

تقييم قابلية السحب العميق لعدد من الخلائط الفولاذية ومقارنتها بالخليطة CuZn30

محمد وفيق الشيخ¹، د. وسيم ديب²، د. ماجد حيبا³

¹مهندس قائم بالأعمال في مركز الدراسات والبحوث العلمية وطالب ماجستير في قسم التصميم الميكانيكي في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق
²مدرس في قسم هندسة التصميم الميكانيكي في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق
³باحث في مركز الدراسات والبحوث العلمية

الملخص

يهدف هذا البحث إلى تقييم قابلية السحب العميق لعدد من الخلائط الفولاذية لمقارنتها بقابلية السحب المكافئة الخاصة بالخليطة النحاسية CuZn30، وذلك من خلال إخضاع عينات متطابقة من الخليطة النحاسية المعنية ومن خلائط فولاذية معروفة بقابلية تشكيلها الجيدة لاختبار الارتفاع الحدي للقبعة Limiting Dome Height Test. ولتحقيق هذا الهدف، عُملَ على تصميم وإنتاج عُدّة الاختبار والعينات التي استعملت بالتجارب المخبرية المنفذة، وعلى التوازي عُملَ على تطوير نموذج عددي يحاكي المسألة المطروحة. تشير النتائج المستخلصة من الدراسات التجريبية والعددية المنفذة إلى أن الخليطة AISI 429 مشابهة بسلوكها الميكانيكي، عندما تخضع لقوى التشكيل العميق، للخليطة CuZn30، وبالتالي فهي مرشحة لتستخدم كبديل عن الأخيرة وفقاً للحاجة.

تاريخ الإيداع: 2022/6/22

تاريخ القبول: 2022/7/26



حقوق النشر: جامعة دمشق - سورية،
يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب
الترخيص CC BY-NC-SA 04

الكلمات المفتاحية: الخلائط الفولاذية، خليطة CuZn30، المُشكّل الكروي، اختبار

الارتفاع الحدي للقبعة، السحب العميق.

Evaluation Of The Deep Drawing Ability Of A Number Of Alloy Steels And Their Comparison With That Of CuZn30

Muhammad Wafeek Alsheikh¹, Dr. Wassim Dib²,
Dr. Majed Haiba³

¹Acting Engineer at the Center for Scientific Studies and Research and a master's student in the Mechanical Design Department at the Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Damascus University.

²Lecturer in the Department of Mechanical Design Engineering at the Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Damascus University

³Researcher at the Center for Scientific Studies and Research

Received: 22/6/2022

Accepted: 26/7/2022



pyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

Abstract

This paper aims to evaluate the deep ductility of a number of steel alloys to compare it with the equivalent ductility of CuZn30, by subjecting identical samples of the respective copper alloy and steel alloys known for their good formability to the Limiting Dome Height Test. To achieve this goal, he worked on designing and producing test kits and samples that were used in the executed laboratory experiments, and in parallel he worked on developing a numerical model that simulates the issue at hand. The results extracted from the experimental and numerical studies carried out indicate that AISI 429 has similar mechanical behavior, when subjected to deep forming forces, to CuZn30, and therefore it is a candidate to be used as a substitute for the latter according to the need.

Key words: steel alloys, CuZn30 alloy, punch, dome height limit test, deep drawing.

الباحثين، فعلى سبيل المثال، عمل الباحث Madeleine Du Toit بمرجعيتيه واستنتج أن الخليطة AISI 202 قابلة لتكون بديل مناسب عن الخليطة AISI 304، في التطبيقات التي تتطلب خصائص سحب عميق جيدة [2]، أما الباحث N.V. Anbarasi فقد عمل بمرجعية نفس النهج واستنتج أن قابلية التشكيل الخاصة بصنف الفولاذ Ultra-Low Carbon Interstitial Free Steel أعلى من تلك الخاصة بخليطة الفولاذ SS430 كما أنها أعلى من تلك الخاصة بصنف الفولاذ [3] Extra Deep Drawing Quality steel، وبنفس المرجعية، توصل الباحث R. Uday Kumar إلى نتيجة تفيد بأن قابلية السحب العميق للخليطة CuZn30 أعلى منها لخليطة الفولاذ الطري AISI 1006 [4].

2. الدراسة المرجعية:

تؤكد الدراسات المرجعية التي تم الاطلاع عليها على تعدد المتغيرات التي تؤثر بشكل مباشر أو غير مباشر على قابليتي التشكيل والسحب العميق، كما تؤكد أيضاً على أن التحديد التجريبي الناجح لقيم المتغيرات المعنية بذلك يستلزم دراستها بشكل تفصيلي، بهدف تحديد مدى تأثيرها على المنتجات من حيث أشكالها وأحجامها ودقة أبعادها وجودتها. وضمن ذلك السياق، عمل العديد من الباحثين على مواضيع كثيرة، بعضها يستهدف أمثلة متغيرات إجراء السحب العميق لمنتج و/أو لخليطة معدنية معينة، أما بعضها الآخر فيسعى لتطوير أنظمة اختبار ونماذج عددية تحاكي ما تتعرض له المنتجات عند إخضاعها للإجراء، وذلك بهدف تحقيق إمكانية التنبؤ بالنتائج والحد من احتمالات الفشل. وبذلك السياق:

- قيم الباحث J. Sahu قابلية السحب العميق لصفائح متعددة السماكة من خليطة نحاس أصفر، وذلك من خلال إخضاعها لاختبار الشد التقليدي ولاختبار القبة الكروية، وبالنتيجة توصل لما يلي [5]:

1. المقدمة:

تمتلك أحد الشركات المحلية خط إنتاج يستخدم الخليطة CuZn30 كمادة أولية قابلة للسحب العميق. ونظراً لخصوصية تلك الخليطة فإن تأمينها لصالح تلك الشركة ووجه بمشاكل غلاء الأسعار ومحدودية العرض وعدم مطابقة نماذج الخلائط التي قُدمت قبل التعاقد، ما تسبب بتوقف العمل بذلك الخط. ونظراً لعالمية المشكلة المطروحة، عملت العديد من المؤسسات الصناعية المالكة لخطوط إنتاج مكافئة لتلك المملوكة محلياً على استبدال الخليطة الـ CuZn30 بخليطة فولاذية مناسبة. وعلى التوازي عملت على إعادة ضبط خطوط إنتاجها بما يعكس الفروق القائمة بين السلوك الميكانيكي للخليطة الفولاذية البديلة والسلوك المكافئ الخاص بالخليطة CuZn30، عند الإخضاع للقوى اللازمة لتحقيق السحب العميق المستهدف. وضمن ذلك السياق، طرح موضوع البحث الحالي الهادف لتنفيذ الاختبارات الميكانيكية اللازمة لتقييم قابلية السحب العميق لعدد من الخلائط الفولاذية المستعملة بمجال السحب العميق، وذلك بهدف تحديد الخليطة الفولاذية الأنسب لتكون بديل عن الخليطة CuZn30، أخذين بعين الاعتبار أن نهج العمل الذي يوصى به لتحقيق ذلك النوع من الأهداف يعتمد على المواصفة الأمريكية -ASTME643 [1] (1984(2000)، والتي تفيد بأن اختبارات قابلية المط ثنائي الاتجاه Biaxial stretching تنفذ بهدف مقارنة قابلية التشكيل لمواد وخلائط معدنية مختلفة. وبناءً عليه، قام نهج البحث الحالي على إخضاع عينات متطابقة من الخليطة CuZn30 ومن خلائط فولاذية معروفة بقابلية تشكيلها الجيدة لأحد اختبارات المشكّل الكروي Ball Punch Tests، على أن تحدد الخليطة الأنسب من خلال مقارنة نتائج الخلائط الفولاذية مع نتيجة خليطة الـ CuZn30. ولتقييم مدى شيوع العمل بمرجعية هذا النهج لا بد من الإشارة إلى أنه استخدم من قبل العديد من

التكرار لتغطية مجال واسع من سرعات التشكيل ومن نسب الكي¹. وبنتيجه العمل بهذا البحث تم التوصل للنتائج التالية:

- تشوّهت الجدران الجانبية للأكواب المسحوبة باستعمال القوالب غير الخاضعة لمعالجات الترسيب والانتشار، وبالمقابل، لم تشوه الجدران الموافقة المسحوبة باستعمال القوالب الخاضعة لمعالجات الترسيب والانتشار حتى وصول سرعة التشكيل لـ 120 mm/Sec.
- لم تشوه الجدران الجانبية للأكواب المسحوبة بقوالب معالجة بطبقة كربيد الفاناديوم حتى وصول سرعات التحميل ونسب الكي لقيم عالية جداً.

وعند هذا الحد لا بد من الإشارة إلى أن الأدبيات أعلاه تشكل غيضاً من فيض، ذلك أن الأدبيات المتاحة بمجال التشكيل العميق كثيرة جداً، ولكنها بالغالب إما تهدف للوصول للتصاميم الأمثلية للعدد المستخدمة أو تسعى للتعرف على سلوك الخلائط المعدنية عندما تتعرض لإجراء السحب العميق، وبالتالي فالدراسات التي تسعى لإيجاد بدائل لخلائط معدنية معروفة بتميز قابلية تشكيلها العميق محدودة جداً.

- قابلية السحب العميق للصفائح التي لا تزيد سماكتها عن 90µm تزداد مع زيادة السماكة.
- قابلية السحب العميق للصفائح ذات السماكة المساوية لـ 30µm تكاد تكون معدومة.
- قابلية السحب العميق لصفائح النحاس الأصفر الخاضعة لحالة انفعالية أحادية المحور أقل بحوالي 30% من القابلية المكافئة العائدة لصفائح مطابقة خاضعة لحالة انفعالية ثنائية المحور أو لحالة انفعالية مستوية.

- ضمن سياق العمل على تصميم العُدّة الخاصة باختبار الارتفاع الحدي للقبعة عمِل الباحث M. Dore على وضع تصور أولي لمكونات وأبعاد تلك العُدّة، حيث نُفِّذ أعمال النمذجة الحاسوبية والحسابات الإنشائية اللازمة للتأكد من قدرة تلك العُدّة على تشكيل صفائح فولاذية بسماكة لا تزيد عن 1mm وبثوابت سلوك لن مساوية للقيم $K \leq 1500 \text{ MPa}$ و $n \geq 0.1$. وللتأكد من صلاحية التصميم المعتمد تم تصنيع وتجميع وتجريب مكوناته حيث أثبتت النتائج المستخلصة صلاحية تلك العُدّة وملاءمتها لتنفيذ الاختبارات المعنية [6].

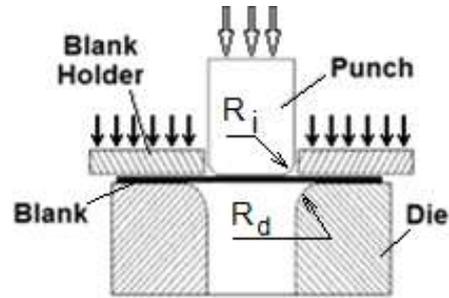
- قِيم الباحث C. MERiC وزملاؤه قابلية السحب العميق للخليطة SAE 6114 (بدون ومع درفلة على البارد) وذلك من خلال إجراء اختبارات شد واختبارات إريكسن Erichsen على عينات متعددة مأخوذة من صفائح سماكتها تتراوح بين 0.67mm و 2mm. بنتيجة العمل بهذا البحث تم التوصل للقيم الأمثلية للمتغيرات الحاكمة لعملية السحب العميق [7].

- قام الباحث Y. Abe وزملاؤه بدراسة تأثير معالجة مكونات قوالب السحب العميق بتقانتى الترسيب الفيزيائي والكيميائي لتبريد التيتانيوم، وبتقانة الانتشار الحراري لكربيد الفاناديوم على قابلية السحب العميق لصفائح فولاذ عالي المتانة [8]. وضمن ذلك السياق، نُفِّذت اختبارات قابلية التشكيل العميق على الصفائح الفولاذية المعنية مع لحظ

¹ الكي: هو إخضاع كوب منتج بعملية سحب عميق سابقة لعملية سحب عميق تالية بقالب مجهز بحلقة كي، لخفض سماكة جدران ذلك الكوب.

مفهوم السحب العميق وآلية تحقيقه:

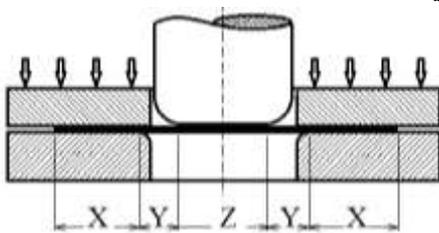
يقصد بالسحب العميق تشكيل صفائح المعادن إلى أجسام جوفاء أو متابعة تشكيل أجسام جوفاء سبق سحبها [9]. ووفقاً لما هو مبين في الشكل رقم (1)، تتكون عُدّة السحب العميق من مُشكّل سحب Punch، وقالب حلقي Die، وماسك Blank Holder، بالإضافة لإطار مَرَكِزَة مثبت على سطح القالب الحلقي [10]. ولتنفيذ عملية السحب العميق توضع الصفيحة المعدنية المطلوب تشكيلها Blank بشكل مركزي فوق القالب الحلقي، وتُنَبَّت بموضعها من خلال تطبيق ضغط كافي على الماسك، وبعد ذلك يدفع المُشكّل بشكل مركزي، باستخدام مكبس تشكيل مناسب Forming Press، إلى عمق كافي داخل القالب الحلقي، ما يتسبب بتقريب الصفيحة المعدنية، بحيث تتحول لمنهج منتهي ذات شكل مطابق، إلى حد كبير، لشكل الخلوص القائم بين مُشكّل السحب والقالب الحلقي [9,10].



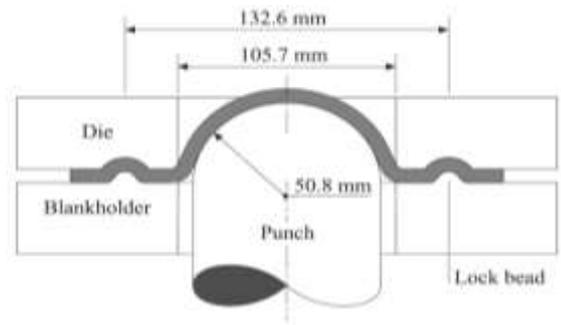
الشكل (1) بيان لآلية تحقيق السحب العميق [10]

ووفقاً للمراجع المختصة، تتأثر نتائج عملية السحب العميق بمتغيرات متعددة مثل شكل وأبعاد الصفيحة الخاضعة للسحب، سلوك مادة الصفيحة، أشكال وأبعاد ومواصفات العُدّة المستخدمة، سرعة تقدم المُشكّل، بالإضافة للضغط المطبق من خلال الماسك، وأخيراً طبيعة الاحتكاك القائم بين الصفيحة ومكونات عُدّة السحب [10,11]. بالعموم، تعتبر آلية السحب العميق آلية غير بسيطة، ذلك أنها تُعَرِّض المشغولة لحقل إجهادي/انفعالي معقد. ولتسهيل فهم تلك الآلية، تُقسّم

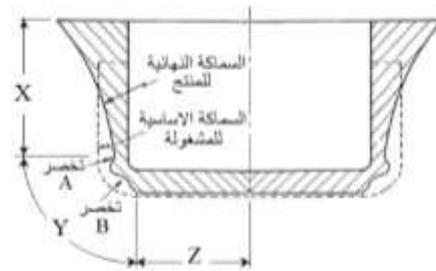
الصفيحة الخاضعة للسحب العميق إلى قطاعات حلقيه. ووفقاً لما هو مبين بالشكل (2)، يُمثّل القطاع X جزء الصفيحة الواقع على تماس مباشر مع الجزء العلوي للقالب الحلقي، بينما يُمثّل القطاع Y جزؤها الذي لا يحقق أي تماس مع مكونات عُدّة التشكيل، وأخيراً، يُمثّل القطاع Z الجزء الواقع على تماس مباشر مع السطح السفلي للمُشكّل [12]. عندما تطبق القوة الضاغطة على المُشكّل، تتعرض مادة القطاع X للسحب، ما يُخضعها لإجهاد شد قطري، وما يتسبب بتحريكها بشكل تدريجي نحو تجويف القالب الحلقي، وعلى التوازي، بالتشكل التدريجي للجدار الشاقولي العائد للمنتج المستهدف، حيث تقع مادة ذلك الجدار تحت تأثير إجهاد محيطي ضاغط. ووفقاً لما هو مبين بالشكل (3)، ينتج عن التأثير المشترك لحالتي الشد القطري والضغط المحيطي تباين معتبر بسماكة تلك المادة. وبذلك السياق، لا بد من التنويه إلى الدور المهم الذي يلعبه الماسك، والذي يتمثل بتطبيقه الضغط اللازم لمنع التجدد بسبب الإجهادات المحيطية المؤثرة بمادة القطاع X. أما فيما يتعلق بمادة القطاع Y، فجزؤها الذي لا يتأثر بشكل مباشر بقوى المُشكّل يمتد بفعل إجهادات الشد المؤثرة به، أما جزؤها الذي يخضع للتشكيل بفعل انزلاقه فوق الجزء القوسي من رأس المُشكّل فيخضع لإجهادات انحناء معتبرة، ما يتسبب بزيادة موضعية بالسماكة، وبالتالي بظهور التخصّرين A و B. أخيراً، تخضع مادة القطاع Z فقط للتمدد والانزلاق فوق الرأس الأفقي للمُشكّل.



الشكل (2) بيان لقطاعات المشغولة [12]



الشكل (4) بيان لغدة اختبار الارتفاع الحدي للقبعة [13]



الشكل (3) شكل تمثيلي لتباين سماكة جدار منتج السحب العميق [12]

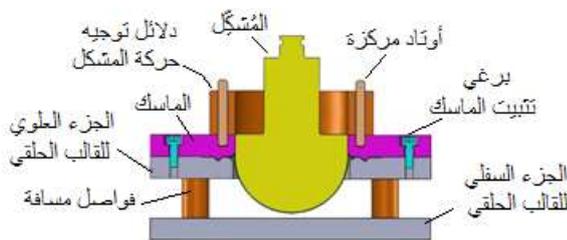
3. اختبار الارتفاع الحدي للقبعة:

يُعتبر اختبار الارتفاع الحدي للقبعة Limiting Dome Height Test (LDH) أحد اختبارات المُشكل الكروي. ووفقاً لما هو مبين في الشكل (4)، يستعمل هذا الاختبار مُشكل برأس كروي قطره 101.8 mm، ويتميز بوجود إطار إقبال محدد Locking bead في حلقة المسك، ما يعني أن عملية التشكيل تتم وفقاً لآلية تشكيل مختلفة تماماً عن تلك العائدة للسحب العميق. وبذلك، قد يكون من غير المناسب تقييم قابلية السحب العميق المطلقة باستعمال هذا الاختبار، ولكن المراجع المختصة تؤكد على إمكانية استخدامه لمقارنة قابلية السحب العميق لخلائط مختلفة [13]، وبالتالي تم الاعتماد على نتائج هذا الاختبار ضمن سياق العمل بالبحث الحالي.

4. خطوات تنفيذ البحث:

1.5 تصميم وتصنيع غدة الاختبار:

تم تصميم الغدة اللازمة لتنفيذ اختبارات البحث الحالي باستعمال البرنامج Solidworks، والذي سمح بتنفيذ أعمال نمذجة مجسمة بصورة تفاعلية لكافة مكونات الغدة المطلوبة، وسمح بعد ذلك بالحصول على الجسم التجميعي المبين في الشكل (5).



الشكل (5) مقطع بتجميعي الغدة المصممة

- وعند العمل على وضع المخططات التفصيلية اللازمة لتصنيع الغدة المصممة تم لحظ ما يلي:
- استعمال الخليطة الفولاذية P20 باعتبارها الأكثر استخداماً بمجال تصنيع القوالب.
 - تحقق الشكل النهائي المطلوب للقالب الحلقي من خلال إنتاج كتلتين علوية وسفلية وفواصل مسافة أسطوانية، وفقاً لما يبينه الشكل (6).
 - تجهيز التصميم المعتمد بدليل توجيه لحركة المُشكل وبأوتاد مركزية معيارية، وذلك لضمان المركزية، أي لضمان تطابق المحور الطولي للمُشكل مع المحاور الطولية لكل من الماسك والقالب الحلقي وفقاً لما يبينه الشكل (6).
 - تحقيق أعمال التصنيع بالتسلسل التالي، وذلك بهدف ضمان المطابقة الكلية لكافة المتطلبات المعتمدة:
 - تنفيذ أعمال قطع أولية مع إبقاء علاوات تشغيل كافية للتخلص من التشوهات التي قد تنتج عن أعمال المعالجة الحرارية من جهة ولتحقيق متطلبات الدقة والنعومة النهائية من خلال أعمال قطع دقيقة لاحقة من جهة أخرى.

3.5 تحديد أصناف الخلائط الفولاذية المرشحة للاختبار:

على اعتبار أن نتائج الاختبارات التي ستفقد ضمن سياق العمل بهذا البحث سُنستعمل لتحديد خليطة الصفائح الفولاذية الأقرب بسلوكها، عندما تخضع لقوى السحب العميق، للخليطة CuZn30، قامت الحاجة للحد من عدد الاحتمالات القائمة وذلك من خلال دراسات مرجعية تقارن من خلالها قيم الثوابت المؤصّفة للسلوك اللدن للخليطة النحاسية المعنية مع القيم الاسمية المكافئة العائدة لأصناف خلائط فولاذية معروفة بقابليتها العالية للتشكيل وللسحب العميق. وضمن سياق العمل بتلك الدراسة تبين أن القيم الاسمية للثوابت المعنية² لصنفي خلائط الفولاذ الفريتي المقاوم للصدأ وخلائط الفولاذ منخفضة الكربون قريبة من القيم المكافئة العائدة للخليطة CuZn30، وبالتالي فصلاحيّة التعامل مع خلائط الفولاذ الفريتي المقاوم للصدأ Ferritic Stainless Steel وخلائط الفولاذ منخفض الكربون Low carbon steels باعتبارها بديل محتمل عن الخليطة CuZn30 قائمة، وبذلك عُملَ على اختبار ثلاثة أنواع من الصفائح المعدنية، الأول منتج من خليطة فولاذ مقاوم للصدأ AISI 429، والثاني منتج من خليطة فولاذ منخفض الكربون C10، أما النوع الثالث فمنتج من خليطة CuZn30، ويقدم الجدول رقم (1) تفاصيل العينات التي أنتجت واختبرت ضمن سياق العمل بهذا البحث.

ii. تنفيذ أعمال المعالجات الحرارية اللازمة لتحقيق القساوت السطحية المستهدفة.

iii. تنفيذ أعمال قطع دقيقة وذلك بهدف الحصول على مكونات مطابقة بالكامل، وبالنتيجة تم الحصول على عُدّة الاختبار المبينة في الشكل (6).



الشكل (6) صورة فوتوغرافية لعدّة السحب المصنعة لصالح البحث الحالي

2.5 تجميع العُدّة المصنعة على آلة الاختبار:

بعد الانتهاء من تجميع مكونات العُدّة المصنعة مع بعضها البعض عُملَ على تجميع تلك العُدّة على آلة اختبار شد عمومية استطاعتها الأعظمية 330 KN، ومجهزة بالحساسات وبأنظمة التحكم اللازمة لضبط سرعة التحميل ولتحصيل قيم الانتقالات المُحقّقة والقوى المكافئة بالزمن الحقيقي، وفقاً لما توضحه الصورة المدرجة في الشكل (7)، وخلال التجميع تم لَظَ مسألة مركزية ومحورية التثبيت والتحميل لكافة المكونات.



الشكل (7) صورة فوتوغرافية للعدّة المصنعة بعد تركيبها على آلة الاختبار

² الثوابت التي استعملت بالمقارنة هي:

- نسبة السحب الحدية Limiting draw ratio.
- الاستطالة المنتظمة Uniform elongation.
- أس ومعامل التقسية الانفعالية Strain hardening exponent and coefficient.
- نسبة الانفعال اللدن Plastic strain ratio.
- الارتفاع الحدي للقبعة Limiting Dome Height.

الثلاثة التي ستخضع للاختبار) عُمل على تنفيذ اختبارات شد تقليدي باستعمال آلة الاختبار العمومية ما استدعى العمل على إنتاج عينات الشد اللازمة لذلك. وضمن ذلك السياق، تؤكد المراجع العلمية على أن شكل وأبعاد نماذج العينات الخاصة باختبار الشد التقليدي يتعلق بكل من طبيعة المادة الأولية المتوفرة (قضبان، صفائح،.. الخ) ومواصفات آلة الاختبار المتاحة (أبعادها، استطاعتها العظمى، .. الخ) وشكل فكوك التثبيت المتوفرة (مسطحة، دائرية، مقلوطة، .. الخ)، حيث يمكن أن تؤخذ العينة من مادة خام أو مشغلة. وحيث أن المواد الأولية التي استعملت بالبحث الحالي كانت على شكل الواح رقيقة فقد تم اعتماد نموذج اختبار مسطح سماكته مساوية لسماكة الواح المواد الأولية المتوفرة، ويقدم الجدول رقم (3) شكل وأبعاد وأعداد العينة المستخدمة في هذا البحث، وفقاً

لمعطيات المواصفة ASTM E-8M:

الجدول (3) تفاصيل عينات الشد المختبرة

خليطة العينة	عدد العينات	شكل وأبعاد العينات التي أنتجت واختبرت
AISI 429	3	
C10	3	
CuZn30	3	

6 النتائج ومناقشتها:

1.6 نتائج تحليل التركيب الكيميائي:

نظراً لضرورة التأكد من التراكيب الكيميائية لخليط الصفائح المعدنية التي سيعمل على إخضاعها لاختبارات الشد والتشكيل، تم تنفيذ عمليات تحليل لعينات متعددة من تلك الصفائح، وتقدم الجداول (4) و (5) و (6) المتوسطات الحسابية لنسب التراكيب المئوية المستنتجة، وبمقارنة تلك النسب مع النسب المعيارية المكافئة، وفقاً لما تقدمه المراجع المختصة، يمكن استنتاج ما يلي:

الجدول (1)	
خليطة العينة	عدد العينات المنتجة
AISI 429	3
C10	3
CuZn30	3

4.5 التأكد من ملائمة آلة الاختبار:

حيث أن الحاجة قائمة للتأكد من أن آلة الاختبار العمومية التي جهزت بالعدّة المعنية قادرة على تأمين القوى اللازمة لإخضاع العينات الموصّفة في الجدول رقم (1) لاختبار الارتفاع الحدي للقبعة ظهرت الحاجة لحساب قوى التشكيل الموافقة لتقدم المُشكّل وصولاً للقيم الأعظمية التي تتسبب بانهياب العينات F_u . ولتحقيق ذلك توصي المراجع المختصة باعتماد المعادلة التالية:

$$F_u = \pi (d_1 + t) t \cdot S_{ult} \cdot (1.2) \frac{d_1 - 1}{\beta - 1} \dots (1)$$

حيث: d_1 قطر المُشكّل بوحدة الـ مم، t سماكة العينة بوحدة الـ مم، S_{ult} حد المتانة لمادة العينة بوحدة الـ نيوتن/مم²، وأخيراً β نسبة السحب الحدية لمعدن الصفيحة المستعملة [14]، ويقدم الجدول رقم (2) النتائج المستخلصة، والتي تؤكد أن إمكانية تنفيذ الاختبارات المستهدفة قائمة بالآلة الاختبار التي جهزت بالعدّة، والتي تصل قوتها الأعظمية لـ 330 KN، وفقاً لما ذكره بفقرة سابقة.

الجدول (2) القوى الأعظمية المطلوبة للاختبار

الخليطة المعنية	CuZn30	C10	AISI 429
F_u (N)	64966	47167	134943

5.5 إنتاج عينات اختبار الشد:

تؤكد العديد من المراجع العلمية على إمكانية التعامل مع بعض الثوابت المستنتجة من اختبار الشد التقليدي باعتبارها معايير فعالة لتقييم قابليتي التشكيل والسحب العميق. وللتأكد من إمكانية الاستفادة من ذلك (تحقيق الهدف من البحث الحالي من خلال مقارنة نتائج اختبارات الشد لأنواع الخلائط

الحاجة لتنفيذ اختبارات قساوة، ونظراً للسماكات المنخفضة نسبياً لنماذج الصفائح التي أخضعت للاختبار عُمل على تنفيذ القياسات المستهدفة باستعمال جهاز نوع Micro hardness tester، نموذج HV-1000، ويقدم الجدول رقم (7) وسطي قيم النتائج المقاسة. وبالمقارنة مع القيم المرجعية لقساوات الخلائط المعنية، وفقاً لما تقدمه المراجع المعنية، يمكن استنتاج ما يلي:

- صفائح الخليطة AISI429 مُلدّنة، ووفقاً للمراجع المختصة يحقق التلدين النموذجي لهذا النوع من الخلائط بحرارة تتراوح بين 705 و 775 °C [15].
- صفائح الخليطة C10 مُلدّنة جزئياً عند درجة حرارة قريبة من 850°C.
- صفائح الخليطة CuZn30 ربع قاسية، ما يعني أنها مُخمّرة بحرارة من 600 إلى 650°C لمدة ساعة.

الجدول (7) متوسطات القيم المقاسة للقساوة

مادة الصفيحة	AISI 429	C10	CuZn30
وسطي قيم القساوة المقاسة	190.9 HV	150.4 HV	96.1 HV
	91 HRB	79 HRB	52 HRB

3.6 نتائج اختبارات الشد:

وفقاً لما ذكر سابقاً، أنتجت عينات اختبار الشد بمرجعية المعطيات المدرجة في الجدول رقم (3)، ومن ثم أخضعت لإجراء اختبار شد معياري، بمرجعية المواصفة الأمريكية ASTM E8، حيث حُصّلت قيم القوى المطبقة والانتقالات الموافقة بالزمن الحقيقي، ومن ثم عُمل على حساب قيم الإجهادات والانفعالات الموافقة، وتقدم الأشكال (8) و (9) و (10) المنحنيات البيانية التي تعكس النتائج المستخلصة لكل عينة أخضعت للاختبار، بالإضافة لتقديمها لوسطي النتائج المستخلصة لكل خليطة من الخلائط الثلاثة المعتمدة. أما القيم الوسطية للثوابت العائدة لكل منحنى شد تم الحصول عليه فمدرجة بالجدول (8) و (9) و (10)، والتي تم التأكد من

- نوع الصفائح الأول مُنتج من خليطة الفولاذ الفريتي المقاوم للصدأ AISI 429.
- نوع الصفائح الثاني مُنتج من خليطة الفولاذ منخفض الكربون C10.
- نوع الصفائح الثالث مُنتج من خليطة النحاس الأصفر CuZn30.

الجدول (4) نتائج التحليل لخليطة الصفائح الأولى

العنصر	C %	Si %	Mn %	P %
النسبة	0.0719	0.3240	0.3860	0.0155
العنصر	Co %	Cu %	Nb %	Ti %
النسبة	0.0193	0.0323	0.0062	0.0037
العنصر	S %	Cr %	Mo %	Ni %
النسبة	0.0026	15.0300	0.0170	0.1590
العنصر	Sn %	As %	N %	Fe %
النسبة	0.0060	0.0237	0.0966	83.7

الجدول (5) نتائج التحليل لخليطة الصفائح الثانية

العنصر	C %	Si %	Mn %	P %
النسبة	0.0846	0.0012	0.305	0.0051
العنصر	Al %	Co %	Cu %	Sn %
النسبة	0.0177	0.0037	0.0287	0.0037
العنصر	S %	Cr %	Mo %	Ni %
النسبة	0.019	0.0148	0.0052	0.0208
العنصر	Ca %	Sb %	Fe %
النسبة	0.0020	0.0055	99.4

الجدول (6) نتائج التحليل لخليطة الصفائح الثالثة

العنصر	Cu%	Fe%	Pb%	Ni%
النسبة	70.1521	0.0415	0.0324	0.1063
العنصر	Al %	Sn %	Others%	Zn%
النسبة	0.0142	0.0237	0.0052	29.6246

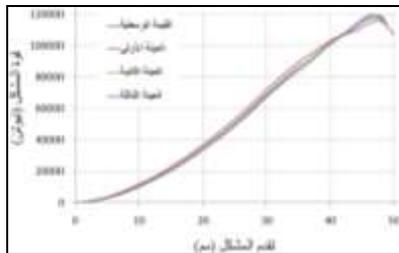
2.6 نتائج اختبارات القساوة:

ضمن سياق السعي للتعرف على حالات الصفائح المستعملة بالاختبارات (من حيث خضوعها لمعالجات ميكانيكية أو حرارية كجزء من إجراء إنتاجها قبل توريدها للجهة التي وضعتها تحت تصرف البحث الحالي) ظهرت

Elongation at break (%)	Elastic Modulus (GPa)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
58.9	110	66	337

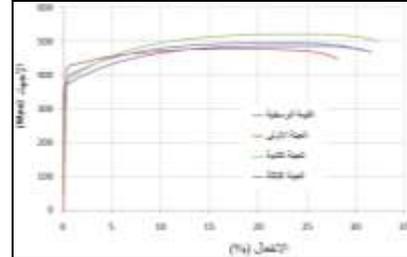
4.6 نتائج اختبارات الارتفاع الحدي للقبعة:

وفقاً لما ذكره بفقرة سابقة، تم إنتاج عينات اختبار الارتفاع الحدي للقبعة بمرجعية المعطيات المدرجة في الجدول رقم (1)، ومن ثم أخضعت تلك العينات للاختبار باستعمال العُدّة المبيّنة في الشكل رقم (6)، وخلال ذلك تم لحظ مسألتين مركزيتين مكونات العُدّة المستعملة مع بعضها البعض وتزبيّت المشكل والعيّنات بشكل جيد ومتكرر، حيث حُصّلت قيم قوى المشكل وانتقالاته الموافقة بالزمن الحقيقي، وتُقدّم الأشكال (11) و(12) و(13) المنحنيات البيانية التي تعكس النتائج المستخلصة لكل عينة أخضعت للاختبار، بالإضافة لتقديمها لوسطي النتائج المستخلصة لكل خليطة من الخلائط الثلاثة المعتمدة. أما فيما يتعلق بقيم متوسطات الثوابت التي يمكن استنتاجها من المنحنيات البيانية أعلاه فيقدمها الجدول رقم (11)، والتي يؤكد شبه التطابق القائم بها بين ثوابت الخليطتين AISI 429 و CuZn30 على أن إمكانية استبدال الخليطتين كلاً بالأخرى قائمة بتطبيقات السحب العميق، وذلك بغض النظر عن الاختلافات التي سُجّلت بقيم الثوابت المستنتجة من منحنيات الإجهاد-انفعال الخاصة بالخليطتين، وفقاً لما تقدمه الجداول (8) و (10).

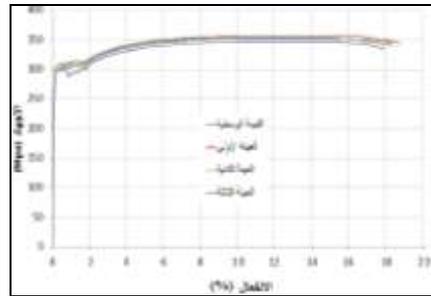


الشكل (11) نتائج اختبارات التشكيل لـ AISI 429

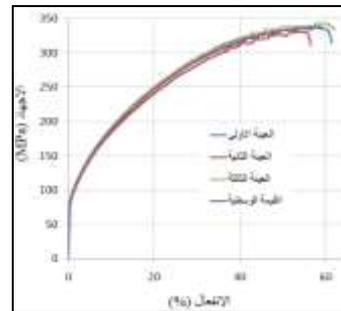
صحتها من خلال مقارنتها مع القيم المرجعية المكافئة، وفقاً لما تقدمه المراجع المعنية.



الشكل (8) نتائج اختبارات الشد لعينات AISI429



الشكل (9) نتائج اختبارات الشد لعينات C10



الشكل (10) نتائج اختبارات الشد لعينات CuZn30

الجدول (8) ثوابت الشد الخاصة بالخليطة AISI429

Elongation at break (%)	Elastic Modulus (GPa)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
31.4	202.4	355	495

الجدول (9) ثوابت الشد الخاصة بالخليطة C10

Elongation at break (%)	Elastic Modulus (GPa)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
19	201.6	300.2	351.9

الجدول (10) ثوابت الشد الخاصة بالخليطة CuZn30

CuZn30	C10	AISI 429	الخليطة
1.69	2.165	1.94	نسبة السحب الحدية

ii. حساب نسب حد الخضوع إلى حد المتانة:

تم حساب هذه النسبة بمرجعية القيم المدرجة بالجدول (8) و (9) و (10)، ويقدم الجدول رقم (13) النتائج المستخلصة.

الجدول (13) نسب حد الخضوع إلى حد المتانة

CuZn30	C10	AISI 429	الخليطة
0.195	0.85	0.71	النسبة المحسوبة

iii. حساب أس ومعامل التقسية الانفعالية:

يُمثل الجزء اللاخطي (أي مجال اللدونة) العائد لمنحني

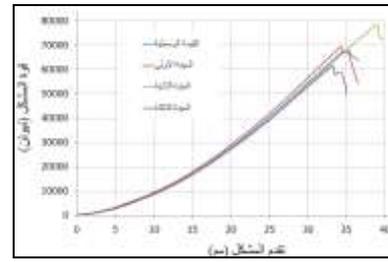
إجهاد-انفعال ما باستعمال المعادلة التالية

$$S = K\varepsilon^n$$

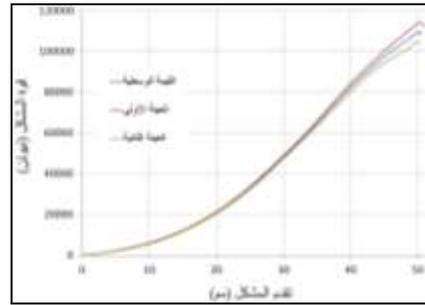
والتي يحسب ثابتها K و n من خلال الإلباس الرياضي Curve fitting لقيم الإجهاد والانفعال الخاصة بذلك الجزء، على أن تُقِيم جودة الإلباس المحقق بمرجعية الجذر التربيعي R² للنتائج، وبتنفيذ ما ذكر أعلاه على منحنيات الإجهاد-انفعال العائدة للخلائط الثلاثة المختبرة تم استنتاج القيم المدرجة في الجدول (14)، والتي تؤكد على أن دقة النتائج المستخلصة لصالح الخليطة CuZn30 أعلى بشكل ملحوظ من القيمتين المكافئتين العائدتين للخليطتين AISI 429 و C10 (بناءً على قيم الجذر التربيعي المستنتجة)، وبذلك أُخِذَ بقيمتي الثابتين K و n العائدتين لخليطة النحاس وبالمقابل لم يؤخذ بقيمتي الثابتين K و n العائدتين للخليطة AISI 429 وللخليطة C10.

الجدول (14) القيم المحسوبة لأس ومعامل التقسية الانفعالية للخلائط المختبرة

CuZn30	C10	AISI 429	الخليطة
0.338	0.055	0.065	n
88.93	380	403	K (MPa)
0.988	0.81	0.836	R ²



الشكل (12) نتائج اختبارات التشكيل لـ C10



الشكل (13) نتائج اختبارات التشكيل لـ CuZn30

الجدول (11) وسطي قيم الثوابت المستخلصة من اختبارات الارتفاع الحدي للقبعة

CuZn30	C10	AISI 429	الخليطة
109394	67602	117988	F _u (N)
50.12	36.51	49.02	الارتفاع الحدي للقبعة (mm)

7 معالجة نتائج اختبارات الشد والارتفاع الحدي للقبعة:

على اعتبار أن النتائج المدرجة في الأشكال من (8) وحتى (13) وفي الجداول من (8) وحتى (11) تعكس السلوك الميكانيكي الحقيقي للخلائط الثلاثة التي أخضعت للاختبارات فالإمكانية قائمة للاستفادة من تلك النتائج وفقاً للتالي:

i. حساب نسب السحب الحدية:

على اعتبار أن القيم الأعظمية المطبقة خلال اختبار الارتفاع الحدي للقبعة والقيم الموافقة لحدود متانة الخلائط المختبرة أصبحت متاحة فالإمكانية قائمة لحساب نسب السحب الحدية لتلك الخلائط، وذلك باستعمال المعادلة رقم (1)، ويقدم الجدول رقم (12) النتائج المستخلصة.

الجدول (12) نسب السحب الحدية للخلائط

8 الاستنتاجات:

بناءً على نتائج الدراسات التي عرضت وبناءً على النقاشات التي قدمت ضمن سياق هذه الورقة يمكن استنتاج ما يلي:

1- الإمكانية قائمة للتعامل مع نتائج اختبارات الارتفاع الحدي للقبعة باعتبارها مرجعية فعالة لمقارنة سلوك الخلائط المعدنية، من حيث قابليتها للسحب العميق، وذلك بهدف البحث بإمكانية استبدال الخلائط المستعملة بأخرى متاحة، بدافع تخفيض تكاليف الإنتاج، أو متابعتها في حال انعدام إمكانية الحصول على الخليطة الأساسية المستعملة.

2- وفقاً للمراجع العلمية المختصة، يمكن الحكم على قابليتي التشكيل والسحب العميق لصفائح الخلائط المعدنية من خلال ثوابت متعددة تُحصّل قيمها من اختبارات الشد واختبارات الارتفاع الحدي للقبعة. وضمن ذلك السياق، ينظر لثابتي أس التقسية الانفعالية (n) ومعامل التقسية الانفعالية (k) باعتبارهما معيارين فعالين لتقييم قابلية التشكيل، وبالمقابل ينظر لثابت نسبة السحب الحدية باعتباره معيار مناسب لتقييم قابلية السحب العميق.

3- تتمثل المشكلة الأساسية التي تحد من إمكانية الحكم على قابليتي التشكيل والسحب العميق من خلال القيم المميزة لثوابت مستنتجة من اختبارات الشد واختبارات الارتفاع الحدي للقبعة بمحدودية القيم المرجعية المتاحة للعموم. وبالتالي، فالمفاضلة الفعلية بين قابليتي التشكيل والسحب العميق لأنواع محددة من الخلائط المعدنية تستدعي القيام بتجارب كافية ومعبرة.

9 التوصيات:

على الرغم من النتائج الإيجابية التي تم التوصل لها ضمن سياق العمل بالبحث الحالي فالحاجة بقيت قائمة لتنفيذ أعمال بحثية متممة، وضمن ذلك السياق يوصى بالعمل على ما يلي:

1- البحث بإمكانية تنفيذ أعمال السحب العميق المعتمدة لدى الشركة المحلية المعنية على عينات من الخليطة AISI 429، ذلك أن إجراء السحب المعتمد متعدد المراحل ويشتمل على معالجات حرارية بينية بين كل مرحلتين سحب متتاليتين، وهو أمر لم يلحظه العمل بالبحث الحالي.

2- البحث بإمكانية تطوير نموذج عددي قادر على محاكاة إجراء السحب العميق متعدد المراحل ومشمتمل على معالجات حرارية بينية بين كل مرحلتين سحب متتاليتين.

3- البحث بإمكانية تحسين السلوك الميكانيكي للخليطة AISI 429، باعتبارها مرشحة لتستعمل كبديل عن الخليطة CuZn30، من خلال إخضاعها لمعالجات حرارية و/أو ميكانيكية، ذلك أن المراجع العلمية المعنية تؤكد على العلاقة القوية القائمة بين ذلك السلوك والمعالجات المسبقة المطبقة على الخليطة.

4- البحث بجدوى استعمال خلائط فولاذية أخرى، من عائلة الفولاذ الفريتي المقاوم للصدأ، بالمقارنة مع جدوى استخدام الخليطة AISI429 باعتبارها بديل محتمل عن الخليطة CuZn30، ذلك أن تلك العائلة تشتمل على خلائط متعددة ومتفاوتة بسلوكها الميكانيكي.

5- عمليات التشكيل العميق العائدة لإجراء السحب المطبق لدى الشركة المحلية المعنية تنفذ بمُشكّلات تتحرك بسرعات عالية، وهو أمر لم يلحظ باختبارات المشكل الكروي المنفذة ضمن سياق العمل بالبحث الحالي، وبالتالي يوصى بالعمل على بحث علمي هدفه دراسة تأثير سرعة التحميل على نتائج السحب العميق لمنتج الشركة المحلية المعنية.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

References

1. ASM International, ASTM E643 (1984) (Reapproved2000). **Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material**. ASM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
2. Du Toit, Madeleine and Steyn, Herman G. (2012). **Comparing the Formability of AISI 304 and AISI 202 Stainless Steel**. Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 21(7).
3. N.V. Anbarasi. (2008) **Comparison of Formability of Sheet Metals of Different Grades Used in Automotive Industries**. Journal of Physical Sciences, Vol. 12, P.P 133-139.
4. R.Uday Kumar. (2021). **Evaluation of Deep Drawability Characteristics of Mild Steel and Brass**. International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 8, Issue 4.
5. J. Sahu and S. Mishra. (2016). **Limit Dome Height Test of Very Thin Brass Sheet Considering the Scaling Effect**. Journal of Physics: Conference Series 734- 032114.
6. [6] Monica Dore, Rodrigo Arturo Ramos, Payam Matin and Monai Stinnett. (2017). **Learning Experience in Designing a Dome Test Setup for Sheet Metal Formability Characterization**. American Society for Engineering Education.
7. C. MERiC, N. Sinan KOKSAL and Bekir KARLIK. (1997). **An Investigation of Deep Drawing of Low Carbon Steel Sheets and Applications in Artificial Neural Networks**. Mathematical & Computational Applications, Vol. 2, No. 3, pp. 119-125.
8. Y. Abe, T. Ohmi, K. Mori and T. Masuda. (2014). **Improvement of Formability in Deep Drawing of Ultra-High Strength Steel Sheets by Coating of Die**. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214, Issue 9, Pages 1838-1843.
9. Vukota Boljanovic. (2004). **Sheet Metal Forming Processes and Die Design**. Industrial Press, New York, ISBN 0-83 1 1-3 182-9.
10. M. Karali. (2011). **Examination of the Strength and Ductility of AA-1050 Material Shaped with the Multi-Stage Deep Drawing Method**. Archives of Metallurgy and Materials, No 2.
11. Emil Evin, Naqib Daneshjo, Albert Mares, Miroslav Tomas and K. Petroveikova. (2021). **Experimental Assessment of Friction Coefficient in Deep Drawing and its Verification by Numerical Simulation**. Applied Sciences, 11, 2756.
12. Adnan I. O. Zaid. **Deep Drawing Mechanism, Parameters, Defects and Recent Results; State of the Art**. 14th International Symposium on Advanced Materials, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 146.
13. Ji You Yoon. (2012). **Evaluation of Formability and Determination of Flow Stress Curve of Sheet Materials with Dome Test**. Master thesis, Graduate School of the Ohio State University.
14. **Sheet Metal Forming Processes**. Chapter 8, chapter_8_ie252_V2.pdf.
15. **S. Chaudhuri. Heat Treatment of Stainless Steel. National Metallurgical Laboratory, Jamshedpur 831007, <https://eprints.nmlindia.org/5764/1/H1-H12.PDF>**.