهيكلي إلى التحولات المعدنية نتيجة للمعالجات الحرارية للمحلول، مثل التبريد والتلطيف، مما يؤدي إلى تكوين هطولات داخل الحبيبات أو في مراحل تصلب مترسبة. تشمل السلسلة التالية:

-سلسلة 2000 : سبائك الألومنيوم والنحاس.

-سلسلة 4000: سبائك الألومنيوم والسيليكون.

-سلسلة 6000: سبائك الألومنيوم والمغنيسيوم والسيليكون.

-سلسلة 7000: سبائك الألومنيوم والزنك والمغنيسيوم (مع أو بدون النحاس) [7].

❖ السبائك المطاوعة: تتميز بالتشوه الساخن. بعد صب هذه السبائك في لوحات أو قضبان، تخضع لعملية التشكيل الساخن مثل المتداول والغزل والتزوير وغيرها. تختلف الخصائص الميكانيكية حسب العملية التي تمت من خلالها، وتميز بين السبائك الصلبة هيكلًا والسبائك غير الصلبة. تظهر هذه السبائك قوة ميكانيكية جيدة، وليونة جيدة، ومقاومة لانتشار الشقوق، ومقاومة للتعب، ومقاومة للتآكل، وتوصيلية كهربائية جيدة.

❖ سبائك المسبك: تتميز بقدرتها العالية على التدفق وانكماشها المنخفض نسبيًا، وقلة تكون الشقوق الساخنة والمسامية، وتتمتع بخصائص ميكانيكية جيدة ومقاومة عالية للتآكل. تتشكل هذه السبائك عندما يكون هيكلها سهل الانصهار. تتكون من العديد من السبائك التي تحتوي على نسبة عالية من العنصر الإضافي التي تتجاوز الذوبان المحدود في الألومنيوم. يحدد هذا المحتوى العالي للعنصر الإضافي سبائك المسبك من السبائك ذات المصدقية [8].

❖ السبائك التي يتم الحصول عليها عن طريق تعدين المساحيق تتميز بميزة كبيرة للألمنيوم مقارنة بالمعادن التقليدية. يتم زيادة اختيار وكمية عناصر الإضافة بسبب ارتفاع معدل تبريد الجسيمات أثناء التصلب، مما يؤدي إلى الحصول على بنية مجهرية دقيقة ومتجانسة بشكل خاص، وتحسين الخصائص بشكل كبير [9].

❖ سبائك الصب هي تلك المستخدمة في المسابك لتصنيع الأجزاء التي تم الحصول عليها عن طريق الصب. ومن بين هذه السبائك، تعتبر سبائك السيليكون الأكثر شيوعًا في الكمية والتطبيق. ومع ذلك، تعتمد مقاومتها للتآكل على إضافة النحاس. إذا كانت الإضافة قوية، فستكون مقاومة التآكل منخفضة. ونتيجة لذلك، فإنها لا تخضع لتشوه كبير ولكن لها صفات أخرى مثل قابلية التدفق الجيدة والانكماش المنخفض عند التصلب.

-يشار إلى سبائك الصب في شكل أبجدي رقمي وفقًا لمعيار AFNOR NF 02-004، حيث تتوافق الأحرف التالية مع عناصر الإضافات :

-للنحاس U

-للمغنيز M

-للسيليكون S

-للمغنيسيوم G

-للزنك Z

-للتيتانيوم T

وما إلى ذلك [10].

### ✓ التسمية القياسية لسبائك الألومنيوم

التسمية القياسية لسبائك الألومنيوم تحدد بواسطة معايير NF 02-104 و NF A 02-004، وهما نظامان يستخدمان لتعيين تركيب سبائك الألومنيوم.

1. النظام العددي: يتكون من رمز مكون من 4 أرقام يشير إلى التركيب الكيميائي. يستخدم بشكل أساسي لسبائك الألومنيوم المطاوع (مثل NF 02104).

-الرقم الأول: يتراوح من 0 إلى 9 ويشير إلى السلسلة أو المجموعة. الرقم 1 يشير إلى الألومنيوم النقي، والرقم 2 يشير إلى السبائك، والأرقام 0 و 9 محجوزة للاستخدام الخاص لمنتجات الألومنيوم.

- الرقم الثاني: في المجموعة 1، يحدد المتغيرات أو الشوائب. في المجموعات من 2 إلى 8، تحجز للتعديلات المتتالية للسبائك .

-آخر رقمين: في المجموعة 1، يشير إلى نسبة الألومنيوم فوق 99.00% بالنسبة للوزن. في المجموعات من 2 إلى 8، يستخدم فقط لتحديد السبائك.

2. النظام الأبجدي الرقمي: يميز بين الألومنيوم غير المخلوط وسبائك الألومنيوم. يستخدم بشكل خاص لصب السبائك... (NF A02-004)

مثال: (A-S13) الأحرف بعد A تتوافق مع عناصر الجمع. يتبع هذه الأحرف إشارة عددية لمحتوى عنصر الإضافة إذا كان يتجاوز 1% [8].

### ✓ استخدامات سبائك الألمنيوم

سبائك الألومنيوم تستخدم على نطاق واسع بسبب خصائصها الممتازة كمادة تغليف. فهي آمنة وغير نافذة للماء وتحجب الأشعة فوق البنفسجية. يتم استخدامها بشكل رئيسي في صناعة الملامح الملفوفة مثل الزوايا واللامح على شكل حرف U واللامح المزودة T وأنايب المقطع العرضي المستديرة أو المستطيلة. كما يتم استخدام كميات كبيرة من سبائك الألومنيوم في تصنيع المسامير والبراغي. في صناعة البناء، يوفر الألومنيوم العديد من المزايا المتعلقة بالتنمية المستدامة. فخفة الوزن تسمح بتصميم هياكل خفيفة وقوية وسهولة التشكيل تمكن من تحقيق إنجازات تقنية عالية الأداء لفترة طويلة. يمكن استخدام الألومنيوم في صناعة النوافذ والأبواب

والأثاث المحكم الغلق، مما يوفر عزلاً حراريًا وصوتيًا مثاليًا. كما يمكن دمجه في واجهات الألواح الشمسية لتوليد الكهرباء المتجددة. مقاومته للتآكل يقلل من حاجة الصيانة ويطيل عمر المباني. الألومنيوم غير قابل للاشتعال وغير سام عند اللمس، ولا ينبعث منه غبار أو بخار، مما يجعله مادة صحية وآمنة في المباني [11].

### 1.3.2.2. النحاس وسبائكه

النحاس هو واحد من أقدم المعادن المعروفة لدى الإنسان [12]. والبرونز، وهو سبيكة تحتوي على النحاس، معروف منذ أكثر من 5000 سنة. استخدم النحاس مع البرونز في الحضارات الأولية للتزيين وإنتاج بعض الأدوات البسيطة. ولكن بسبب ارتفاع سعره نسبيًا، بدأت بعض المواد الأرخص سعرًا في استبداله في العديد من الاستخدامات، مثل الألمنيوم واللدائن. والمادة الخام الرئيسية للنحاس هي خليط معقد من كبريتات النحاس والحديد، ويتم استخلاص النحاس من الخام إما عن طريق الصهر أو التحليل الكهربائي.

#### ➤ خصائص النحاس

-درجة حرارة الانصهار:  $1083^{\circ}\text{C}$ .

-البنية البلورية: المكعب المتمركز الوجه

-الكثافة:  $8.93 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$

-معامل يونغ:  $122.5 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

-متانة الشد:  $220 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$

-المقاومة الكهربائية:  $1.67 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$  في درجة حرارة  $20^{\circ}\text{C}$ .

-مقاومة التآكل: جيدة جدا.

#### ➤ النحاس النقي الاحمر

النحاس النقي له لون أحمر، ويتميز النحاس ذو النقاوة العالية التي تصل نسبتها إلى أكثر من 99.7% باستخدامات متعددة. من أهم هذه الاستخدامات:

1. الأسلاك الكهربائية .

2. المفاتيح الكهربائية.

3. الصفائح المستخدمة في أعمال البناء وتغليف الأحواض والأوعية المستخدمة في الصناعات الكيميائية والغذائية.

4. الأنابيب المستخدمة في التطبيقات الحرارية والتركيبات المنزلية.

ويتم صهر النحاس مع العديد من العناصر لإنتاج سبائك مختلفة وهي كالاتي:

الجدو 1.2: سبائك النحاس ومكوناتها [12].

اسم السبيكة	مكونات السبيكة
النحاس الأصفر (البراص)	الزنك-النحاس
البرونز	(الخاصن)-القصدير-النحاس
البرونز الألوميني	ألومنيوم-النحاس
النيكل النحاسي	النيكل-النحاس

الجدول التالي يوضح بعض المعادن المستخدمة في تصنيع الأشياء التقنية [2]. على الرغم من أن الحديد والألمنيوم هما المعادن الأكثر استخدامًا، إلا أنه نادرًا ما يتم استخدام المعادن في حالتها النقية؛ حيث يتم استخدامها بشكل أكبر في شكل سبائك.

الجدول 3.1: المعادن المستخدمة في تصنيع الأشياء التقنية.

المعدن	الوصف والخصائص	الخصائص الميكانيكية	امثلة للاستخدام
الحديد (Fe)	فضي، لينة، قد تصدأ، أكثر معدن مستعمل	المرونة، الليونة	السيارات، هياكل المباني، الأواني، كابلات وأظافر
الالمنيوم (Al)	أبيض، ناعم، وفيرة في طبيعة	خفة، جيد الليونة، المرونة، الموصلية، مقاومة التآكل	القوارب علب كهربائية، الأبواب والنوافذ
النحاس (Cu)	اللون البني الأحمر الذي يتأكسد بالهواء الرطب (يتحول إلى اللون الأخضر)	المرونة، الثقل، توصيل كهربائي ممتاز وحرارية	الأسلاك الكهربائية، الآلات الموسيقية، الأنابيب، البنسات
الزنك (Zn)	اللون الرمادي الأبيض ساطع	الصلابة، الليونة، المرونة، مقاومة التآكل	الأسلاك الكهربائية، المزاريب والأسوار
المغنيزيوم (Mg)	اللون: أبيض فضي	الخفة، القابلية للاشتعال، مرونة، الليونة	الألعاب النارية، أضواء البنغال، جنوط السيارة
النيكل (Ni)	رمادي	الصلابة، المرونة، المقاومة العالية للتآكل	عملات معدنية، عناصر التسخين
الكروم (Cr)	أبيض، مزرق قليلا	صلابة عالية، مقاومة للتآكل، موصلية جيدة	طلاء التآكل
إيثان (Sn)	اللون: أبيض فضي	ليونة، قابلية للطرق، نقطة انصهار منخفضة	اللحام والأواني
تيتان (Ti)	اللون: أبيض فضي	ليونة عالية وخفيفة الوزن ومقاومة للتآكل	هياكل القوارب والغواصات وقطع غيار السيارات
الرصاص (Pb)	لون رمادي مزرق	نعومة، مرونة، ثقل، ليونة، مقاومة التآكل	تستخدم أساسا للحديد الزهر
التنغستن (W)	القصديراللون الأبيض	نعومة، ليونة، خفيفة الوزن، مقاومة درجات الحرارة العالية	خيوط المصابيح المتوهجة

## 4.1. الخواص الميكانيكية الرئيسية

1. **المرونة (Flexibilité):** هي قدرة المادة على استعادة أبعادها الأصلية أي عدم بقاء تشكل دائم بعد

زوال الحمل المؤثر

2. **اللدونة (Plasticité):** هي قدرة المادة على أن يكون لها تشكل دائم أي لا تسترجع المادة أبعادها

الأصلية بعد إزالة الحمل المؤثر. فاللدونة عكس المرونة وليست هناك مادة مرنة تماماً أو لدنة تماماً

3. **الممطولية (Ductilité):** يمكن تعريفها بأنها الخاصية التي تسح للمادة بتغيير لدن كبير تحت تأثير

حمل الشد أي قدرة المادة على السحب وقابليتها للاستطالة الكبيرة عند تعرضها لحمل الشد.

4. **القصفة (Fragilité):** هي الخاصية التي تجعل المادة تنكسر قبل تغيير ملحوظ في الشكل. فالممطولية

هي عكس القصفة فالمواد المطيلة لها تشكل لدن كبير عند تعرضها لحمل الشد مثل النحاس أما المواد القصفة

فتكسر قبل أن يطرأ عليها أي تغيير في الشكل عند التحميل مثل الزجاج وحديد الزهر

5. **الطروقية (Malléabilité):** هي قدرة المادة على أن يحدث لها تغيرات لدنة كبيرة تحت حمل الضغط

أي قدرة المادة على التفلطح بالطرق دون حدوث كسر.

6. **المقاومة (Résistance):** هي مقاومة المادة لأي حمل مؤثر، والمقاومة للشد إذا كان الحمل المؤثر

حمل الشد والمقاوم

7. **الصلابة او الكزازة (Raideur):** هي خاصية مقاومة المادة لأي نوع من التغيير في الشكل، وتعرف

المادة الصلبة بأنها تتحمل أحمال عالية مع حدوث تغيير صغير نسبياً في الشكل

8. **المتانة (durabilité):** هي قدرة المادة على مقاومة الصدمات و امتصاص الطاقة الميكانيكية .

9. **الرجوعية (Résilience):** هي قدرة المادة على امتصاص الطاقة المرنة التي تختفي تماماً بعد زوال

الحمل المؤثر.

10. **الصلادة (Dureté):** صلادة المادة هي الخاصية التي تمكنها من الاحتفاظ بشكل سطحها سليماً

متماسكا تحت تأثير الأحمال. وتعرف الصلادة بأنها قدرة المادة المقاومة البري نتيجة الاحتكاك أو المقاومة

للخدش أو القطع أو حدوث علامة بها [14].

## 5.1. الأبحاث العلمية

**Vidal-Sallé** وآخرون [17] أشاروا إلى أنه في حالة وجود اتصال خشن دون احتكاك بين سبيكة ولكمات متناظرة (axisymmetric punches) ، تشير البراهين التجريبية و النمذجة العددية لقياسات دقيقة إلى أن مادة billet تتحرك بشكل مشابه لمادة التشحيم اللزجة في المنطقة المجاورة لسطح التماس وقد تمت دراسة ذلك من خلال قياس صلابة الألواح واختبار الشد وتحليل البنية المجهرية للألواح الملحومة FS المصنوعة من سبائك AA5083 و AA7075 .

تمت دراسة صلابة Cu99 ل Martens من قبل **Vladvojet** وآخرين [18]، وذلك لتحديد علاقتها بصلابة التلامس وحمل المسافة البادئة ومعامل المرونة المنخفض، لتحليل منحنيات حمل المسافة البادئة D-E.

قدم **Habibi** وآخرون [19] اقتراحًا تجريبيًا، وتم تحقيق نتائج متميزة.

تجمع الدراسة التي قام بها **U.B.KRISHNA** و آخرون [20] على دراسة الخصائص الميكانيكية والبنية المجهرية لسبائك الألومنيوم المعززة Al7075 بنسبة 6 و 9 و 12% بوزن WCCo. تم استخدام علم المعادن السائل لإنشاء المركبات وتوصيف المواد، وذلك من خلال استخدام تحليلات SEM و EDS .

تمت دراسة من قبل **Da Fonte** وآخرين [21] بشكل صناعي لتطبيق مفاهيم تحمل الضرر، وذلك بغرض الصيانة بشكل أساسي وتحليل تأثير الالتواء المستمر على نمو شقوق الكلال تحت الانحناء الدوار. تمت دراسة أيضًا تأثير الالتواء المستمر على نمو شقوق الكلال تحت الانحناء.

رصد **Marazani** وآخرين [22] وجود صلات ميكانيكية ومعدنية جيدة من خلال الصور المجهرية الخالية من العيوب التي تم التقاطها أثناء تحليل البنية المجهرية والتحليل الهيكلي واختبار الصلابة الدقيقة واختبار الشد باستخدام تقنية حيود الأشعة السينية.

أظهرت الدراسات بواسطة **Ekaboteet** وآخرين [23] التي أجريت على سبائك الألومنيوم-AA2050-T84 أهمية الاختلافات التباينية في خصائص الانضغاط والشد. يُشير ذلك إلى الأهمية المتزايدة للمعلمات المؤثرة على تحطم المواد، مثل بارامترات قيادة الكراك ومعامل الإجهاد، مع انخفاض درجة الحرارة. يتم تحليل تأثير درجة الحرارة على سطح الصفيحة وفي الموقع المركزي، وتقدير تأثيرها على خواص المادة وأداءها في ظروف استخدامها المختلفة.

وجد **Azadi** وآخرون [24] أن سبب زيادة التآكل والكلل في حياة سبائك الألومنيوم المعززة بالمعالجة الحرارية والجسيمات النانوية بنسبة 114% و 128% على التوالي في ظل مستويات إجهاد عالية، يعود إلى العيوب التي تحدث خلال عملية القولبة المهتزة في تلك السبائك.

اقترح **Shahraki** و **Ghanbari** وزملائهم [25] طريقة جديدة لتحليل بنية البلورة الفرعية في الألومنيوم النقي التجاري، ويُطلق عليها ضغط الأخدود المقيد (CGP) في صناعة البلاستيك الحادة

في الدراسة التي أجروها **Ravikumar** وآخرون [26]، تم التركيز على تأثير أكسيد الألومينا الدقيق والنانوي ( $Al_2O_3$ ) على الخصائص الميكانيكية وخصائص التآكل لمركبات الألومنيوم (Al). لاحظ الباحثون أنه مع زيادة محتوى التعزيز في المصفوفة المعدنية، حدث تحسن في القوة وقوة الشد، وأظهرت المركبات النانوية قوة أفضل مقارنة بالمركبات الدقيقة.

تم استخدام **Shlyannikovet** وآخرون [27] عينة ألومنيوم أسطوانية مجوفة بشكل مشابه للهلال، بهدف دراسة سلوك نمو الكراك تحت تأثير الشحن الخاص باللف النقي، والتوتر الشد الدوري المركب التوتر + الكلل من الالتواء، ووجدوا أن مسارات انتشار الكراك تختلف تبعاً لأشكال مختلفة من العيوب الأولية، ومع ذلك تستقر عبر نفس التكوين عندما يتجاوز عمق الكراك قيمة تقريبية تعادل 0.25؛ لاحظت زيادة في سرعات نمو الكراك في اتجاه أكثر عمقاً بالنقطة الأكثر عمقاً في جبهة الكراك بالمقارنة بنقطة تقاطع جبهة الكراك مع سطح العينة الحر.

وجدت الدراسة التي أجريت بواسطة **Lemi** وزملائه [28] أن الألومنيوم المعدني الأساسي (AA6061-T6) يتميز بخصائص فريدة لعملية اللحام بالاحتكاك. تظهر النتائج أن درجة الحرارة تتخفض على طول الخط المتعامد مع اتجاه اللحام على الأسطح العلوية والسفلية، بينما تزداد درجة الحرارة القصوى مع زيادة القوة المحورية داخل النطاق المقبول لدرجات الحرارة. ومن الملاحظ أيضاً أن سرعات الدوران واللحام ثابتة في هذه العملية. يمكن الاستنتاج من النتائج أن الألومنيوم المعدني الأساسي (AA6061-T6) يتمتع بأفضل خصائص اللحام بالتحريك الاحتكاكي.

تم اختيار **Patilet** وآخرون [29] كأنواع من سبائك الألومنيوم (AA7075) و (AA6061) لدراسة صلابتهما. تم قطع صفائح من سبائك الألومنيوم بالأبعاد المطلوبة وهي 150 مم × 70 مم × 35.6 مم. تم

اكتشاف أن الحد الأدنى للصلابة كان حوالي BHN 70.1 والحد الأقصى للصلابة كان حوالي BHN 121 مقارنة بـ BHN 170 للسبيكة الأساسية.

أجرى Vidal-Sallé وزملاؤه [30] دراسة حول نموذجين من العناصر المحدودة للسلالة المستوية، وقارنوا بينهما باستخدام برنامج العداد في عملية ختم القوالب. وتوصلوا إلى أن اختيار نظام ضمني شبه جامد أو نظام صريح دينامي ليس أمرًا سهلاً.

بواسطة Shahraki, Miyanaaji وآخرون [31] تم استخدام طريقة تشويه البلاستيك الشديد، بالإضافة إلى تطبيق الصلابة والفحص المجهرى الإلكتروني واختبارات الشد الموحدة في إنتاج البنية المجهرية الحبيبية الفائقة في فولاذ IF. تم استخدام هذه الطرق لتقييم الخصائص الميكانيكية والبنية المجهرية لصفائح فولاذ IF بطلاء الكهربائي.

تمت اقتراح صيغة مختلفة لمشكلة الاتصال في تحولات كبيرة مع احتكاك كولوم من قبل Nguyenet وآخرون [32]. تستخدم هذه الصيغة حقولاً غير معروفة تشمل مجال الإزاحة ومجال المضاعفات. تستخدم أيضاً وظائف الوزن لتحديد مجال الإزاحة الافتراضية ومجال المضاعفات الافتراضية.

Jean-Michel Croset وآخرون [33] مهتمون بتطوير نماذج لحل مشاكل الارتطام بالاحتكاك. يقدمون نهجاً يجمع بين سرعة التحليل المباشر ودقة تمثيل مناطق الاتصال بطريقة ثنائية الجهد.

## 6.1. خاتمة :

في الختام، يمكننا أن نقول أن السلوك الميكانيكي للمواد المعدنية أساسي في فهم كيفية استجابة المواد للقوى الميكانيكية والتحميل. وتلعب الخصائص الميكانيكية دوراً حاسماً في تصميم واستخدام المواد المعدنية في مجموعة متنوعة من التطبيقات.

## الفصل ١١

# تقنيات توصيف المواد

**1.1. مقدمة**

توصيف المعادن واختباراتها هي جزء أساسي من علم المواد والهندسة الميكانيكية. يهدف توصيف المعادن إلى دراسة وتحليل خصائصها الميكانيكية والفيزيائية والكيميائية. يعتبر توصيف المعادن أمراً حاسماً لفهم سلوك المعادن تحت ظروف مختلفة ولتحديد تطبيقاتها المناسبة. تشمل اختبارات المعادن مجموعة متنوعة من التقنيات والأساليب لتحديد الخصائص المختلفة من بين الاختبارات الشائعة تجد اختبارات الصلادة والشد والانضغاط والالتواء ... .

**2.1. اختبار المواد الهندسية**

ولتحديد و قياس الخواص الميكانيكية للمواد تجرى اختبارات ميكانيكية باستخدام أجهزة وآلات على عينات مجهزة للاختبار.

تنقسم الاختبارات الميكانيكية للمواد إلى قسمين:

**1.2.1. الاختبارات الإتلافية للمواد (Essais destructifs)**

وفيها تتلف العينة ولا يحافظ على سلامتها مثل الكسر و الثني و الخدش الخ ... و أهمها:

- اختبار الشد Essai de traction
- اختبار الضغط Essai de compression
- اختبار الصلادة Essai de dureté
- اختبار الصدم Essai de d'impact
- اختبار الالتواء Essai de torsion الخ ... .

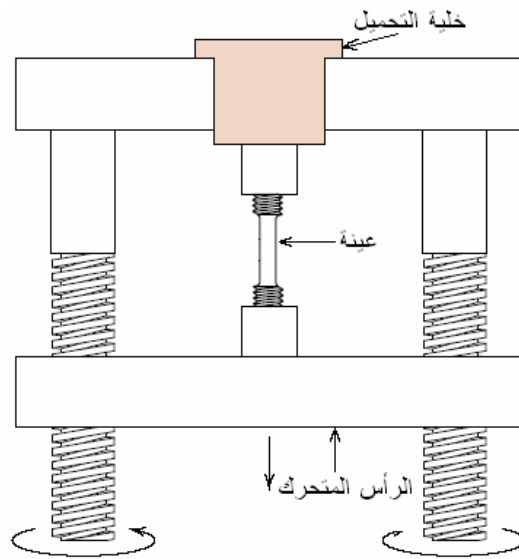
**1.1.2.1. اختبار الشد (Essai de traction)**

أ/ تعريف: هو عملية تجرى على قطعة اختبار لتعيين خواصها تحت تأثير حمل الشد المحوري في اتجاه واحد حيث ينطبق اتجاه الحمل على المحور الطولي للعينة المختبرة. و يكون التحميل تدريجياً، يبدأ من الصفر ويزداد حتى حدوث الكسر بالعينة [13].

ب/ ماكينة اختبار الشد

تستخدم ماكينة الاختبار العامة (Réglage Machine Universel) لاختبارات عديدة كالشد والضغط والانحناء. وتتكون هذه الماكينة من رأس ثابت خاص لموازنة الحمل و قياس قيمته (balancine) وآخر متحرك

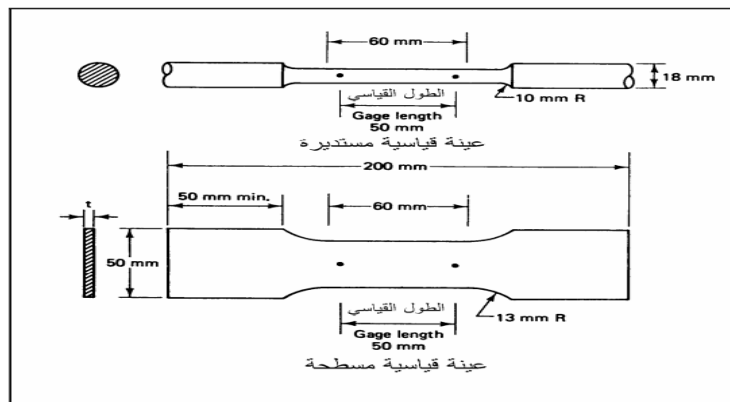
وهو المسبب للأحمال المؤثرة على العينات المختبرة (atterrissage). العينة المختبرة تثبت بين الرأسين بواسطة كلابات و مصدر القوة المحركة يكون في أغلب الأحيان محركاً كهربائياً كما في (الشكل 1.11) [13].



الشكل. 1. 11: ماكينة اختبار الشد [13].

### ج/ عينات الاختبار القياسية

أشكال العينات القياسية المستخدمة في اختبار الشد مختلفة و لها مقاسات موحدة فمنها المستديرة الطويلة والقصيرة ومنها المسطحة الطويلة والقصيرة (الشكل 2.11) يعطي شكل عينة قياسية مستديرة و عينة قياسية مسطحة.



الشكل. 2. 11 : عينات قياسية لاختبار الشد.

### د/ الحمل و الإجهاد

عندما يتعرض جزء من منشأ أو جزء من ماكينة إلى أحمال أو قوى خارجية، تتولد في داخله قوى مقاومة لتلك الأحمال. وتسمى هذه القوى الداخلية في أي جزء من المنشأ بالإجهادات. فنستطيع أن نقول بأن الأحمال

الخارجية هي القوى المطبقة و تكون وحدتها النيون (N) ويرمز إليها غالبا بـ (F). أما كثافة القوى الداخلية و هي شبيهة بالضغط المولد داخل المنشأ فهي الإجهادات و تكون وحدتها باسكال (Pa) أو (N/m<sup>2</sup>) و يرمز إليها بـ (σ). كما أن الإجهادات تكون إجهاد شد في حالة تحميل القطعة شدا أو إجهاد ضغط في حالة تحميلها ضغطاً. و بالتالي نعرف الإجهاد

الإجهاد (σ) هو حاصل قسمة القوة العمودية (F) على مساحة مقطع العينة الأصلي (A<sub>0</sub>).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1.II)$$

σ: الإجهاد [Pa] أو [N/m<sup>2</sup>]

F: القوة [N]

A<sub>0</sub>: مساحة مقطع العينة الأصلي [m<sup>2</sup>]

### هـ/ التشكيل و الانفعال

عندما تتأثر مكونات الماكينة بقوى خارجية، يحدث تغير في شكلها، ويُعرف هذا التغير باسم التشكيل. عند تحميل الشد، يحدث استطالة، بينما في حالة الضغط يحدث انقباض. وحدة التشكيل هو الطول وتقاس بالمليمتر (mm) وترمز إليها بـ (ΔL). أما الانفعال، فيعرف كوحدة للتشكيل أو التغير في كل وحدة من الأبعاد الطولية، ولذلك فإن وحدة الانفعال هي mm/mm، ويُمثل بالنسبة المئوية (%) ويرمز إليه بـ (e). الانفعال (e) هو حاصل قسمة التشكيل (الاستطالة أو التقلص) (ΔL) الحاصلة للعينة على الطول الأصلي للعينة (L<sub>0</sub>).

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.II)$$

e: الانفعال [mm/mm] أو [بدون وحدة] أو %

ΔL: التشكيل (الاستطالة أو التقلص) [mm]

L<sub>0</sub>: الطول الأصلي للعينة [mm]

L<sub>f</sub>: الطول النهائي للعينة [mm].

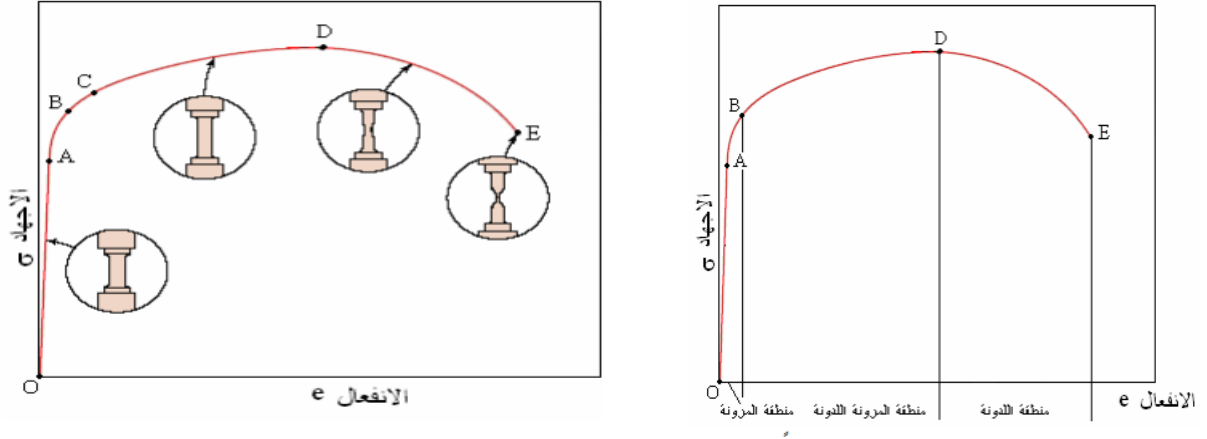
### و/ معامل يونغ E

العلاقة التي تربط بين الإجهاد و الانفعال الهندسيين هو معامل يونغ (E). الانفعال (e) بدون وحدة و وحدة الإجهاد (σ) باسكال (Pa) و بالتالي وحدة (E) هي (Pa).

$$E = \frac{\sigma}{e} \quad (3. II)$$

### ز/ منحنى الإجهاد و الانفعال

نتائج اختبار الشد توضع في منحنى الإجهاد و الانفعال الذي يعطي العلاقة بين الإجهاد والانفعال. وتمثل الإجهادات بالإحداثي الرأسي أما الانفعال فيمثل بالإحداثي الأفقي.



الشكل. 3. II: منحنى الاجهاد والانفعال لمعدن مطيل مبينا ميينا المناطق المختلفة.  
الشكل. 4. II: منحنى الاجهاد والانفعال لمعدن مطيل مبينا شكل العينة عند فترات مختلفة من الشد.

### II. 1.2. 2. اختبار الضغط (Essai de compression)

#### أ/ تعريف اختبار الضغط

اختبار الضغط على المعادن هي عملية تقنية تستخدم لتقييم قوة ومقاومة المعادن تحت تأثير الضغط . يتم قياس قدرة المعدن على مقاومة الشد أو التشويه بواسطة قوة ضاغطة محكمة. إليك بعض الخصائص التي يتم تقييمها عند إجراء اختبار الضغط على المعادن: [14]

- قوة الضغط القصوى (Résistance à la compression ultime): وهي القوة القصوى التي يمكن للمعدن تحملها قبل أن يحدث الكسر تحت تأثير الضغط. تعبر عنها بالوحدات النيوتن / ملليمتر مربع ( $N/mm^2$ ) أو الباسكال (Pa).

- السلوك الانحناي (Élastique comportement): يتم قياس الانفعال في المواد عند تطبيق الضغط، ويشير السلوك الإنشائي إلى القدرة التحملية للمعدن وقدرته على استرجاع شكله بعد إزالة الضغط.

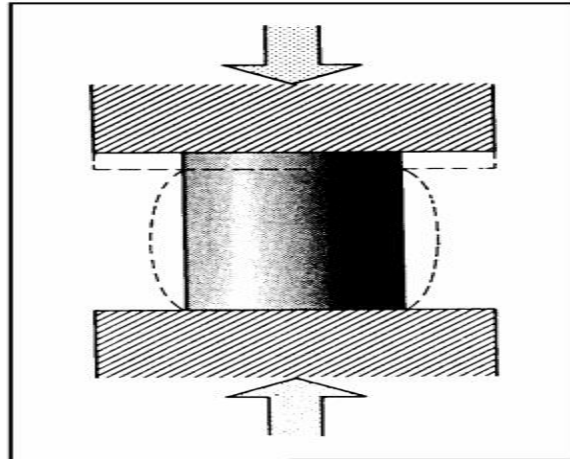
- الاستقامة (Ductilité): تشير إلى قدرة المعدن على التشكيل أو التمدد قبل حدوث الكسر تحت الضغط.

- التأثير الديناميكي (dynamique Réponse): يصف الأداء الديناميكي للمعدن تحت التأثير الحاد

للضغط، ويعتمد على سرعة تطبيق الضغط وكمية الطاقة المستهلكة أثناء الاختبار.

## ب/ العوامل الداعية لاختبار الضغط

يعتبر إختبار الضغط (Test de compression) حالة عكسية لاختبار الشد بالنسبة لاتجاه الحمل المؤثر هذا ما يوضحه (الشكل 5.11). يمثل اختبار الضغط الأساس لقبول المواد غير المعدنية مثل الخرسانة و الطوب والأحجار والأخشاب حيث إن هذه المواد ضعيفة جدا في الشد [13].



الشكل 5.11: شكل العينة في اختبار الضغط.

هذا لا يعني أن اختبار الضغط لا يجري للمعادن و لكن يفضل عليه اختبار الشد حيث إن العوامل الآتية تجعل اختبار الضغط غير صالح لإعطاء نتائج دقيقة من استخدامه كاختبار قبول للمواد أو كاختبار عملي يعتمد على نتائجه:

- صعوبة التأثير بحمل الضغط تأثيرا محوريا حقيقيا على العينة.
- حالة عدم الاتزان النسبية للتحميل بالضغط مقارنة بالتحميل بالشد.
- الاحتكاك بين رأس الماكينة وبين نهايتي العينة المختبرة و هذا الاحتكاك يغير تغييرا ملحوظا نتائج الاختبار عن مثيلتها لو أجري اختبار الضغط بدون وجود الاحتكاك.
- الكبر النسبي للمقطع المستعرض لعينة الضغط.
- و من اختبار الضغط للمعادن المطيلة يمكن تحديد :

✓ إجهاد الخضوع

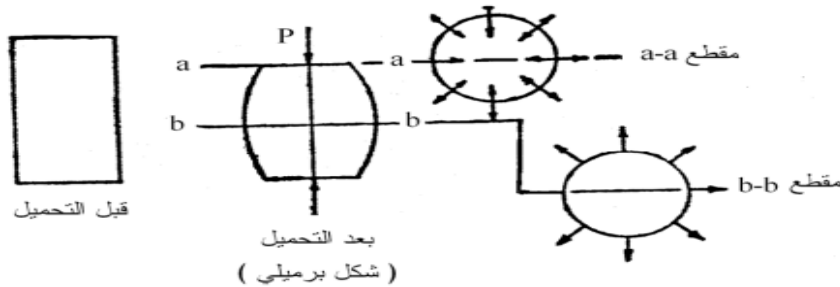
✓ معامل المرونة

✓ الرجوعية

أما بالنسبة للمعادن القصيفة فيمكن تحديد مقاومة الضغط فقط.

## ج/ سلوك المعادن تحت تأثير الضغط

إذا تعرضت عينة معدنية أسطوانية الشكل بارتفاع قصير نسبياً إلى حمل ضغط فإنها تتضغط و يتسبب عن ذلك أن يحدث للعينة تشوه برميلي نتيجة الزيادة في العرض المصاحب للنقص في الطول وتواجد الاحتكاك بين سطحي نهايتي العينة ورأس ماكينة الاختبار.



شكل 6.11: حدوث الشكل البرميلي للمعادن المطبقة في اختبار الضغط.

## د/ منحنى الإجهاد والانفعال :

في حدود المرونة للمعدن يكون توزيع الإجهاد الناتج عن التحميل بالضغط توزيعاً منتظماً على مقطع العينة و يساوي حمل الضغط ( $F$ ) مقسوماً على المساحة الأصلية للمقطع المستعرض ( $A_0$ ) أي :

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (4.II)$$

$\sigma$ : الإجهاد [ Pa ] أو [ N/m<sup>2</sup> ]

F: حمل الضغط أو القوة [ N ]

$A_0$  : المساحة الأصلية لمقطع العينة [ m<sup>2</sup> ].

منحنى الإجهاد و الانفعال يختلف في شكله حسب طبيعة المعادن كالتالي:

1 - معدن مطيل (مثل الصلب الطري): الاستمرار في التحميل يزيد في انضغاط العينة ثم تتفلطح و تستمر في ذلك ولا يحدث لها كسر مهما ازداد الحمل.

2 - معدن نصف مطيل (مثل النحاس الأصفر): العينة تتضغط مع ازدياد التحميل ثم تنكسر على مستوى يعمل زاوية 50 درجة مع الخط الأفقي حيث يظهر في المنحنى تواجد منطقة الخضوع و أحياناً لا توجد تبعاً لظروف معدن العينة من ناحية تشغيلها ومعاملتها حرارياً. كما يلاحظ وجود حد للمقاومة القصوى و بالتالي يمكن إيجاد الإجهاد الأقصى للضغط ( $\sigma_{max}$ ).

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (5.II)$$

$\sigma_{max}$ : الإجهاد الأقصى للضغط ، [ Pa ] أو [  $N/m^2$  ].

$F_{max}$ : حد المقاومة القصوى ، [N].

$A_0$ : المساحة الأصلية لمقطع العينة ، [  $m^2$  ].

3- معدن قصف ( مثل حديد الزهر ) : العينة تتضغط قليلاً جداً ثم تنكسر على مستوى يعمل زاوية حوالي 55 - 60 درجة مع الخط الأفقي .  
الإجهاد الهندسي في الضغط من المعادلة :

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (4.II)$$

و الانفعال الهندسي في الضغط:

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (6.II)$$

F: حمل الضغط أو القوة [N]

$A_0$ : المساحة الأصلية لمقطع العينة [  $m^2$  ].

$\Delta L$ : الانضغاط [mm].

$L_0$ : الطول الأصلي للعينة [mm] .

كما يمكن رسم المنحنيات البيانية للإجهاد والانفعال الحقيقي في الضغط ( انظر الشكل 7.ii ) على أساس أن:

الإجهاد الحقيقي في الضغط هو :

$$\sigma_{tr} = \frac{F}{A_i} \quad (7.II)$$

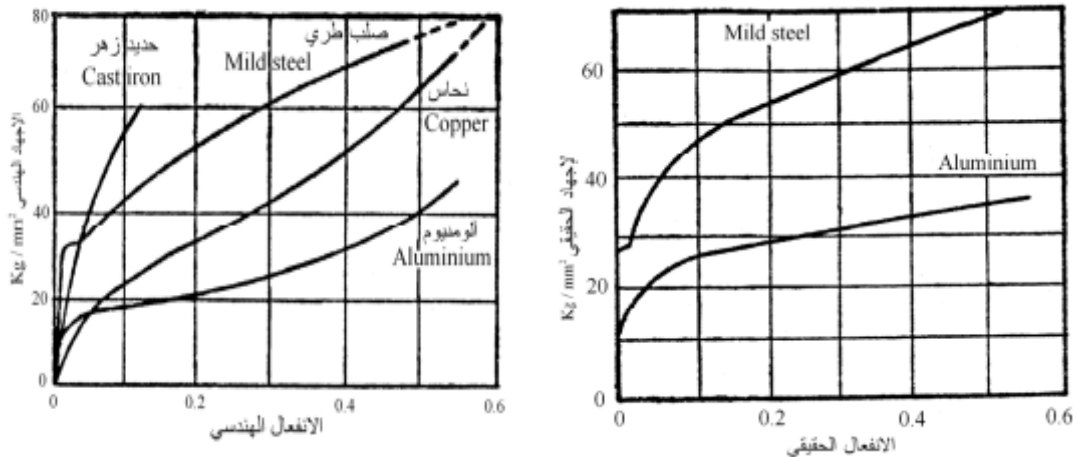
أما الانفعال الحقيقي في الضغط فهو:

$$\varepsilon = \ln \frac{\Delta A}{A_0} \quad (8.II)$$

F : حمل الضغط أو القوة [N] .

$A_0$ : المساحة الأصلية للمقطع المستعرض [  $m^2$  ]

$A_i$ : مساحة أكبر مقطع مستعرض للعينة عند تأثير الحمل عليها  $[m^2]$

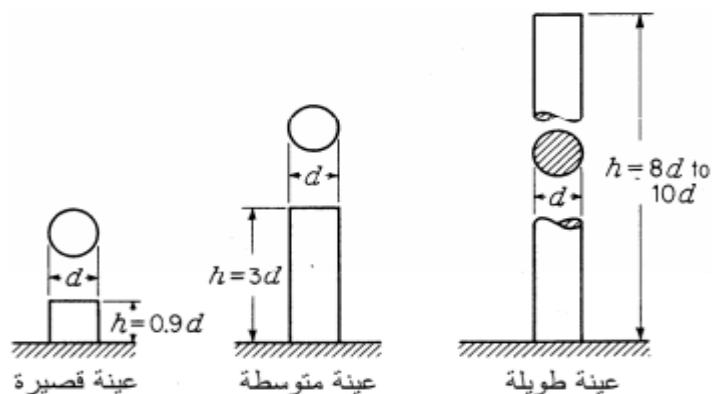


الشكل 7.11: منحنيات الاجهاد والانفعال الهندسي و الحقيقي في اختبار الضغط.

#### ه/ أنواع العينات القياسية لاختبار الضغط للمعادن

العينات القياسية لاختبار الضغط للمعادن هي ثلاثة أنواع [13]:

- العينة الطويلة: الطول فيها يساوي من 8 إلى 10 مرات قطر مقطع العينة تستخدم لرسم منحنى الحمل والتشكيل و منه تعيين حد التناسب و إجهاد الخضوع.
  - العينة المتوسطة: الطول فيها يساوي 3 مرات قطر مقطع العينة تستخدم لتعيين مقاومة الضغط.
  - العينة القصيرة: الطول فيها يساوي 0.9 مرات قطر مقطع العينة تستخدم لاختبار معادن المحامل (كراسي التحميل) بحيث يكون تأثير الاحتكاك الموجود مشابه لحالة تشغيل معادن المحامل و (الشكل 8.11).
- يبين شكل العينات.



الشكل 8.11: شكل العينات القياسية لاختبار الضغط

#### و/ الشروط الواجب توافرها في عينات الضغط للمعادن

يجب أن تستوفي عينات اختبار الضغط للمعادن الشروط التالية:

- أن تكون العينات ذات مقطع دائري أي تكون أسطوانية وذلك حتى يكون توزيع الحمل منتظماً على سطح كل من نهايتي العينة عند التأثير بماكينة الاختبار.
- أن تكون العينات ذات ارتفاع لا يتجاوز 10 مرات قطر المقطع حتى لا يحدث انبعاج والذي يسبب تواجد عزم انحناء على العينة بجانب حمل الضغط.
- يكون سطحاً نهاية العينة مستويين متوازيين وعموديين وذلك حتى يكون التحميل محورياً.

### ز/ العوامل المؤثرة على اختبار الضغط

نعبر على كل عامل كالتالي:

- شكل العينة: حيث إن صغر مقطع العينة المختبرة بالنسبة لمساحة رأس ماكينة الاختبار يؤثر على قيمة الحمل المنقل للعينة فيجب استعمال قطع ارتكاز بين نهايتي العينة و بين فكي ماكينة الاختبار.
- المحورية: يستعمل مرتكز كروي لتعديل أي انحراف في ميل الحمل وجعله محوريا دائماً. و يجب أيضاً جعل كل نهايتي العينة مسطحة و عموديا على محور العينة وكذلك جعل محور العينة ينطبق مع محور ماكينة الاختبار لضمان توزيع الإجهاد على سطح العينة بانتظام .
- انبعاج العينة: يجب منع حدوث انبعاج العينة نتيجة التحميل وذلك بجعل ارتفاع العينة لا يزيد عن 10 مرات قطر العينة.
- الاحتكاك : في اختبار الضغط، توجد إجهادات غير منتظمة على عينة الاختبار نتيجة للقوى القطرية والمماسية للاحتكاك بين سطحي قطعة الاختبار ورأس الماكينة. للتغلب على هذا، يستخدم التشحيم باستخدام مواد مناسبة على الأسطح المعرضة للاحتكاك، ولكن لا يمكن القضاء تماماً على القوى المسببة للاحتكاك. "ميسير دينا" قد اقترح طريقة للحصول على شكل منتظم لقطعة الاختبار عن طريق جعلها من ثلاثة أجزاء. يمكن أيضاً تقليل الاحتكاك عن طريق لف رأس الماكينة بزواوية تساوي زاوية الاحتكاك بين السطحين، مما يجعل اتجاه الإجهادات يتوازي مع محور قطعة الاختبار.

## 3.1.2. II. اختبار الالتواء

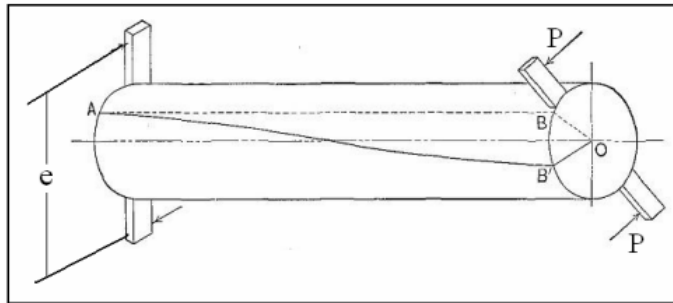
## أ/ تعريف

إذا تم تطبيق عزم الالتواء  $M_t$  ( $N \cdot m$ ) على المقطع المستعرض، فمن المرجح أن يكون المقطع عبارة عن عمود أو قضيب. بالإضافة إلى ذلك، إذا تأثر المقطع بقوتين متوازيتين و متعاكستين في الاتجاه، وتكون القوتين متساويتين في القيمة  $P$  ( $N$ ) وتبعد إحداها عن الأخرى بمسافة  $e$  ( $m$ )، تسبب كلتا القوتين عزم التواء على المقطع.

$$M_t = P \cdot e \quad (9.II)$$

اختبار الالتواء على المعادن هي عملية تقنية تستخدم لتقييم قوة ومقاومة المعادن تحت تأثير الالتواء أويتم تطبيق قوة على المعدن بشكل محكم في نقطة محددة، مما يؤدي إلى انحناء المعدن وقد يؤدي أيضًا إلى حدوث كسر. يتم قياس قدرة المعدن على تحمل الالتواء وتحمل الانحناء بواسطة هذا الاختبار [14].

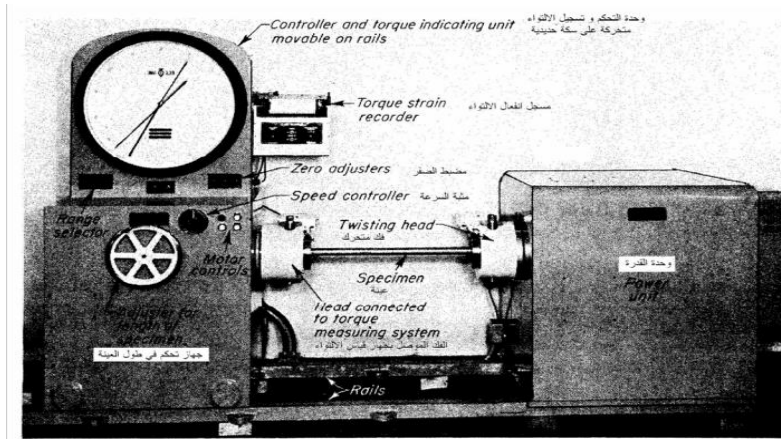
يتم إجراء اختبار الالتواء عن طريق تطبيق عزم دوراني على العينة المعدنية وقياس الزاوية التي تتحرك بها. يتم تحليل البيانات لتحديد مرونة وصلابة المعدن وقدرته على الالتواء [15].



الشكل. II.9: عزم الالتواء نتيجة قوتين متوازيتين ومتساويتين ومتعاكستين في الاتجاه [13].

## ب/ ماكينة اختبار الالتواء

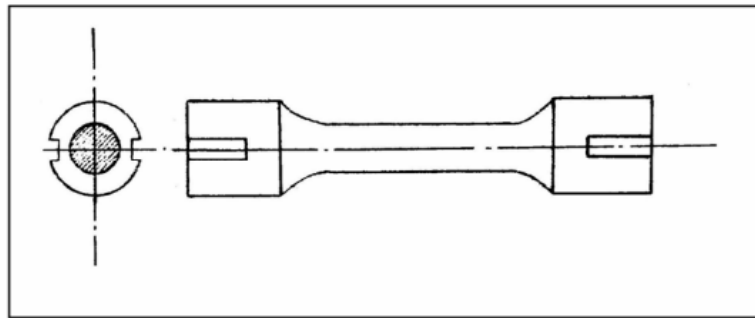
تتم عملية اختبار الالتواء على ماكينة مخصصة تحتوي على فكين يتم تركيب عينة الاختبار بينهما. يتحرك أحد الفكين دائرياً محدثاً بذلك عزم التواء على العينة، أما الفك الآخر فيتصل بثقل بندولي يقوم بموازنة عزم الالتواء المذكور. يمكن استخدام أي طريقة أخرى لتحقيق تلك الموازنة عن طريق الفك الآخر. كما تحتوي الماكينة على مقياس يظهر عزم الالتواء المؤثر ومقياس الزاوية الالتواء المصاحبة لهذا العزم، كما هو موضح في (الشكل. II.10) [13].



الشكل 10.11: ماكينة اختبار الالتواء.

## ج/ عينة الاختبار

لا توجد مواصفات قياسية لشكل و أبعاد عينة اختبار الالتواء و لكنها غالباً ما تكون دائرية المقطع مع ملاحظة أن يكون قطر مقطع جسم عينة الاختبار أقل من قطر نهايتي العينة اللتين تتركبان في ماكينة الاختبار تقادياً لحدوث الكسر عند إحدى نهايتي العينة حيث يلزم لصحة نتائج الاختبار ان يكون الكسر بجسم العينة المختبرة. ويلاحظ أيضاً أن يكون هناك تجاوزيف بكل من النهايتين حتى يمكن تركيبها في ماكينة الاختبار لترتكز عليها العينة كما في (الشكل 11.11).



الشكل 11.11: عينة اختبار الالتواء.

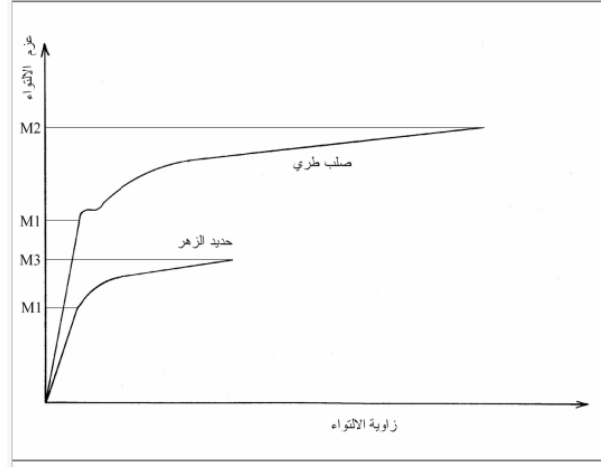
إليك بعض الخصائص التي يتم تقييمها عند إجراء اختبار الالتواء على المعادن [14]:

- **قوة الالتواء القصوى** (Résistance à la Torsion Ultime): وهي القوة القصوى التي يمكن للمعدن تحملها قبل أن يحدث الكسر تحت تأثير الالتواء. يعبر عنها بالوحدات النيوتن / ملليمتر مربع ( $N/mm^2$ ) أو الباسكال (Pa).

- **الصلابة** (Dureté): يتم قياس صلابة المعدن تحت تأثير الالتواء، وتعكس قدرة المعدن على مقاومة التشوه والتشقق.

- المرونة (Flexibilité): تشير إلى قدرة المعدن على الانحناء والعودة إلى شكله الأصلي بعد إزالة القوة المؤثرة.

- التأثير الديناميكي (Réponse dynamique): يصف الأداء الديناميكي للمعدن تحت التأثير الحاد للالتواء، ويعتمد على سرعة تطبيق القوة وكمية الطاقة المستهلكة أثناء الاختبار.



الشكل. II.12: الرسم البياني لعزم الالتواء وزاوية الالتواء اي الحمل والتشكيل [13].

## II.2.1.4. اختبار الصدم Essai d'impact

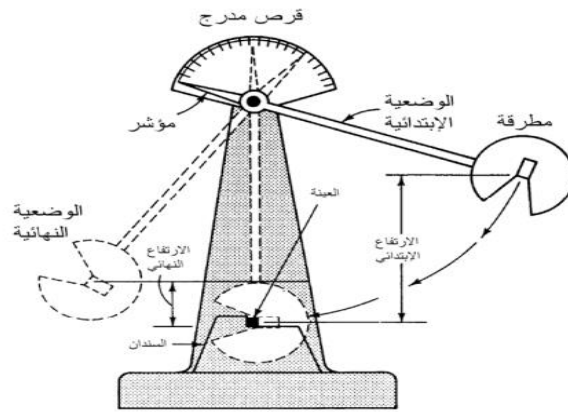
### أ/ تعريف اختبار الصدم

هو عملية تجرى على قطعة اختبار لتعين خاصية المتانة تحت تأثير قوة صدم بواسطة كتلة كبيرة نسبياً متحركة ويكون التحميل فجائياً أي يستغرق فترة قصيرة جداً من الزمن [13].

تعتبر المتانة خاصية تعبر عن الشغل المبذول لتصدع العينة، وتعتمد المتانة على المقاومة والممتولية. اختبار الصدم يظهر مقاومة المادة للانهايار تحت قوى الصدم ومعدل امتصاص الطاقة يؤثر على سلوك المواد وجودتها. في تجارب الصدم على عينة غير منقورة، لوحظ توافق نتائجها مع نتائج اختبار الشد عند حساب المتانة من منحنى الإجهاد الحقيقي والانفعال الهندسي.

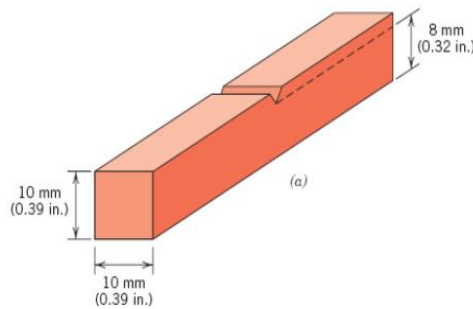
### ب/ ماكينة اختبار الصدم و العينات القياسية

بصفة عامة ماكينة اختبار الصدم هي عبارة عن ذراع مثبت بطرفه كتلة وتسمى بالمطرقة. الذراع يتأرجح حول مركز فيرفع الذراع إلى علو ما ثم يطلق فيسقط تحت تأثير الجاذبية فيصدع العينة التي تكون مثبتة في أسفل الجهاز ويسمى غالباً السندان. كما أنه يوجد حول مركز الدوران قرص مدرج عليه مؤشر احتكاك يسمح بقراءة الطاقة المبذولة لتصدع العينة.



الشكل. 13. II: ماكينة اختبار الصدم.

أما العينات المستخدمة في اختبار الصدم فهي عينات قياسية وبصفة عامة هي على شكل متوازي أضلاع عليه حز في أحد أسطحه يسمح له بتسهيل عملية الكسر كما هو موضح في ( الشكل. 14. II ).



الشكل. 14. II: شكل عينة اختبار الصدم

### ج/ انواع اختبارات الصدم

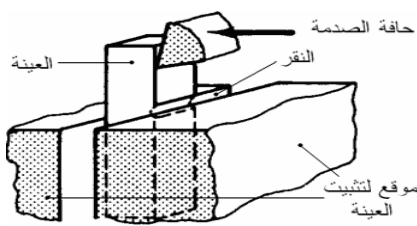
توجد عدة أنواع من اختبارات الصدم، أهمها [13]:

#### ➤ اختبار تشاربي: Charpy

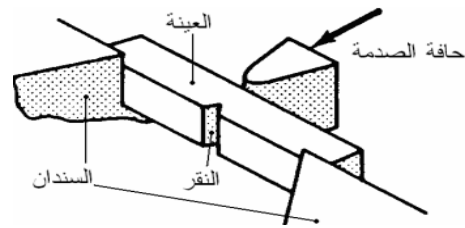
توجد ماكينة تشاربي لاختبار الصدم بمجموعة من الأحجام، ويكون الحجم الطبيعي للصدمة بقوة قصوى تبلغ  $30\text{Kg}\cdot\text{m}$ . يتكون البندول من قضيب خفيف وجاسي بقرص ثقيل في نهايته. يتم تعليق البندول من محور دوران في الركيزة، ويتأرجح قرب قاعدته حيث توجد العينة وركائزها والسندان. يجب ضبط حد السكين الضارب بحيث يلمس العينة في جميع عمقها عند لحظة الصدمة في طريقة الاختبار، يتم رفع البندول إلى أعلى مستواه ويحفظ بهذا المستوى لضمان نفس ارتفاع السقوط في كل تجربة.

#### ➤ اختبار ايزود: Izod

تعمل ماكينة اختبار أيزود للصدمة بسعة  $175\text{Kg}\cdot\text{m}$  غالباً، وتوجد ماكينات أخرى بسعات مختلفة. يتكون البندول من مطرقة مركبة في نهاية عضو خفيف مثبت بركيزة ذات رمان متصل بقائم و مربوط بمسار إلى قاعدة من حديد الزهر. يظهر زاوية ارتفاع البندول بعد هبوطها أو كمية الطاقة اللازمة لتصديع العينة على تدريج بواسطة مؤشر احتكاك عينات اختبار الصدم أيزود القياسية عبارة عن متوازي أضلاع بأبعاد  $10\text{ mm} \times 75 \times 10$  ، ذات نقر عادي على شكل بزواوية  $45^\circ$  وعمق  $2\text{ mm}$ . البندول يصدم العينة وهي مثبتة على هيئة كابولي.



الشكل. II.16: تثبيت عينات اختبار ايزود.



الشكل. II.15: تثبيت عينات اختبار شاربي

#### د/ العوامل المؤثرة على نتائج الاختبار

بصفة عامة إذا كان نفس شكل النقر في العينات فإن نتائج اختبار الصدم بطريقتي أيزود و تشاربي تكون متطابقة و لو أن نتائج تشاربي تكون أعلى من نتائج أيزود و كلما زادت متانة المادة كلما زاد الفرق إلا أن نتائج اختبار الصدم للمعادن تتغير تبعاً للعوامل التالية:

- ✓ الفقد في الطاقة.
- ✓ سرعة الصدم .
- ✓ حجم وشكل العينة .
- ✓ درجة الحرارة.

#### II.2.1.5. اختبار الصلادة Essai de dureté

##### أ/ تعريف اختبار الصلادة

هو عملية تجرى على قطعة اختبار لتعین خاصية الصلادة والتي هي الخاصية التي تمكن المادة من الاحتفاظ بشكل سطحها متماسكاً تحت تأثير الأحمال .

لصلادة المواد بصفة عامة والمعادن بصفة خاصة أنواع و هي:

- صلادة العلامة (Dureté d'indentation): و هي خاصية مقاومة المعدن لحدوث علامة به نتيجة

تحميله بحمل ستاتيكي وديناميكي.

مجال الاستخدام: مثلاً في مقارنة صلادة ألواح المدرعات الحربية لمقاومة اختراق القذائف.

- **صلادة الارتداد (Durée de rebond):** و هي خاصية قدرة المعدن على الرجوعية أي امتصاص الطاقة وإعادتها ثانية بعد إزالة الأحمال المؤثرة مسببة ارتداداً لها تكبر قيمته كلما كبرت صلادة المعدن.

- **صلادة الخدش (Dureté aux rayures):** و هي خاصية مقاومة سطح المعدن للخدش.

مجال الاستخدام: تقيد في تقدير صلادة المعادن في عمليات البرد و عند تعرض المعدن للخدش أثناء التشغيل.

- **صلادة التآكل (Dureté à l'usure):** و هي خاصية مقاومة سطح المعدن للبرى أي التآكل نتيجة للاحتكاك.

مجال الاستخدام: مثلاً في تحديد صلادة المعادن اللازمة لسطوح العجلات الحديدية للقطارات والقضبان الحديدية حتى تكون ذات مقاومة كافية للتآكل نتيجة الاحتكاك.

- **صلادة التشغيل بالماكينات (Usinabilité Dureté):** و هي خاصية مقاومة المعدن للتشغيل بالماكينات مثل عملية القطع و الثقب و القص... الخ.

مجال الاستخدام: هي ذات فائدة قيمة عند تشكيل المعادن بالمخرطة والمنتاب و غيرها بالورشة.

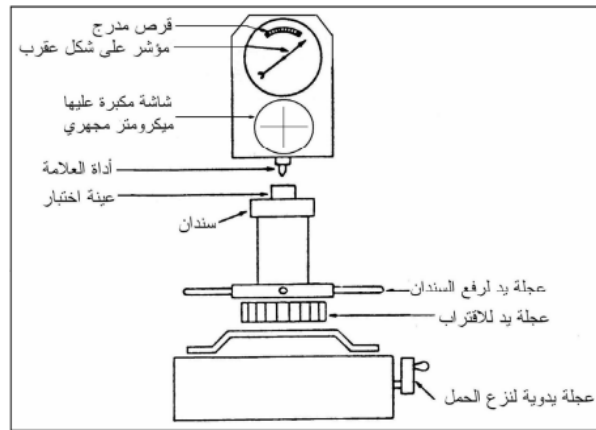
### ب/ صلادة العلامة

نوع اختبار الصلادة الأكثر استخداماً في الهندسة هو اختبار صلادة العلامة. يتم دراسة هذا النوع بدقة، ويستخدم فيه أداة (جسم له شكل محدد)، يتم وضعه على سطح المعدن وتطبيق عليه ضغط حتى يترك أثر علامة. يتم إزالة الحمل بعد مدة التحميل التي تتراوح بين 15 إلى 30 ثانية. يتم قياس صلادة المعدن عن طريق قياس عرض الأثر أو عمقه، حيث يزداد قيمة الصلادة كلما كان المعدن أقل صلادة. يمكن حساب رقم صلادة المعدن عن طريق قسمة الحمل المؤثر على مساحة الأثر. وحدات الأحمال والمساحات ثابتة، وبالتالي لا يتم ذكر وحدة لرقم الصلادة. هناك أنواع معينة من اختبار صلادة العلامة القياسية للمعادن هي :

• اختبار برينل Brinell

• اختبارا فيكرس Vickers

• اختبار روكويل Rockwell



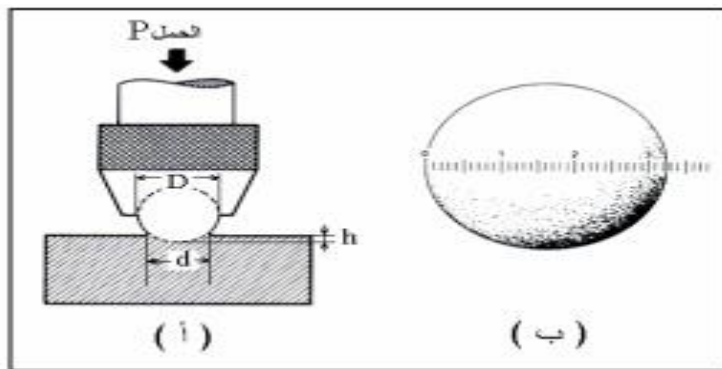
الشكل. 17.11: جهاز اختبار الصلادة.

الجهاز عبارة عن ماكينة اختبار الضغط، تركيب وصلة خاصة تثبت عليها أداة (التي تترك العلامة على القطعة المختبرة) في أحد وجهي الضغط، تضغط بحمل معين على ألا تزيد أصغر قراءة لتدرجات حمل الماكينة على 0.5% من حمل الاختبار و أن تكون دقة الماكينة في حدود 0.5 % من حمل الاختبار كما هو موضح في (الشكل. 17.11).

### ج/ اختبار برينل Brinell

#### ➤ شكل الأداة

الأدوات المستخدمة في اختبار برينل هي كرات من الصلب المصلد و يجب أن يكون سطح الكرات أملس وخاليا من العيوب والكرات المستعملة في هذا الاختبار تكون بأقطار محددة [13].



الشكل. 18.11: اختبار برينل للصلادة: أداة الاختبار، قطر وعمق الاثر (أ)

والشاشة المكبرة بالجهاز التي عليها ميكرومتر مجهري لقياس قطر الاثر (ب).

#### ➤ طريقة الاختبار

تتلخص طريقة الاختبار في ضغط كرة من الصلب قطرها  $D$  (mm) بحمل قدره  $P$  (Kg) ثم قياس الأثر  $d$  (mm) الناتج من هذا الضغط على سطح قطعة الاختبار وذلك بعد إزالة الحمل المؤثر.

و يعبر عن صلادة المعدن المختبر برقم برينل للصلادة الذي يحسب كما يلي:  
رقم صلادة برينل = حمل الاختبار (Kg) / مساحة أثر الكرة على قطعة الاختبار ( $\text{mm}^2$ )

### ➤ خطوات اختبار برينل

1. يجرى اختبار برينل في درجة حرارة الغرفة ويكون ذلك بوضع قطعة الاختبار على مرتكز صلب ثابت حتى لا تحدث إزاحة أثناء إجراء الاختبار.
2. توضع كرة برينل المناسبة على سطح قطعة الاختبار.
3. يضغط على كرة برينل بحمل عمودي على سطح قطعة الاختبار و يزداد هذا الحمل تدريجياً حتى تصل قيمته إلى الحمل المناسب للمعدن المختبر المقابل لكرة برينل المستعملة.
4. يترك الحمل مؤثراً على قطعة الاختبار فترة لا تقل عن 15 ثانية.
5. يزال الحمل.
6. يقاس قطر الأثر بواسطة الشاشة المكبرة المزودة بالميكرو متر المجهرى و يحسب رقم برينل للصلادة.

### ➤ حدود استخدام طريقة برينل

يعتبر استخدام طريقة برينل لاختبار صلادة المعادن غير صحيح في الحالات التالية:  
إذا كان المعدن المختبر شديد الصلادة حيث يخشى على كرة برينل من أن تغير شكلها فبذلك لا تحدث علامة حقيقية تمثل صلادة المعدن المختبر.  
إذا كانت العينة المختبرة رقيقة جداً أي ذات سمك صغير حيث تحدث كرة برينل بسطح المعدن انبعاجاً يظهر أثره من الجانب الآخر.  
إذا كانت العينة المختبرة مصلدة بالتغليف حيث ينتظر أن يكون أثر كرة برينل له عمق أكبر من سمك الجزء المصلد و حينئذ لا يمثل رقم برينل صلادة الغلاف المصلد لسطح العينة و هو غرض الاختبار.

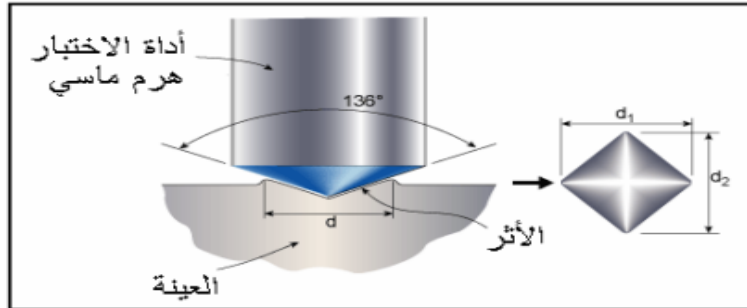
### د/ اختبار فيكرز Vickers

#### ➤ شكل الاداة

الأداة المستخدمة لإجراء الاختبار هي عبارة عن هرم من الماس مربع القاعدة و تتقاطع مستوياته عند الحروف بزواوية  $\theta$  قدرها  $136^\circ$  [13].

#### ➤ طريقة الاختبار

يجري اختبار فيكرس بنفس طريقة اختبار برينل و بما أن شكل الأداة هرم من الماس فإن الأثر على سطح القطعة المختبرة يكون مربعاً و ذا عمق معين و بالتالي تقاس الصلادة بقياس قطر الأثر (d) (الشكل.19.11).



الشكل. 19.11: إختبار فيكرس للصلادة: وضعية الاختبار وشكل الاثر.

و يحسب رقم فيكرز كالتالي:

رقم صلادة فيكرز = حمل الاختبار (Kg) / مساحة اثر الكرة على قطعة الاختبار ( $\text{mm}^2$ )

➤ **عينة الاختبار:** باستخدام هرم من الماس صغير ودقيق الحجم يمكن تحديد صلادة المعادن العينات رقيقة السمك وذلك حتى سمك قدره 0.01mm.

➤ **مزايا اختبار صلادة المعادن بطريقة فيكرز**

- ✓ يعطي قيمة دقيقة لرقم الصلابة.
- ✓ الأحمال المؤثرة صغيرة إذا ما قورنت بالأحمال المؤثرة في اختبار برينل.
- ✓ يمكن بواسطته تحديد صلادة المعادن شديدة الصلادة نظراً لاستخدام الهرم الماسي.
- ✓ يمكن بواسطته تحديد صلادة المعادن الرقيقة السمك و التي لا يصلح لها اختبار برينل (فمثلاً يمكن إيجاد صلادة شفرة الحلاقة بواسطة اختبار فيكرز).

➤ **خطوات الاختبار**

خطوات اختبار الصلادة بطريقة فيكرس هي نفس الخطوات التي تتبع في الاختبار بطريقة برينل. ملاحظة: في اختبار برينل أو في اختبار فيكرس في حالة ما إذا كان سطح عينة الاختبار مقوساً أو يوجد فيه اعوجاج أو أن شكل الأثر ببيضاوي (برينل) فيجب في هذه الحالة أخذ القيمة المتوسطة لقطر الأثر.

هـ/ اختبار وركول Rockwell

➤ **شكل الاداة**

الجسم المحدث للأثر عبارة عن كرة صغيرة من الصلب قطرها 1.5875mm أو مخروط من الماس بزاوية  $120^\circ$  وحرف مستدير و يسمى برايل ( Brale ) [13].

### ➤ طريقة وخطوات الاختبار

1. يجري اختبار روكويل باستخدام احمال 150kg,100,60 وهي احمال صغيرة بالنسبة للأحمال المستخدمة في طريقة برينل.

2. تحمل قطعة الاختبار بحمل ابتدائي  $F_0$  قيمته 10 (Kg) (Charge de mineur).

3. يعاد مؤشر القرص المدرج للجهاز أمام التدرج صفر.

4. يزداد الحمل بإضافة العمل الكبير: (Charge importante) حتى يكون الحمل الكلي النهائي ( $F_1$ )

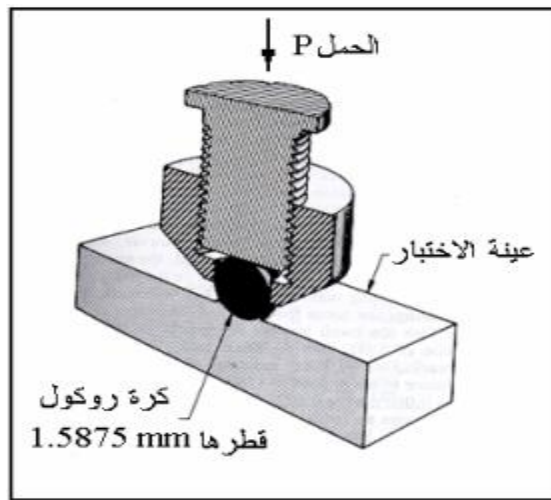
100,60 أو 150 (kg) حسب نوع اختبار روكويل المستخدم.

بحيث الحمل النهائي = العمل الابتدائي + العمل الكبير المضاف.

5. عندما يثبت مؤشر القرص المدرج يزال العمل الكبير المضاف حتى يصير الحمل المؤثر (10 Kg)

فيرتد المؤشر قليلاً ويثبت عند تدرج معين يمثل رقم روكويل للصلادة ( مع الملاحظة أن الحمل الابتدائي 100

لا زال مؤثراً على قطعة الاختبار) أي أن رقم الصلادة يتعلق بالأثر الناتج من الحمل الكبير فقط.



الشكل. II.20: اختبار روكويل للصلادة.

### ➤ عينة الاختبار : يراعى عند تجهيز قطعة الاختبار التالي:

- أن يكون سطح القطعة مستوياً وناعماً وخالياً من الخدوش و العلامات.
- أن لا يكون ملتصقاً به زيوت أو شحوم أو أية مواد غريبة.
- و عدم حدوث انبعاج بالجانب الآخر للعينة بعد الاختبار.

## ➤ مزايا طريقة روكويل للصلادة

- يوجد أجهزة تقيس الصلادة إلا بطريقة روكويل ولا يمكن استخدام طرق أخرى كبرينل أو فيكرز وتمتاز هذه الأجهزة بصغر حجمها مما يجعلها تستخدم بكثرة في الصناعة.
- إمكانية اختبار صلادة المعادن مختلفة سواء صغيرة أو كبيرة الصلادة.
- الحصول على رقم الصلادة مباشرة من قراءة تدريج قرص الجهاز مما يوفر عملية الحساب.
- يمكن من ليست لهم خبرة بتعيين رقم روكويل للصلادة بتشغيل الجهاز وقراءة رقم الصلادة من التدريجات القرص والأثر الناتج من طريقة روكويل صغير جداً إذا قورن بالأثر الناتج من طريقة برينل مما يترك سطح القطعة سليماً نسبياً.

## و/ العلاقة بين ارقام الصلادة المختلفة

اتضح من التجارب المتنوعة انه لا توجد علاقة ثابتة صحيحة تماما بين أرقام الصلادة المعينة بالطرق المختلفة بحيث تتأثر هذه العلاقة بالعوامل التالية:

- ✓ المعاملة الحرارية.
- ✓ التشغيل على البارد.
- ✓ و الدرجات الحرارية المختلفة.
- ✓ وطبيعة المعدن أي من معدن إلى آخر.

## II.2.2. الاختبارات الغير إتلافية للمواد Contrôle non destructif

فيها تختبر العينة دون إتلافها و المحافظة على سلامتها وأهمها:

- ❖ الاختبار بالفحص البصري (Visual inspection)
- ❖ اختبار بمخترق السوائل (Contrôle par ressuage)
- ❖ اختبار التسرب (Test de fuite)
- ❖ الاختبار بالدقائق المغناطيسية (Test de particules magnétiques)
- ❖ الاختبارات بالأشعة (Test radiographique)
- ❖ الاختبار بالموجات فوق الصوتية (Test par ultrasons)
- ❖ الاختبار بالتيارات الدوامية (Test par courants de Foucault)

كما أن الاختبارات الإتلافية تقيس وتحدد الخواص الميكانيكية للمواد فإن الاختبارات غير الإتلافية تقوم بالتفتيش وتوصيف العيوب الداخلية و السطحية للمواد دون إتلافها و ذلك لضمان أنها تؤدي الوظائف المطلوبة منها.

### 3.11. الهدف من تعريض المعادن لمختلف الاختبارات

تعريض المعادن لمختلف الاختبارات والمواصفات يهدف إلى تقييم خصائص المعادن وضمان جودتها وملائمتها للاستخدام المقصود هناك عدة أهداف لتطبيق الاختبارات والمواصفات على المعادن منها [16] :

1) تقييم الجودة: يهدف ذلك للتأكد من تحقيق المعادن لمعايير الجودة والمواصفات المطلوبة. فهذه الاختبارات تساعد في التحقق من قدرة المعدن على تحمل الإجهادات والضغوطات المختلفة وتحديد مقاومتها للتآكل والتأكسد.

2) ضمان السلامة: يُستخدم تقييم المعادن للتأكد من سلامتها وملائمتها للاستخدام في التطبيقات حيث تكون السلامة مهمة بشكل خاص، مثل في الصناعات الميكانيكية والهندسية.

3) تحديد الاستخدام الملائم: يساعد تحديد خصائص المعادن في اختيار المعدن المناسب لتطبيق محدد، فعلى سبيل المثال، يمكن استخدام نتائج اختبارات المعدن لاختيار المعدن الأمثل لتطبيق في الهياكل الفولاذية أو في السيارات أو الطائرات.

4) التقليل من الفشل: يمكن من خلال اختبارات المعادن تحديد نقاط الضعف والعيوب المحتملة في المعدن، وبالتالي تحسين تصميم المواد وتجنب الفشل المحتمل في المستقبل.

بشكل عام، تهدف اختبارات المعادن والمواصفات إلى ضمان جودة وسلامة المواد وضمان توافقها مع الاستخدامات المختلفة.

### 4.11. الخاتمة

في الختام، يمكن القول إن توصيف المعادن واختباراتها هي وسائل أساسية لفهم وتحليل الخصائص الميكانيكية والفيزيائية والكيميائية للمعادن. و باستخدامها، يمكن للمهندسين والباحثين والعلماء تحسين فهمهم للمعادن وتطبيقاتها وتطوير مواد جديدة وتقنيات مبتكرة. وبالتالي يساهم توصيف المعادن واختباراتها في تطور وتقديم مجالات الهندسة والصناعة والتكنولوجيا.

## الفصل III

# الاجراءات التجريبية

## 1. III. مقدمة

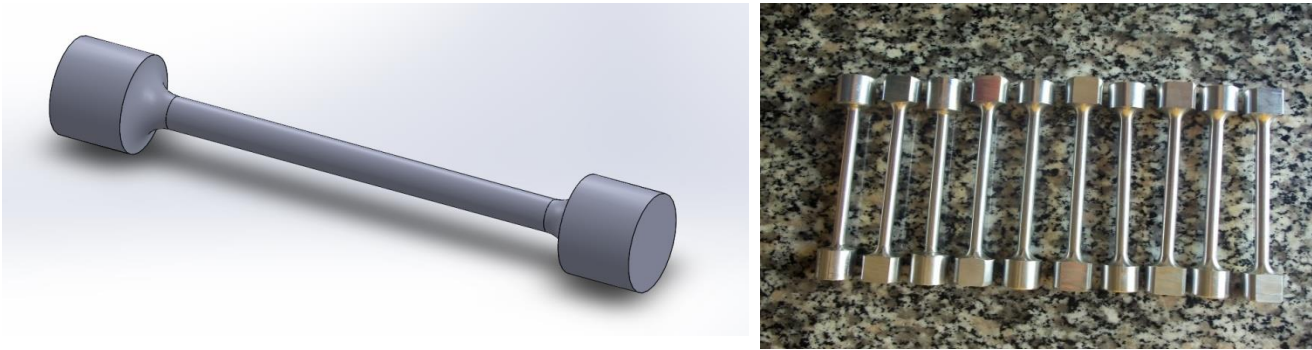
في هذا الفصل، نقدم الوسائل و مختلف المعدات المستخدمة لتحقيق الاختبارات المختلفة: الالتواء، وكذلك الدراسة التعدينية (l'étude métallographique). حيث تم إجراء التجارب اللازمة لدراستنا بمركز البحث العلمي (LMS)، قسم الميكانيك بجامعة 8 ماي 1945 في قالمة.

الاختبارات التي أجريت على عينات سبائك الألومنيوم اللازمة لتنفيذ عملنا ، نفذت في قسم التكنولوجيا داخل مختبر قطع المعادن (Laboratoire de coupe des métaux :LMS). أما بالنسبة لاختبارات المعالجة الحرارية (التلدين) و الدراسة التعدينية، تم تنفيذها في مختبر علوم المادة (SDM). اختبارات الالتواء تم تنفيذها في مختبر مقاومة المواد (RDM).

## 2. III. المعدات المستخدمة

## 1. 2. III. العينات

العينات المستخدمة مصنوعة من سبائك الألومنيوم من الصنف AISi12 (الباكس) بالنسبة لاختبارات الالتواء ، قمنا بتشغيل عينات من سبائك الالمنيوم (Alpax) بقطر  $\Phi = 6 \text{ mm}$  ، الطول الإجمالي  $L=115\text{mm}$  والطول المتوسط  $l=75\text{mm}$  (الشكل. III . 1).



الشكل. III . 1: عينات اختبار الالتواء.

الجدول.1.III: التكوين الكيميائي لسبيكة الألمنيوم (AlSi12).

النسبة %	العناصر
86.45	الألمنيوم (Al)
12	السليسيوم (Si)
0.6	النحاس (Cu)
0.4	المغنيزيوم (Mg)
0.55	الحديد (Fe)

الجدول.2.III: الخصائص الميكانيكية المتوسطة الموحدة.

G (N/mm <sup>2</sup> )	E(Gpa)	A(%)	Dureté HB
32000	70	>= 1.0 %	80-120

الجدول.3.III: الخصائص الفيزيائية.

الخاصية	قيمتها
التوصيل الحراري	120 w/m.k
الحرارة النوعية	0.87 Kj/kg.k
درجة حرارة الانصهار	577 - 630 C°
الكثافة	2.7 kg/m <sup>3</sup>

### III.2.2. الآلات

الآلات التي تم استخدامها لتشغيل العينات هي: مخرطة متوازية و آلة تفريز شاقولية.

#### III.2.2.1. مخرطة متوازية

المخرطة المستخدمة في اختباراتنا هي مخرطة متوازية من الشركة التشيكية «TOS TRENCIN»، نموذج

SN 40 C حيث استطاعتها تساوي 6.6KW .

سرعات الدوران المتوفرة على الجهاز هي: (2000 ;1400 ;1000 ;710 ;500 ;355 tr/min) ;250 ;180 ;125 ;90 ;63 ;45).

سرعات التغذية المتاحة هي : (0.16 ;0.18 ;0.20 ;0.22 ;0.24...6.4) mm /tr : (0.08 ;0.10 ;0.11 ;0.12;0.14).



الشكل. III.2: مخروطية متوازية (SN 40 C).

### III.2.2.2. آلة تفريز

آلة التفريز التي قمنا باستخدامها لتحضير العينة هي آلة تفريز شاقولية (FV 1.5) من الشركة الوطنية لإنتاج الآلات الصناعية PMO (Almo) باستطاعة 5 KW.

سرعات الدوران المتاحة من 45 tr/min الى 2000 tr/min، وسرعة تغذية من 16 mm/min إلى 800 mm/min (الشكل. III.3a).

أداة القطع عبارة عن فريزة 2T مع 6 أسنان كربيد (K10) بقطر 50mm.

يبين (الشكل. III.3b) كيفية تسطیح اطراف العينات لأجل منع دورانها في المقابس الماسكة للعينة في آلة الالتواء.



الشكل. III. 3b : تشغيل الأسطح المستوية للعينات. الشكل. III. 3a : آلة التفريز المستخدمة (آلة تفريز شاقولية).

### III.2.3. فرن كهربائي (Controlab)

من أجل المعالجة الحرارية (recuit) لعينات الالتواء، قمنا بإجراء عملية تلمين مع شروط المعالجة الحرارية المدرجة في (الجدول. III.4).

إعداد عينات الاختبار:

- ضبط درجة حرارة الفرن على  $320\text{ C}^\circ$  درجة مئوية.

- وضع 11 قطعة اختبار في الفرن (9 + 2 قطعة لاختبار السلامة). (الشكلان III.4 و 5).

- خروج قطع الاختبار من الفرن بعد 7 ساعات و 20 دقيقة من التلمين و التبريد إلى درجة الحرارة المحيطة.

الجدول. III.4: متطلبات المعالجة الحرارية.

الوقت اللازم للمعالجة	المعالجة الحرارية	السبيكة
	التلمين (recuit)	
7h20min	$320\text{C}^\circ$	Alsi12



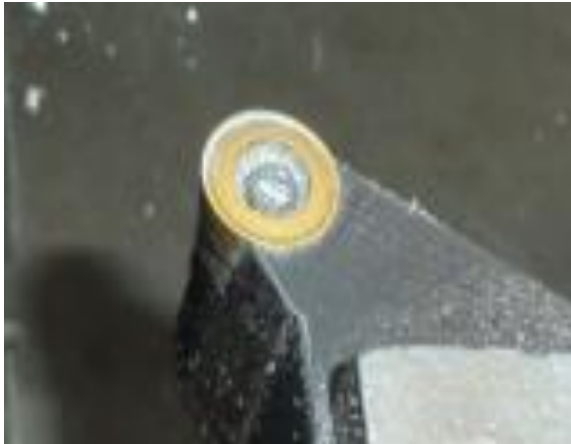
الشكل. III. 4: فرن كهربائي.



الشكل. III. 5: ترتيب قطع الاختبار داخل الفرن.

### III.2. 4. لقم القطع وحامل الأدوات

من أجل تحقيق الاختبارات، استخدمنا حامل أداة اين نثبت اللقم (plaquettes de coupe)، انظر (الشكل. III.6).



الشكل. III.6: اللقم وحاملات الأدوات المستخدمة.

### III.2. 5. المجهر (Microscope métallographique)

المجهر المستخدم لإجراء دراسة فحص المعادن هو المجهر يورو مكس EUROMEX، يتم وضع العينة تحت عدسة المجهر على طاولة ميكرومتر ذات حركات متقاطعة كما هو موضح في (الشكل. III.7).



الشكل. III. 7: المجهر الضوئي الفلزي (يورو مكس).

### III.6.2 آلة اختبار الالتواء Machine de torsion

الجهاز المستخدم هو آلة اختبار الالتواء، وتبلغ قوتها 30 Nm مع سرعة دوران 500tr/min، وتستخدم لدراسة الالتواء لعينات الاختبار أثناء تعرضها للحمل حتى الإلتلاف. يتم قياس الدوران و زاوية الالتواء لكل قطعة (الشكل. III.8).

يتكون جهاز الاختبار أساسًا من جهاز التحميل، و جهاز التثبيت، ووحدة القياس ووحدة المعايرة.

- يتم نقل الدوران المطبق من خلال دولاب التوازن مع ترس نسبة التخفيض المقدار الذي يساوي 62، يتم قياس سرعة الدوران عند المدخل والمخرج من الترس واستخدامها لتقييم زاوية الالتواء بدقة.
- يتم قياس الدوران بواسطة قضيب الالتواء الذي يحتوي على مقاييس إجهاد مرتبة بشكل مناسب لتقليل الأخطاء.
- يتم استخدام جهاز يتكون من ذراع رافعة وأثقال موازنة لمعايرة شريط الالتواء.
- يتم تثبيت العينة بين جهاز التحميل ووحدة القياس عن طريق مقبسين ذو سطح مستوي.



الشكل. III.8: آلة الالتواء.

### III.7.2. معدات أخرى

بالإضافة إلى المعدات المذكورة أعلاه، قمنا أيضًا باستخدام:

- القدم القنوية (pied à coulisse) لقياس قطر عينة الاختبار.
- استخدمنا كاميرا رقمية لالتقاط الصور من النتائج و المعدات المختلفة المستخدمة.

### III.3. بروتوكول الاختبار

#### III.3.1. معايير قبول الاختبارات

تعتبر المعالجة و التحضير صحيحًا إذا تم تحقيق الشروط التالية:

- الحصول على منحنيات إجهاد القص كدالة للتشوه الزاوي.
- الحصول على تطور حالة البنية المجهرية كدالة للتشوه الزاوي.

### III.3.2. اختبارات الالتواء Essais de torsion

اخترنا استخدام العينات التي تمت معالجتها بشكل جيد. تم تشغيل هذه العينات لإعطاء أبعاد محددة لعينات الاختبار. تم تنفيذ هذه الاختبارات عند درجة حرارة الغرفة في (الشكل. III.9).

- تم إجراء 3 اختبارات للالتواء حتى الكسر أو التمزق (الشكل. III.9).
- 3 اختبارات للالتواء في 3/1 من نقطة الكسر أو التمزق.
- 3 اختبارات للالتواء في 3/2 من نقطة الكسر أو التمزق.



الشكل. III.9: عينة عند الكسر.

### III.3.3. المعالجة الحرارية

تلعب المعالجة الحرارية للمواد دورًا مهمًا في مجال تريبولوجيا (Tribologie) حيث تهدف إلى تعديل خصائص معينة للمادة، بشكل عام تتمثل المعالجة الحرارية في إجراء تحويلات هيكلية للمعدن، وذلك عن طريق تعريضه لدورات من التدفئة والتبريد بدرجات حرارة محددة مسبقًا. وتهدف المعالجة الحرارية إلى تحسين الخصائص الميكانيكية للمادة مثل الصلابة والليونة والقوة والمرونة.

عادةً ما تتضمن عملية المعالجة الحرارية استخدام جو محكم الضغط لضبط درجة حرارة القطعة، ويتم ذلك إما لمنع الأكسدة أو لإجراء معالجة سطحية. بالإضافة إلى ذلك، قد تحتوي المادة على بلورات من أنواع مختلفة.

عندما يتم تسخين المادة، تتحرك ذرات البلورة حول مواقعها وتبتعد عن بعضها البعض، مما يؤدي إلى تمدد المادة. هذا الأمر له عدة تأثيرات، فمع زيادة المسافة بين الذرات، يمكن استيعاب المزيد من الذرات في محلول

الإدراج ويمكن أن تكون الذرات أكبر حجمًا. وبالتالي، يمكن أن يؤدي هذا إلى تفتت الرواسب وتحويلها إلى محلول صلب. وعند تحريض الذرات، تصبح متحركة وقابلة للانتشار في البلورة، ويشار إلى هذه الظاهرة بالانتشار.

في بعض الحالات، يمكن إعادة تنظيم ذرات البلورة في مرحلة أخرى من علم البلورات، ويشار إلى هذه العملية بالتأصل. وتلعب جميع هذه الآليات دورًا أساسيًا في عملية المعالجة الحرارية. بالنسبة للمواد القابلة للتشكيل مثل المواد المطيلة (ductile)، فإن تشوه المادة بشكل بلاستيكي يتسبب في عيوب في ترتيب ذرات البلورة وبالتالي تصلب المادة. وعند تسخين المعدن بشكل معتدل، فإنه يُعطى الذرات القدرة على التحرك وإعادة تنظيمها وإزالة العيوب التنظيمية، وهذه العملية تسمى التلدين.

بالنسبة للسبائك مثل سبائك الألومنيوم، تحتوي بعضها على رواسب من عناصر السبائك مثل  $Al_2Cu$  في سبائك الألومنيوم والنحاس المغنيسيوم والسيليكون. وتسمى هذه الظاهرة التصلب الهيكلي (durcissement structural).

### III.4.3. الدراسة المعدنية (Structure métallographique)

يتم القيام بعملية التلميع الميكانيكي في خطوتين رئيسيتين تحت الشروط المعدنية القياسية. الخطوة الأولى تشمل تلميع السطح على ورق الرمل الدوار (SiC)، حيث يتم تقليل القوى الكاشطة واستخدام الماء في هذه العملية. أما الخطوة الثانية، فتشمل إكمال عملية التلميع عن طريق وضع العينة على حصائر اللباد الدوّارة التي تحتوي على معاجين الماس ذات حجم جسيمات صغير (حتى  $0.1 \mu m$ ).

قبل القيام بعملية التلميع، يتم أيضًا تنظيف العينات وإزالة الشحوم وجلود الطبقة السطحية.

يعتبر التنظيف جزءًا مهمًا جدًا في معالجة السطح للمواد المعدنية للأسباب التالية:

- 1- جميع عمليات الحماية أو التجميل للأسطح المعدنية يجب أن تتضمن تنظيفًا شاملاً.
- 2- التنظيف لا يقتصر فقط على إزالة الدهون والزيوت والأوساخ العضوية، بل يشمل أيضًا إزالة طبقات الأكسيد والطلاءات الأخرى على السطح كالصدأ والقشور والترسبات الأخرى.

3- إنه أيضًا يقوم بإزالة بقايا عمليات الطحن والطلاء ومنتجات التلميع والجسيمات المعدنية والرمال وما إلى ذلك.

تمت الدراسة التعدينية من خلال أربع خطوات مهمة:

الخطوة الأولى: تم قطع العينات المشوهة إلى نصفين وفقًا للمحور الطبيعي للعينات.

الخطوة الثانية: تم تلميع أقسام عينات الاختبار المشوهة على ثلاث مراحل و هي 600، 1200، 2400 (الشكل.10.III). النتيجة كانت أسطح مصقولة جيدًا.



الشكل.10.III: الأسطح المصقولة.

الخطوة الثالثة: تم استخدام تركيب كيميائي خاص لتسليط الضوء على حبيبات سبائك الألومنيوم المستخدمة في الدراسة.

تم استخدام محلول كيلر مكون من 0.5 ml من حمض الهيدروفلوريك (HF) و 1.5 ml من حمض الهيدروكلوريك (HCl) و 2.5ml من حمض النترريك (HNO<sub>3</sub>) و 95 ml من الماء (H<sub>2</sub>O).

تم ذلك للحصول على تباين واضح بين الحبيبات المختلفة.

تم إجراء هذا الاختبار على أربع عينات خضعت لتشوهات بنسب مختلفة اثناء الالتواء:

✓ تشوه العينة بنسبة 0% من الكسر

✓ تشوه العينة بنسبة 33% من الكسر

✓ تشوه العينة بنسبة 66% من الكسر

✓ تشوه العينة بنسبة 100% من الكسر

الخطوة الرابعة: تم إجراء تحليل مجهري لقطع الاختبار. تم التقاط صور مجهرية للعينات المشوهة من جوانب مختلفة لرؤية الدراسة التعدينية بوضوح. (الشكل.11.111).



الشكل.11.111: التقاط الصور المجهرية.

### III.5.3. تحديد معاملات التصلب (écrouissage) ومعامل المقاومة (résistance)

من خلال استخدام مشغل اللوغاريتم الطبيعي على كلا الجانبين من المعادلة:

$$\sigma = K(\epsilon_p)^n \quad (1.111)$$

التي تصف قانون التصلب لهولومون (Hollomon)، يمكننا تحديد معامل التصلب (n) ومعامل المقاومة (K). بناءً على ذلك، يصبح لدينا المعادلة التالية:

$$\ln(\sigma) = \ln(K(\epsilon_p)^n) \quad (2.111)$$

و بالتالي:

$$Ln \sigma = Ln (K) + nLn.(\epsilon_p) \quad (3.III)$$

#### 4.III. الخاتمة

في هذا الفصل قدمنا معدات العمل المستخدمة في التجارب (آلات التشغيل و الإختبار ومعدات أخرى، عينات الاختبار، لقم القطع، حامل الأدوات، المجهر و الفرن الكهربائي). تطرقنا إلى التركيب الكيميائي والتسميات والخصائص الهندسية لعينة الإختبار بالإضافة للخصائص الميكانيكية والفيزيائية لهذه الأخيرة، وأيضاً تطرقنا لكيفية إجراء التجارب عن طريق الدراسة التعدينية.

## الفصل IV

### نتائج الاختبارات

## 1.IV. مقدمة

تم تطوير اختبار الإلتواء في الأصل لتحليل سلوك المعادن تحت قوى القص والتشوه العالي، مع التركيز على منع ظاهرة عدم الاستقرار (الإنقباض).

يُفرض في هذا الاختبار تشوه عينة أسطوانية من خلال دوران إحدى نهاياتها. سنقوم بإجراء إختبارات الإلتواء لعينات سبائك الألمنيوم المدنة حتى كسرها،  $3/1$  و  $3/2$  من الكسر، لتقييم الخصائص الميكانيكية للمادة مثل: معامل يونغ، معامل القص، معامل التصلب ومعامل المقاومة في المجال البلاستيكي، لتحديد الخصائص السطحية لعيناتنا، سنقوم بإجراء الدراسة التعدينية.

## 2.IV. إختبارات الإلتواء

قبل الشروع في أي تحليل ميكانيكي للإختبار، يجب وضع عدد من الافتراضات. على وجه الخصوص، يُفترض أن المواد متجانسة ومتباينة الخواص، وأنها تتبع قانون التصلب. هذا يعني أنه يجب المحافظة على التماثل الأسطواني للعينة خلال التشوه. كما يُفترض أن العينة بأكملها مُدنة بشكل متجانس، وأن التشوه موحد على طول العينة دون وجود أية منطقة للتدفق. علاوةً على ذلك، من المفترض أن تظل المقاطع العرضية للعينة مستقيمة وتُدور في حركة جسم صلب بسرعة ثابتة (ω).

## 1.2.IV. سجلات الإختبار

## 1. إختبار الكسر

الجدول IV. 1: إختبار الكسر.

زاوية الدخول، دوران عجلة اليد (Tr)	زاوية الالتواء للعيونة (بالدرجات)	وحدة زاوية الالتواء (rd/mm)	$\epsilon_{Hencky}$	عزم دوران الالتواء (N.M)	إجهاد القص (Mpa)	$\sigma_{equ VM}$ (Mpa)
0	0	0	0	0	0	0
0,25	1,45	0,00034	0,00051	0,3	7,07	12,25
0,5	2,9	0,00067	0,00100	1,24	29,24	50,65
0,75	4,35	0,00101	0,00151	2,225	52,46	90,86
1	5,8	0,00135	0,00202	3,275	77,22	133,75
1,5	8,71	0,00203	0,00304	4,35	102,57	177,66
2	11,61	0,00270	0,00404	4,8	113,18	196,03
2,5	14,52	0,00338	0,00506	5,1	120,25	208,28
3	17,42	0,00405	0,00606	5,275	124,38	215,43
4	23,23	0,00540	0,00807	5,6	132,04	228,7
5	29,03	0,00675	0,01008	5,925	139,71	241,98
6	34,83	0,00810	0,01208	6,275	147,96	256,27
7	40,64	0,00945	0,01420	6,6	155,62	269,54
10	58,06	0,01350	0,02005	7,28	171,66	297,32
15	87,09	0,02026	0,02994	8,3	195,71	338,98
20	116,13	0,02701	0,03971	9,1	214,57	371,65
30	174,19	0,04052	0,05900	10,225	241,1	417,6
45	261,3	0,06078	0,08725	11,225	264,68	458,44
60	348,39	0,08104	0,11472	11,85	279,42	483,97
90	522	0,12142	0,16732	12,4	292,38	506,42
120	696,77	0,16207	0,21761	12,9	304,17	526,84
145	841,94	0,189035	0,24963	12,95	305,35	528,88

## 2. إختبارات التمزق 3/1

الجدول 2.IV: الإختبار الأول عند التمزق 3/1.

وحدة زاوية الالتواء (rd/mm)	$\epsilon_{Hencky}$	عزم دوران الالتواء (N.M)	إجهاد القص (Mpa)	$\sigma_{equ VM}$ (Mpa)
0	0	0	0	0
0,00034	0,00051	0,25	5,89	10,19
0,00067	0,00100	0,975	22,99	39,77
0,00101	0,00115	1,95	45,98	79,55
0,00135	0,00202	2,775	65,43	113,19
0,00203	0,00304	3,925	92,55	160,11
0,00270	0,00404	4,325	101,98	176,43
0,00338	0,00506	4,6	108,46	187,64
0,00405	0,00606	4,775	112,59	194,78
0,00540	0,00807	5,1	120,25	208,03
0,00675	0,01008	5,4	127,33	220,28
0,00810	0,01208	5,675	133,81	231,49
0,00945	0,01420	5,975	140,89	243,74
0,01350	0,02005	6,625	156,21	270,24
0,02026	0,02994	7,6	179,20	310,01
0,02701	0,03971	8,35	196,89	340,62
0,04052	0,05900	9,4	221,65	383,45
0,05193	0,07501	10,075	237,56	410,98
0,06753	0,09649	10,6	249,94	432,4

الجدول 3.IV:الاختبار الثاني عند التمزق 3/1.

وحدة زاوية الالتواء (rd/mm)	$\epsilon_{Hencky}$	عزم دوران الالتواء (N.M)	إجهاد القص (Mpa)	$\sigma_{equ VM}$ (Mpa)
0	0	0	0	0
0,00034	0,00051	0,25	5,89	10,19
0,00067	0,00100	0,975	22,99	39,77
0,00101	0,00115	1,95	45,98	79,55
0,00135	0,00202	2,775	65,43	113,19
0,00204	0,00306	3,925	92,55	160,11
0,00269	0,00403	4,325	101,98	176,43
0,00338	0,00506	4,6	108,46	187,64
0,00405	0,00606	4,775	112,59	194,78
0,0054	0,00807	5,1	120,25	208,03
0,00676	0,01009	5,4	127,33	220,28
0,0081	0,01208	5,675	133,81	231,49
0,00945	0,01420	5,975	140,89	243,74
0,0135	0,02005	6,625	156,21	270,24
0,02026	0,02994	7,6	179,20	310,01
0,02702	0,03973	8,35	196,89	340,62
0,04052	0,05900	9,4	221,65	383,45
0,05194	0,07502	10,075	237,56	410,98
0,06753	0,09649	10,6	249,94	432,4

الجدول 4.IV:الاختبار الثالث عند التمزق 3/1.

وحدة زاوية الالتواء (rd/mm)	$\epsilon_{Hencky}$	عزم دوران الالتواء (N.M)	إجهاد القص (Mpa)	$\sigma_{equ VM}$ (Mpa)
0	0	0	0	0
0,00034	0,00051	0,25	5,89	10,19
0,00067	0,00100	0,975	22,99	39,77
0,00102	0,00153	1,95	45,98	79,55
0,00135	0,00202	2,775	65,43	113,19
0,00203	0,00304	3,925	92,55	160,11
0,0027	0,00404	4,325	101,98	176,43
0,00338	0,00506	4,6	108,46	187,64
0,00406	0,00607	4,775	112,59	194,78
0,0054	0,00807	5,1	120,25	208,03
0,00674	0,01006	5,4	127,33	220,28
0,00809	0,01206	5,675	133,81	231,49
0,00945	0,01420	5,975	140,89	243,74
0,0135	0,02005	6,625	156,21	270,24
0,02026	0,02994	7,6	179,20	310,01
0,02701	0,03971	8,35	196,89	340,62
0,04053	0,05902	9,4	221,65	383,45
0,05193	0,07501	10,075	237,56	410,98
0,06754	0,09650	10,6	249,94	432,4

## 3. إختبارات التمزق 3/2

الجدول 5.IV: الإختبار الأول عند التمزق 3/2.

وحدة زاوية الالتواء (rd/mm)	$\epsilon_{Hencky}$	عزم دوران الالتواء (N.M)	إجهاد القص (Mpa)	$\sigma_{equ VM}$ (Mpa)
0	0	0	0	0
0,00034	0,00051	0,275	6,48	11,21
0,00067	0,00100	0,65	15,33	26,52
0,00101	0,00115	1,025	24,17	41,81
0,00135	0,00202	2,1	49,52	85,67
0,00203	0,00304	3,575	84,3	145,84
0,00270	0,00404	4,05	95,5	165,22
0,00338	0,00506	4,4	103,75	179,49
0,00405	0,00606	4,7	110,82	191,72
0,00540	0,00807	5,075	119,67	207,02
0,00675	0,01008	5,5	129,69	224,36
0,00810	0,01208	5,775	136,17	235,57
0,00945	0,01420	6,025	142,07	245,78
0,01350	0,02005	6,775	159,75	276,37
0,02026	0,02994	7,775	183,33	317,16
0,02701	0,03971	8,55	201,60	348,77
0,04052	0,05900	9,625	226,95	392,62
0,06078	0,08725	10,6	249,94	432,4
0,08103	0,11471	11,15	262,20	453,61
0,10804	0,15019	11,525	271,75	470,13
0,13505	0,18447	12	282,95	489,50

الجدول 6.IV: الإختبار الثاني عند التمزق 3/2.

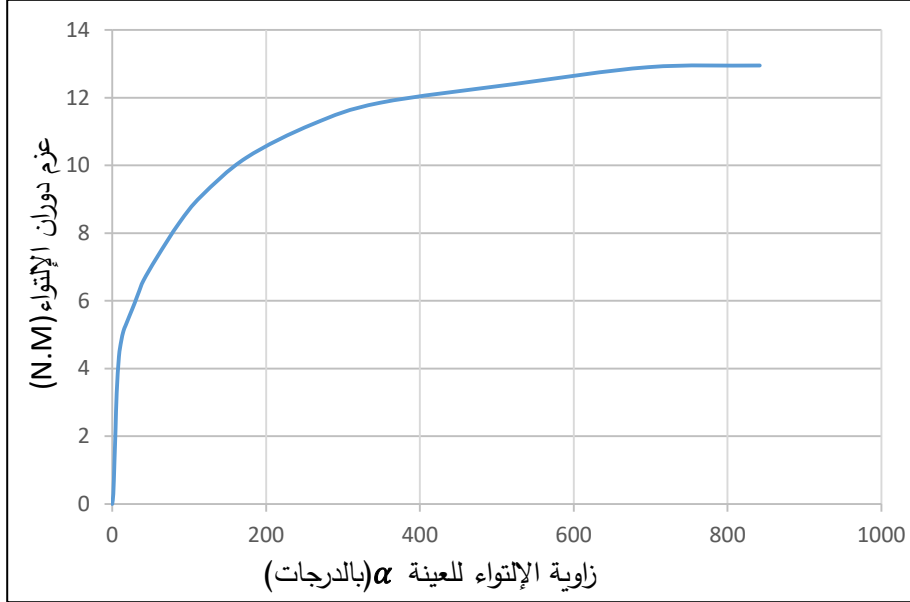
وحدة زاوية الالتواء (rd/mm)	$\epsilon_{Hencky}$	عزم دوران الالتواء (N.M)	إجهاد القص (Mpa)	$\sigma_{equ VM}$ (Mpa)
0	0	0	0	0
0,00034	0,00051	0,275	6,48	11,21
0,00066	0,00099	0,65	15,33	26,52
0,00101	0,00115	1,025	24,17	41,81
0,00135	0,00202	2,1	49,52	85,67
0,00203	0,00304	3,575	84,3	145,84
0,00271	0,00406	4,05	95,5	165,22
0,00338	0,00506	4,4	103,75	179,49
0,00405	0,00606	4,7	110,82	191,72
0,00540	0,00807	5,075	119,67	207,02
0,00676	0,01009	5,5	129,69	224,36
0,00810	0,01208	5,775	136,17	235,57
0,00945	0,01420	6,025	142,07	245,78
0,01350	0,02005	6,775	159,75	276,37
0,02025	0,02992	7,775	183,33	317,16
0,02701	0,03971	8,55	201,60	348,77
0,04052	0,05900	9,625	226,95	392,62
0,06078	0,08725	10,6	249,94	432,4
0,08104	0,11472	11,15	262,20	453,61
0,10804	0,15019	11,525	271,75	470,13
0,13505	0,18447	12	282,95	489,50

الجدول 7.IV: الإختبار الثالث عند التمزق 3/2.

وحدة زاوية الالتواء (rd/mm)	$\epsilon_{Hencky}$	عزم دوران الالتواء (N.M)	إجهاد القص (Mpa)	$\sigma_{equ VM}$ (Mpa)
0	0	0	0	0
0,00034	0,00051	0,275	6,48	11,21
0,00067	0,00100	0,65	15,33	26,52
0,00100	0,0015	1,025	24,17	41,81
0,00135	0,00202	2,1	49,52	85,67
0,00203	0,00304	3,575	84,3	145,84
0,00270	0,00404	4,05	95,5	165,22
0,00339	0,00507	4,4	103,75	179,49
0,00405	0,00606	4,7	110,82	191,72
0,00540	0,00807	5,075	119,67	207,02
0,00675	0,01008	5,5	129,69	224,36
0,00810	0,01208	5,775	136,17	235,57
0,00944	0,01406	6,025	142,07	245,78
0,01350	0,02005	6,775	159,75	276,37
0,02025	0,02992	7,775	183,33	317,16
0,02701	0,03971	8,55	201,60	348,77
0,04052	0,05900	9,625	226,95	392,62
0,06078	0,08725	10,6	249,94	432,4
0,08103	0,11471	11,15	262,20	453,61
0,10805	0,15021	11,525	271,75	470,13
0,13505	0,18447	12	282,95	489,50

### IV. 2.2. تطور عزم الدوران كدالة لزاوية الالتواء

من خلال تحليل الرسم البياني (الشكل 1.IV)، يمكننا أن نرى أن فشل العينات يحدث بعد 145Tr من إرادة يد الماكينة، أي زاوية إلتواء العينات تساوي  $841.94^\circ$  درجة مع عزم دوران أقصى يبلغ 12.5 N.M.



الشكل 1.IV: منحنى عزم الدوران بدلالة زاوية الإلتواء للعيينة عند اختبار الكسر.

### IV. 3.2. تطور إجهاد القص كدالة لزاوية وحدة الالتواء

حساب إجهاد القص:

$$\tau_{max} = \frac{Mt}{I_0} r \quad (1.IV)$$

مع:

$$I_0 = \frac{\pi d^4}{32} \quad (2.IV)$$

حساب وحدة زاوية الالتواء:

$$\theta = \frac{\alpha}{L} \quad (3.IV)$$

أين:

**d:** قطر العينة

**Mt:** عزم الدوران الذي تلتقطه الآلة

**$\alpha$ :** الزاوية المقاسة بواسطة الآلة

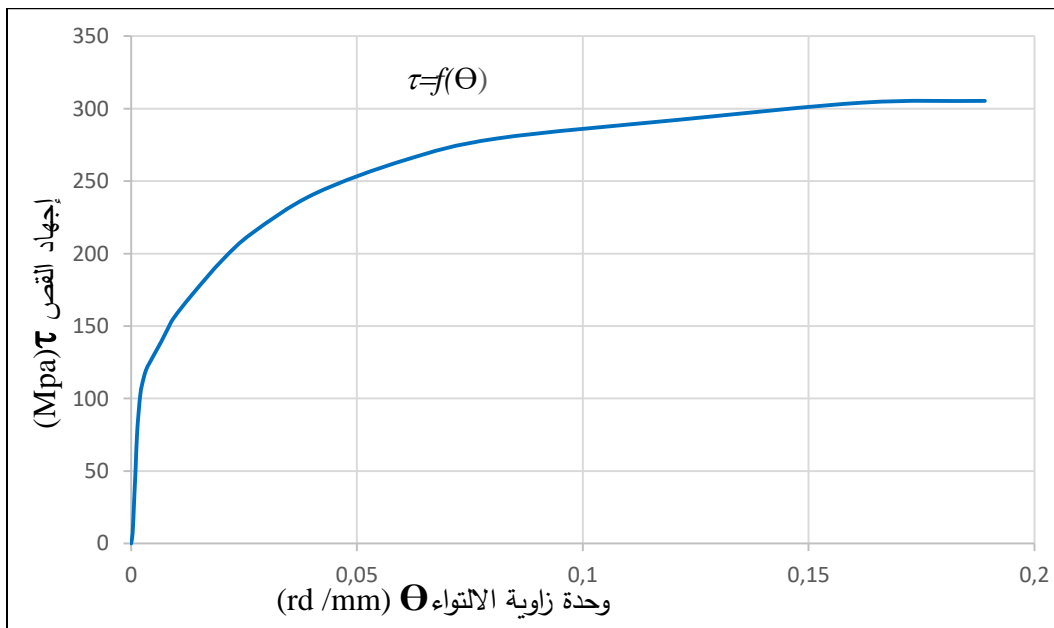
**L:** المسافة بين الفكين

من خلال (الشكل.2.1V) لإختبار الكسر يمكن ملاحظة القيم التالية:

$$\tau_{Max}=305,35 \text{ Mpa}$$

$$\theta=0.189035 \text{ rd/mm}$$

يتم حساب جميع القيم  $\theta$  و  $\tau_{Max}$  وتظهر في الجداول السبعة السابقة.



الشكل.2.1V: منحنى وحدة زاوية الالتواء بدلالة إجهاد القص.

### ✓ تحديد معامل القص

توضح تحليل القراءات أن المنطقة المرنة الموضحة في الرسم البياني (الشكل.2.1V) تتكون من نقطتين فقط. وبالتالي، لا يمكن ضمان موثوقية قياسات معامل القص ومعامل المرونة.

بالإعتماد على الأشكال التالية:

(الشكل.3.IV)، (الشكل.4.IV)، (الشكل.5.IV)، (الشكل.6.IV)، (الشكل.7.IV) لمعادلات الخط

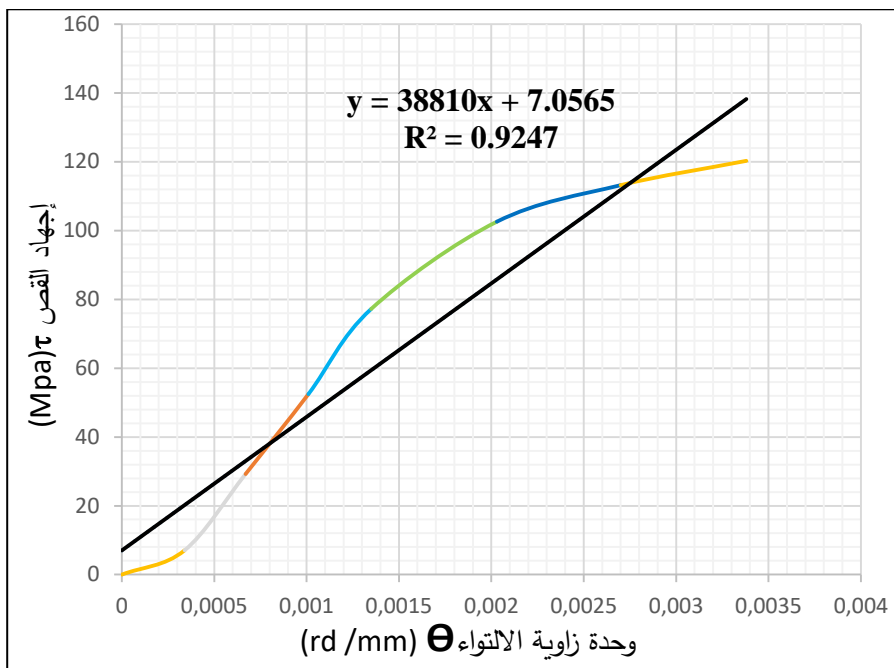
المستقيم للمنحنيات والتي تتوافق مع:

$$\tau = \theta G \quad (4.IV)$$

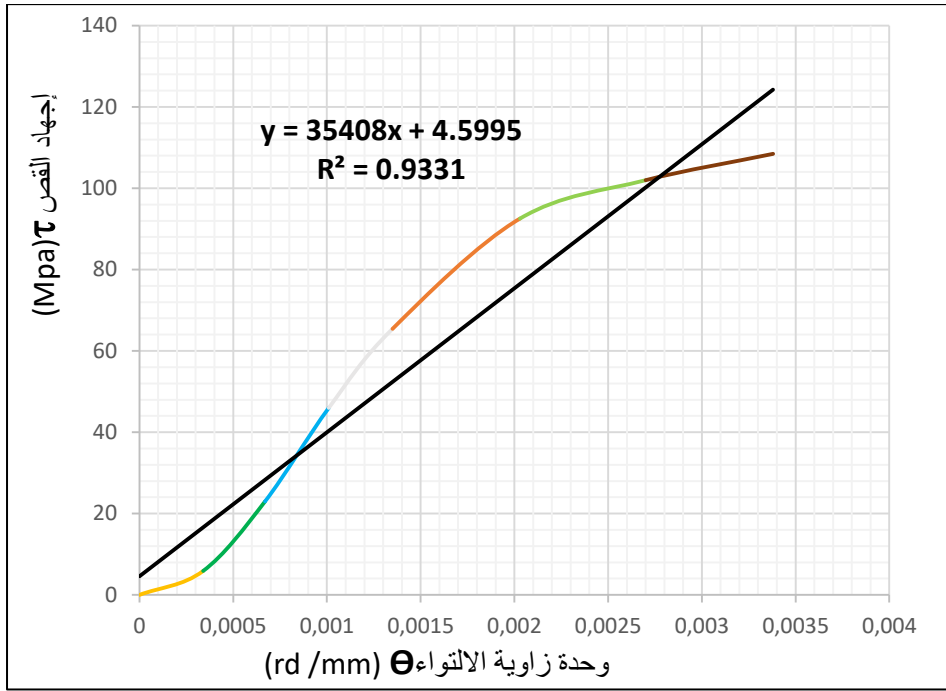
بالتطابق نجد قيم معامل القص G تتراوح: من 30000 Mpa إلى 39000 Mpa

بسبب التداخل القوي جدًا في المنحنيات، تكون القيم المحسوبة لـ G هي نفسها بالنسبة للاختبارات

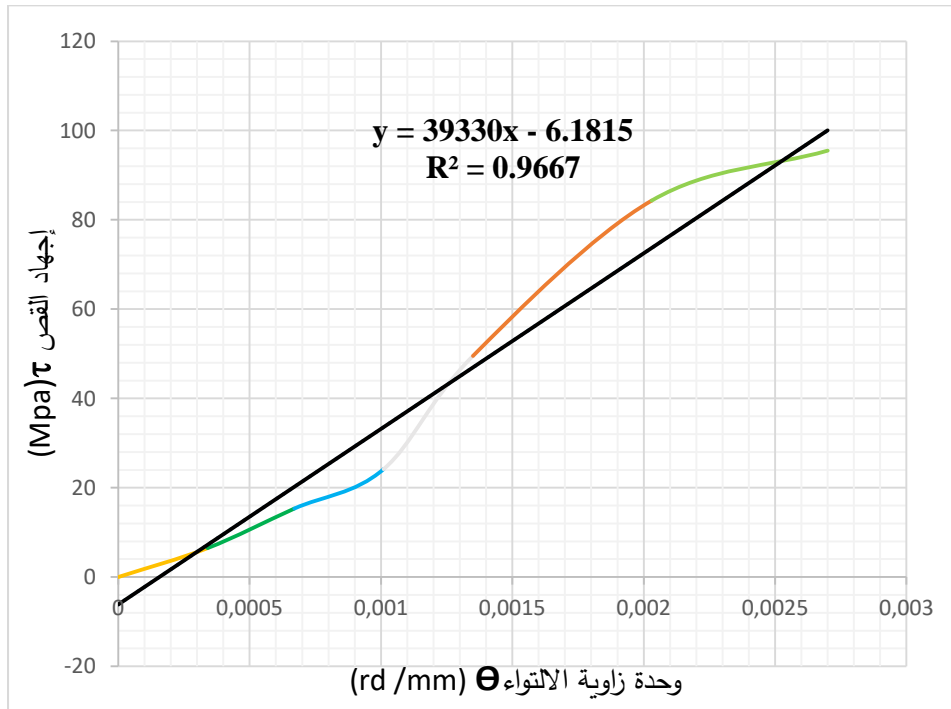
الأخرى.



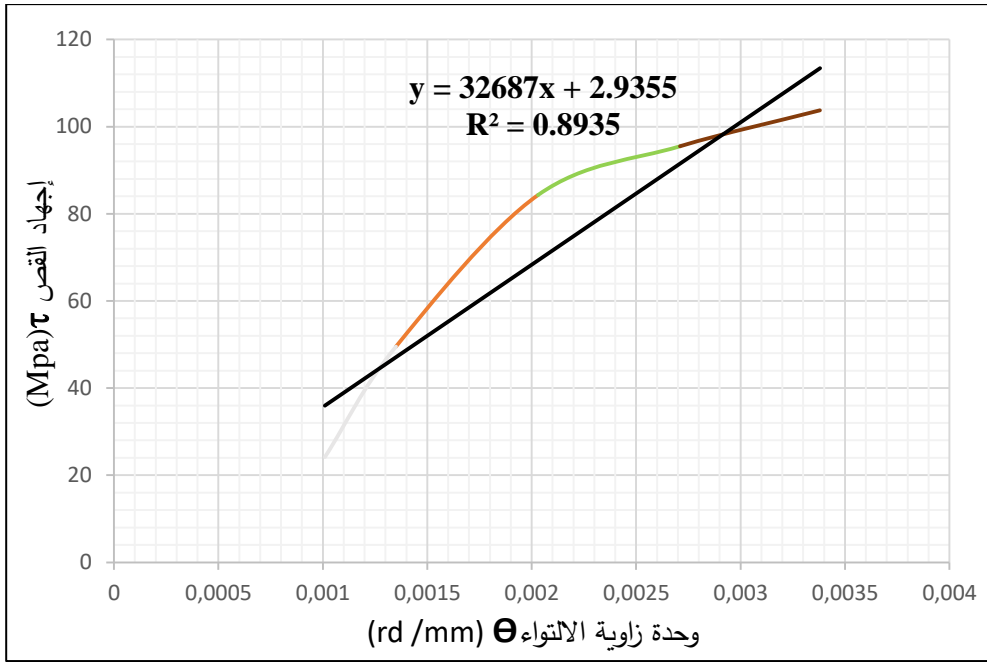
الشكل.3.IV: تكبير التشوهات الصغيرة لاختبار الكسر.



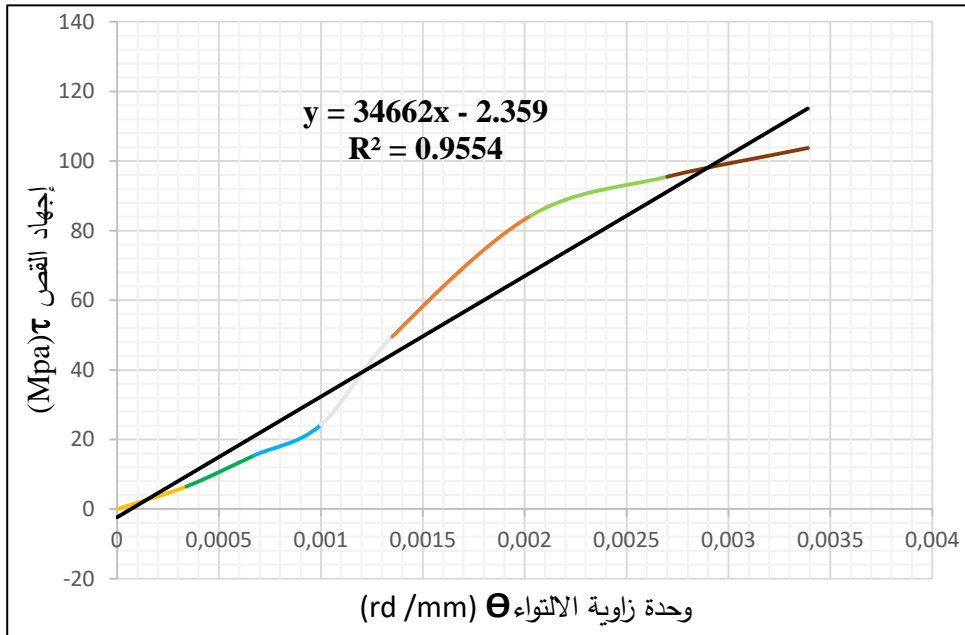
الشكل.4.IV: تكبير التشوهات الصغيرة لاختبار التمزق الأول عند 3/1.



الشكل.5.IV: تكبير التشوهات الصغيرة لاختبار التمزق الأول عند 3/2.



الشكل.6.IV: تكبير التشوهات الصغيرة لاختبار التمزق الثاني عند 3/2.



الشكل.7.IV: تكبير التشوهات الصغيرة لاختبار التمزق الثالث عند 3/2.

#### IV. 4.2. تطور الإجهاد $\sigma$ المكافئ لـ Von Mises كدالة تشوه Hencky $\epsilon$

من أجل ترجمة هذا الإجهاد إلى إجهاد شد مكافئ، سنقوم بقطر مصفوفة الإجهاد المطبقة على العينة.

$$[M] - \lambda I = 0 \quad (5.IV)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{\gamma}{2} & 0 \\ \frac{\gamma}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (6.IV)$$

فلتكن المصفوفة المائلة:

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \frac{\gamma}{2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\gamma}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.IV)$$

كونها في حالة إجهاد عالية، لا يمكن تطبيق إجهاد المهندس، وهناك حاجة إلى تعريفات أخرى أكثر تعقيدا للتشوه مثل الإجهاد اللوغاريتمي.

لذلك سيتم استخدام  $\varepsilon$  اللوغاريتمي للتشوه، المعروف أيضا باسم تشوه Hencky :

$$\varepsilon_{HENCKY} = \ln\left(1 + \frac{\gamma}{2}\right) \quad (8.IV)$$

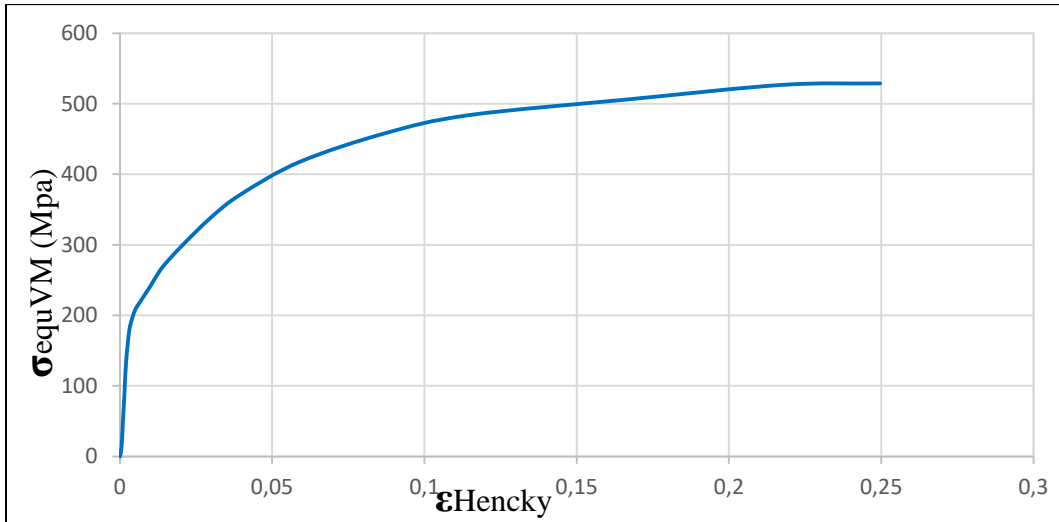
مع:

$$\gamma = \theta r \quad (9.IV)$$

من أجل المواد المطييلة:

$$\sigma_{\acute{e}qui VM} = \tau\sqrt{3} \quad (10.IV)$$

الشيء نفسه ينطبق على القيم  $\varepsilon_{HENCKY}$  و  $\sigma_{\acute{e}qui VM}$  ويتم حسابها وعرضها في الجداول السبعة أعلاه.



الشكل 8.IV: منحنى الإجهاد  $\sigma$  المكافئ لـ Von Mises كدالة تشوه  $\epsilon$  Hencky عند الكسر.

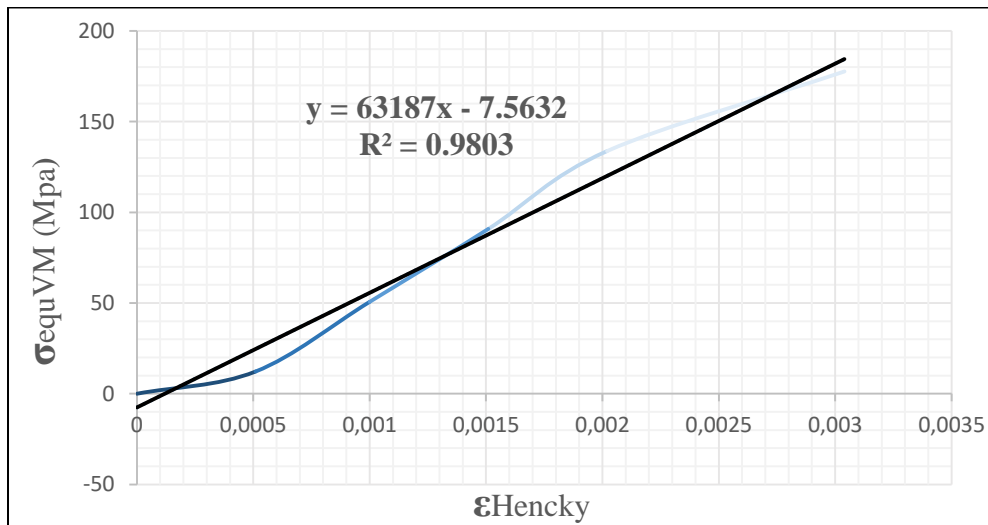
✓ تحديد معامل المرونة (Young)

في مجال التشوهات الصغيرة (الشكل IV.8): ووفقا لمعادلات المنحنيات في الشكلين (الشكل 9.IV)، (الشكل 10.IV)، والتي تتوافق مع:

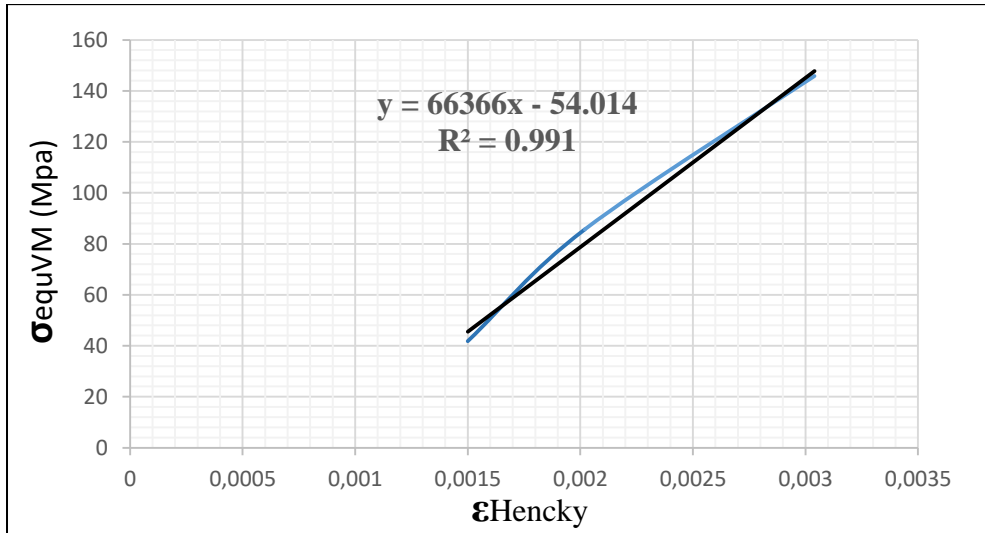
$$\sigma = E \cdot \epsilon \tag{11.IV}$$

بالتطابق، يمكن ملاحظة أن قيم معامل يونغ  $E$  تتراوح بين: 60000 Mpa و 66000 Mpa

بالنسبة للاختبارات المختلفة، تكون المنحنيات متشابهة جدا، وقيم  $E$  متطابقة لهذه الاختبارات المختلفة.



الشكل 9.IV: تكبير التشوهات الصغيرة اختبار الكسر الأول.



الشكل 10.1V: تكبير التشوهات الصغيرة اختبار التمزق الثالث عند 3/2.

تظهر مقارنة قيم الخصائص الميكانيكية المحددة تجريبيا مع القيم المشار إليها في (الجدول 10.1V) أن معامل المرونة والقص قريبة جدا. يتم تحديد هذه الخصائص عن طريق أخذ أي نقطتين من المنحنيات (9.1V) و (10.1V)، مما قد يؤدي إلى اختلافات كبيرة بين القيم. لهذا السبب، قمنا بتنعيم المنحنى التجريبي.

الجدول 8.1V: القيم النظرية المستخرجة من [www.matweb.com](http://www.matweb.com)

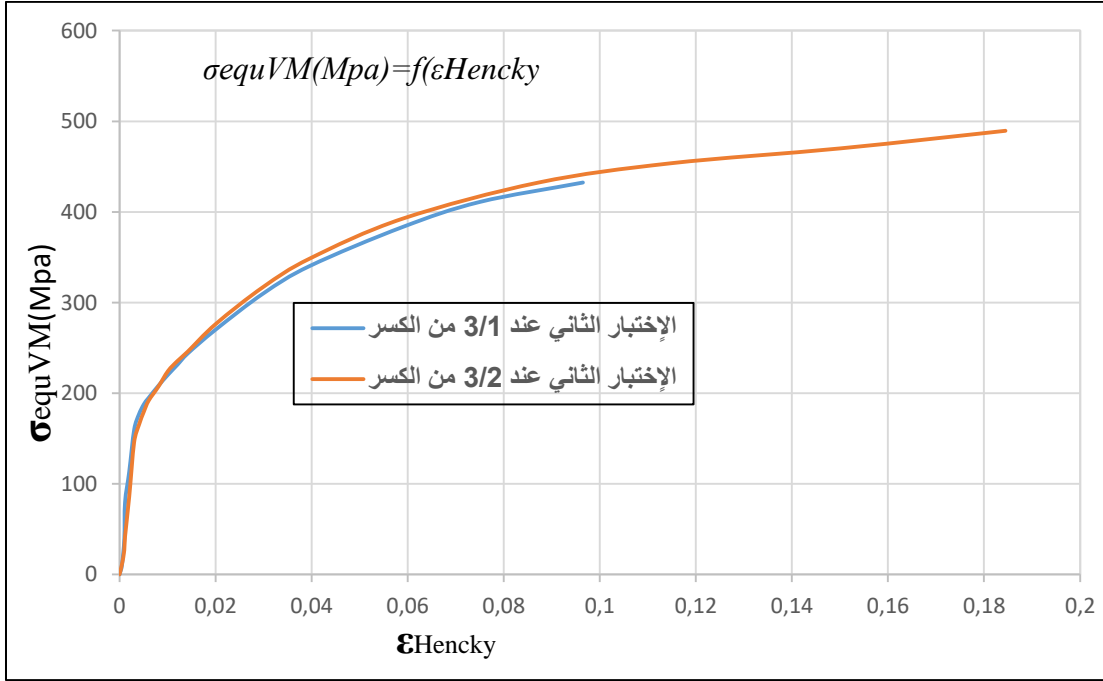
القيم	سبيكة ألومنيوم AISi12
80	صلابة برينل
$\geq 1.0 \%$	استطالة
70 Gpa	معامل المرونة (Module d'Young)
0.34	نسبة Poisson
32.0 Gpa	معامل القص

من المثير للاهتمام، بالنظر إلى المنحنيات أعلاه، أن نرى التكرار الجيد لاختبار الالتواء. بالإضافة إلى ذلك، جعل الاختبار الأول من الممكن إحضار العينة إلى نقطة الفشل وبالتالي تحديد عدد الدورات التي يتعين إجراؤها لإجراء الاختبارات عند الكسر، 3/1 و 3/2.

### IV. 5.2. إختبار 3/1 و 3/2 من الكسر

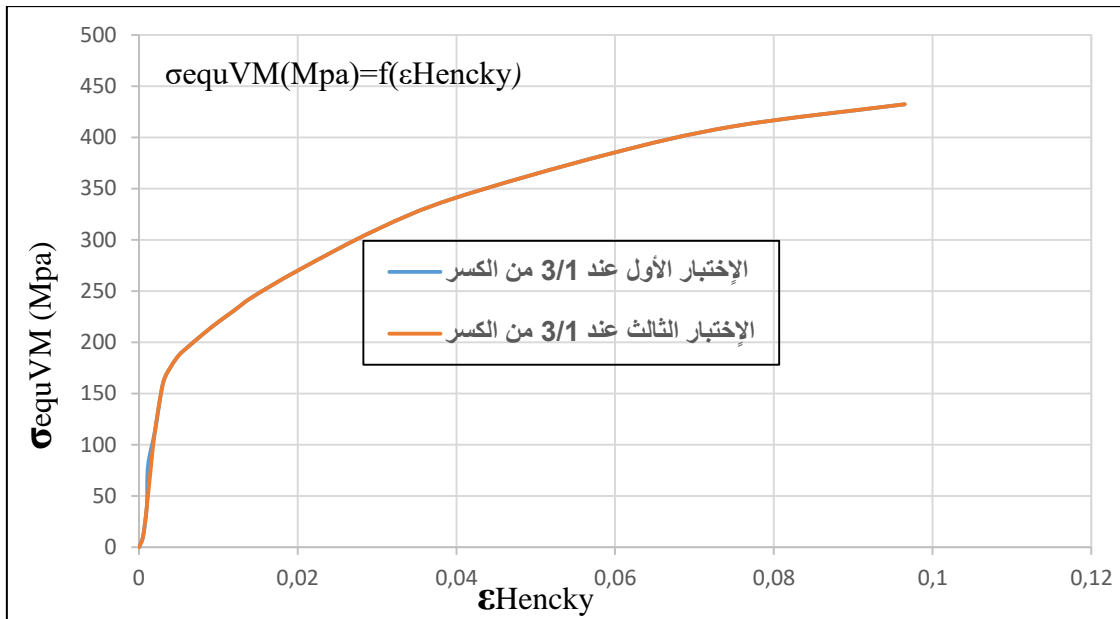
يتوافق الإختباران المعروضان أدناه (الشكل.11.IV) (الشكل.14.IV) مع 3/1 و 3/2 من نسبة العرض إلى الارتفاع عند الكسر، أي 45 Tr إلى 50 Tr و من 90 Tr إلى 100Tr بالترتيب في العجلة اليدوية.

كما في التجارب الأولى، هناك تكرار جيد.

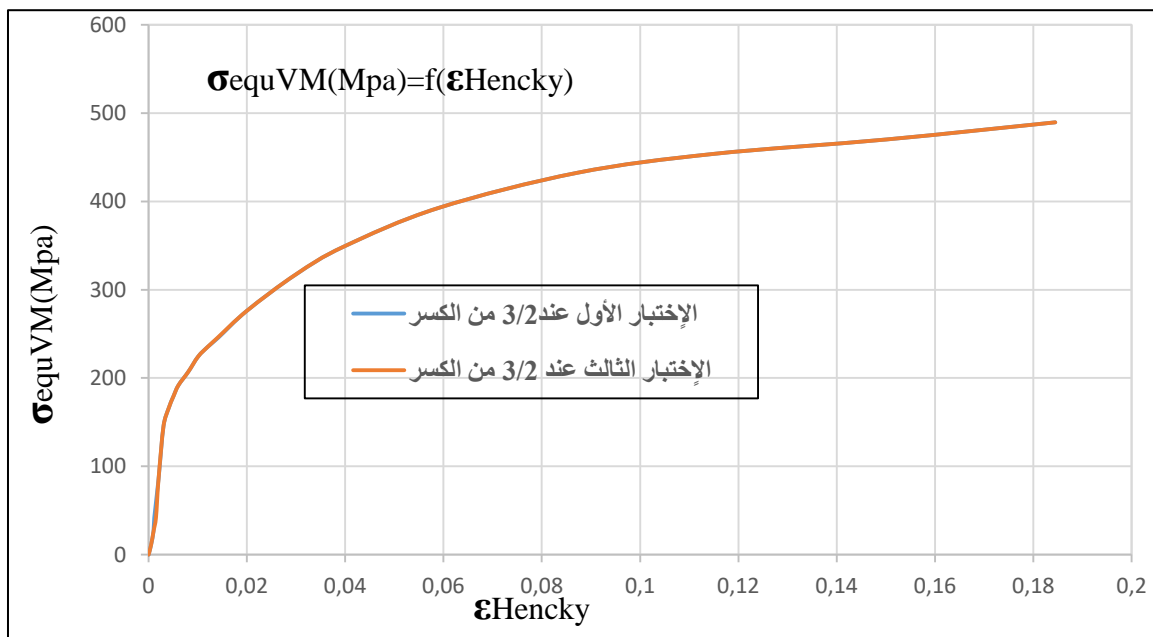


الشكل.11.IV: منحنى الإجهاد  $\sigma$  المكافئ لـ Von Mises كدالة تشوه  $\epsilon$  Hencky عند 3/1 و 3/2 من الكسر.

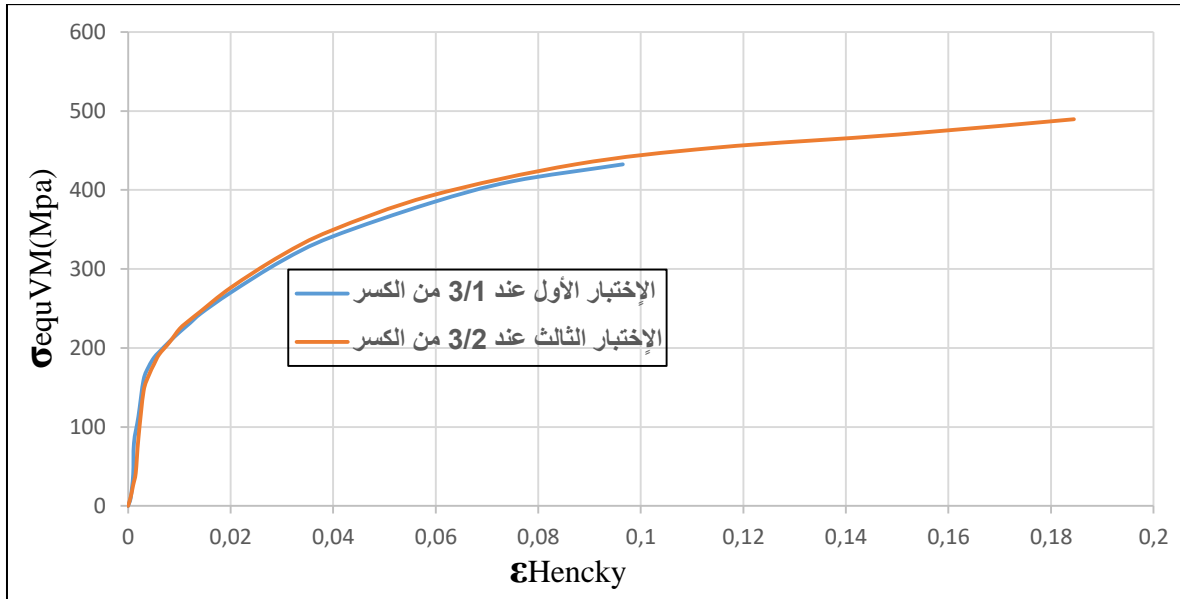
من خلال (الشكل.12.IV)، (الشكل.13.IV) يوجد تطابق مثالي لمنحنيات إختبار الالتواء.



الشكل.12.IV: منحنى الإجهاد  $\sigma$  المكافئ لـ Von Mises كدالة تشوه  $\epsilon$  Hencky عند 3/1 من الكسر.



الشكل.13.IV: منحنى الإجهاد  $\sigma$  المكافئ لـ Von Mises كدالة تشوه  $\epsilon$  Hencky عند 3/2 من الكسر.



الشكل 14.IV: منحنى الإجهاد  $\sigma$  المكافئ لـ Von Mises كدالة تشوه  $\epsilon$  Hencky عند 3/2 و 3/1 من الكسر.

عند دراسة شكل منحنى الإجهاد كدالة للتشوه، نلاحظ تباين الإجهاد حتى حدوث الكسر، مما يعني عدم قدرتنا على التنبؤ بشكل المنحنى للتشوهات الأكبر. للسعي نحو تشوهات أكبر، يتم تلميع عينات الالتواء لتقليل العيوب السطحية قدر الإمكان، حيث يمكن أن تؤدي إلى الفشل المبكر للعينة.

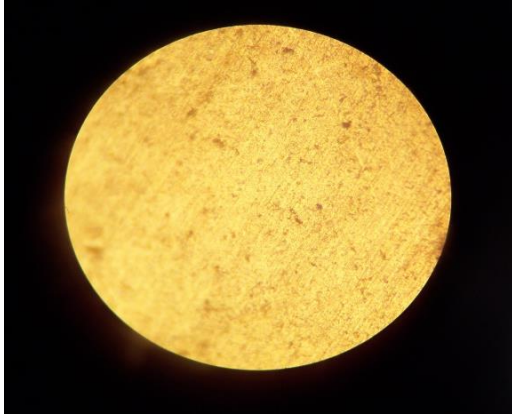
### 3.IV. الدراسة المعدنية (Etude métallographique)

سيتم إجراء الدراسات المعدنية (Etude métallographique) فقط على العينات اللدنة ذات استطالة

33% و 66% و 100% مقارنة بالاستطالة عند الكسر.

#### 3.IV.1. تشوه العينة المصلاة عند 33% مقارنة بالاستطالة عند الكسر

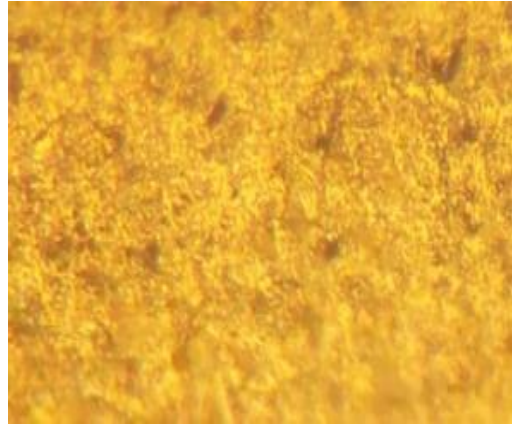
الشكلان (15.IV) و (16.IV)، يمثلان الحالة المعدنية (la métallographie) لعينة الالتواء اللدنة والمشوهة إلى 33% مقارنة بالاستطالة عند الكسر، يظهران عدم تجانس حجم النتوءات. إذا قمنا بتحليل الشكل (15.IV)، يمكننا بسهولة تخمين النتوءات بينما في الشكل (16.IV)، لا يمكن فصل أي نتوء.



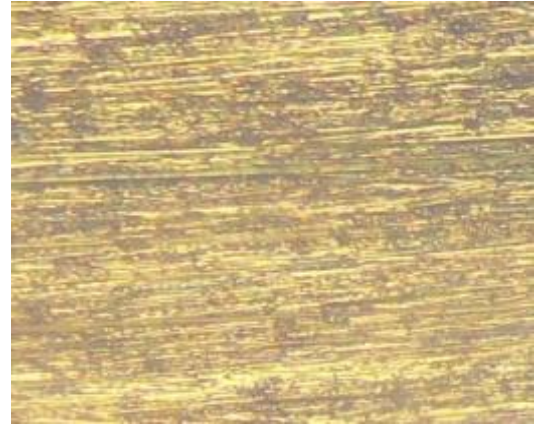
الشكل. 15a.IV: عينة صلبة مشوهة إلى 33%  
(centre zoom X40)



الشكل. 15b.IV: عينة صلبة مشوهة إلى 33%  
(centre zoom X40)



الشكل. 15c.IV: عينة صلبة مشوهة إلى 33%  
(centre zoom X100)



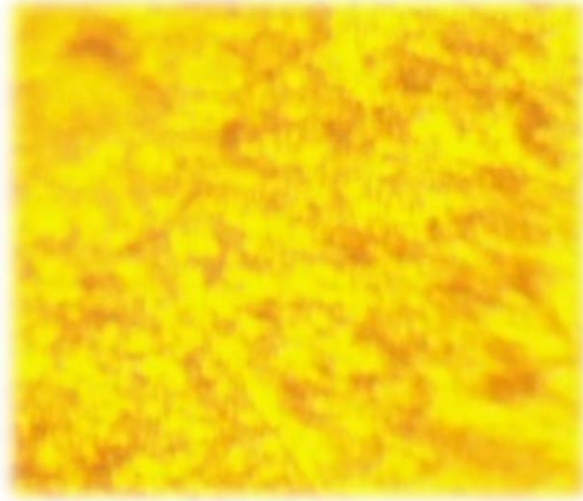
الشكل. 16.IV: عينة صلبة مشوهة إلى 33%  
(périphérie zoom X40)

### 2. 3.IV. عينة صلبة غير مشوهة

(الشكل. 17. IV) هو الحالة التعدينية (la métallographie) دون تشوه العينة. حجم النتوء أكبر بكثير.

إذا قمنا بتحليل (الشكل. 16. IV) بعناية أكبر، يمكننا أن نميز، في محيط العينة، تدفق المادة الناتج أثناء

إختبار الإلتواء.



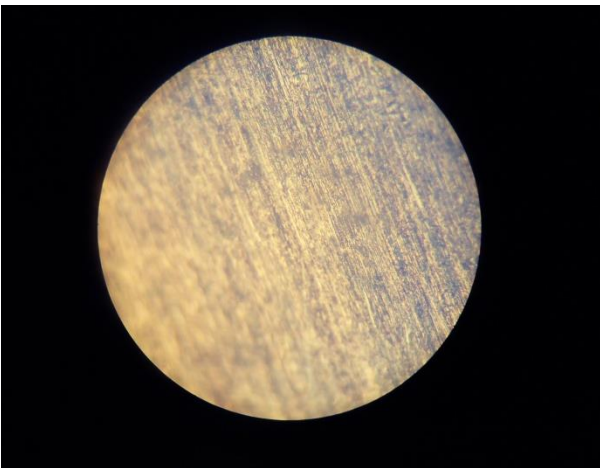
الشكل. 17.IV: عينة صلبة غير مشوهة (centre zoom X40)

### 3.IV. 3. تشوه العينة المصلدة إلى 66% مقارنة بالاستطالة

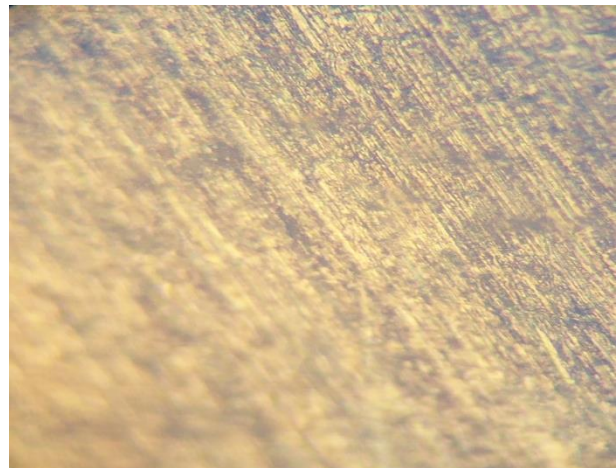
تؤدي الزيادة في التشوه في العينة إلى انخفاض حجم النتوءات.

ويمكن ملاحظة أن هذا التشوه قد أدى إلى انخفاض قيمة معامل يونغ، بسبب بدء اندماج التجايف.

(الشكلان 18.IV و 19.IV).



الشكل. IV. 18a: عينة صلبة مشوهة إلى 66%  
(centre zoom X40)



الشكل. IV. 18b: عينة صلبة مشوهة إلى 66%  
(centre zoom X40)



الشكل. 19.IV: عينة صلبة مشوهة إلى 66%  
(périphérie zoom X100)

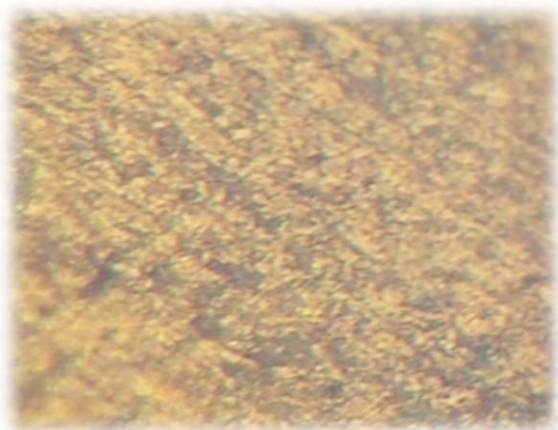


الشكل. 18c.IV: عينة صلبة مشوهة إلى 66%  
(centre zoom X100)

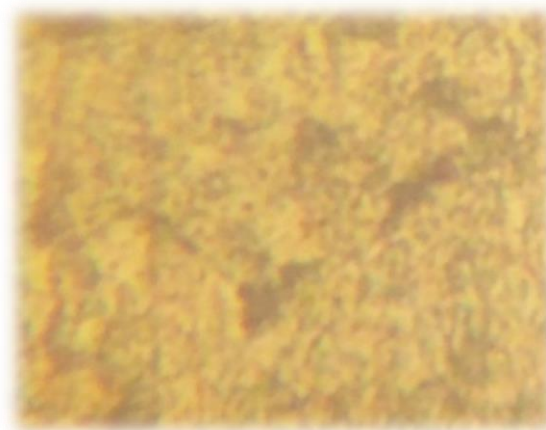
### 3.IV. 4. عينة صلبة مشوهة حتى التمزق (الكسر)

يمكن ملاحظة أنه لا يوجد تغيير ملحوظ بين تعدينية (la métallographie) لعينة مشوهة إلى 66% من استطالتها عند الكسر وتعدينية (la métallographie) للعينة عند التمزق.

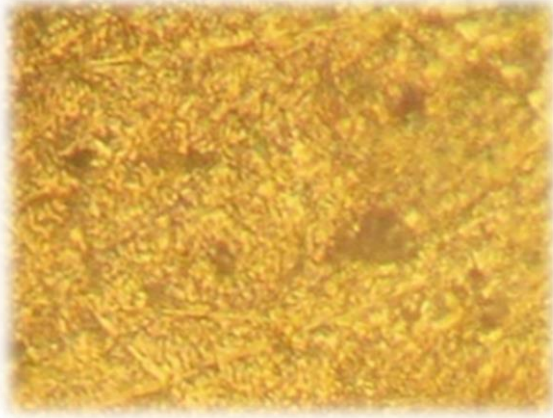
(الشكل. 20. IV و الشكل. 21. IV)



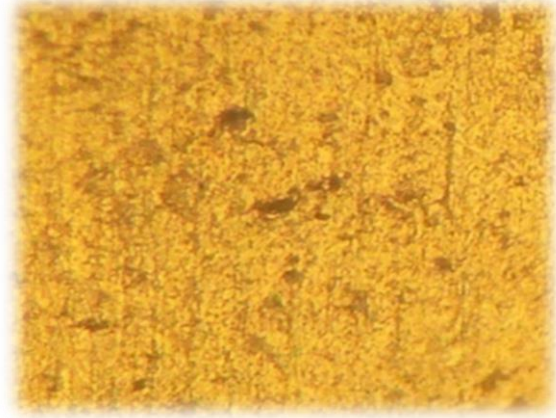
الشكل. 20a.IV: عينة صلبة مشوهة للتمزق  
(Périphérie zoom X10)



الشكل. 20b.IV: عينة صلبة مشوهة للتمزق  
(Périphérie zoom X10)



الشكل. IV. c. 20 : عينة صلبة مشوهة للتمزق  
(Périphéri zoom X10)



الشكل. IV. 21 : عينة صلبة مشوهة للتمزق  
(Centre zoom X10)

#### IV. 4. تحديد معامل التصلب (coefficient d'écrouissage)

#### ومعامل المقاومة (coefficient de résistance)

غالبًا ما يتم اختيار اختبار الالتواء كاختبار مرجعي لإنشاء منحنى التصلب الذي يربط تطور حد المرونة 0 بمتغير التصلب الداخلي (التشوهات البلاستيكية المكافئة  $\epsilon_p$ ).

نحن نتعامل مع المنحنيات باستخدام الدوال التحليلية التي يمكن أن تتخذ عدة أشكال:

• قانون هولومون (Hollomon) لتصلب

$$\sigma = K(\epsilon_p)^n \quad (12.IV)$$

• قانون كروبكوفسكي (Krupkowski) لتصلب

$$\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n \quad (13.IV)$$

• قانون لودويك (Ludwick) لتصلب

$$\sigma = \sigma_0 + K(\epsilon_p)^n \quad (14.IV)$$

• قانون فوس (Voce) لتصلب

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_s[1-\exp(-\epsilon_p/\epsilon_0)] \quad (15.IV)$$

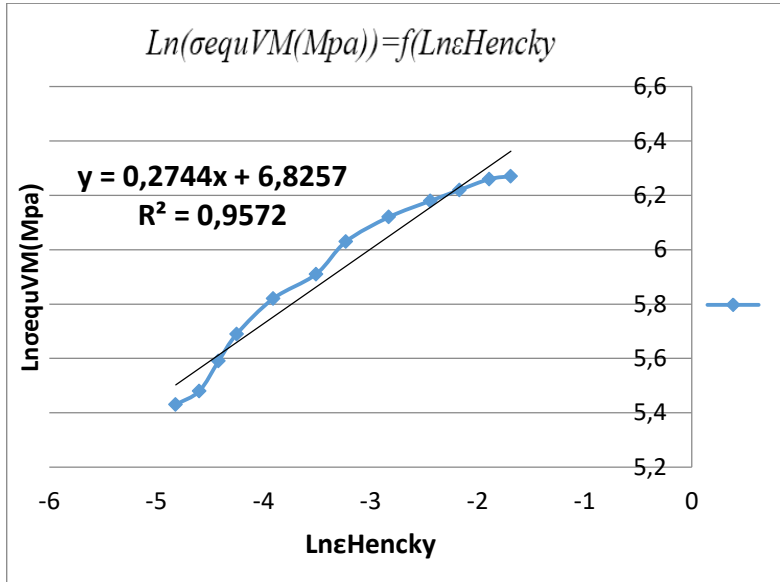
على الرغم من أن قانون هولومون الأول يتمتع بميزة كونه الأبسط. ومع ذلك، فإنه يمثل قيوداً معينة في وصف منحنى التصلب للتشوهات المنخفضة.

$$\sigma = K(\epsilon_p)^n \quad (12.IV)$$

تمثل  $n$  معامل التصلب وهو قدرة المادة على التشوه اللدن. تمثل  $K$  معامل مقاومة المادة (معبراً عنها بـ

(MPa

## IV. 4. 1. إختبار الكسر الأول

الجدول IV.9: قيم  $\ln(\sigma)$  كدالة لـ  $\ln(\epsilon)$ 

الشكل IV. 22: تحول منحنى الإجهاد والانفعال

$Ln\epsilon_{Hencky}$	$Ln\sigma_{equVM}$ (Mpa)
-5,11	5,37
-4,82	5,43
-4,6	5,48
-4,42	5,59
-4,25	5,69
-3,91	5,82
-3,51	5,91
-3,23	6,03
-2,83	6,12
-2,44	6,18
-2,17	6,22
-1,89	6,26
-1,69	6,27

إذا كان :

$$Ln(\sigma) = Ln(K) + n \cdot Ln(\epsilon_p) \quad (16.IV)$$

معادلة المستقيم الذي تم الحصول عليه تكون :

$$Ln(\sigma) = 6,8257 + 0,2744Ln(\epsilon_p)$$

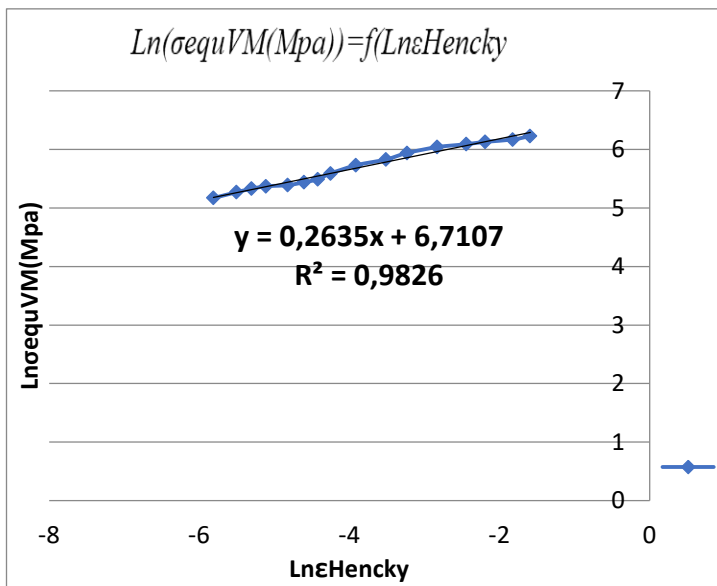
و:

$$\ln(K) = 6,8257$$

حيث:

$$K = 921,22 \text{ MPa} \quad \text{و} \quad n = 0,274$$

#### IV. 2.4. إختبار الكسر الثاني

الجدول IV.10: قيم  $\ln(\sigma)$  كدالة لـ  $\ln(\epsilon)$ 

الشكل. IV. 23: تحول منحنى الإجهاد والانفعال.

$\ln \epsilon_{\text{Hencky}}$	$\ln \sigma_{\text{equVM}} (\text{Mpa})$
-5,81	5,17
-5,5	5,27
-5,3	5,33
-5,11	5,37
-4,82	5,39
-4,6	5,44
-4,42	5,49
-4,25	5,59
-3,91	5,73
-3,51	5,83
-3,23	5,94
-2,83	6,04
-2,44	6,09
-2,19	6,13
-1,82	6,17
-1,59	6,23

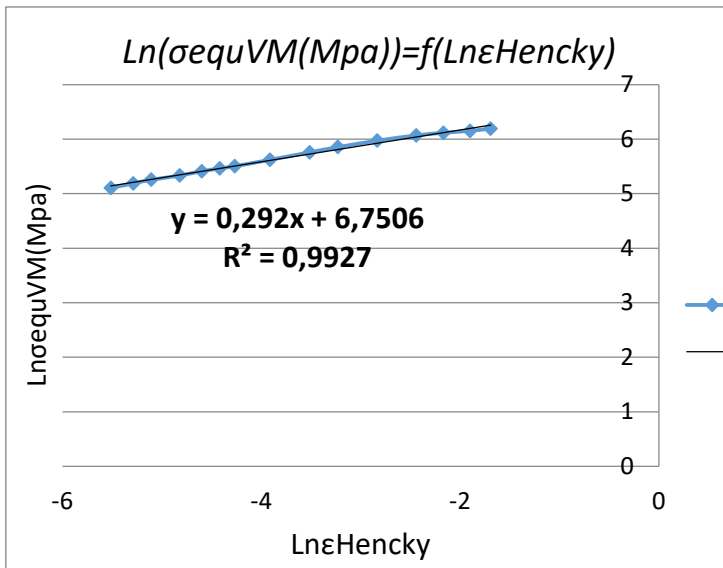
بعد الحساب نجد:

$$K = 821,14MPa$$

$$n = 0,263$$

### 3.4. IV. اختبار الكسر 3/2

الجدول IV.11: قيم  $\ln(\sigma)$  كدالة لـ  $\ln(\epsilon)$



الشكل. IV. 24. : تحول منحنى الإجهاد والانفعال.

$\ln\epsilon_{Hencky}$	$\ln\sigma_{equVM}(Mpa)$
-5,51151059	5,10727792
-5,28441446	5,1901195
-5,10604548	5,25603597
-4,8196018	5,33281541
-4,59720202	5,4132519
-4,41620409	5,46200811
-4,26442139	5,50443683
-3,90952613	5,62174055
-3,50922813	5,75940638
-3,22615223	5,85441268
-2,83021784	5,97284222
-2,43897772	6,06935109
-2,16534807	6,1172378
-1,89572096	6,15300925
-1,69026843	6,19338446

بعد الحساب نجد:

$$K = 854,57MPa$$

$$n = 0,292$$

الجدول 12.IV: قيم معامل التصلب ومعامل المقاومة.

	<i>K</i>	<i>n</i>
اختبار التمزق الأول	921,22MPa	0,274
اختبار التمزق الثاني	821,14MPa	0,263
اختبار الكسر 3/2 الاول	854,57MPa	0,292

و نلاحظ أن قيم معامل التصلب ومعامل المقاومة متقاربة جداً بالنسبة لاختبارات الكسر الأول.

#### IV. 5. خاتمة

إن التشوه الإجمالي ليس كبيراً بدرجة كافية لاستنتاج تطور منحنى اللدونة للتشوهات الأكبر من % 150.

لمحاولة تحقيق قيم تشوه أكبر من % 200، سيتم إجراء تلميع لعينات الالتواء من أجل إزالة جميع عيوب السطح التي نشأت أثناء المعالجة على سبيل المثال وتقليل تركيزات الإجهاد عند أصل ظهور التشقق. لزيادة نطاق المنطقة المرنة، من المستحسن إجراء اختبارات الالتواء باستخدام عينات مصقولة على السطح الأسطواني.

## الإستنتاجات العامة

مكنتنا إختبارات الإلتواء لعينات سبائك الألومنيوم (AISI12) المدنة حتى الكسر، 3/1 و 3/2 من الكسر تقييم الخصائص الميكانيكية للمادة: معامل يونغ ومعامل القص، معامل تصلب العمل ومعامل القوة في المجال البلاستيكي. وتحديد الخصائص السطحية لعيناتنا من خلال الدراسة التعدينية من التوصل للإستنتاجات التالية:

نتائج وقيم الخصائص الميكانيكية للمادة المستخدمة (AISI12) في المجال البلاستيكي هي :

- ✓ معامل القص: تتراوح G من 30000Mpa إلى 39000 Mpa مع معامل ارتباط ( $R^2=89.35 \div 96.67\%$ )
- ✓ معامل يونغ: يتراوح E من 60000 Mpa إلى 66000 Mpa مع معامل ارتباط ( $R^2:97.19 \div 99.1\%$ )
- ✓ تتراوح قيم معامل المقاومة (k) من 854.57 Mpa إلى 921.22 Mpa، و قيم معامل التصلب (n) من 0.261 إلى 0.282.

يظهر تحليل القيم التجريبية التي تم الحصول عليها بواسطة اختبار الإلتواء أن المنطقة المرنة تتكون من نقطتين فقط. لذلك، لا يمكن ضمان موثوقية قياسات معامل القص ويونغ (Young)، وهذا ما يؤكد مقارنة هذه القيم بتلك الموجودة في القيم النظرية.

تظهر الحالة التعدينية لعينة الإلتواء المدنة والمشوهة بنسبة 33% مقارنة بالاستطالة عند الكسر ، عدم تجانس حجم النتوءات، حيث أنه في وسط العينة يمكن رؤية النتوءات بسهولة، بينما في المحيط لا يمكن رؤية النتوءات. على عكس الحالة التعدينية للعينات دون تشوه، فإن حجم النتوءات أكبر بكثير.

بالنسبة للعينات المشوهة بنسبة 66%، تؤدي الزيادة في التشوه على العينة إلى انخفاض في حجم النتوءات، وقد لوحظ أن هذا التشوه قد أدى إلى انخفاض في قيمة معامل يونغ، ربما بسبب بداية اندماج التجايف وبالتالي يقلل من الخصائص الميكانيكية للعينة، من المهم جدا اقتراح التلميع لتقليل عيوب السطح التي يمكن أن تسبب تمزق العينة قبل الأوان وتحليل الفاصل الزمني للتشوهات الكبيرة بدقة.

تظهر الدراسة التعدينية المقارنة بين عينة مشوهة بنسبة 66% من الكسر وعينة خضعت للكسر أنه لا يوجد تغيير كبير.

## المراجع:

- [1] David Mercier. Lois de comportement des matériaux utilisés dans les contacts électriques pour application ” flip chip ”. Matériaux. Université de Grenoble, 2013. Français. ffNNT : 2013GRENI083ff. fftel-01127940
- [2] Jean Pierre Mercier, Gérald Zambelli, Wilfried Kurz, Introduction à la science des matériaux, PPUR, 1999, Lire en ligne [archive]
- [3] Hazard et coll., Mémotech — Structures métalliques (Casteilla, 2000), p. 14
- [4] R. BUTIN, M. PINOT "Fabrications mécaniques". Technologie, tome 2, 1981.
- [5] Michel Colombie « MATÉRIAUX MÉTALLIQUES ».
- [6] S.BENSAADA METAUX ET ALLIAGES FERREUX. November 2019 P59.60.61
- [7] j. Baralis & g. Maeder : précis métallurgie, nathan, paris, 1997
- [8] c.vargel : le comportement de l'aluminium et ses alliages
- [9] m. Colombie et all : matériaux industriels, matériaux métalliques.(propriété chimique)
- [10] précis métallurgie : élaboration, structures-propriétés, normalisation.
- [11] F.Ghomari: SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION université aboubekr belkaid, faculté des sciences de l'ingénieur.
- [12] كتاب اختبار المواد 123 ميك. المواد الهندسية 1 . الطبعة 1429 . المملكة العربية السعودية المؤسسة العامة للتدريب المهني والتقني.
- [13] كتاب اختبار المواد 123 ميك. فحص واختبار المواد الهندسية . الطبعة 1429 . المملكة العربية السعودية المؤسسة العامة للتدريب المهني والتقني.
- [14] M. Ashby and D. Jones, "Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design," 3rd ed., Butterworth-Heinemann, 2005
- [15] George DieterJ "Mechanical Metallurgy McGraw-Hill Book Company, Inc. Printed in the United States of America 1961.. Library of Congress catalog number[ 12 13 14 15 16- MAMM- 7 5 4 3 ISBN 07-016890-311385-61 ]

- [16] Introduction to The Thermodynamics of Materials 6th edition - David R. Gaskell & David E. Laughlin 1995 .
- [17] Vidal-Sallé, E., Baillet, L., & Boyer, J, C, (1999, April), Friction law and parameter identification, In 2nd ESAFORM Conference on Material Forming, Guimarães (pp, 603-606).
- [18] Vladvoj, M., & Jorge, F. P. (2005). Microstructure and properties of friction stir welded aluminium alloys. Metal, Hradec nad Moravicí, Czech Republic, 1255-126.
- [19] Habibi, S., Semsoum, D, Z., Benaissa, S., & Merzouk, H, (2022), The proposition of analytical expression  $HM-(\sqrt{P/S})$  in microindentation pile-up deformation mode, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 16(60), 407-415, DOI: 10,3221/IGF-ESIS,60,28.
- [20] KRISHNA, Krishna, U, G., Vasudeva, B., Auradi, V., & Nagaral, M, (2022), Mechanical Characterization and Tensile Fractography of Al7075-WCP-CoP Composite, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 16(60), 283-290, DOI: 10,3221/IGF-ESIS,60,20.
- [21] Da Fonte, M., Reis, L., & De Freitas, M, (2014), The effect of steady torsion on fatigue crack growth under rotating bending loading on aluminium alloy 7075-T6, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 8(30), 360-368, DOI: 10,3221/IGF-ESIS,30,43.
- [22] Marazani, T., Akinlabi, E., Madyira, D., Majumdar, J., & Pal, S, (2021), Microstructural, elemental, mechanical and structural attributes of AA1100/17-4 PH stainless steel composites fabricated via friction stir processing, *Engineering Solid Mechanics*, 9(4), 391-414.
- [23] Ekabote, N., Kodancha, K, G., & Revankar, P, P, (2022), Elastic-plastic rupture analysis of anisotropy effect on AA2050-T84 alloy at different temperatures: a numerical study, *Frattura ed Integrità Strutturale*, (59), DOI: 10,3221/IGF-ESIS,59,06.
- [24] Azadi, M, & Aroo, H, (2021), Bending cyclic behavior and scatter-band analysis of aluminum alloys under beneficial and detrimental conditions through high-cycle fatigue regime, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 15(58), 272-281, DOI: 10,3221/IGF-ESIS,58,20.
- [25] Shahraki, S., Ghanbari, B., & Abdollahi, H, (2020), Sub-microcrystalline Al achieved by various procedures of constrained groove pressing: microstructure and mechanical properties, *Engineering Solid Mechanics*, 8(2), 93-104.
- [26] Ravikumar, M., Reddappa, H, N., Suresh, R., Babu, E, R., & Nagaraja, C, R, (2021), Study on micro-nano sized Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles on mechanical, wear and rupture behavior of Al7075 Metal Matrix Composites, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 15(58), DOI: 10,3221/IGF-ESIS,58,12.

- [27] Shlyannikov, V., Yarullin, R., & Ishtyryakov, I, (2015), Surface crack growth in cylindrical hollow specimen subject to tension and torsion, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 9(33), 335-344, DOI: 10,3221/IGF-ESIS,33,37.
- [28] Lemi, M., Gutema, E., & Gopal, M, (2022), Modeling and simulation of friction stir welding process for AA6061-T6 aluminum alloy using finite element method, *Engineering Solid Mechanics*, 10(2), 139-152.
- [29] Patil, C., Patil, H., & Patil, H, (2016), Experimental investigation of hardness of FSW and TIG joints of aluminium alloys of AA7075 and AA6061, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 10(37), 325-332, DOI: 10,3221/IGF-ESIS,37,43.
- [30] Vidal-Sallé, E., Boutabba, S., & Boyer, J, C, (2008), Quasi-static versus dynamic explicit scheme for the modeling of an energy-driven thermo-mechanical forming process, *International Journal of Material Forming*, 1(1), 407-410, doi,org/10,1007/s12289-008-0081-5.
- [31] Shahraki, S., Miyanaji, H., & Abdollahi, H, (2020), Microstructure and mechanical properties of ultrafine-grained IF steel sheets produced by constrained groove pressing, *Engineering Solid Mechanics*, 8(1), 63-68.
- [32] Nguyen, T, H, (2008), Une formulation variationnelle du problème de contact avec frottement de Coulomb, *Comptes Rendus Mécanique*, 336(7), 606-611, doi,org/10,1016/j,crme,2008,05,003.
- [33] Cros, J, M., Feng, Z, Q., & Magnain, B, (2010), A semi-explicit method to simulate frictional impact problems, *Academie des Sciences, Comptes Rendus, Mecanique*, 338(3), 176-180 .