International Science and Technology Journal
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
Volume 37 العدد
Part 1 المجلد
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
International Science and Technology Journal
ISTJ

http://www.doi.org/10.62341/amgh1707

Received	2025/06/21	تم استلام الورقة العلمية في
Accepted	2025/07/16	تم قبول الورقة العلمية في
Published	2025/07/17	تم نشر الورقة العلمية في

مقارنة الرجوعية وترقق السمك في السحب العميق والنقطي التزايدي بطريقة العناصر المحددة

علي محمد الغويل
كلية التقنية الصناعية، مصراته– ليبيا
ali75lby@cit.edu.ly

الملخص

يُعد الحصول على الأبعاد الدقيقة للمنتج النهائي أحد الأهداف الأساسية في عمليات التصنيع، بما في ذلك عمليات تشكيل المعادن المستخدمة في صناعات مثل السيارات، الطيران والأجهزة المنزلية. وتُعد الرجوعية((Springback من أبرز المشكلات التي تؤثر على جودة المنتج، خاصة بعد إزالة قوى التشكيل وكذلك الترقق في السمك (Thinning) نتيجة لعملية التشوه اللدن عاملان حاسمان في جودة المنتج النهائي. إذ تمثل هاتان الظاهرتان تحديين رئيسيين في إنتاج الأجزاء مختلفة التصاميم من الصفائح المعدنية بإستخدام تقنيات التشكيل المتعددة ومنها على سبيل المثال عملية السحب العميق وعملية التشكيل النقطي التزايدي. بناءً عليه، تهدف هذه الدراسة إجراء محاكاة عددية بإستخدام طريقة العناصر المحددة (FEM)عن طريق برنامج Abaqus/CAE للتنبؤ بسلوك الصفيحة المعدنية من حيث الرجوعية والتغير في سمك المنتج النهائي، وذلك لكل من عمليتي السحب العميق و التشكيل النقطي التزايدي. وقد تم إستخدام نموذج هندسي موحد لمقارنة الأداء وتحديد نقاط القوة والقصور في كل عملية بهدف إقتراح الأنسب منها حسب التطبيق الصناعي.

أظهرت نتائج المحاكاة أن عملية السحب العميق توفر تحكمًا أفضل في الحفاظ على سمك الصفيحة، مما يجعلها الخيار الأمثل في الحالات التي يتطلب فيها المنتج سمكًا منتظمًا. بينما تفوقت عملية التشكيل النقطي التزايدي في تقليل إنحراف الأبعاد النهائية عن التصميم المستهدف، مما يجعلها أكثر ملاءمة للتطبيقات التي تتطلب دقة شكلية عالية.

الكلمات المفتاحية: الرجوعية، ترقق السمك، السحب العميق، التشكيل النقطي التزايدي.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

International Science and Technology Journal
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
Volume 37 العدد
Part 1 المجلد
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
International Science and Technology Journal
ISTJ
http://www.doi.org/10.62341/amgh1707

Springback and Thickness Thinning Comparison in Deep drawing and Incremental Forming via FEM

Ali Mohamed Elghawail
College of Industrial Technology, Misurata - Libya
ali75lby@cit.edu.ly

Abstract

Achieving the required dimensional accuracy in the final product is a primary objective of all manufacturing processes, including metal forming operations, especially in industries such as automotive, aerospace, and household appliances. Among the most critical issues affecting product quality are springback after the removal of forming forces and thickness thinning due to plastic deformation. These factors pose major challenges in producing components with diverse geometries using various metal forming techniques, such as deep drawing and incremental sheet forming (ISF). Accordingly, this study conducts a numerical simulation using the Finite Element Method (FEM) via Abaqus/CAE to predict the behavior of sheet metal in terms of springback and thickness variation under both deep drawing and incremental forming processes. The goal is to assess and compare the performance of each method on the same product design to determine their strengths and limitations, and to propose the most suitable forming method based on industrial application needs. The final comparison results clearly indicate that deep drawing is preferable when maintaining material thickness is critical, whereas incremental forming is more suitable when dimensional accuracy (reduced deviation from target dimensions) is a higher priority.

Keywords: Springback, Thickness Thinning, Deep Drawing, Incremental Sheet Forming.

المقدمة

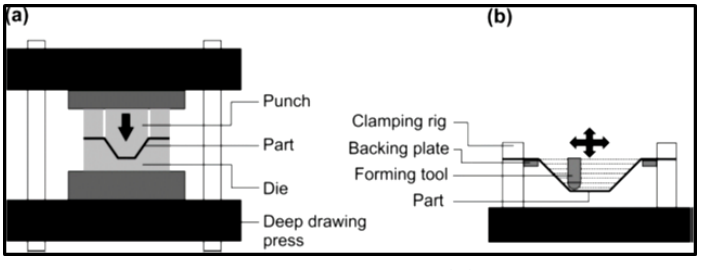
جميع الأجزاء المعدنية المستخدمة في شتى المجالات تم إنتاجها على الأقل بعملية تشكيل واحده. حيث سيطرت عمليات الإنتاج الكمي مثل السحب العميق (Deep Drawing DD) وضغط الصفائح المعدنية (Sheet Metal Stamping) على تشكيل الصفائح المعدنية والتي تحتاج إلى إستثمار مالي أولي كبير، وسوف يستمر تصنيع

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amgh1707

المنتجات باعداد كبيرة بهذه الطرق. مع تزايد الحاجة لإنتاج نماذج أولية حقيقية خلال المراحل المبكرة من تطوير المنتج والسماح بتغيير الشكل المستهدف بأقل تكلفة، ولتلبية هذه المتطلبات تم تخصيص العديد من الأبحاث لتطوير تقنيات وعمليات النمذجة السريعة. إحدى هذه العمليات هي عملية التشكيل النقطي التزايدي Single Point Incremental SPIF (forming) والتي تستخدم آلات التحكم الرقمي CNC لإنتاج أشكال هندسية من الصفائح المعدنية بدون الحاجة لأي قوالب داعمه.

تعتبر عملية السحب العميق وعملية التشكيل النقطي التزايدي من ضمن عمليات التشكيل التي يحدث فيها تغير في أبعاد المنتج نتيجة لعملية الرجوعية بعد إزالة قوى التشكيل، حيث تعتمد قيمة الرجوعية على عدة متغيرات منها نوع معدن الشغلة، سمك الصفيحة المستخدمة وقيمة قوة ماسك الصفيحة وغيرها من العوامل التي يمكن من خلالها التحكم في قيمة الرجوعية وإنحراف أبعاد المنتج النهائي عن المستهدف، وهناك عدة تقنيات مستخدمة لتعويض التغير في الأبعاد نتيجة لظاهرة الرجوعية. الترقق في سمك المنتج النهائي عن السمك الأصلي يعتبر أيضا من ضمن العيوب التي تصاحب عمليات تشكيل المعادن عامة والسحب العميق والتشكيل النقطي التزايدي خاصة. لهذا السبب تم في هذه الدراسة إختيار هاتين العمليتين لمقارنة قيم الرجوعية والترقق في الصفيحة المعدنية لنفس المنتج والخروج بتوصيات للحصول على أفضل جودة للمنتج النهائي. الشكل (1) يوضح رسم تخطيطي للأجزاء الأساسية لكل عملية.(Maqbool, F., 2021)



الشكل (1) التشكيل بعملية السحب العميق
(a) مقابل التشكيل، (b) النقطي التزايدي

من الشكل السابق يتضح الفرق بين عمليتي التشكيل، حيث عملية التشكيل النقطي التزايدي يستخدم فيها الآت التحكم الألي (CNC) لإنتاج أشكال هندسية من الصفائح المعدنية بواسطة عملية مرنة يتم فيها تشكيل الصفائح المعدنية تحت تأثير تشوه بلاستيكي موضعي تدريجي على طول مسار محدد مسبقاً وذلك بإستخدام أدوات بسيطة وغير مكلفة بدون

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amgh1707

الحاجة الى قوالب خاصة أو أدوات تشكيل مكلفة، حيث يعتبر التحكم في عوامل التشكيل عند منطقة التلامس بين الأداة والمعدن عاملاً حاسماً في كفاءة العملية وجودة المنتج النهائي. بينما التشكيل بعملية السحب العيق يحتاج الى تصميم وتصنيع قوالب خاصة للمنتجات المطلوبة، أي أن لكل منتج يراد تصنيعه يجب أن يصمم ويصنع له قالب معين ناهيك عن إستخدام معدات لتوفير قوة التشكيل الكبيرة اللازمة لإنهاء العملية وهذا يعتبر مكلف جداً وخاصة في حالة الإنتاج البسيط(Yan, Zhou, et., 2021).

إن الطلب المتزايد على الإنتاج بالكميات القليلة وبأقل تكلفة كالعينات لمنتجات خاصة أصبح متزايداً في هذه السنوات، ومن أهمية هذه النقطة ركز الكثير من البحاث على دراسة عملية التشكيل النقطي التزايدي للتحسين من جودة المنتج النهائي ومقارنته بمنتجات عملية السحب العميق.

الدراسات السابقة

خلال العقود الماضية ومع توفر أدوات التحليل العددي مثل طريقة العناصر المحددة وإستعمالها في دراسة عمليات تشكيل المعادن، حدث تطور ملحوظ في هذا المجال مما أتاح القدرة على التنبؤ بسلوك المواد تحت تأثير قوى التشكيل بدقة عالية. في كثير من الدراسات البحثية، تم التركيز على عملية السحب العميق كعملية تقليدية لتشكيل الصفائح المعدنية. في المنتج النهائي بعملية السحب العميق كنتيجة لتحرر الإجهادات بعد زوال قوة التشكيل. بجانب الرجوعية، تبين أن توزيع سمك الصفيحة غير منتظم وخاصة في الإنحناءات، وأن التحكم في متغيرات العملية يساهم في تحسن دقة الأجزاء المنتجة (Zhang et al. 2010). أظهرت نتائج الدراسة التي قام بها (H. Zein et al. 2014) أن نموذج العناصر المحددة ثلاثي الأبعاد لمحاكاة عملية السحب العميق للصفائح المعدنية قادر على التنبؤ بدقة مقبولة بمقدار الرجوعية وتوزيع السمك في في الأجزاء المُشكلة. بناءً على دراسة قام بها(Said R. and Mehrabi, M., 2021) تمكنا من تمثيل ظاهرة الرجوعية بدقة مقبولة مقارنة بالنتائج المعملية من خلال نموذج المحاكاة العددي. أجرى الباحثان (Singh, P. and Kumar, N., 2015) دراسة تحليلية لأثر الرجوعية على دقة المنتج النهائي في عملية التشكيل النقطي التزايدي، حيث تم دراسة تأثير بعص من متغيرات العملية مثل قيمة الخطوة الرأسية، سمك الصفيحة المعدنية، قطر أداة التشكيل ومعدل التغذية، أظهرت النتائج أن كل هذه المتغيرات تؤثر بشكل كبير على الرجوعية وتم تطوير نموذج إحصائي للتنبؤ بها. أنجز (Dejardin, S. et al. 2008) بحث

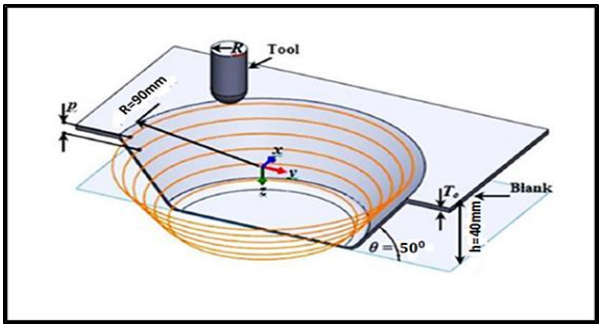
Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amgh1707

جمع بين التحليل العددي والتجارب المعملية لتحسين دقة عملية التشكيل النقطي التزايدي. حيث تم التركيز على الرجوعية وترقق السمك، أظهرت النتائج أهمية إختيار معلمات العملية المناسبة لتحقيق دقة عالية في الأجزاء المشكلة.

منهجية الدراسة

تم إختيار منتج مخروطي الشكل بقطر علوي 180 ملم، وعمق 40 ملم وزاوية جدار 50^0 لإنتاجه بالسحب العميق والتشكيل النقطي التزايدي كما هو موضوح بالشكل (2). في الخطوة التالية، صممت معدات العمليتين ورسمت ببرنامج السوليدووركس بشكل ثلاثي الأبعاد. طبقت طريقة تحليل العناصر المحددة لدراسة كل من عمليتي التشكيل من خلال إستخدام برنامج المحاكاة الهندسي Abaqus/Explicit والتحقق من صحة عمل النموذج بمقارنتة بنتائج دراسة سابقة (Arfa, H., et al. 2013) قبل البدأ الفعلي في الدراسة الحالية. في النهاية تم مقارنة نتائج المحاكاة للعمليتين مثل قيمة الرجوعية في الجزء المنتج وكذلك توزيع سمك الصفيحة على كامل الجزء المصمم والخروج بالتوصيات النهائية.



الشكل (2) أبعاد الشكل المخروطي

خطوات تطبيق عملية المحاكاة

لإجراء عملية المحاكاة لعملية التشكيل النقطي التزايدي أو بالسحب العميق بإستخدام برنامج Abaqus نحتاج إلى إعداد معلمات مختلفة وفقاً لمتطلبات كل عملية تشكيل. فيما يلي خطوات المحاكاة بشكل عام:-

أ. تصميم المعدات : نحتاج لإنشاء معدات عملية التشكيل من قوالب وماسكات والمواد التي سوف يتم تشكيلها بواسطة برنامج Abaqus أو رسمها بأحد البرامج الأخرى ثم إستيرادها لبرنامج المحاكاة.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amgh1707

ب. خواص المواد:- تحديد وإدخال خواص مادة الصفيحة المعدنية التي تهم عمليتي التشكيل وتتضمن الكثافة، نسبة بواسون، معامل المرونة، إجهاد الخضوع وبيانات سلوك المادة تحت إختبار الشد وغيرها.

ت. التجميع: تجمع الإجزاء معاً حسب نوع العملية.

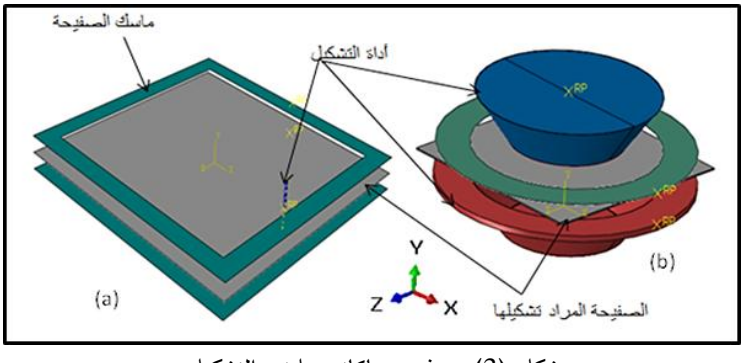
ث. التشبيك: تقسيم جميع أجزاء معدات عملية التشكيل إلى جزئيات صغيرة وبنوع معين يتماشى مع طبيعة عملية التشكيل والتأكد من تحسينها بدرجة كافية لتمثيل تفاصيل العملية بدقة.

ج. إختيار نوع التحليل: حدد إعدادات الحل مثل نوع التحليل (ثابت، ديناميكي،..) وخطوة الوقت للتحليلات الديناميكية.

د. مرحلة التحليل: بعد المحاكاة، مرحلة تحليل النتائج بإستخدام الأدوات المتوفرة بالبرنامج لإستخراج المعلومات ذات الصلة مثل التشوه، توزيع السمك، إرتداد بعض الأجزاء المشكلة وغيرها.

نموذج العناصر المحدودة لعمليتي التشكيل

يتناول هذا القسم نموذج العناصر المحدودة الذي تم تصميمه لمحاكاة مفهوم التشكيل بالسحب العميق وكذلك بعملية التشكيل النقطي التزايدي الموضح بالشكل (3) والتحقيق في جودة الجزء المشكل من حيث الإرتداد والترقق في سمك الصفيحة.



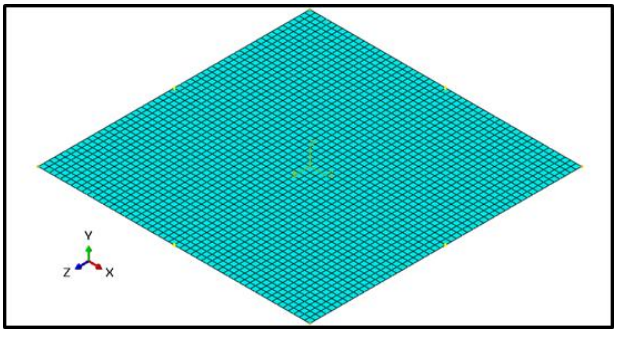
شكل (3) نموذج محاكاة عمليتي التشكيل
(a) SPIF (b) DD

لقد أصبحت نمذجة العناصر المحدودة (FEM) أداة عملية قوية تسمح بدراسة آلية التشوه الناتج عن عمليات تشكيل المعادن المختلفة. عادة يتم نمذجة الصفيحة المعدنية بإستخدام عناصر صلبة أو القشرة، حيث يفضل التمثيل الصلب للصفيحة لتقسيم السمك وذلك

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amgh1707

لتحسين النتائج مع أنه يستهلك وقت أطول في عملية الحسابات (et al. , Dejardin, S.2010). لدراسة التغير في سمك الصفيحة وكذلك تقليل وقت المحكاة يفضل إستخدام نوع القشرة للصفيحة (Cocchetti, G., et al. 2013)، وهذا ما تم تطبيقة في هذه الدراسة. تم إختيار حزمة Abaqus Explicit لتحليل عملية التشكيل وذلك لوجود تشوه كبير في العمليتين (Habbachi, M. and Baksa, A., 2024.). الصفيحة المعدنية بمقاس 240 ملم x 240 ملم وبسمك 1.2 ملم تم تمثيلها بجسم قابل للتشوه بينما باقي معدات التشكيل أعتبرت أجسام صلبة غير قابلة للتشوه (أو تشوه مهمل) كما هو موضح بالشكل السابق رقم (2). أختير الألمونيوم 3003-O ليمثل الصفيحة المعدنية بالخواص الفيزيائية والميكانيكية التالية: الكثافة 2700كجم/م^3، نسبة بواسون =0.33 ، معامل المرونة =70جيجا باسكال، أقصى قوة شد =135ميجا باسكال وإجهاد الخضوع =35 ميجا باسكال (Duflou, J., et al. 2007). تم تقسيم الصفيحة الى 4489 جزء من عنصر التكامل المنخفض S4R الذي يطبق في التطبيقات الصناعية نظرا لكفاءته الزمنية ودقته الإجمالية الجيدة كما هو موضح بالشكل (4).



شكل (4) نوع تشبيك الصفيحة المعدنية

سرعة تغذية الأداة في عملية التشكيل النقطي التزايدي كانت 2000ملم/دقيقة لإخفاء العيوب الناتجة عن عامل السرعة في المنتج النهائي، ومعامل إحتكاك 0.09 بين الأداة والصفيحة المعدنية (Yan, Zhou, et al. 2021). مسار الأداة تم تحديده من خلال الحركة في الإتجاهات Z, Y, X وذلك بتوليد المسار بواسطة برنامج الماتلاب، وتم تحديد الإنحدار الأولي للجدار بمقدار 0.5 ملم وبعمق 40 مل (Yeshiwas Z, and Krishniah A., 2021). أما بالنسبة للنموذج الممثل لعملية السحب العميق كما هو موضح بالشكل السابق رقم (2-b)، بالنسبة للصفيحة لها نفس الأبعاد والخواص التي

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

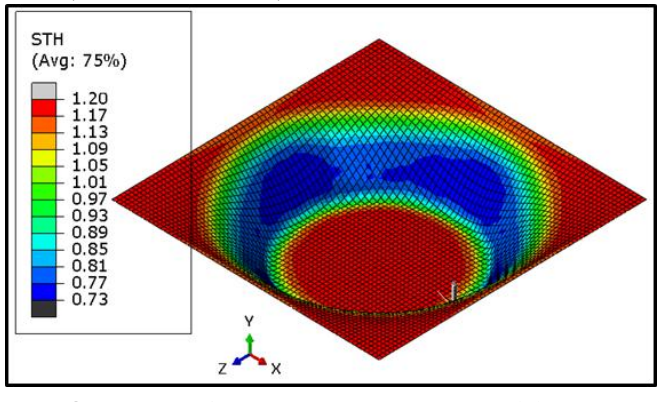
http://www.doi.org/10.62341/amgh1707

طبقت في نموذج عملية التشكيل النقطي التزايدي حتى يمكن مقارنة النتائج النهائية بين العمليتين. تم فرض إزاحة رأسية مقدارها 40 ملم للأسفل للجزء العلوي من قالب التشكيل مع تثبيت الجزء السفلي منه مع وجود قوة مناسبة وكافية لمسك الصفيحة حتى لا تظهر عيوب بالمنتج النهائي مثل التجاعيد أو التمزق وكذلك لتقليل قيمة الرجوعية إلى أقل ما يمكن.

التحقق من صحة النموذج

تم تقييم موثوقية النموذج المستخدم في محاكاة عمليتي التشكيل من خلال مقارنة نتائج النمذجة الحالية مع نتائج دراسات سابقة محققة بالتجارب. كذلك أستخدمت قيمة سمك الشكل المنتج المحسوب رياضيا ومقارنته بسمك الشكل الناتج من المحاكاة كعنصر للتأكد من صحة نموذج المحاكاة.

$T_{part} = T_0 \sin(90-\alpha)$ حيث T_{part} هو سمك الشكل الناتج، T_0 = السمك الأصلي للصفيحة و α زاوية المخروط، حيث كانت قيمة السمك المحسوبة تساوي تقريبا 0.77 ملم، بينما مدى سمك الجزء المُشكَّل المتحصل عليه في هذه الدراسة كان بين 1.2 الى 0.73 ملم كما هو موضح بالشكل (5) حيث كان موافق لحد كبير لما هو موجود في الدراسات السابقة (1.200 – 0.7216 ملم) (Arfa, H., et al. 2013). متوسط سمك الجزء المنتج باللون الأزرق في الشكل رقم (5) كان تقريبا في الدراسة الحالية وفي الدراسات السابقة 0.77 ملم و 0.76 ملم على التوالي، القيمتان تعتبر مطابقة للسمك الناتج من الحسابات النظرية 0.77 ملم. لذلك، يمكن اعتبار نموذج المحاكاة الحالي صالحًا ويمكن استخدامه بشكل موثوق للتحقيق في المقارنة بين عمليتي التشكيل.



شكل (5) توزيع سمك الجزء المشكل بواسطة عملية SPIF

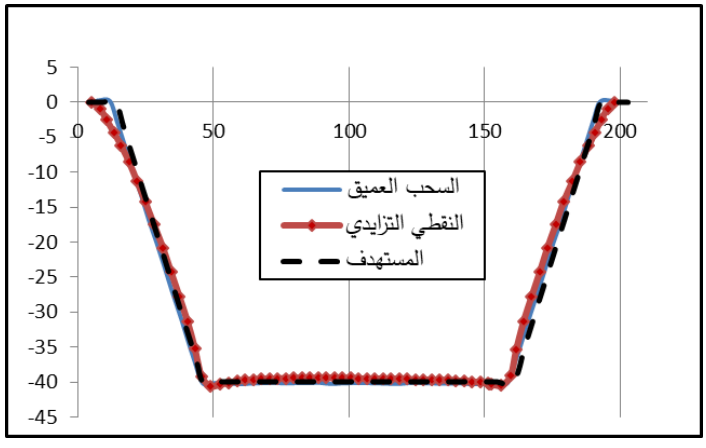
Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amgh1707

النتائج والمناقشة

تمت عملية المحاكاة بواسطة برنامج ABQUS على نموذجي العمليتين وذلك بإستخدام المعلومات والشروط الحدية المذكورة سلفاً.

الشكل (6) يظهر رسماً بيانياً لمقارنة السطح الناتج قبل إزالة قوة التشكيل في عملية السحب العميق مع سطح الشكل المنتج بعملية النقطي التزايدي ومقارنتهما بالشكل المستهدف. نلاحظ أن المنتج بإستخدام عملية السحب العميق مقارب جداً لتفاصيل الشكل المستهدف خصوصاً عند الزوايا في أعلى الشكل والجوانب والقاع. بينما الشكل الناتج عن عملية التشكيل النقطي به إنحرافات عند الزوايا العليا للشكل. السبب في هذه النتيجة المؤقتة هو تطبيق الضغط دفعة واحدة في عملية السحب العميق عن طريق قالب مما ينتج عنه توزيع أكثر إنتظاماً للشكل الهندسي للمنتج قبل إزالة القوة (Kalpakjian, S., 2001). أما في حالة التشكيل النقطي التزايدي، فالعميلة تعتمد على حركة تدريجية موضعية قد تسبب تركم إجهادات موضعية تؤثر على الدقة اللحظية للشكل (Micari, et al. 2007). رغم تفوق السحب العميق في هذه المرحلة (قبل إزالة القوة)، فإن التشكيل النقطي قد يُظهر تحسنًا في الشكل النهائي بعد إزالة القوى، بسبب مرونة واستجابة المادة بعد الإرتداد (springback)، وهي نقطة تتطلب مقارنة إضافية لاحقًا.



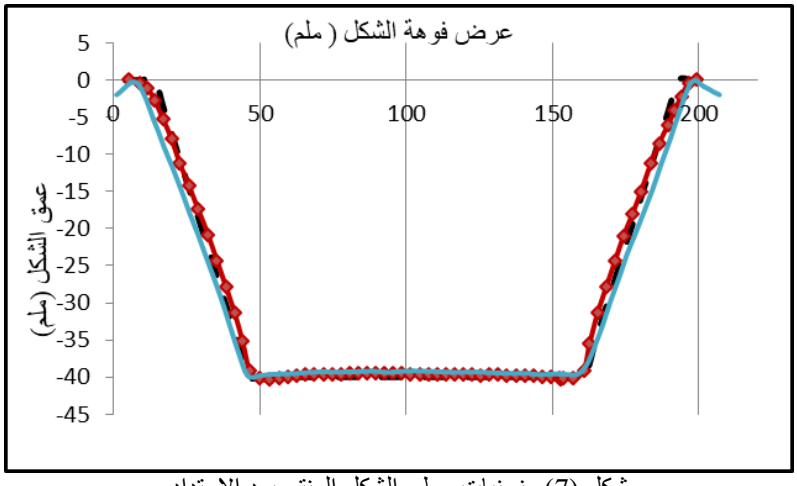
شكل (6) منحنيات سطح الشكل المنتج والمستهدف قبل إزالة قوة التشكيل

أما الشكل (7) يبين مقارنة بين الأشكال الناتجة بعد الإرتداد (أي بعد إزالة قوة التشكيل) لكل من عمليتي السحب العميق والتشكيل النقطي التزايدي، مقارنةً بالشكل المستهدف. تشير النتائج إلى أن الشكل الناتج عن التشكيل النقطي التزايدي مقارب بشكل كبير للشكل

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amgh1707

الهندسي المستهدف، مقارنةً بالشكل الناتج عن السحب العميق. هذا يُعزى إلى الطبيعة التدريجية الموضعية لتقنية التشكيل النقطي، والتي تسمح بتحكم أفضل في توزيع الإجهادات والإنفعالات، مما يؤدي إلى تقليل التشوهات المرنة والحد من ظاهرة الارتداد (Springback). هذه النتيجة مطابقة لما ورد في دراسات سابقة، حيث أشارت بأن التشكيل النقطي التزايدي يقلل من ظاهرة الارتداد مقارنة بالتقنيات التقليدي (Allwood, J. M. et al. 2007).

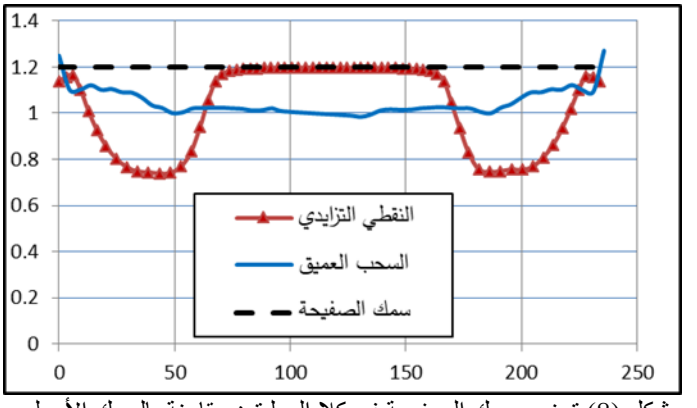


شكل (7) منحنيات سطح الشكل المنتج بعد الإرتداد

يعرض الشكل (8) مقارنة لتوزيع السمك النهائي للصفيحة بين طريقتي التشكيل بالسحب العميق والنقطي التزايدي، مقارنةً بسُمك الصفيحة الأصلي 1.2 ملم. يتضح من المنحنيات أن عملية السحب العميق ينتج عنها تقارب الى حد ما في ترقق السمك على اغلب مناطق الشكل في حالة توفر قوة شد مناسبة للصفيحة أثناء التشكيل مقارنةً بالنقطي التزايدي الذي يظهر تباين كبير في سمك الشكل الناتج وخاصة عند قاع الشكل(إختفاء الترقق) والجوانب (أقصى قيمة للترقق). ويرجع ذلك الإختلاف إلى أن عملية السحب العميق تعتمد على توزيع قوى الشد والضغط من خلال قالب محدد الأبعاد، مما يؤدي إلى تشكيل متوازن نسبياً مع ترقق أقل في معظم مناطق الشكل (Kalpakjian, S., 2001). في المقابل ترقق الصفيحة في التشكيل النقطي التزايدي هو نتيجة حتمية لطبيعة التشكيل الموضعي بدون دعم كافٍ، خاصة عند الزوايا الكبيرة، ويجب التحكّم به من خلال تقنيات مثل: استخدام دعامات، تقليل زاوية الجدار، أو تحسين مسار الأداة Young, D. and (Jeswiet, J., 2004).

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amgh1707



شكل (8) توزيع سمك الصفيحة في كلا العمليتين مقارنة بالسمك الأصلي

الخلاصة

تناول هذا العمل دراسة مقارنة لسلوك صفيحة معدنية أثناء التشكيل في عمليتي السحب العميق والتشكيل النقطي التزايدي من حيث الترقق والرجوعية من خلال محاكاة نموذج العمليتين، حيث يعتبر هذان العاملان حاسمان في جودة المنتج النهائي. وقد أدت النتائج إلى الإستنتاجات التالية:

- توافق النتيجة المتحصل عليها من المحاكاة بشكل جيد مع القيمة المحسوبة رياضياً. وعليه يمكننا الإستنتاج أن المحاكاة طريقة فعّالة على التنبؤ بالترقق بنجاح في عمليات تشكيل الصفائح المعدنية.
- عملية السحب العميق توّفر تحكما أفضل في ترقق سمك الصفيحة بفضل وجود قالب معدني دقيق مع مقدار رجوعية ملاحظ يمكن التقليل منه بعدة تقنيات.
- عملية التشكيل النقطي التزايدي تظهر ترقق في سمك الصفيحة بقيمة أكبر وغير متحكم فيه نتيجة للتشكيل الموضعي للأداة، بينما الرجوعية أقل من عملية السحب العميق.

التوصيات

- ستكون هناك حاجة إلى القيام بمزيد من العمل للحصول على توزيع أكثر تحكماً للترقق في عمليات التشكيل النقطي التزايدي.
- تطبيق عملية التشكيل النقطي التزايدي على أشكال أكثر تعقيداً ودراسة الترقق الحاصل ومقارنته بقيم الترقق في الأشكال البسيطة.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amgh1707

- تطبيق بعض أدوات تصميم التجارب مثل طريقة الإستجابة السطحية وغيرها من أجل تحسين جودة الأجزاء المشكلة من خلال التحكم الدقيق في متغيرات العملية.
- إدماج البرمجيات الهندسية للتصميم والمحاكاة ضمن النظام التعليمي الليبي يساهم في تأهيل الخريجين بمهارات تقنية عالية، مما يعزز فرص توظيفهم في المؤسسات العامة والخاصة. كما يتيح استخدام هذه البرمجيات في محاكاة مراحل ما قبل التصنيع، مما يساهم في تحسين جودة المنتج النهائي وتقليل كلفته، وبالتالي تعزيز قدرته التنافسية في سوق العمل.

References

Allwood, J.M., Shouler, D.R. and Tekkaya, A.E., 2007. The increased forming limits of incremental sheet forming processes. Key Engineering Materials, 344, pp.621-628

Arfa, H.; Bahloul, R.; Salah, H.B.H. Finite element modelling and experimental investigation of single point incremental forming process of aluminium sheets: Influence of process parameters on punch force monitoring and on mechanical and geometrical quality of parts. Int. J. Mater. Form. 2013, 6, 483–510. [CrossRef].

Cocchetti, G., Pagani, M. and Perego, U., 2013. Selective mass scaling and critical time-step estimate for explicit dynamics analyses with solid-shell elements. Computers & Structures, 127, pp.39-52.

Dejardin, S., Thibaud, S. and Gelin, J.C., 2008. Finite element analysis and experimental investigations for improving precision in single point incremental sheet forming process. International Journal of Material Forming, 1, pp.121-124.

Dejardin, S., Thibaud, S., Gelin, J.C. and Michel, G., 2010. Experimental investigations and numerical analysis for improving knowledge of incremental sheet forming process for sheet metal parts. Journal of Materials Processing Technology, 210(2), pp.363-369.

Duflou, J., Tunçkol, Y., Szekeres, A. and Vanherck, P., 2007. Experimental study on force measurements for single point incremental forming. Journal of Materials Processing Technology, 189(1-3), pp.65-72.

Habbachi, M. and Baksa, A., 2024. Numerical modeling of single-point incremental sheet metal forming of 3003-O aluminum alloy. Multidiszciplináris Tudományok, 14(3), pp.168-176.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amgh1707

Kalpakjian, S., 2001. Manufacturing engineering and technology. Pearson Education India.

Maqbool, F., 2021. Targeted generation and suppression of the deformation mechanism and residual stresses in incremental sheet forming to improve the geometric accuracy (Doctoral dissertation, BTU Cottbus-Senftenberg).

Micari, Ambrogio, G. and Filice, L., 2007. Shape and dimensional accuracy in single point incremental forming: state of the art and future trends. Journal of Materials Processing Technology, 191(1-3), pp.390-395

Said, R. and Mehrabi, M., 2021 Analysis of springback effects in deep drawing processes: simulation and experimental studies (No. 2021-01-0268). SAE Technical Paper

Singh, P. and Kumar, N., 2015. Experimental and statistical study on spring-back behavior in incremental sheet metal forming process. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 4(9), pp.8124-8130.

Yan, Z., Hassanin, H., El-Sayed, M.A., Eldessouky, H.M., Djuansjah, J.R.P., A. Alsaleh, N., Essa, K. and Ahmadein, M., 2021. Multistage tool path optimisation of single-point incremental forming process. Materials, 14(22), p.6794

Yeshiwas Z, and Krishniah A., 2021. Spiral toolpath definition and g-code generation for single point incremental forming. Journal of Mechanical Engineering (JMechE), 17(1), pp.91-102

Young, D. and Jeswiet, J., 2004. Wall thickness variations in single-point incremental forming. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 218(11), pp.1453-1459.

Zein, H., El Sherbiny, M. and Abd-Rabou, M., 2014. Thinning and spring back prediction of sheet metal in the deep drawing process. Materials & Design, 53, pp.797-808.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية