

Орлюк М. В.
Піманов В. В.

ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ DEFORM ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ОПЕРАЦІЙ ЛИСТОВОГО ФОРМУВАННЯ

Використання при розробці технології виготовлення деталей зі складною геометрією з листового матеріалу та проектуванні відповідного штампового оснащення лише практичних рекомендацій з довідникової літератури не гарантує отримання якісних деталей та відсутність браку за результатами штампування, оскільки ці рекомендації не можуть врахувати усі особливості деформування за конкретних умов. У випадку появи під час штампування браку розроблений технологічний процес або існуюче штампове оснащення потребує доопрацювання. Подібна проблема, пов'язана з руйнуванням матеріалу, виникла при штампуванні корпусної деталі великокаліберного кулемету із листової заготовки із сталі 30ХГСА. З ціллю усунення браку в роботі була досліджена ефективність використання програмного комплексу DEFORM для встановлення особливостей листової формовки складних просторових деталей та оптимізації параметрів процесу деформування. Процес деформування досліджувався за допомогою комп'ютерного моделювання з використанням методу скінчених елементів у середовищі DEFORM 3D та перевірки отриманих результатів експериментальним шляхом. Під час моделювання в якості оптимізаційного параметру в роботі використовувались граничні значення критерію руйнування Normalizet Cockcroft-Latham, визначені для операції вісесиметричного витягування без потоншення. За результатами досліджень були виявлені негативні фактори, що призводили до перенавантаження матеріалу заготовки в процесі деформування та його руйнування. Отримані результати дозволили оптимізувати форму вихідної заготовки та деформуючого інструменту. Оптимізація геометрії деформуючого інструменту та заготовки велась за умови, що за результатами моделювання у найбільш деформованих ділянках заготовки розраховані значення критерію руйнування Normalizet Cockcroft-Latham не мають перевищувати граничного значення 0,6, визначеного для операції вісесиметричного витягування. Результати натурного експерименту підтвердили правомірність прийнятих припущень. Після внесення відповідних змін у геометрію вихідної заготовки та деформуючого інструменту проблема появи браку під час штампування була успішно вирішена.

Ключові слова: штампування, оптимізація, формовка, чисельне моделювання, метод скінчених елементів, критерій руйнування.

При виготовленні деталей із застосуванням операцій листового штампування на жаль виникають ситуації, коли при проектуванні штампового оснащення практичні рекомендації з довідникової літератури [1, 2] не дозволяють врахувати усі особливості процесу деформування листового матеріалу. Дуже часто такі ситуації закінчуються руйнуванням заготовки в процесі деформування, що призводить до необхідності корегування геометрії заготовки та деформуючого інструменту задля усунення браку процесі виготовлення деталей та збереження інструменту як такого.

Однак доопрацювання інструменту – це процес ітераційний та витратний. І якщо він виконується без врахування особливостей процесу деформування, то може закінчитись безрезультатним псуванням вартісного штампового оснащення. У таких випадках використання моделювання процесу деформування дозволяє встановити причини руйнування заготовки та визначити необхідну геометрію інструменту, яка б забезпечила деформування вихідної заготовки без руйнування [3–6].

Подібна ситуація виникла при виготовленні зі сталі 30ХГСА корпусної деталі великокаліберного кулемету. У конструкцію даної деталі були закладені мінімально допустимі радіуси переходів, але її формування супроводжувалось постійним руйнуванням заготовки на радіусній кромці деформуючого пуансона (рис. 1). Тому виникла необхідність скорегувати параметри процесу деформування заготовки для усунення браку.

Ціллю роботи є перевірка можливості та ефективності використання комп'ютерного моделювання у середовищі DEFORM для оптимізації параметрів процесу формовки корпусної деталі великокаліберного кулемету із листової заготовки із сталі 30ХГСА для усунення браку штампування.



Рис. 1. Характер руйнування вихідної заготовки при деформуванні

Для встановлення причин руйнування заготовки в процесі деформування в роботі за допомогою комп'ютерного моделювання у програмному комплексі Deform-3D були досліджені особливості формоутворення корпусної деталі за умов, максимально наближених до реальних умов деформування (геометрія деформуючого інструменту, геометрія та матеріал вихідної заготовки, умови тертя). Для моделювання використовувалась пластична модель матеріалу вихідної заготовки. Схема деформування та zdeформована заготовка представлені на рис. 2.

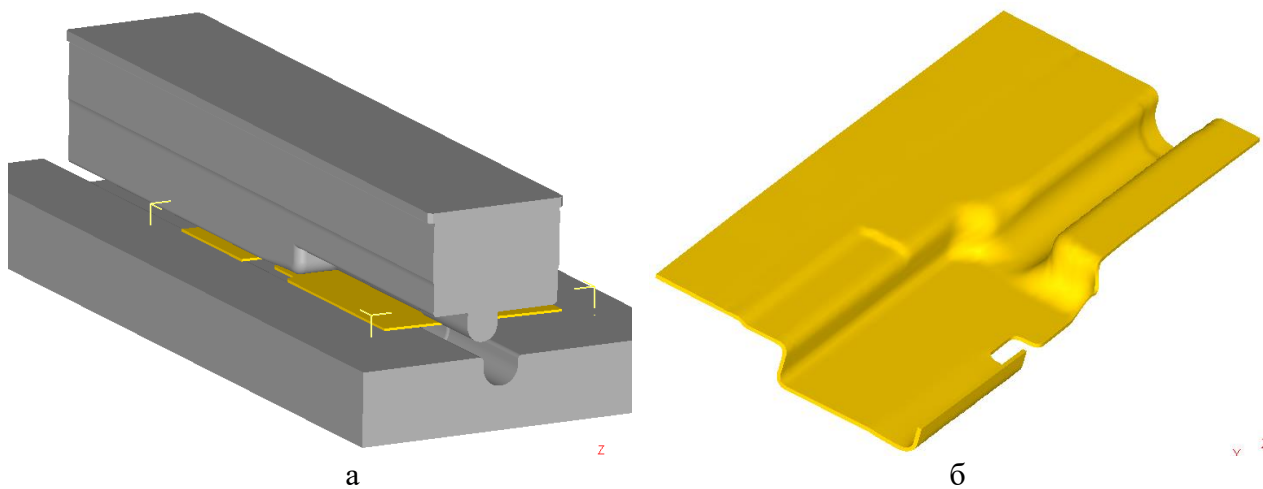


Рис. 2. Моделювання деформування заготовки з початковою геометрією:
а – схема деформування; б – zdeформований напівфабрикат

Однак програмний комплекс Deform не призначений для моделювання процесів, пов'язаних з руйнуванням матеріалу, тому очікувано за результатами моделювання руйнування заготовки в небезпечному перерізі не відбулось (рис. 3), хоча геометрія деталі, отримана за результатами моделювання процесу формовки (рис. 3) дуже точно повторює геометрію напівфабрикату, отриманого під час натурального експерименту (рис. 1).

Для прогнозування руйнування матеріалу заготовки в процесі деформування в Deform передбачено використання різноманітних критеріїв руйнування [7]. В даній роботі використовувався критерій руйнування Normalized Cockcroft-Latham, значення якого визначаються за формулою:

$$C = \int_{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon},$$

де $\bar{\varepsilon}$ – накопичена пластична деформація, $d\bar{\varepsilon}$ – приріст накопиченої деформації, σ^* – максимальне головне напруження, $\bar{\sigma}$ – інтенсивність напружень.

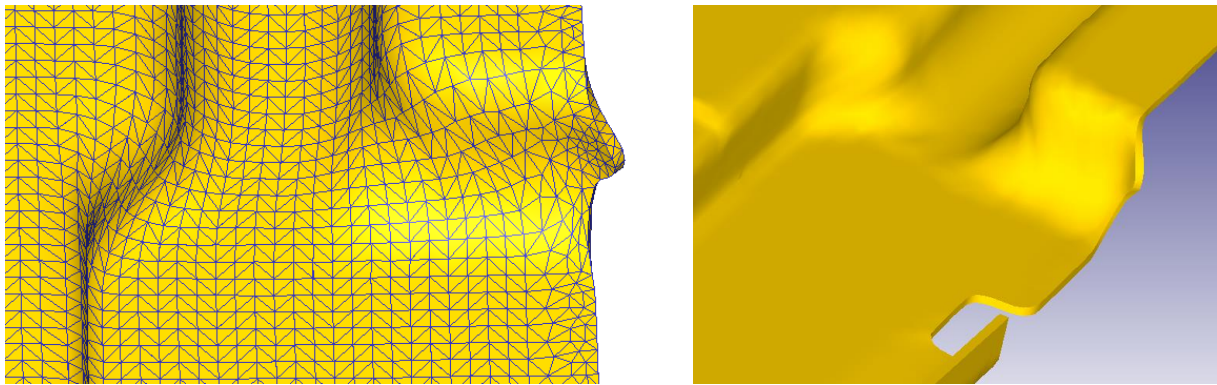


Рис. 3. Характер деформування заготовки в місці руйнування напівфабрикату

Для оцінки ймовірності руйнування було використано граничне значення критерію 0,6, встановлене для сталі 20 [8]. При цьому виходили з припущення, що даний критерій безрозмірний і його що граничне значення для сталі 30ХГСА якщо і буде відрізнятись від прийнятого, то не суттєво, а перевищення розрахованих значень критерію руйнування граничного значення сигналізує про високу ймовірність руйнування заготовки у даному місці в процесі деформування.

На рис. 4 представлені картини розподілу інтенсивності деформацій та значень критерію руйнування на небезпечній ділянці заготовки.

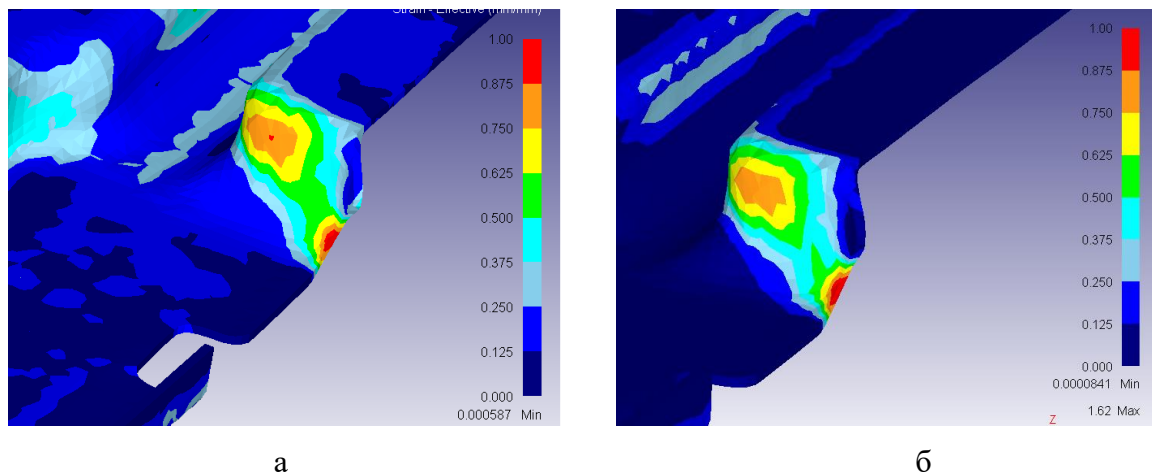


Рис. 4. Розподіл параметрів деформованого стану в zdeформованій заготовці з початковою геометрією:

а – інтенсивності деформації ε_i ; б – значень критерію руйнування

З рис. 4 видно, що на небезпечній ділянці напівфабрикату існує два місця з піковими значеннями інтенсивності деформації та критерію руйнування, а максимальні значення критерію руйнування 1,6 (значно перевищує прийняте граничне значення 0,6) та інтенсивності деформації $\varepsilon_{i\max} = 1,45$ відповідають місцю руйнування заготовки у реальному процесі (рис. 1).

Також за результатами аналізу процесу деформування заготовки було встановлено що початкова форма вихідної заготовки не оптимальна, вона ускладнює процес деформування напівфабрикату та призводить до небажаного збільшення ступеня деформації на небезпечній ділянці.

Для покращення умов деформування геометрія вихідної заготовки була скорегована (рис. 5, а) та виконане моделювання процесу формування напівфабрикату із скорегованої заготовки (рис. 5, б).

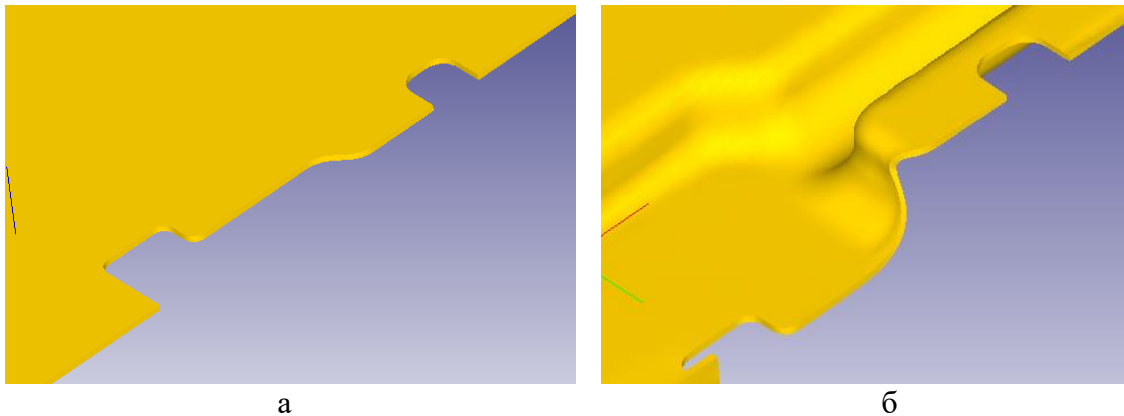


Рис. 5. Моделювання деформування заготовки зі скорегованою геометрією: а – елемент контуру заготовки; б – zdeформований напівфабрикат

На рис. 6 представлені картини розподілу інтенсивності деформацій та значень критерію руйнування на небезпечній ділянці напівфабрикату при деформуванні скорегованої заготовки.

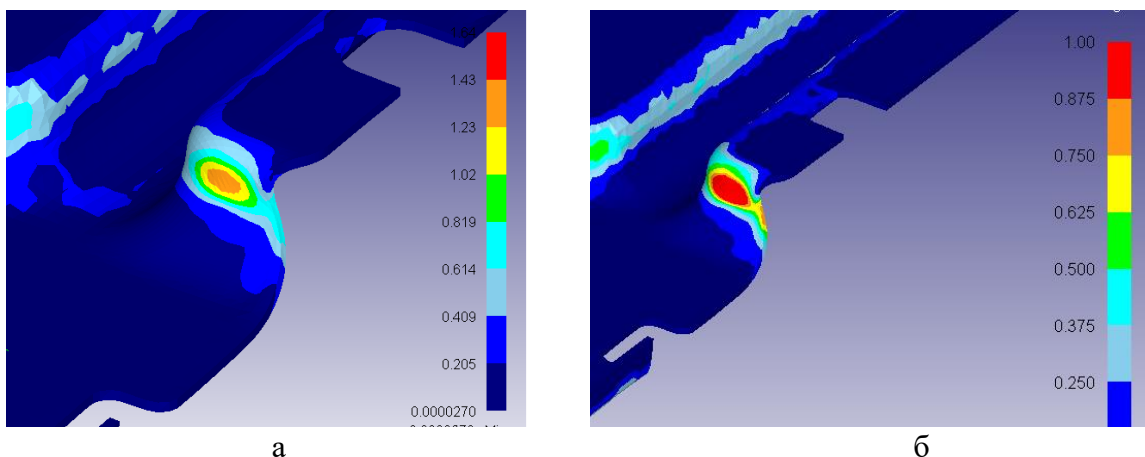


Рис. 6. Розподіл параметрів деформованого стану в zdeформованій заготовці зі скорегованою геометрією: а – інтенсивності деформації ε_i ; б – значень критерію руйнування

Результати моделювання показали, що використання заготовки зі скорегованою геометрією дозволяє розвантажити ділянку напівфабрикату на радіусній кромці пуансона, де відбувалось руйнування заготовки, проте залишилась небезпечна ділянка на радіусній кромці матриці. Максимальне значення інтенсивності деформації на цій ділянці становить $\varepsilon_{i\max} = 1,3$, критерію руйнування – 1,5, що перевищує прийняте граничне значення 0,6 та свідчить про дуже високу ймовірність руйнування.

Проведений натурний експеримент підтвердив, що використання заготовки із скорегованою геометрією дозволяє уникнути руйнування заготовки на радіусній кромці пуансону, проте руйнування заготовки відбулось на радіусній кромці матриці (рис. 7), де за результатами моделювання значення критерію руйнування перевищили граничне значення.

Оскільки величина деформації матеріалу заготовки на кромці матриці за інших рівних умов залежить від радіуса заокруглення матриці, наступним кроком був підбір за результатами моделювання мінімально допустимого радіуса заокруглення кромки матриці у місці руйнування.

За результатами чисельних експериментів була підібрана відповідна геометрія матриці, за якої значення критерію руйнування вдалось знизити до критичного значення 0,6...0,62 (рис. 8).



Рис. 7. Характер руйнування скорегованої заготовки при деформуванні

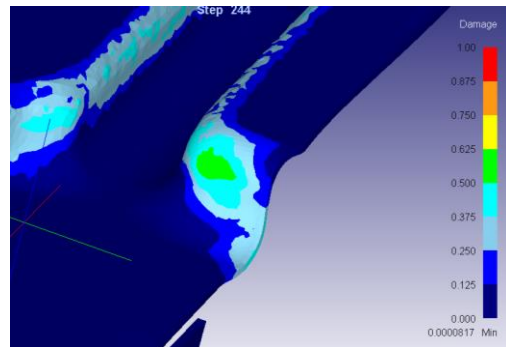


Рис. 8. Розподіл значень критерію руйнування за результатами моделювання деформування заготовки інструментом з оптимізованою геометрією

Відповідно до отриманих даних були скореговані геометрія та розміри деформуючої матриці. Остаточні результати по формуванню напівфабрикату корпусу представлені на рис. 9. Як видно з рисунку, деформування відбулось у відповідності до результатів моделювання, без руйнування заготовки в процесі деформування. При виготовленні експериментальної партії напівфабрикатів корпусу деформування заготовок відбувалось прогнозовано, без руйнування.



Рис. 9. Результати натурального експерименту по деформуванню заготовки інструментом з оптимізованою геометрією

ВИСНОВКИ

В роботі за результатами порівняльного аналізу комп'ютерного моделювання та натурних експериментів по деформуванню сталі 30ХГСА в процесі формовки напівфабрикату корпусної деталі великокаліберного кулемета встановлено, що використання граничного значення 0,6 критерію руйнування Normalized Cockcroft-Latham дозволяє за результатами моделювання ефективно прогнозувати руйнування листової заготовки в процесі формовки. Підтверджено, що якщо за результатами моделювання розраховані значення критерію руйнування не перевищують граничного значення, формовка в реальних умовах протікає без руйнування заготовки. Отримані результати досліджень дозволили шляхом моделювання оптимізувати форму вихідної заготовки та деформуючого інструменту з наступним їх доопрацюванням, що забезпечило подальше штампування напівфабрикату без руйнування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Машиностроение. 1979. 520 с.
2. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка Под общ. ред. Л.И. Рудмана. Москва: Машиностроение. 1988. 496 с.
3. Стеблюк В.І., Орлюк М.В., Шкарлута Д.Б. Витягування вісесиметричних тонкостінних виробів із нержавіючої сталі 04X18H9T. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*: Тематич. зб. наук. пр. Краматорськ: ДДМА. 2007. С. 268–270.
4. Калюжний В. Л., Ярмоленко О. С., Марчук К. Л. Штампування із маловуглецевої сталі заготовки гільзи середніх розмірів. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2021. 5. 1. С. 113–121.
5. Калюжний В.Л., Бісик С.П., Калюжний О.В., Горностай В.М. Підвищення продуктивності та зниження витрат металу при штампуванні латунних гільз великої довжини. *Озброєння та військова техніка*. Київ. 2021. 2(30). С. 85–95.
6. Stebunov S., Vlasov A., Biba N. Prediction of the fracture in cold forging with modified Cockcroft-Latham criterion. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918309594>
7. Власов А. В. Расчет поврежденности металла при холодной радиальной ковке по результатам конечно-элементного моделирования в программе Deform 3D. *Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения и обработки давлением: сборник докладов и материалов IX Конгресса «Кузнец-2009»*. Рязань. 2009. С. 204–218.
8. Орлюк М. В. Граничні значення критеріїв руйнування при моделюванні процесів витягування в середовищі DEFORM. *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА. 2017. 2(45). С. 22–29. URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2\(45\)_2017/article/6.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2(45)_2017/article/6.pdf)

REFERENCES

1. Romanovskii V.P. Cold Forging Handbook. 6th edition revised and expanded. Leningrad: Machinebuilding. 1979. 520 p. (*in Russian*).
2. Die design Handbook: Sheet Metal Stamping. Under the general editorship of L.I. Rudmana. Moscow: Machinebuilding. 1988. 496 p. (*in Russian*).
3. Stebliuk V.I., Orliuk M.V., Shkarluta D.B. Axisymmetric drawing of thin-walled products made of stainless steel 04Cr18Ni9Ti. *Improvement of pressure processing processes and equipment in metallurgy and mechanical engineering*: Thematic collection of scientific papers. Kramatorsk: DSEA. 2007, pp. 268-270. (*in Ukrainian*).
4. Kaliuzhnyi V.L., Yarmolenko O.S., Marchuk K.L.. Stamping of mild steel blank of medium cartridge case. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2021. 5. 1, pp. 113–121. (*in Ukrainian*).
5. Kaliuzhnyi V.L., Bisyk S.P., Kaliuzhnyi O.V., Hornostai V.M. Productivity increasing and metal consumption reducing while large length brass sleeves stamping. *Armament and military equipment*. Kyiv. 2021. 2(30), pp.85-95. (*in Ukrainian*).
6. Stebunov S., Vlasov A., Biba N. Prediction of the fracture in cold forging with modified Cockcroft-Latham criterion. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918309594>
7. Vlasov A.V. Metal damage calculation while cold radial forging according to the results of finite element simulation in Deform 3D software package. *State, problems, and prospects for the development of forging engineering and metal forming processes: Reports and materials collection of the IX Congress "Blacksmith-2009"*. Ryazan. 2009, pp. 204–218. (*in Russian*).
8. Orliuk M.V. Limit values of fracture criteria while sheet drawing process simulating in DEFORM software package. *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2017. 2(45), pp.22-29. URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2\(45\)_2017/article/6.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2(45)_2017/article/6.pdf) (*in Ukrainian*).

Orliuk M., Pimanov V. Using of the DEFORM software package to optimize sheet metal forming operations

Using only practical recommendations of reference literature while developing of the technology of parts with complex geometry manufacturing and stamping equipment design, does not ensure high-quality parts obtaining and defects absence, since these recommendations cannot consider all the features of deformation in specific conditions. In case of defects emergence during the stamping, developed technological process or existing stamping equipment needs to be improved. A similar problem, related to the material fracture, arose in the process of heavy machine gun body part stamping from a sheet steel blank made of 30CrMnSiA steel. To eliminate defects, the effectiveness of using the DEFORM software package was studied to determine the features of complex solid parts sheet metal forming and stamping process parameters optimization. Stamping process was studied using finite element method computer simulation in DEFORM 3D environment to acquired experimental results confirming. As a computer simulation optimization parameter limit values of Normalized Cockcroft-Latham criteria defined for axisymmetric sheet drawing operations were used. According to the results of the research, negative factors that led to overload of the workpiece material and its destruction in the process of deformation were identified. Obtained results made it possible to optimize the shape of the initial workpiece and the deforming tool. Deforming tool and workpiece geometry improvement was carried out on the condition of Normalized Cockcroft-Latham criteria limit value equal 0,6 defined for axisymmetric sheet drawing operations is not exceeded.

The results of the natural experiment proved the relevancy of the accepted assumptions. After making appropriate changes to the geometry of the initial workpiece and the deforming tool, the problem of the defects appearance during stamping was successfully solved.

Keywords: stamping, optimization, forming, computer simulation, finite element method, fracture criteria.

Орлюк М. В., Пиманов В. В. Использование программного комплекса DEFORM для оптимизации операций листовой формовки

Использование при разработке технологии изготовления деталей со сложной геометрией из листового материала и проектировании соответствующего штампового оснащения только практических рекомендаций справочной литературы не гарантирует получения качественных деталей и отсутствие брака по результатам штамповки, поскольку эти рекомендации не могут учесть все особенности деформирования в конкретных условиях. В случае появления при штамповке брака разработанный технологический процесс или существующее штамповое оснащение требует доработки. Подобная проблема, связанная с разрушением материала, возникла при штамповке корпусной детали крупнокалиберного пулемета из листовой заготовки из стали 30ХГСА. С целью устранения брака в работе была исследована эффективность использования программного комплекса DEFORM для определения особенностей листовой формовки сложных пространственных деталей и оптимизации параметров процесса деформирования. Процесс деформирования исследовался с помощью компьютерного моделирования с использованием метода конечных элементов в среде DEFORM 3D и проверки полученных результатов экспериментальным путем. При моделировании в качестве оптимизационного параметра в работе использовались предельные значения критерия разрушения Normalized Cockcroft-Latham, определенные для операций осесимметричной вытяжки без утонения. По результатам исследований были выявлены негативные факторы, приводившие к перегрузке материала заготовки в процессе деформирования и его разрушения. Полученные результаты позволили оптимизировать форму исходной заготовки и деформирующего инструмента. Оптимизация геометрии деформирующего инструмента и заготовки велась при условии, что по результатам моделирования в наиболее деформированных участках заготовки рассчитанные значения критерия разрушения Normalized Cockcroft-Latham не должны превышать предельного значения 0,6, определенного для операции осесимметричной вытяжки. Результаты натурного эксперимента подтвердили правоту принятых допущений. После внесения соответствующих изменений в геометрию исходной заготовки и деформирующего инструмента проблема появления брака во время штамповки была успешно решена.

Ключевые слова штамповка, оптимизация, формовка, численное моделирование, метод конечных элементов, критерий разрушения.

Орлюк Михайло Володимирович – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»

Orliuk Mykhailo – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor NTU “I. Sikorsky KPI”

Орлюк Михаил Владимирович – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПИ им. И. Сикорского»

E-mail: minorkpi@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4728-9097>

Піманов Валерій Володимирович – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»

Pimanov Valerii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor NTU “I. Sikorsky KPI”

Пиманов Валерий Владимирович – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПИ им. И. Сикорского»

E-mail: pimanov@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6609-6904>

НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

NTU “I. Sikorsky KPI” – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv

НТУУ «КПИ им. И. Сикорского» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев

Стаття надійшла до редакції 14.05.22 р.