



College of Engineering

ISSN: 1813-162X (Print) ; 2312-7589 (Online)

Tikrit Journal of Engineering Sciences

available online at: <http://www.tj-es.com>

TJES
Tikrit Journal of
Engineering Sciences

Al-Qahwaji TTO, Al-Jobory YAA. Experimental and Numerical Study on the Effect of Strain Hardening Characteristics on Curved Flaring Process of Pure Copper and Brass. *Tikrit Journal of Engineering Sciences* 2020; 27(4): 39- 47.

Tahseen T.O Al-Qahwaji *

Yasir A.A Al-Jobory

Mechanical Department/ Engineering
College/Tikrit University/ Tikrit, Iraq

Experimental and Numerical Study on the Effect of Strain Hardening Characteristics on Curved Flaring Process of Pure Copper and Brass

A B S T R A C T

Tikrit Journal of Engineering Sciences Tikrit Journal of Engineering Sciences Tikrit Journal of Engineering Sciences

Keywords:

Metal forming, Flaring Process, Strain-Hardening, Pure Copper, ANSYS.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 07 Dec. 2019
Accepted 10 May 2020
Available online 01 July 2020

An experimental and numerical study of tube curved flaring process was conducted to investigate the effect of strain hardening characteristic of material on the process using two metals that differ in strain hardening characteristic which are pure copper and brass (70-30) by using curved dies which have curvature ratio ($\frac{r}{r_d}$) of ($\frac{r}{r_d}=6$) and ($\frac{r}{r_d}=12$) and base radius of die ($r_d=24\text{mm}$) and (r) is the radius of curvature. The experimental part was included experiments on specimens with an outer diameter of (39 mm) and a wall thickness of (2 mm). The expansion process was carried out for different expansion ratios that it was reached to about (32%). The results were showed that the strain hardening exponent of pure Copper more than Brass (70-30) and its value reached (0.54) for pure Copper and (0.49) for Brass (70-30). However, this paper concluded a study of the effect of strain hardening characteristics on the curved flaring process. It was found that the increasing of flaring ratio and relative axial displacement of the die through the specimen are caused increase in the relative forming stress, and its value is significant in expanded tubes with high strain hardening characteristic and it is about (0.77) in Brass and (1.42) in Copper. It also found that a little difference in the deformation of specimens' geometry which means that the deformation is not affected by the strain hardening characteristic and there is no significant difference in strain distribution. The study also included a numerical simulation using the finite element ANSYS program. The results obtained are compared with experimental data and showed good agreement.

© 2019 TJES, College of Engineering, Tikrit University

DOI: <http://dx.doi.org/10.25130/tjes.27.4.05>

دراسة عملية وعددية لتأثير خاصية التقسية الانفعالية على عملية التوسيع المقوسة لمادة النحاس النقي والبراص

تحسين طه عثمان القهوجي / قسم الهندسة الميكانيكية/ كلية الهندسة/ جامعة تكريت/ العراق
وباسر احمد عبدالله الجبوري / قسم الهندسة الميكانيكية/ كلية الهندسة/ جامعة تكريت/ العراق

الخلاصة

اجريت دراسة تجريبية وعددية لعملية التوسيع المقوسة على البارد لمعرفة تأثير خاصية التقسية الانفعالية للمادة على هذه العملية. وذلك باستخدام مادتين مختلفتين في خاصية التقسية الانفعالية هما النحاس النقي والبراص (70-30) مع قالبين مقوسين لهما نسبة تقوس ($\frac{r}{r_d}$) مختلفة تساوي ($\frac{r}{r_d}=6$) و ($\frac{r}{r_d}=12$) حيث ان نصف قطر قاعدة القالب ($r_d=24\text{mm}$) و (r) يمثل نصف قطر تقوس القالب. تضمن الجانب التجريبي اجراء تجارب على عينات بقطر خارجي مقداره (39) mm وسمك جدار ثابت بلغ (2) mm واجريت عملية التوسيع لنسب توسيع مختلفة تصل إلى (32%) ووجد ان ثابت التقسية

* Corresponding author: E-mail: tahseentaha@tu.edu.iq

الانفعالية للنحاس النقي اكبر من البراص حيث بلغت قيمته (0.54) للنحاس النقي و(0.49) للبراص. وتمت دراسة تأثير خاصية التقسية الانفعالية على عملية التوسيع المقوسة فوجد ان زيادة نسبة التوسيع والإزاحة المحورية النسبية للقالب داخل العينة تزيد من إجهاد التشكيل النسبي وإن مقدار إجهاد التشكيل النسبي يكون اكبر في المواد التي لها خاصية تقسية انفعالية عالية حيث يصل الى قيمة مقدارها (0.77) في البراص و(1.42) في النحاس، ووجد اختلاف قليل في التشوهات الحاصلة في شكل العينات مما يعني عدم تأثر طبيعة التشوه باختلاف خاصية التقسية الانفعالية للمواد وجد أيضاً أن هذه الخاصية ليس لها تأثير واضح على نمط توزيع الانفعالات. أما الجانب العددي تضمن بناء نموذج محاكاة عددية لعملية التوسيع باستخدام برنامج تحليل العناصر المحددة (ANSYS) وتم إجراء مقارنة بين النتائج التجريبية والعددية، حيث أظهرت المقارنة توافقاً جيداً بين النتائج.

الكلمات الدالة: تشكيل المعادن، التوسيع المقوسة، النحاس والبراص النقي، التقسية الانفعالية، ANSYS.

1. المقدمة

عملية التوسيع هي إحدى عمليات التشكيل الميكانيكي التي تجرى على نهايات الأنابيب المعدنية والتي يتم فيها دفع قالب تشكيل مقوس ذو نصف قطر تقوس (ρ) داخل العينة الأنبوبية ذات متوسط نصف قطر (r_{om}) لتوسيعها بالاتجاه القطري إلى متوسط نصف قطر (r_{fm}) بإزاحة محورية مقدارها (S) وكما موضح في الشكل (1)، وذلك للحصول على نسبة توسيع معينة مقدارها (R)، وتعرف نسبة التوسيع بأنها حاصل قسمة الفرق بين متوسط نصف قطر الأنبوب في النهاية المتوسعة ومتوسط نصف قطر الأنبوب الابتدائي على متوسط نصف قطر الأنبوب الابتدائي. إن عملية التوسيع التي تجرى على البارد تتأثر بعدة عوامل منها الشكل الهندسي للعينات والقوالب وظروف الاحتكاك والخواص الميكانيكية لمادة العينات [1].

أما تطبيقات عملية التوسيع فهي كثيرة ومتنوعة إذ انها تستخدم كوسيلة لتخميد الطاقة وامتصاص الصدمة في المركبات لتقليل الخطر الناتج عن حوادث الاصطدام. كما تستخدم في الأنظمة الهوائية والهيدروليكية وأنظمة العوادم وشبكة أنابيب الوقود في المحركات وصناعة المبادلات الحرارية وإنتاج الوصلات الرابطة بين الأجزاء الأنبوبية، كما يمكن أن تستخدم في الهياكل الإنشائية لقدرتها على مقاومة الأحمال المحورية الكبيرة بمادة أقل من مادة القضيب المسلح. وفي تطبيقات أبار النفط والغاز حيث دخلت هذه العملية في توسيع الأنابيب الموجودة داخل الأبار النفطية وأسهمت في حل العديد من المشاكل التي تواجه العاملين في هذا المجال وتحسين عمليات الحفر [2 - 4].

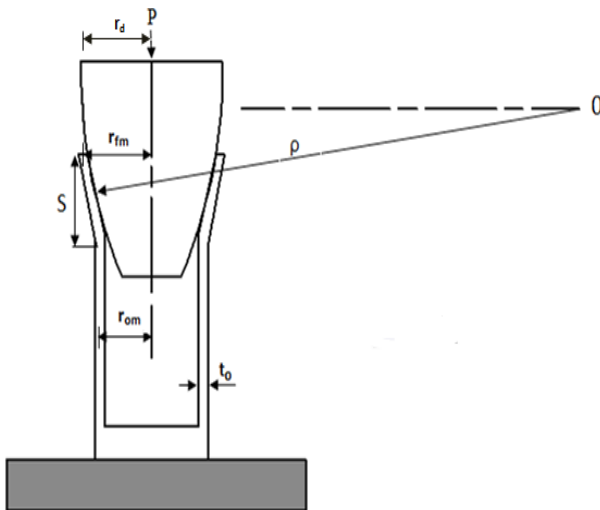
أما بخصوص البحوث والدراسات السابقة حول هذه العملية فقد قام Liu and Qiu [5] بتطوير دراسة تحليلية استناداً لمبدأ حفظ الطاقة لعملية التوسيع باستخدام قالب مخروطية وباقتراض مادة جاسئة - لدنة (-Rigid perfectly plastic) وتوصلا إلى إيجاد علاقة رياضية للتنبؤ بمقدار القوة الضاغطة ونصف قطر الأنبوب المتوسع إضافة إلى تأثير التقسية الانفعالية والاحتكاك وتحققاً من صحة هذا النموذج بالمقارنة مع بحوث عملية وعددية سابقة فوجد أن قيمة القوة الضاغطة ونصف قطر الأنبوب المتوسع أكثر دقة ولزوايا القالب الصغيرة إلا أن نصف قطر الأنبوب المتوسع كان أقل حساسية لخاصية المادة وطبيعة الاحتكاك ولكنه يعتمد على الشكل الهندسي للأنبوب وقالب التشكيل.

وقام Fung-Huei Yeh [6] ببناء نموذج تحليلي للتنبؤ بعلاقات إزاحة القالب المخروطي ونسبة التوسيع وسمك الأنبوب وحد التوسيع (أقصى نسبة توسيع) بالاعتماد على معادلات اللانضغاطية ومعادلة ليفي - ميسر والشكل الهندسي للقالب ومعادلات الاتزان ومعيار تريسكا وأشار أيضاً إلى تأثير التقسية الانفعالية للمادة باستخدام ثلاث مواد تختلف في قيمة التقسية الانفعالية فأظهرت خاصية التقسية الانفعالية تأثيراً قليلاً على نسبة السمك (t_f/t_0) وتأثيراً واضحاً على القوة اللازمة للتوسيع. قام Al-Qahwaji and Mohammed [7] بدراسة تجريبية لعلاقة الإجهاد الاسمي مع نسبة التوسيع وذلك باستخدام ثلاثة قوالب مخروطية ذات زوايا نصفية ($20^\circ, 15^\circ, 10^\circ$) لتوسيع أنابيب مصنوعة من مادتي الألمنيوم و الفولاذ الكربوني ذات قطر داخلي (30) mm وسمكين مختلفين mm (2, 1.5)، واستخدام مزيج من مسحوق الكرافيت مع الزيت المعدني وبنسبة (1/2) لتقليل الاحتكاك بين الأنبوب والقالب ووجد بان الإجهاد الاسمي يزداد بزيادة نسبة التوسيع. وقاما أيضاً بمقارنة هذه العلاقة مع نموذج تحليلي يتضمن خاصية التقسية الانفعالية لمادة العينة ووجدا توافقاً مقبولاً بين الجانبين وذلك عند استخدام $\mu = 0.025$. وقام [8] بتطوير نموذج رياضي لدراسة تأثير التقسية الانفعالية على عملية التوسيع فتوصلا إلى علاقة تربط بين إجهاد التشكيل النسبي ومعامل الاحتكاك وخاصية التقسية الانفعالية. حيث تتضمن هذه العلاقة معامل الاحتكاك وثوابت السلوك الميكانيكي لمادة الأنبوب المتمثلة بإجهاد الخضوع وخاصية التقسية. ومن أجل التحقق من صحة هذا النموذج قام الباحثان بإجراء تجارب عملية

باستخدام ثلاثة قوالب مخروطية ذات زوايا نصفية ($20^\circ, 15^\circ, 10^\circ$) و عينات أنبوبية مصنوعة من مادة البراص بحالتها الملدنة والمستلمة بقطر داخلي (34) mm وسمك (1.5) mm واستخدام مزيج من مسحوق الكرافيت مع الزيت المعدني كمزيت للعملية. توصل الباحثان إلى أن الإجهاد النسبي يزداد بزيادة نسبة التوسيع وتكون قيمته بالحالة المستلمة أعلى منها في الحالة الملدنة وإن معامل الاحتكاك يزداد مع زيادة الزاوية النصفية للقالب ومع كون الحالة مستلمة. وأشاروا أيضاً إلى أن ظروف الاحتكاك تتغير بصورة عامة بتغير الزاوية النصفية للقالب المخروطي وتغير حالة المادة من مستلمة إلى ملدنة.

ولدراسة تأثير الشكل الهندسي للقالب على عملية التوسيع واختيار الشكل الأمثل فقد قام Omar S. Al-Abri et al [9] بدراسة عددية وعملية باستخدام قوالب مختلفة (نصف كروي ومقوس وبيضاوي ومخروطي ذو قاعدة مقوسة) وتم اختيار الشكل الهندسي الأمثل لعملية التوسيع بالاعتماد على أربعة معايير رئيسية (قوة التوسيع والنقصان بالسمك والتقشير بالطول وضغط التماس). وجدوا ان الشكل الهندسي الأمثل هو المخروطي ذي القاعدة المقوسة لكونه يعطي أقل مقدار القوة اللازمة للتوسيع والنقصان بالسمك وزيادة التقشير بالطول [10]. قامت Yusra Abdullah [11] بدراسة نظرية باستخدام طريقة العناصر المحددة لعملية التوسيع باستخدام قوالب دائرية التقوس ذات أنصاف أقطار تقوس mm (432, 144, 24) و عينات أنبوبية ذات سمك ابتدائي mm (3, 2, 1.5) إضافة إلى إجراء تحليل نظري لاشتقاق المعادلة التفاضلية الحاكمة لعملية التوسيع باستخدام قالب نصف كروي. وتوصلت الباحثة إلى إن إجهاد التشكيل يزداد بزيادة نسبة التوسيع وإن معدل هذه العلاقة يزداد بنقصان نصف قطر التقوس عند قيمة معينة لنسبة التوسيع إضافة إلى عدم تأثر هذه العلاقة بتغير سمك جدار العينة.

ومن خلال مراجعة البحوث السابقة لوحظ عدم التطرق إلى تأثير خاصية التقسية الانفعالية على عملية التوسيع المقوسة بشكل مباشر، لذا كان الهدف من البحث الحالي هو دراسة عملية لتأثير خاصية التقسية الانفعالية على عملية التوسيع باستخدام قوالب مقوسة باستخدام مادتين مختلفتين في خاصية التقسية الانفعالية مع بناء نموذج عددي لمحاكاة العملية باستخدام برنامج ANSYS وإجراء المقارنة بين نتائج الجانبين العملي والعددي.



شكل 1. يبين متغيرات عملية التوسيع المقوسة

2. الجانب العملي

تضمن الجانب العملي تصنيع قالب التشكيل المقوسين من فولاذ متوسط الكربون وهو فولاذ مناسب لعملية التشكيل على البارد إذ تم تصنيع

قيمة السمك الأصلي (t_0) من نصف قيمة القطر الخارجي المقاس وذلك لحساب الانفعالات المحيطية حسب المعادلة التالية :

$$\epsilon_{\theta} = \ln \frac{r_m}{r_{om}} \quad (1)$$

أخذت شريحة من المقطع الطولي للعينات المتوسعة لتسهيل عملية قياس السمك عند كل خدش (t) بواسطة المايكرومتر وذلك لغرض حساب الانفعالات السمكية (ϵ_r) وحسب المعادلة الآتية:

$$\epsilon_r = \ln \frac{L}{L_0} \quad (2)$$

يمكن حساب الانفعالات الطولية باستخدام مبدأ ثبوت الحجم (Volume Constancy) خلال التشوه اللدن بواسطة المعادلة التالية:

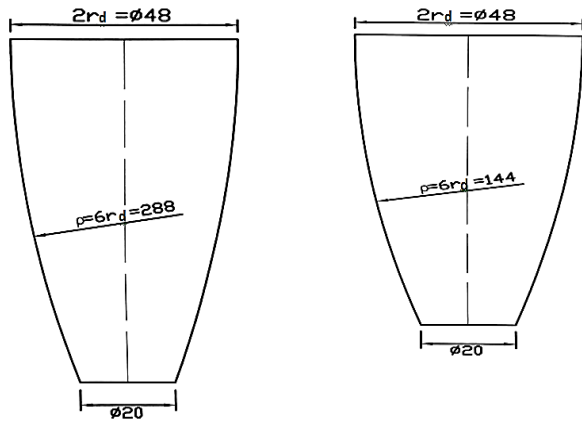
$$\epsilon_z = -(\epsilon_{\theta} + \epsilon_r) \quad (3)$$

أجريت تجارب الشد لعينة مصنوعة من النحاس النقي وأخرى من البراص باستخدام جهاز (United SHFM) ذو سعة (KN600) وتم الحصول على العلاقة البيانية بين الإجهاد الحقيقي والانفعال الحقيقي للمادتين وكما موضح بالشكل (6).

ومن أجل إبراز خاصية التقسية الانفعالية للمادتين تم تحويل منحني الإجهاد الحقيقي-الانفعال الحقيقي باستخدام تعبير لودويك المبسط $\sigma = k \epsilon^n$ باخذ اللوغارتم الطبيعي للاجهاد الحقيقي والانفعال الحقيقي في الجزء اللدن الذي يحصل فيه الاصلاد الانفعالي لتصبح المعادلة كالآتي :

$$\ln \sigma = n \ln \epsilon + \ln k \quad (4)$$

وباستخدام الإحداثيات اللوغارتمية ترسم هذه الدالة بشكل خط مستقيم يكون ميله مساوي لقيمة ثابت التقسية الانفعالية (n) وتقاطع قيمة الانفعال الحقيقي التي تساوي (1) مع هذا الخط يمثل قيمة معامل مقاومة المادة K [14] وبالتالي وجد ان قيمة ثابت التقسية الانفعالية (n) تساوي 0.54 لمادة النحاس النقي و 0.49 لمادة البراص (30-70) أما معامل مقاومة المادة (k) يساوي 320 N/mm^2 للنحاس النقي و 896 N/mm^2 للبراص (30-70).



شكل 2. الشكل الهندسي للقوالب



شكل 3. اختبار التوسع

القالب الاول بنسبة تقوس تساوي ($\frac{P}{r_d} = 6$) والثاني بنسبة تقوس

($\frac{P}{r_d} = 12$) ، إذ وجد ان القوالب التي تكون بنسبة تقوس اقل من (6) يطغى

فيها تأثير الحناية على تأثير التقسية الانفعالية للمادة والقوالب التي تكون بنسبة تقوس اعلى من (12) يكون شكلها الى الشكل المخروطي لذلك وقع الاختيار على القالبين (6) و (12) حيث (ρ) نصف قطر

تقوس القالب و (r_d) نصف قطر قاعدة القالب ويساوي 24 mm). إن عملية تصنيع القوالب تمت باستخدام الخراطة المبرمجة CNC لتكون هذه القوالب مناسبة لحجم العينات وحمولات التشكيل اللازمة لعملية التوسيع.

ومن أجل رفع صلادة هذه القوالب أجريت لها عملية التصليد عن طريق تسخينها بالفرن إلى درجة حرارة 836 درجة مئوية والبقاء عند تلك الدرجة لمدة ساعة كاملة ومن ثم تخميدها بالماء وتبعث هذه العملية صقل وتنعيم للسطح الخارجي للقالب لإزالة الأكاسيد والحصول على نعومة سطحية جيدة [12]. الشكل (2) يوضح الشكل الهندسي للقوالب المستخدمة في عملية التوسيع. ومن أجل تحقيق هدف هذا البحث وهو دراسة تأثير خاصية التقسية

الانفعالية على التوسيع يتطلب ذلك اختيار مواد العينات الأنبوبية من مادة ذات تقسية انفعالية عالية نسبياً ومادة أخرى ذات تقسية انفعالية أقل لأجل

المقارنة بين المادتين مع كون هاتين المادتين متشابهتين في الخواص الميكانيكية الأخرى قدر الإمكان حيث تم اختيار مادة النحاس النقي كمادة ذات تقسية انفعالية عالية والبراص (30-70) كمادة ذات تقسية انفعالية أقل وهي سبيكة تتكون من 70% نحاس و 30% خارصين. أما بخصوص

تصنيع العينات فقد تم تصنيع عشر عينات من مادة البراص و عشر عينات من مادة النحاس النقي ويواقع خمس عينات لكل قالب وكانت جميع العينات بقطر داخلي يساوي 35 mm) وسمك جدار ثابت يساوي 2 mm (2) وبطول يساوي 100 mm). الشكل (3) يوضح الشكل الهندسي للعينة

المستخدمة في البحث. ومن أجل دراسة الخواص الميكانيكية للمادتين تم تصنيع عينات اختبار الشد من المحور الطولي لقضيبي النحاس والبراص وأجريت عملية التخمير الكامل لجميع العينات الأنبوبية إضافة إلى عينات اختبار الشد وذلك بوضعها جميعاً داخل الفرن ورفع درجة الحرارة إلى C°

700 والبقاء عند تلك الدرجة لمدة ساعة كاملة ثم تركت لتبرد داخل الفرن لحين الوصول إلى درجة حرارة الغرفة. تبعثها عملية الصقل والتنعيم لإزالة الأكاسيد دراسة المتبقية جراء المعاملة الحرارية وللحصول على سطوح

أكثر نعومة [8]. ولغرض التعرف على العينات بعد عملية التوسيع رقيمت بأرقام متسلسلة وضعت على النهاية المغلقة للعينة. ومن أجل قياس الانفعالات المحيطية والطولية تم إحداث خدوش محيطية خفيفة على طول العينة من الخارج وبمسافة 5 mm) بين خط وآخر ولكافة العينات. تم قياس الأقطار الداخلية والخارجية والطول والسمك ولكافة العينات قبل إجراء عملية التوسيع عليها [13]. أجريت اختبارات التوسيع على جهاز

الانضغاط (HOYTOM Di 922FL) وبسعة 170 kN) تم تنظيف جميع العينات بشكل جيد وتزييت الجدار الداخلي لها بمزيج من الكرافيت والزيت المعدني وبنسبة حجمية 2 كرافيت إلى 1 زيت معدني. إضافة إلى تزييت السطح الخارجي للقوالب بنفس المادة وذلك لتقليل الاحتكاك بين الجدار الداخلي للعينة والسطح الخارجي للقالب. قبل بدء اختبار التوسيع وضعت العينة على القاعدة المتحركة للجهاز ووضع القالب فوق العينة كما في الشكل (4). تم ضبط سرعة الجهاز خلال تجارب التوسيع عند 3 ملم / دقيقة ولجميع العينات ويمكن تلخيص إجراء التجارب العملية بالخطوات الآتية :

1- دفع خمس عينات من البراص داخل قالب ذو نسبة تقوس ($\frac{P}{r_d} = 6$) وبإزاحات مختلفة وقياس الحمل اللازم لإحداث نسبة توسيع معينة لنهاية العينة.

2- قياس متوسط نصف القطر عند النهاية المتوسعة (r_{fm}) لكل عينة باستخدام قدمة قياس رقمية (فيرنيه) وتم حساب نسبة التوسيع R حيث ان $R = \frac{r_{fm} - r_{om}}{r_{om}}$ وان r_{om} يمثل متوسط نصف القطر الأصلي.

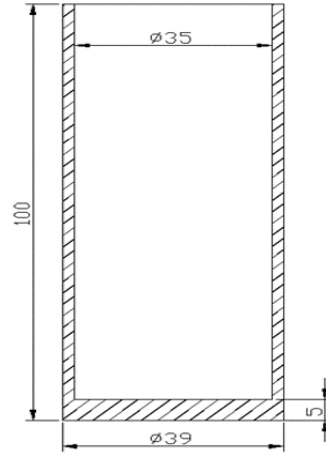
3- كررت الخطوات 1 و 2 لخمس عينات من البراص لكن باستخدام قالب ذو نصف قطر تقوس ($\frac{P}{r_d} = 12$)

4- كررت الخطوات من 1-3 لعينات النحاس وبنفس العدد السابق وباستخدام القالب ($\frac{P}{r_d} = 6$) و ($\frac{P}{r_d} = 12$)، علماً أن أقصى نسبة توسيع بلغت 32% للمادتين النحاس والبراص، والشكل (5) يبين

مراحل عملية التوسيع لمادتي النحاس والبراص. تم قياس قطر العينة الخارجي في مواقع الخدوش المذكورة آنفاً، ثم تم حساب متوسط نصف القطر (r_m) عند كل خدش بطرح نصف

$$\int_V \delta \varepsilon_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV - \int_{S_f} F_i \delta u_i dS_f + \int_V \delta \varepsilon_{ij} dV \lambda + \int_V \varepsilon_{ij} \delta \lambda dV = 0 \quad (5)$$

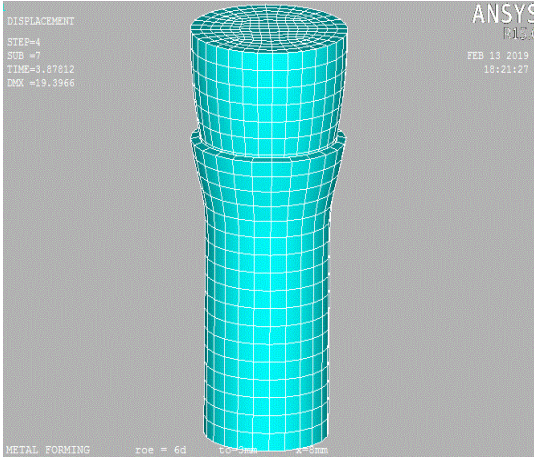
إذ إن $(\delta \varepsilon_{ij})$ تمثل الاجهاد المنحرف و (ε_{ij}) معدل الانفعال و (F_i) السحب (traction) المسلط على السطح (S_f) و (u_i) تمثل السرعة و (λ) مضروب لاكرانج. إن النموذج العددي الموضح بالشكل (7) يتكون من عينة أنبوبية وقالب تشكيل مقوس، إذ تم بناء النموذج الثلاثي الأبعاد بواسطة انشاء الشكل الهندسي للقالب والأنبوب وإدخال الخواص الميكانيكية للمواد ووضع الشروط الحدية المناسبة للعملية. إن مادة القالب تم اعتبارها مادة جاسئة غير قابلة للتشوه وتمثلت بالعنصر (Target 170) ومادة الأنبوب مادة قابلة للتشوه تم تمثيلها بالعنصر (Solid 186)، اعتبرت هذه المادة ذات سلوك لا خطي مرن- لدن وتعاني تشوهاً كبيراً (large strain) وإن المادة متماثلة الخواص (Isotropic material). أما بالنسبة لخواص المادة التي تم إدخالها البرنامج فهي موضحة بالجدول (1) ولمادتي النحاس والبراص وإن جميع هذه الخواص مأخوذة من النتائج العملية لاختبار الشد للمادتين. إن منطقة التماس الواقعة بين سطح القالب والجدار الداخلي للعينة الأنبوبية ذات أهمية كبيرة فهي لها دور كبير في التأثير على النتائج العددية. لذا يجب اختيارها بعناية واختيار العنصر المناسب لتمثيلها إذ اختير العنصر (Conata173) لتمثيل هذه المنطقة واعتبار الاحتكاك فيها نوع كولومب. وبسبب عدم إيجاد معامل الاحتكاك عملياً تم اعتماد قيم معاملات الاحتكاك التي حصل عليها [13] لنفس المواد وتحت نفس الظروف فوجد أن معامل احتكاك البراص $(\mu=0.035)$ والنحاس النقي $(\mu=0.045)$. بعد الانتهاء من بناء الشكل الهندسي للنموذج وخواص المواد المستخدمة من الضروري تحديد نقاط التقييد والأحمال والإزاحات ومن أجل المحاكاة الفعلية يتم تقييد حركة قالب التشكيل بجميع الاتجاهات وإعطاء العينة الأنبوبية حرية الحركة بجميع الاتجاهات.



شكل 4. الشكل الهندسي للعينة الأنبوبية



شكل 5. يبين مراحل التوسيع لعينات: أ- البراص ب- النحاس

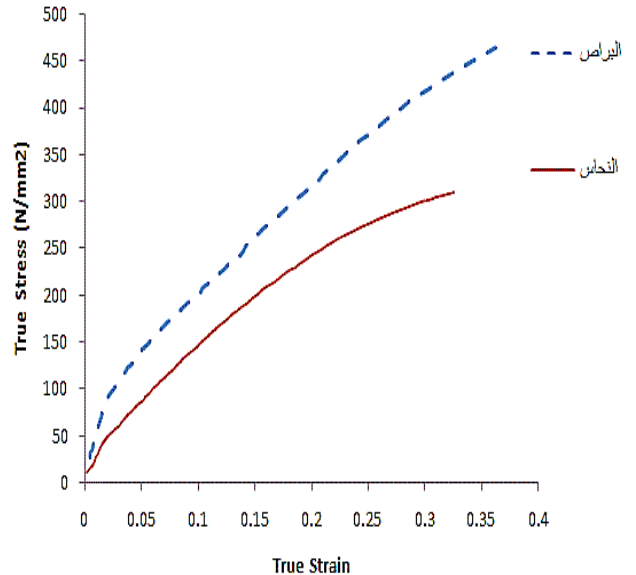


شكل 7. يبين نمذجة عملية التوسيع باستخدام برنامج ANSYS 4. النتائج والمناقشة

إن عملية توسيع الأنابيب باستخدام قوالب مقوسة عملية معقدة وتعتمد على عدة متغيرات منها الشكل الهندسي للعينات والقوالب وخواص مادة العينات وطبيعة الاحتكاك... الخ. حيث ركز هذا البحث على تأثير خاصية مادة العينات "التقسية الانفعالية" على عملية التوسيع وذلك باستخدام قوالب تشكيل مقوسة ومادتين ذات تقسية انفعالية مختلفة هما النحاس والبراص.

4.1 مناقشة النتائج العملية

يبين الشكل (8) العلاقة بين إجهاد التشكيل النسبي $(\frac{P}{A_0 Y_0})$ ونسبة التوسيع لمادتي النحاس والبراص وذلك عند استخدام قالب التوسيع ذي نسبة تقوس $(\frac{P}{r_d} = 6)$ ونسبة تقوس $(\frac{P}{r_d} = 12)$. إذ تم قياس نسبة التوسيع لكل عينة في نهاية الحافة المتوسعة بحيث تعطي كل عينة نسبة توسيع واحدة وبواقع (5) عينات لمادة النحاس و (5) عينات لمادة البراص لكل قالب. وتم في كل منحنى من هذه المنحنيات اختيار قيمة إجهاد التشكيل النسبي اللازم للوصول إلى نسبة التوسيع المطلوبة في كل عينة، إذ تم الحصول على نسبة توسيع عالية تصل إلى (32%) عند اجهاد تشكيل نسبي (2.5). يظهر الشكلان ميلاً متزايداً ابتداءً من نقطة الأصل حيث يزداد إجهاد التشكيل النسبي بزيادة نسبة التوسيع ويكون منحنى النحاس أعلى من البراص ولكلا القالبين



شكل 6. العلاقة بين الاجهاد الحقيقي والانفعال الحقيقي

3. التحليل العددي

يتضمن التحليل العددي بناء نموذج عددي باستخدام برنامج (ANSYS R15) الذي يعتمد على طريقة العناصر المحددة وذلك على افتراض أن المادة لا انضغاطية لدنة-لزجة والمعادلة الحاكمة للعناصر المحددة المتعلقة بعملية تشكيل المعادن يمكن أن تكتب بالصيغة الآتية [15]:

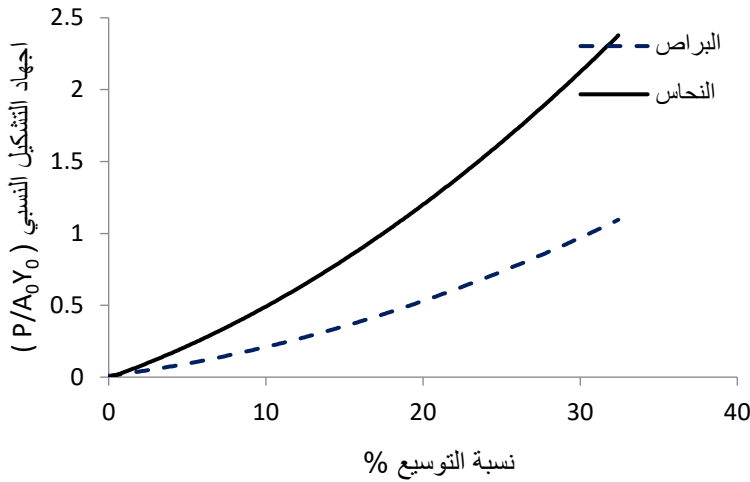
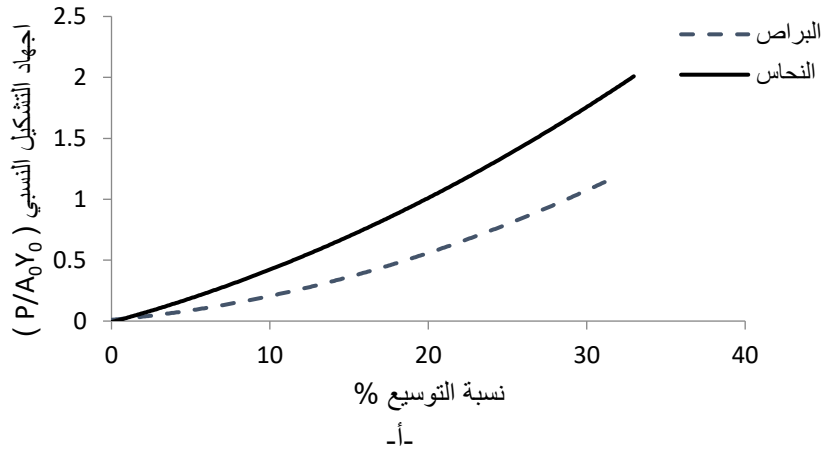
إلى كون مساحة التلامس بين سطح القالب والجدار الداخلي للعينة في القالب ذي نسبة تقوس ($\frac{P}{r_d} = 12$) أكبر من مساحة التلامس في القالب ذي نسبة تقوس ($\frac{P}{r_d} = 6$) عند نسبة توسيع معينة.

ويمكن أن يعزى ذلك إلى أن التقسية الانفعالية لمادة النحاس أكبر من البراص. ويلاحظ أيضاً أن المنحنيات في القالب ذي نسبة تقوس ($\frac{P}{r_d} = 12$) تكون أعلى من منحنيات القالب ذي نسبة تقوس ($\frac{P}{r_d} = 6$) ويعود ذلك

جدول 1.

الخواص الميكانيكية للنحاس والبراص

الخواص	البراص	النحاس
معامل المرونة (E)	97 GPa	110 GPa
إجهاد الخضوع Y_0	89.29 MPa	46.22 MPa
إجهاد الشد الأقصى σ_{ii}	326.66 MPa	220.65 MPa
نسبة بواسون ν	0.34	0.34
الكثافة	8.53 g/cm ³	8.93 g/cm ³
الاستطالة (%EL)	58	62
ثابت التقسية الانفعالية (n)	0.49	0.54
معامل المقاومة (k)	815.66 MPa	735.09 MPa
معامل الاحتكاك (μ)	0.035	0.045



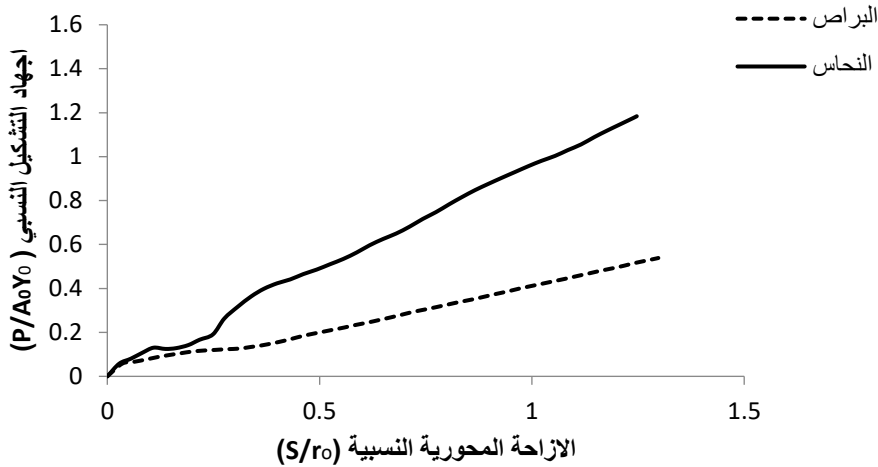
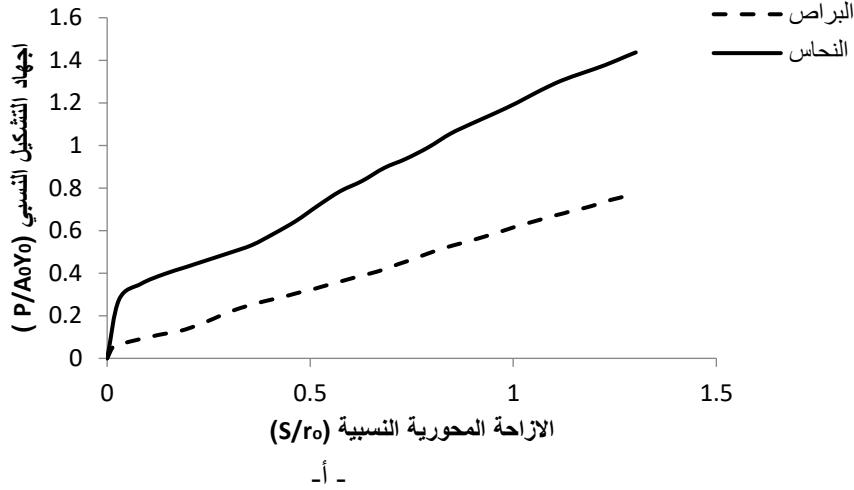
شكل 8. علاقة اجهاد التشكيل النسبي مع نسبة التوسيع للمادتين البراص والنحاس وللقالبين أ- ($\frac{P}{r_d} = 6$) ب- ($\frac{P}{r_d} = 12$)

وهي ناتجة عن تغير مفاجئ في اتجاه انسياب المعدن. إن هذه الطفرة تكون حدثها ضمن نفس المادة أعلى في القالب ذي نسبة تقوس ($\frac{P}{r_d} = 6$) من القالب ذي نسبة تقوس ($\frac{P}{r_d} = 12$) ويمكن أن يعزى سبب ذلك إلى أن التغير في اتجاه انسياب المعدن خلال تغلغل القالب داخل العينة الأنبوبية يكون أقل حدة في القالب ذي نسبة تقوس ($\frac{P}{r_d} = 12$) مما في القالب ذي نسبة تقوس ($\frac{P}{r_d} = 6$). وفي نهاية هذه المرحلة يحصل هبوط بالمنحني نتيجة تغير اتجاه قوة التماس بين جدار العينة والقالب. أما المرحلة الثانية: التي تمثل الجزء الرئيسي من المنحني تكون ذات ميل مترابيد، وعموماً يكون هذا المنحني في القالب ذي نسبة تقوس ($\frac{P}{r_d} = 6$)

من اجل بيان تأثير خاصية التقسية الانفعالية على العلاقة بين إجهاد التشكيل النسبي والإزاحة المحورية النسبية (S/r_{om}) للقالب داخل العينة رسمت العلاقة الموضحة بالشكل (9) وذلك عند إزاحة نسبية مقدارها (1.3) للقالبين ($\frac{P}{r_d} = 6$) و ($\frac{P}{r_d} = 12$) حيث يبين الشكل إن هذه المنحنيات تتشابه جميعها بأنها تتألف من مرحلتين، الأولى: وهي مرحلة قصيرة نسبياً تبدأ بخط مستقيم يمثل حالة التشوه المرن لطرف الأنبوب حيث يمكن أن يعود الأنبوب إلى وضعه الأصلي بعد زوال تأثير القوة المسلطة على القالب، يبدأ الأنبوب بالتشوه اللدن بعد الوصول إلى نقطة الخضوع وهذا ما أشار إليه الباحث [15]، حيث تبدأ مرحلة دخول القالب خلال العينة يكون فيها المنحني على شكل طفرة أو قمة تمثل ارتفاعاً حاداً في قيمة إجهاد التشكيل النسبي بسبب تأثيرات الحناية في طرف الأنبوب عند بدء عملية التوسيع

قيمه سالبة، أما الانفعال الطولي يكون على العموم انفعال تقلص. ان قيم هذه الانفعالات الثلاثة تقل مع الابتعاد عن النهاية المتوسعة للعينة، فالانفعال المحيطي ϵ_θ يبدأ بالتناقص تدريجياً إلى أن يقترب من الصفر عند منطقة تماس العينة مع مقدمة القالب، وكذلك الحال بالنسبة للانفعالين السمكي والطولي. أما تأثير اختلاف خاصية التقسية الانفعالية على نمط توزيع الانفعالات كان طفيفاً فقد لوحظ عدم وجود تغير واضح في سلوك توزيع الانفعالات لمادتي النحاس والبراص.

(6) أعلى مما في القالب ذي نسبة تقوس ($\frac{P}{r_d} = 12$). ويمكن أن يعزى ذلك إلى دور الحناية الكبير الذي يبديه القالب ذو نسبة تقوس ($\frac{P}{r_d} = 6$) والذي يكون أقل في القالب ($\frac{P}{r_d} = 12$). ويوضح الشكل (10) نمط توزيع الانفعالات المحيضية ϵ_θ والطولية ϵ_z والسمكية ϵ_r . وبلاحظ من الشكل أن الانفعال المحيطي ϵ_θ بصورة عامة تكون قيمته موجبه فهو انفعال تمدد والانفعال السمكي ϵ_r انفعال تقلص تكون



شكل 9. يبين العلاقة بين اجهاد التشكيل النسبي والازاحة النسبية للقالب أ- ($\frac{P}{r_d} = 6$) ب- ($\frac{P}{r_d} = 12$)

بطريقة (FEM) مع النتائج العملية. ويبين الشكلان (11-12) النتائج العددية والعملية للعلاقة بين اجهاد التشكيل النسبي مع نسبة التوسيع لمادتي النحاس والبراص وباستخدام القالبين ذو نسبة تقوس ($\frac{P}{r_d} = 6$) و ($\frac{P}{r_d} = 12$). إذ يلاحظ من الشكلين توافقاً جيداً بين النتائج العددية والعملية وان اعلى نسبة مئوية لحيود النتائج العددية عن النتائج العملية تساوي (4%) بالنسبة لمادة البراص و(4.7%) بالنسبة لمادة النحاس وذلك عند استخدام القالب ذو نسبة تقوس ($\frac{P}{r_d} = 6$). اما في القالب ذو نسبة تقوس ($\frac{P}{r_d} = 12$) فان النسبة المئوية لحيود النتائج لمادة البراص تساوي (10%) ولمادة النحاس تساوي (7%). اما بخصوص الانفعالات فقد تمت مقارنة قيم الانفعالات العملية والعددية وذلك للعينات ذات نسبة التوسيع العالية (32%) لمادتي النحاس والبراص للقالبين ايضاً وكما موضح بالشكلين (13-14). حيث يلاحظ من الشكلين ان نتائج الانفعالات المحيضية العددية تتوافق بشكل جيد مع الانفعالات العملية ولكلا المادتين. اما النتائج العددية للانفعالات الطولية والسمكية على العموم تبتعد عن النتائج العملية في منطقة نهاية

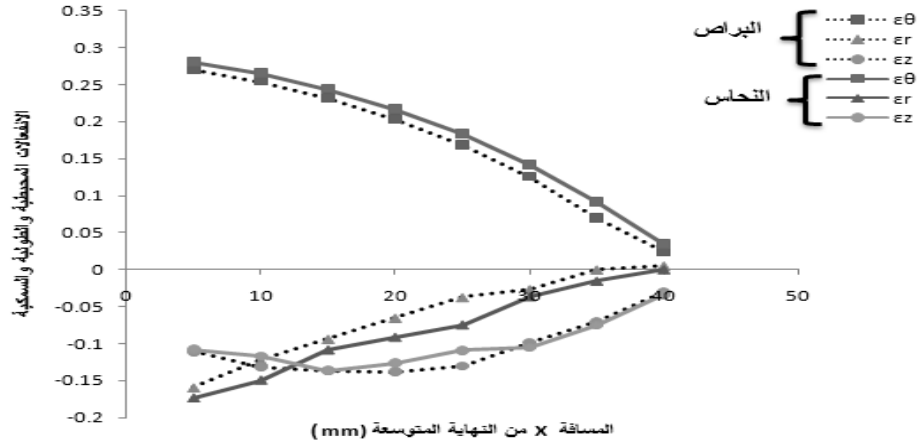
ويوضح الشكل (10) نمط توزيع الانفعالات المحيضية ϵ_θ والطولية ϵ_z والسمكية ϵ_r . وبلاحظ من الشكل أن الانفعال المحيطي ϵ_θ بصورة عامة تكون قيمته موجبه فهو انفعال تمدد والانفعال السمكي ϵ_r انفعال تقلص تكون قيمته سالبة، أما الانفعال الطولي يكون على العموم انفعال تقلص. ان قيم هذه الانفعالات الثلاثة تقل مع الابتعاد عن النهاية المتوسعة للعينة، فالانفعال المحيطي ϵ_θ يبدأ بالتناقص تدريجياً إلى أن يقترب من الصفر عند منطقة تماس العينة مع مقدمة القالب، وكذلك الحال بالنسبة للانفعالين السمكي والطولي. أما تأثير اختلاف خاصية التقسية الانفعالية على نمط توزيع الانفعالات كان طفيفاً فقد لوحظ عدم وجود تغير واضح في سلوك توزيع الانفعالات لمادتي النحاس والبراص.

4.2. مقارنة النتائج العملية والعددية

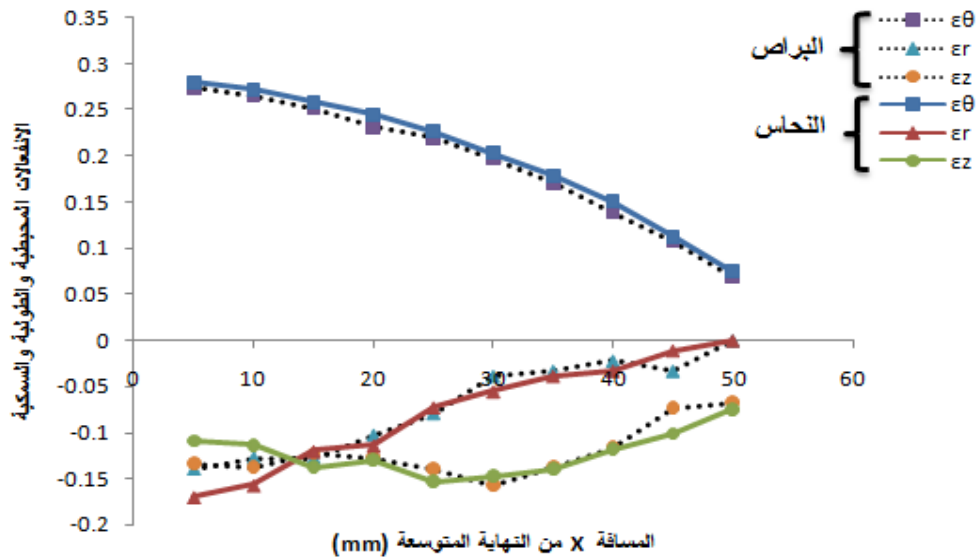
استخدم برنامج ANSYS لإنشاء نموذج للعناصر المحددة يحاكي عملية التوسيع بشكل كامل وبناء على النتائج التي يعطيها البرنامج أجريت مقارنة لبيان مدى توافق نتائج التحليل العددي المستحصلة من نمذجة العملية

معامل الاحتكاك خلال العملية إلا انه في الحقيقة يختلف معامل الاحتكاك في منطقة تلامس العينة مع سطح القالب نتيجة عدم تجانس التزييت أثناء العملية. إذ إن انزلاق القالب على جدار العينة يعمل على طرد طبقة التزييت مما يؤدي إلى اختلاف معامل الاحتكاك إضافة إلى وجود سبب آخر هو أن التشوه يكون بالحالة العملية غير متجانس، بينما يعتبر برنامج ANSYS التشوه متجانساً مما يؤدي إلى اختلاف قيمة إجهاد التشكيل.

الحافة المتوسعة ثم تعود لتقترب من بعضها مع الابتعاد عن تلك الحافة. يمكن أن تعزى الاختلافات بين النتائج التجريبية والعددية إلى عدة جوانب في التحليل العددي منها اختلاف الانفعالات والإجهادات على طول جدار العينة إضافة إلى انه تم افتراض نوع الاحتكاك (isotropic-friction) في التحليل العددي والذي يعتمد على قانون كولمب للاحتكاك، حيث تلعب طبيعة الاحتكاك دوراً رئيسياً في هذا الاختلاف خصوصاً وأن عملية التوسيع حساسة جداً لتغير معامل الاحتكاك حيث يفترض برنامج ANSYS ثبوت

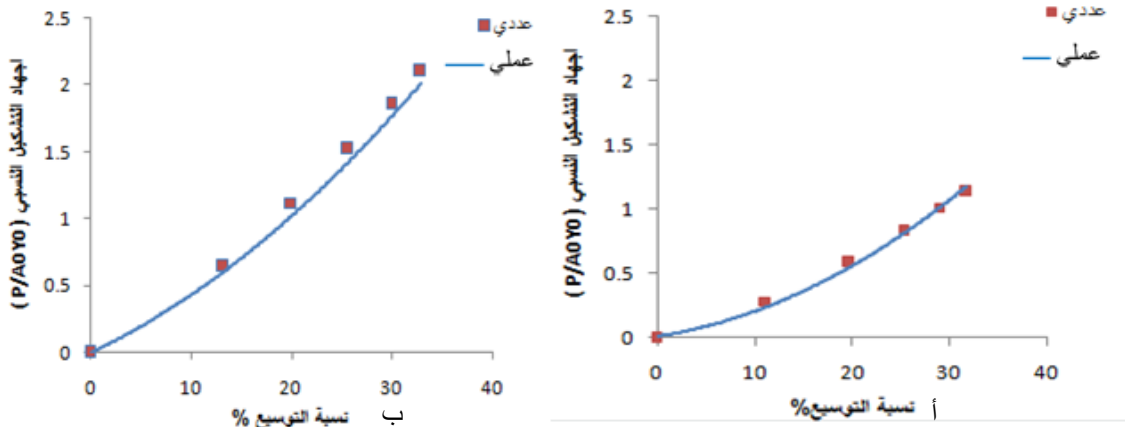


أ-

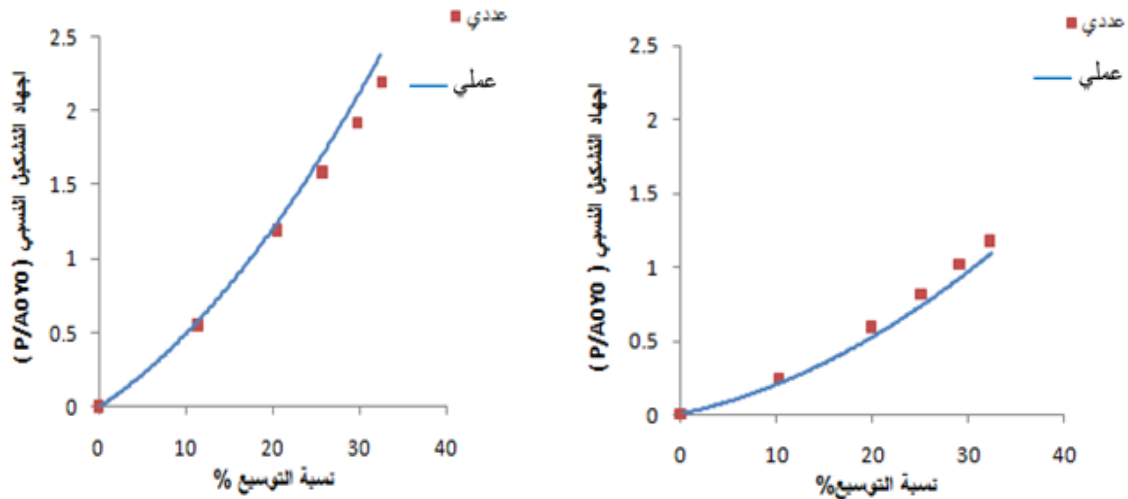


ب-

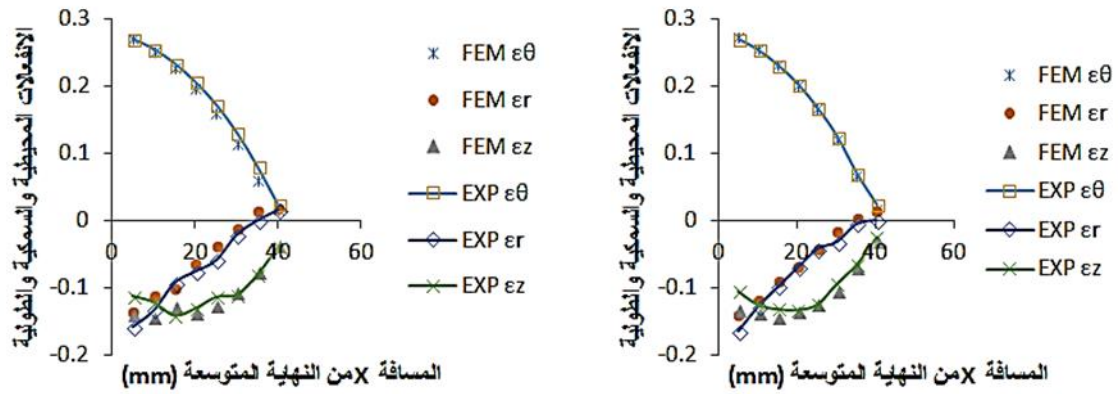
شكل 10. نمط توزيع الانفعالات لمادتي النحاس والبراص وباستخدام القالب أ- ($\frac{P}{r_d} = 6$) ب- ($\frac{P}{r_d} = 12$)



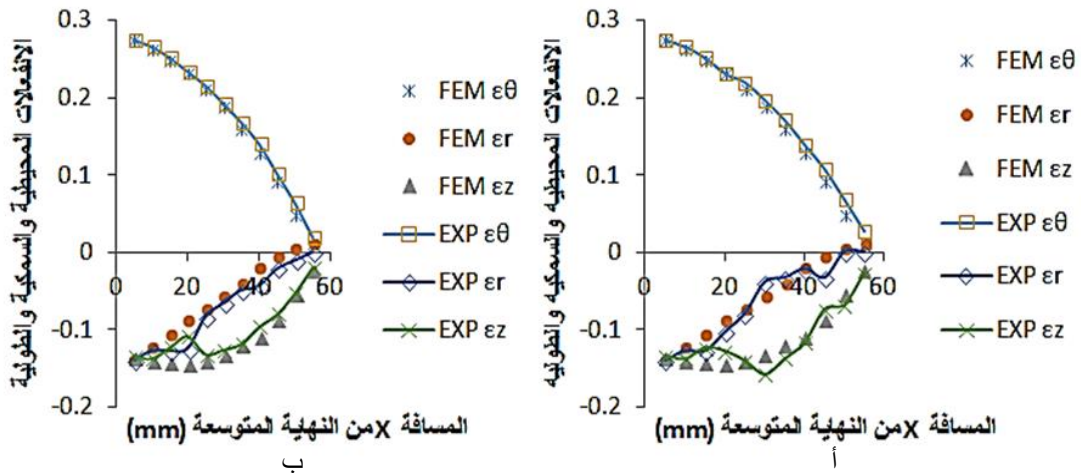
شكل 11. النتائج العملية والعددية للعلاقة بين إجهاد التشكيل النسبي ونسبة التوسيع للقالب ($\frac{P}{r_d} = 6$) أ- البراص ب. النحاس



الشكل 12. النتائج العملية والعددية للعلاقة بين اجهاد التشكيل النسبي ونسبة التوسيع للقالب



شكل 13. النتائج العددية والعملية لنمط توزيع الانفعالات للقالب (6 = $\frac{p}{r_0}$) أ- البراص ب- النحاس



شكل 14. النتائج العددية والعملية لنمط توزيع الانفعالات للقالب (12 = $\frac{p}{r_0}$) أ- براص ب- نحاس

5. الاستنتاجات

1. تؤثر خاصية التقسية الانفعالية للمواد على العلاقة بين اجهاد التشكيل النسبي والإزاحة المحورية النسبية للقالب ولوحظ إن منحنيات النحاس في هذه العلاقة أعلى من المنحنيات البراص يزداد اجهاد التشكيل النسبي مع زيادة نسبة التوسيع.
2. يكون منحنى العلاقة بين اجهاد التشكيل النسبي ونسبة التوسيع أعلى لمادة النحاس مما للبراص بسبب التقسية الانفعالية العالية لمادة النحاس.
3. يكون تأثير التقسية الانفعالية على سلوك توزيع الانفعالات لمادتي النحاس والبراص طفيفاً.

5. توافق جيد للنتائج العددية مع النتائج التجريبية من ناحية علاقة اجهاد التشكيل النسبي مع نسبة التوسيع وعلاقات توزيع الانفعالات المحيطة والسكبكية والطولية على امتداد جدار العينة.

References

- [1] Avalle M, Priarone PC, Scattina A. Experimental and Numerical Characterization of a Mechanical Expansion Process for Thin-Walled Tubes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014; **214**(5): 1143-1152.

- [2] Al-Abri OS, Pervez T. Structural Behavior of Solid Expandable Tubular Undergoes Radial Expansion Process – Analytical, Numerical, and Experimental Approaches. *International Journal Solid and Structures*. 2013; **50**(19): 2980 – 2994.
- [3] AL-Abri OS. Analytical and Numerical solution for large plastic Deformation of Solid Expandable Tubular. (ISPC) *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver, Colorado, USA. 2011; **6**.
- [4] Huang Y, Huang Y. Elasto-Plastic Finite-Element Analysis of the Axisymmetric Tube-Flaring Process with Conical Punch. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2001; **18**:390-398.
- [5] Liu Y, Qiu X. A Theoretical Study of the Expansion Metal Tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016; **114**: 157–167.
- [6] Yeh F. Study of Tube Flaring Forming Limit in the Tube Flaring Process. *Journal of Strain Analysis*, 2007; **42**(5): 315-323.
- [7] Al-Qahwaji TT, Ibrahim MA. Experimental Study of Flaring Process of Tubes by using Conical Nosing Dies. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*. 1999; **6**(1): 49-60.
- [8] Al-Qahwaji TT, Ibrahim MA. Study of Work-Hardening Characteristic Effect on Flaring Process of Tubes by Using Conical Dies. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*. 1998; **4**(5): 21-43.
- [9] Al-Abri OS, Pervez T, Qamar SZ, Al-Busaidi MA. Optimum Mandrel Configuration for Efficient Down-Hole Tube Expansion. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2015; **137**(6): 14P.
- [10] Abbas EF, Mohammed SS, .Study the Effect of Granules Type of The Porous Medium on The Heat Transfer Enhancement for Double Pipe Heat Exchanger. *Tikrit Journal of Engineering Sciences* 2019; **26**(4): 43- 49.
- [11] Yusra AJ. Theoretical Study of Tube Flaring Using Curved Dies. MSc Thesis, Tikrit University, Mechanical Engineering Dept. 2015.
- [12] Othman TT, Khalaf HK, Alyan JK, Experimental Study of Steady-State Tube Expansion by using Conical Mandrel. *Journal of Engineering and Technology*. 2015; **33**(7): 148-166.
- [13] Al-Qassab SYA. The Influence of Work Hardening Properties on Conical Nosing Process by using Small Semi Angles. MSc Thesis, University of Technology, Mechanical Engineering Dept. 1990.
- [14] Tang MC, Kobayashi S. An Investigation of the Shell Nosing Process by the Finite-Element Method. Part 1: Nosing at Room Temperature (Cold Nosing). *Journal of Engineering for Industry*. 1982; **104**(3): 305-311.
- [15] Pier BF, Nikhare CP. Outer Diameter to Thickness Ratio Effect on Tube Flaring Behavior. International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC 2018-6486, V004T03A029; 9P.