

Dr inż. Marcin HOJNY
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Uruchomienie produkcji nowego asortymentu wanien

Część 2: Symulacje metodą elementów skończonych w równoległym projektowaniu i wytwarzaniu

Starting up of a new bathtubs' range production Part 2: Finite elements simulation for concurrent design and manufacture

Streszczenie

Globalizacja i konkurencja w przemyśle metalowym wymusza konieczność ograniczenia czasu rozwoju produktu. Dlatego też, komputerowe wspomaganie rozwoju produktu stało się jedną z najbardziej ważnych technik w przemyśle metalowym. Zastosowanie zintegrowanych systemów CAD/CAM/CAE w projektowaniu narzędzi do tłoczenia wraz z koncepcją inżynierii współbieżnej, pozwala na znaczne zredukowanie czasu rozwoju i kosztów, a także poprawić jakość i wprowadzić produkt na rynek w względnie krótkim czasie. W artykule przedstawiono znaczenie zastosowania symulacji MES w koncepcji projektowania współbieżnego, w oparciu o przykładowe wyniki analiz narzędzia do tłoczenia wanny z serii 1700.

Abstract

The globalization and competition in the metal industry make it necessary to reduce the time spent on product development. Therefore, computer aided product development has become one of the most important techniques in the metal industry. Application of an integrated CAD/CAM/CAE system for stamping die design together with concurrent engineering concept, can greatly reduce the development time and cost, improve the product quality and push product into the market in relatively short time. In this paper the role of FEM simulation in the concurrent engineering concept is presented, based on example results of analysis of die design for the stamping of a bathtub 1700.

Słowa kluczowe: inżynieria współbieżna, efektywny próg ciągowy, głębokie tłoczenie, wanna, siła hamowania

Key words: concurrent engineering, equivalent drawbead, deep drawing, bathtub, restraining force

1. WSTĘP

W procesach kształtowania metali, modelowanie i symulacje mogą być użyte w różnym celu, na przykład do przewidywania płynięcia metalu, analizy rozkładów naprężeń, odkształceń i temperatur, wyznaczenia sił kształtowania, prognozowania potencjalnych źródeł wad i uszkodzeń, poprawy jakości wyrobu oraz ograniczenia kosztów wytwarzania. W dzisiejszych czasach, symulacje MES są często częścią cyklu produkcyjnego integrującego etapy projektowania produktu jak też i procesu wytwarzania. Szczególnie istotne jest zastosowanie symulacji w fazie projektowania wyrobu.

1. INTRODUCTION

In sheet metal forming processes, modelling and simulation can be used for many purposes, for example to predict metal flow, to analyse stress, strain and temperature distribution, to determine forming forces, to forecast potential sources of defects and failures, to improve part quality and to reduce manufacturing costs. Nowadays, FEM simulations are often integrated parts of product and process design in an integrated manufacturing environment. It is essential to apply simulation in the design phase.

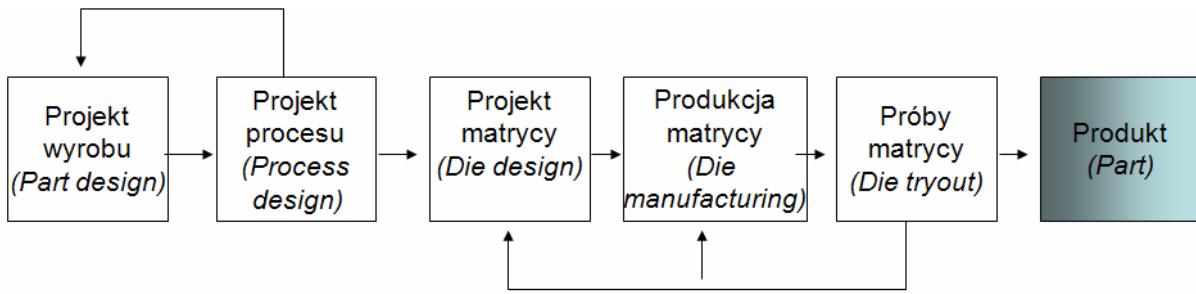
Decyzje podjęte na etapie projektowania znacząco decydują o całkowitych kosztach wytwarzania [1]. Obecnie na rynku jest dostępnych kilka komercyjnych pakietów do symulacji kształtowania. Oprócz pakietów ogólnego zastosowania takich jak MSC.MARC lub ABAQUS, ostatnio coraz szerzej są stosowane pakiety dedykowane procesom kształtowania metali. Wśród nich, AUTOFORM, PAM-STAMP oraz DYNAFORM są na rynku pakietami wiodącymi. W prezentowanej pracy, przypadek przemysłowy był analizowany za pomocą pakietu DYNAFORM 5.7 oraz solvera LS-DYNA. Od roku 1993 solver LS-DYNA jest szeroko wykorzystywany do symulacji procesów tłoczenia. Opracowany przez firmę Engineering Technology Associates system eta/DYNAFORM zawiera dedykowane moduły do projektowania narzędzi (DFE - *Die Face Engineering*), optymalizacji kształtu wykrojki (BSE - *Blank Size Engineering*), analizy narzędzi (DSA - *Die Structural Analysis*), kompensacji efektu sprężynowania (SCP - *Springback Compensation Process*) oraz moduł symulacji całych linii technologicznych (LDS - *Line Die Simulation*) [3].

Metody współbieżne w rozwijaniu nowych produktów przede wszystkim zależą od tego, w jaki sposób symulacje MES są stosowane w projektowaniu i analizie samego już procesu, jak również narzędzi i wyrobu. Obecnie, rozwijane są różne algorytmy oraz procedury na potrzeby analiz procesów kształtowania metali, począwszy od jawnych i niejawnych modeli MES do jednokrokowych solverów. Powyższe metody w połączeniu z nowymi możliwościami obliczeniowymi obecnych komputerów, dostarczają przydatne narzędzia do implementacji podejścia równoległego projektowania oraz wytwarzania. Inżynieria współbieżna w rozwoju nowych elementów tłoczonych sugeruje, że projekt wyrobu, procesu, narzędzi, procesu wytwarzania narzędzi i ich prób, może być prowadzony równolegle [2]. Tradycyjny proces (tzw. inżynieria sekwencyjna) rozwoju nowego produktu jest przedstawiona na rysunku 1. Natomiast podejście do projektowania z wykorzystaniem zintegrowanych systemów CAD/CAM/CAE wspieranych symulacjami MES pokazano na rysunku 2.

The decisions made in the design stage significantly determine the overall manufacturing costs [1]. Today, several commercial packages are available for forming simulation. Besides general purposes packages such as MSC.MARC or ABAQUS, recently special packages dedicated for sheet metal forming are more widely and more often applied. Among them, the AUTOFORM, PAM-STAMP and DYNAFORM are the leading tools. In this paper, the industrial case was study by using DYNAFORM 5.7 software and LS-DYNA solver. The LS-DYNA solver has been widely used for sheet metal forming simulation since 1993. Engineering Technology Associates has developed a specialized sheet metal forming software package and additional modules such as formability module, die face engineering (DFE), blank size engineering (BSE), die structural analysis (DSA), springback compensation process (SCP) module, and line die simulation (LDS) module [3].

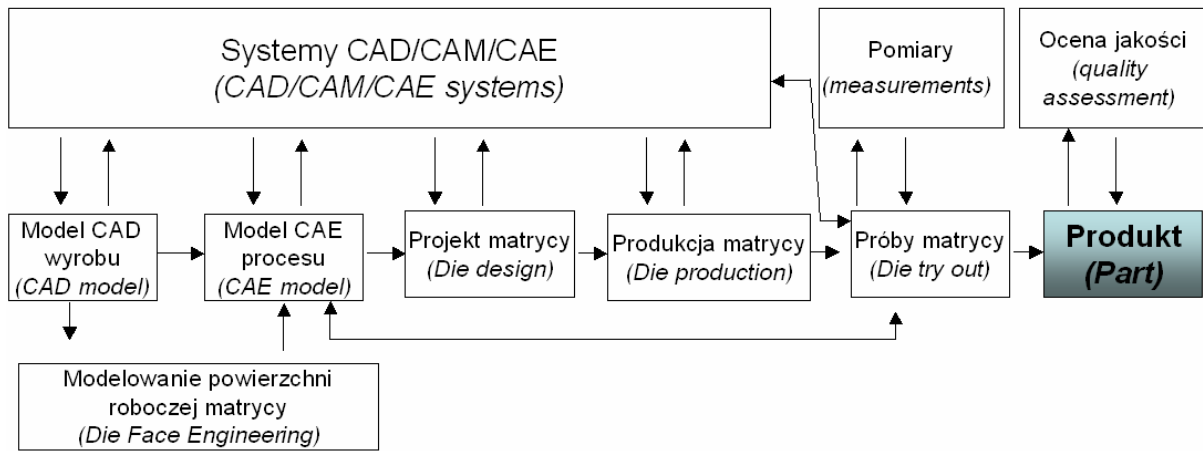
A concurrent methods for developing new products would depend strongly on how FEM simulation is applied to the design and analysis of the process, the tools and the part. Nowadays, different algorithms and procedures have been developed for the analysis of sheet metal forming, ranging from implicit and explicit FEM models to one-step solvers. These methods, combined with the sever improved computing capability of computers, provide useful tools to implement concurrent design and manufacture approach.

Concurrent engineering for developing new sheet metal parts suggests that the design of the part, the process and the tools, tool manufacturing and try out, may be carried out concurrently [2]. A traditional process (sequential engineering) of developing a new product is shown in Figure 1, whilst a process using a integrated CAD/CAM/CAE approach with FEM simulation is shown in Figure 2. The data flow of developing a sheet metal part with FEM simulation is shown in Figure 3.



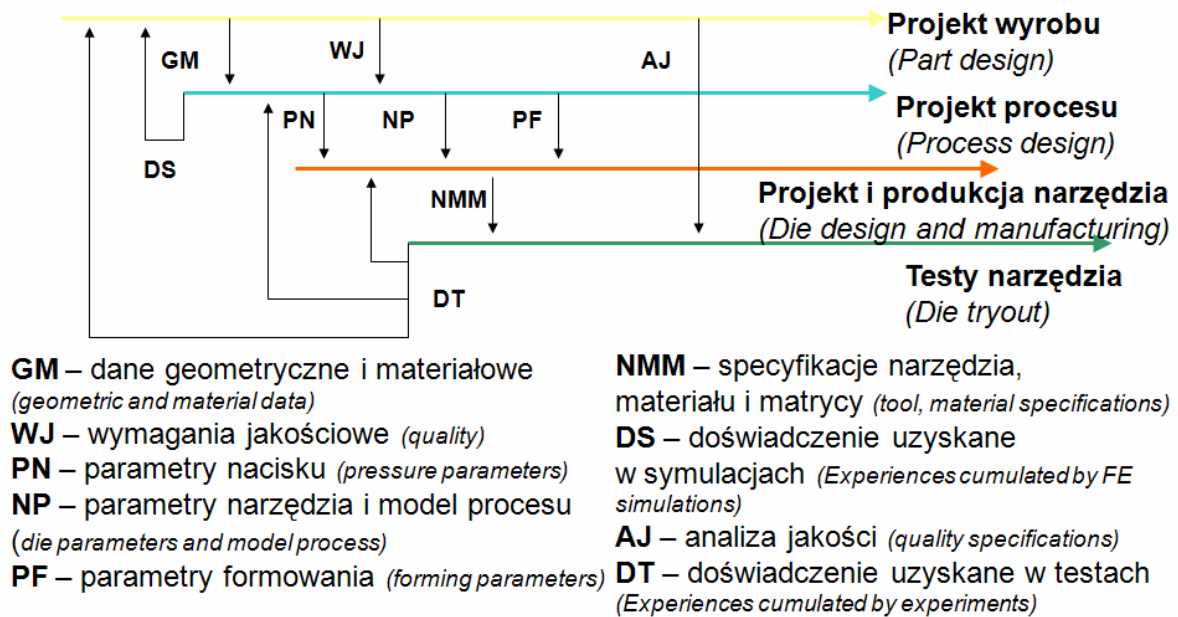
Rys. 1. Tradycyjny proces rozwoju produktu

Fig. 1. A traditional process of part development



Rys. 2. Proces rozwoju produktu wspomagany systemem MES

Fig. 2. A product development process with FE simulation support



Rys. 3. Przepływ informacji w współbieżnym rozwoju produktu

Fig. 3. The data flow in concurrent product development

Na rysunku 3 przedstawiono schemat przepływu informacji w rozwoju produktu tłoczonego wspomaganym symulacjami MES. Za pomocą symulacji MES, ewentualne poprawki wstępnego lub też końcowego projektu narzędzia po próbach przemysłowych, mogą być praktycznie wyeliminowane. Inne parametry kształtowania wpływające na wymaganą jakość produktu, mogą być także łatwiej i efektywniej wyznaczone.

Celem przedstawienia oczekiwanej roli symulacji MES, w artykule rozważono projekt procesu wyrobu (wytłoczki) i projekt narzędzi użytych do produkcji wanny z serii 1700. Symulacje komputerowe mogą być efektywnie wykorzystane na różnych etapach projektowania i wytwarzania do wspomaganie decyzji projektowych. Pierwszym celem symulacji jest oszacowanie czy wyrób może być formowany czy też nie. Jeśli analiza nie jest pozytywna, projekt musi zostać zmodyfikowany. Na tym etapie pełna geometria narzędzi nie jest wymagana. Stosowane są tak zwane solwery jednokrokowe, jako że sama analiza produktu nie wymaga dociskacza oraz większości parametrów procesu i warunków. Jeżeli stwierdzono, że produkt jest „kształtowany”, wymagana jest już symulacja procesu z uwzględnieniem narzędzi. Na tym etapie jest konieczność określenia liczby operacji tłoczenia (ciągnięcie-okrawanie-zaginanie krawędzi) oraz zamodelowanie geometrii narzędzia przy użyciu systemu CAD. Dla tych symulacji wymagana jest już znajomość geometrii dociskacza, naddatków i warunków procesu. Symulacje komputerowe są także konieczne na etapie prób przemysłowych narzędzi, w celu poszukiwania rozwiązań w celu uniknięcia ewentualnych defektów jakie mogą powstać podczas prób.

2. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

Wanna jest tłoczona z blachy w gatunku DC05 o grubości 1,4 mm. Główny proces kształtowania jest realizowany w jednej operacji w celu uniknięcia ewentualnych wad mogących wystąpić podczas wieloetapowego kształtowania.

With the help of FEM simulation, amendment of the preliminary or final design of the product die after the tool try-out can be avoided. Others forming parameters, which would result in a product with the required quality, can be determined in an efficient way.

In order to present the expected role of simulation, consider the design and manufacturing of stamping tools used for production of a bathtub 1700. Computer simulation may be effectively performed at different stages of design and manufacturing to support decision. The first target of the simulation is to make a rough estimation as to whether the part can be formed or not. If the analysis is not positive, the design must be modified. At this stage full tools geometry of a part are not required. The so called one-step solvers are often used, since the product analysis does not require binder and most of the process parameters and conditions. As the product has been validated as “formable”, the die design and process simulations are required. At this stage, it is necessary to determine the number of stamping steps (drawing-trimming-edge bending) and die geometry which is modeled by using CAD system. For these analyses is required a knowledge on binder, addendum and process conditions. Simulation is also required at the try out stage to find a solution to avoid forming defects appearing during try out.

2. RESULTS OF NUMERICAL ANALYSIS

The bathtub is made of steel of 1.4 mm thickness and is to be formed by a single drawing process to avoid drawing marks caused by a multi stamping process. Also, both the flange width around the cavity and maximum thinning of the final shape should be greater than 70 mm and lower than $\pm 40\%$, respectively, required by the part design.

Kolejnym etapem jest okrawanie kołnierza wanny. Z założeń projektowych narzędzi do tłoczenia wanny szerokość kołnierza powinna być większa niż 70 mm, a maksymalne pocienienie lub pogrubienie wyrobu końcowego mniejsze niż $\pm 40\%$.

Mimo, że przeprowadzone badania dotyczyły przede wszystkim optymalizacji narzędzi do tłoczenia wanny, głównym celem projektowania narzędzi było uniknięcie defektów (pofałdowanie, pęknięcie). Poprawny kształt narzędzi zależy od dokładnego określenia przebiegu płynięcia metalu podczas samego procesu kształtowania, ale z drugiej strony zależy także od doświadczenia i umiejętności projektowania procesu tłoczenia wanny przez inżynierów i technologów.

Właściwości mechaniczne materiału użytego w próbach przemysłowych i symulacjach były następujące:

- granica plastyczności: 179 MPa,
- wytrzymałość na rozciąganie: 301 MPa,
- współczynnik umocnienia $n = 0,219$,
- współczynnik anizotropii $r = 2,28$.

Inne parametry procesu: współczynnik tarcia, siła nacisku dociskacza, były przyjmowane zależnie od warunków prowadzenia procesu tłoczenia.

Celem wyeliminowania pofałdowania bez osiągnięcia efektu pęknięcia wytłoczki, przeanalizowano wpływ siły docisku, tarcia oraz rozmieszczenia progów ciągowych, a zwłaszcza siły hamowania. Otrzymane rozkłady odkształceń głównych dla różnych warunków brzegowych posłużyły do opracowania optymalnego projektu kształtu narzędzia. Następnie poprawność projektu kształtu narzędzia została zweryfikowana w rzeczywistym procesie produkcyjnym.

W symulacjach metodą elementów skończonych, użyto model efektywnego progu ciągowego. Więcej szczegółów i informacji odnośnie efektywnego progu ciągowego oraz wyznaczania siły hamowania przedstawiono w części pierwszej artykułu [4], który dotyczył symulacji komputerowej procesu tłoczenia oraz narzędzi do produkcji wanny 1200.

Ustawienie narzędzi przy symulacji procesu tłoczenia wanny 1700 przedstawiono na rysunku 4.

The efforts focused on the die design for the stamping of a bathtub are mainly to avoid major defects such as wrinkling and fracture. A successful die design generally results from an accurate prediction of the metal flow during the forming process, and on the other hand on the experience and know-how of engineers in actual practice.

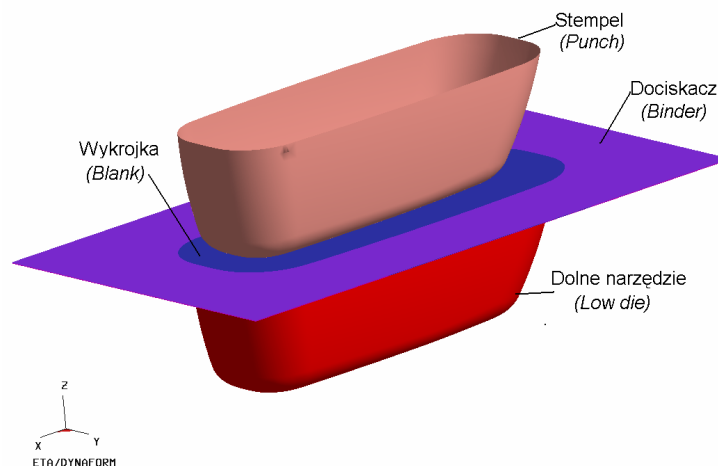
Some further information about material are given below:

- yield strength: 179 MPa,
- tensile strength: 301 MPa,
- hardening exp. n -value: 0.219,
- anisotropy r -value: 2.28.

The other process parameters, such as the friction coefficient and blank holder pressure, was set differently for the different stamping conditions.

In order to eliminate wrinkles without introducing fracture, the effects of the blank holder pressure, friction and the distribution of the drawbead especially restraining force were investigated also. The strain distribution for various stamping conditions were established for designing an optimum set of stamping dies. The die design obtained from the finite element analysis was validated by the production part.

In the finite element simulations, the equivalent drawbead model was used. More details and information about equivalent drawbead model and restraining force prediction was presented in the first part of the current paper [4]. In the present study, the tooling setup for the stamping of a bathtub 1700, as shown in Figure 4.



Rys. 4. Ustawienie narzędzi do tłoczenia wanny 1700

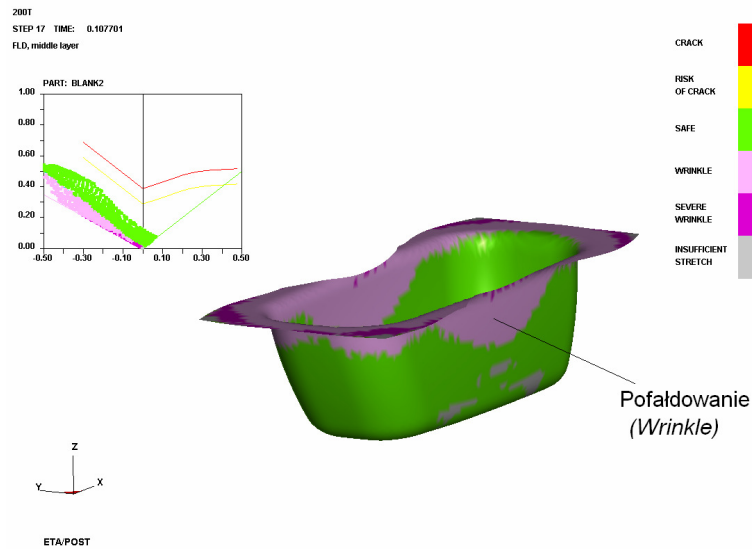
Fig. 4. Tooling setup for the stamping of a bathtub 1700

Model MES narzędzia został przygotowany przy użyciu modułu do projektowania narzędzi (DFE - Die Face Engineering) będącego modułem składowym systemu eta/DYNAFORM. Moduł ten jest narzędziem pomagającym inżynierom na szybkie uzyskanie kompletu narzędzi do tłoczenia, bazując na geometrii wyrobu gotowego. Poprzez integrację z modułem symulującym samo kształtowanie, moduł DFE pomaga zredukować cykl projektowy w systemie CAD. W modelu obliczeniowym narzędzia traktowane były jako sztywne. Stan kontaktu zachodzącego podczas tłoczenia wanny był identyfikowany odpowiednimi algorytmami zakodowanymi w programie eta/DYNAFORM. Optymalny kształt wykrojki został wyznaczony na podstawie symulacji metodą elementów skończonych przy użyciu modułu BSE służącego m.in. do optymalizacji kształtu wykrojki (BSE - Blank Size Engineering) będącego modułem składowym systemu eta/DYNAFORM.

W wstępnym projekcie narzędzia przyjęto siłę wywieraną przez dociskacz równą 2,0 MN oraz współczynnik tarcia równy 0,125. Na rysunku 5 przedstawiono końcowy kształt dla żądanych parametrów. Jak można zaobserwować, znaczące płynięcie metalu występuje w części środkowej kołnierza, co doprowadziło do stosunkowo małej jego szerokości, mniejszej niż wymagane w projekcie 70 mm. Ponadto, na bocznej części wystąpiło niepożądane zjawisko pofałdowania. Rozkład odkształceń głównych na tle krzywej odkształceń granicznych przedstawiono na rysunku 5.

FEM model of die were prepared by using DFE (Die Face Engineering) module of eta/DYNAFORM system. The Die Face Engineering (DFE) is a tool developed for help to stamping engineers in quick derive a suite of draw dies, including binder and addendum, from the product design. By integrating with forming simulation, DFE helps to reduce iteration time for tooling design in the CAD system. In the finite element simulation, the tooling is considered to be rigid. The condition contact proceeding during stamping of bathtub was identified by algorithms coded in eta/DYNAFORM system. An optimum sheet blank shape determined by the finite element analysis was used for all die designs by using BSE (Blank Size Estimated) module of eta/DYNAFORM system.

A clamping force of 2.0 MN exerted by the blank holder and a coefficient of friction of 0.125 were assumed for the initial die design. The final shape that results from which design being show in Figure 5. As seen, significant metal flow occurs in the middle flange resulting in a relatively small flange width, less than the required width of 70 mm. Moreover, some wrinkles also appear on the draw wall. The major and minor strain distributions as well as the forming limit diagram are shown in Figure 5, as well.



Rys. 5. Końcowy kształt wanny 1700 oraz rozkład odkształceń głównych na tle Granicznej Krzywej Tłoczenia (GKT) dla wstępnego projektu narzędzia

Fig. 5. Final shape of a bathtub 1700 and the minor and major strain and Forming Limit Diagram (FLD) for the initial die design

Widać wyraźnie, że otrzymana wytłoczka jest wolna od pęknięć, lecz mała szerokość kołnierza i obecność pofałdowania jest niedopuszczalna w końcowym produkcie. Dlatego też projekt narzędzia musiał zostać zmodyfikowany. Zarówno zwięźanie kołnierza oraz powstawanie efektu pofałdowania, wynika z znaczącego płynięcia metalu w tym obszarze. Jedną z najskuteczniejszych metod ograniczenia płynięcia jest dodanie progów ciągowych. Zgodnie z wynikami symulacji komputerowych efekt pofałdowania zanika, gdy siła, jaką wywiera dociskacz wzrasta z 2,1 MN do 4,2 MN.

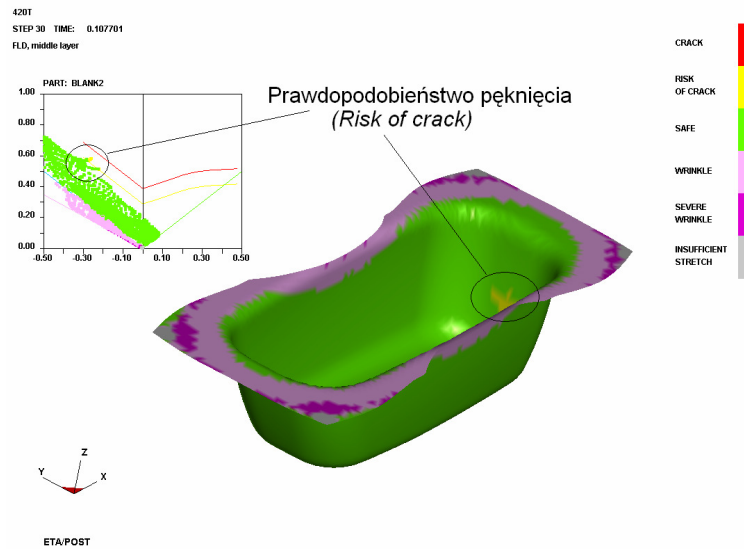
Jednakże analiza odkształceń głównych wyznaczonych na tle krzywej odkształceń granicznych, przedstawionych na rysunku 6, wskazuje, że wytłoczka jest blisko pęknięcia, ponieważ niektóre punkty są powyżej linii określającej prawdopodobieństwo pęknięcia.

Celem wyeliminowania pofałdowania bez występowania problemu z potencjalnym pękaniem, zaprojektowano wymiary oraz położenie progów ciągowych. Bazując na obserwacji płynięcia metalu otrzymanego z symulacji metodą elementów skończonych, zaproponowano 3 progi oznaczone jako db1, db2 oraz db3 w położeniu przedstawionym na rysunku 7.

It is seen clearly that the final shape is free from fracture, but they small flange width and the presence of wrinkles are not allowed in the final product so that the die face must therefore be modified. Both the narrowness of the flange and the formation of wrinkles resulted from a significant metal flow at these areas. One of the efficient methods of restraining metal flow in stamping die design is to add drawbeads on the die face. The wrinkles disappear when the blank holder pressure is increased from 2.0 MN to 4.2 MN, according to the simulation results.

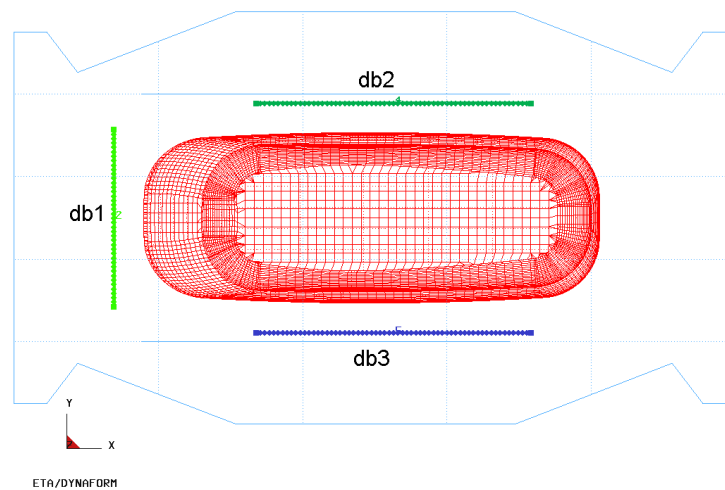
However, the major and minor strain distributions plotted on the forming limit diagram, as shown in Figure 6, indicate that the sheet metal is close to fracture since many of the points are above the risk of crack line.

In order to eliminate the wrinkles without causing the problem of fracture, the size and the location of drawbeads were designed. Following the observation of the metal flow obtained from the finite element results, the three drawbeads were used, as shown in Figure 7, denoted db1, db2 and db3.



Rys. 6. Końcowy kształt wanny 1700 oraz rozkład odkształceń głównych na tle Granicznej Krzywej Tłoczenia (nacisk dociskacza 4,2 MN)

Fig. 6. Final shape of a bathtub 1700 and the minor and major strain and Forming Limit Diagram (blank holder pressure 4.2 MN)

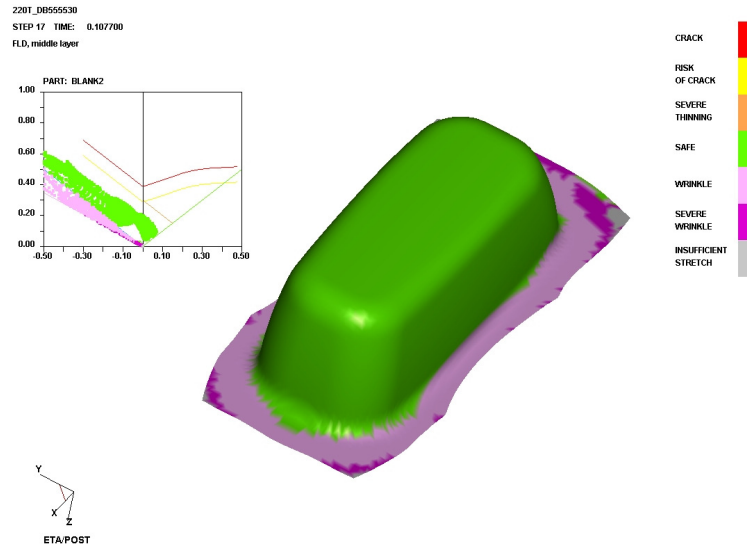


Rys. 7. Rozmieszczenie progów ciągowych dla końcowego projektu narzędzia

Fig. 7. Drawbead distribution for the final die design

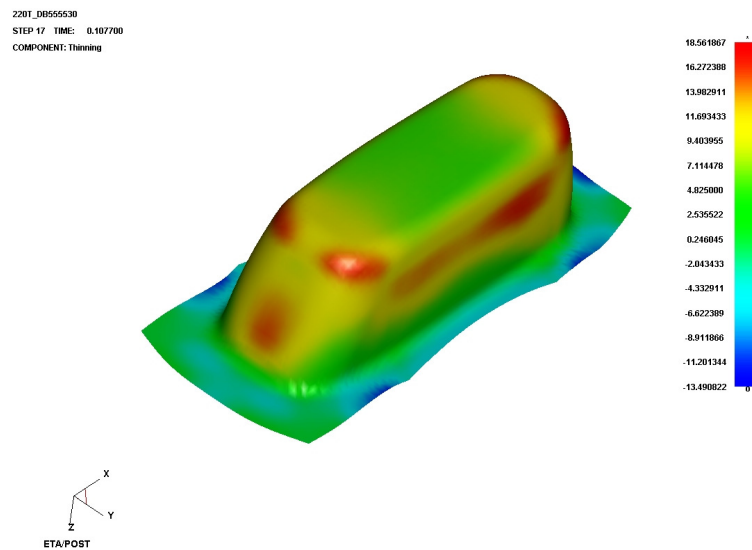
Ustalone długości i siły hamownia są następujące: 560 mm oraz 0,182 kN/mm dla proggu oznaczonego jako db1, 930 mm oraz 0,33 kN/mm dla progów ciągowych oznaczonych odpowiednio db2 i db3. Końcowy kształt wanny 1700 otrzymany z symulacji MES z uwzględnieniem optymalnych sił hamowania oraz położenia i długości progów ciągowych przedstawiono na rysunku 8.

The determined lengths and restraining forces are: 560 mm and 0.182 kN/mm for drawbead db1; 930 mm and 0.33 kN/mm for drawbeads db2 and db3. The final shape obtained from the finite element simulation with the use of the optimum drawbead design is shown in Figure 8, from which it is seen clearly that the wrinkles disappear and that the calculated flange width is greater than 70 mm.



Rys. 8. Końcowy kształt wanny 1700 oraz rozkład odkształceń głównych na tle Granicznej Krzywej Tłoczenia (GKT) dla końcowego projektu narzędzia

Fig. 8. Final shape of a bathtub 1700 and the minor and major strain and Forming Limit Diagram (FLD) for the final die design



Rys. 9. Rozkład pocienienia na końcowym wyrobie wanny 1700

Fig. 9. Thinning distribution for the final part

Na rysunku tym można zaobserwować, że zjawisko pofałdowania na dłuższym boku wanny zostało wyeliminowane, oraz obliczona szerokość kołnierza jest większa niż 70 mm. Na rysunku 8 przedstawiono odkształcenia główne otrzymane w wyniku symulacji komputerowej, gdzie można zaobserwować, że wszystkie punkty leżą poniżej krzywej definiującej prawdopodobieństwo pęknięcia wytłoczki.

As for the major and minor strains computed from the computer simulation, as shown in Figure 8, the corresponding points are all below the risk of crack line. This indicates that a defect free part can be produced under the stamping conditions, such as the sheet blank shape, the blank holder pressure, the coefficient of friction and the drawbead locations, obtained from the finite element analysis.

Wskazuje to, że w trakcie procesu produkcyjnego, przy założeniu warunków tłoczenia otrzymanych z analiz MES takich jak, optymalny kształt wykrojki, siła nacisku wywierana przez dociskacz, tarcie, oraz położenie progów ciągowych, końcowym efektem powinien być wyrób gotowy bez wad. W przypadku wielkości pocienienia lub pogrubienia blachy (rysunek 9) otrzymane wartości mieściły się w założonym zakresie uznanym za dopuszczalny ($\pm 40\%$) i wyniosły odpowiednio -13% oraz $+18\%$.

Kształt wytłoczki wanny 1700 jaki przewidziano przy użyciu metody elementów skończonych, jest wolny od wad.

Otrzymany w czasie prób przemysłowych kształt wytłoczki wanny 1700 zgadza się z kształtem otrzymanym metodą symulacji komputerowej.

Uzyskanie produktu końcowego wolnego od wad, potwierdza ogromne korzyści wynikające z użycia systemu MES do projektowania i weryfikacji narzędzi w tłocznictwie.

3. PODSUMOWANIE

Zaprezentowany przykład produkcji z zastosowaniem procesu tłoczenia wanny z serii 1700 został zrealizowany poprzez zastosowanie podejścia w ramach inżynierii współbieżnej, w rozwoju projektu narzędzi oraz procesu produkcji wanny.

Symulacje MES zostały użyte do wspierania projektu narzędzia, samego procesu oraz podczas prób przemysłowych narzędzi. Symulacje komputerowe odegrały podczas całego cyklu rozwoju bardzo ważną rolę w integracji projektowania i wytwarzania wanny z serii 1700. Zastosowanie zintegrowanych systemów CAD/CAM/CAE do projektowania narzędzia do tłoczenia wanny 1700, wykorzystujących koncepcję inżynierii współbieżnej, dostarczyło znaczących korzyści zarówno na samym etapie projektowania jak też i wytwarzania. Pozwoliło na znaczne zredukowanie czasu rozwoju i kosztów, a także poprawienie jakości i wprowadzenie produktu na rynek we względnie krótkim czasie.

Analysis of thinning distribution (Figure 9) indicates that the minimum and maximum thinning was -13% and $+18\%$, respectively.

As predicted by the finite element analysis, the production part is free from defects. The actual part shape also agrees very well with that obtained by the finite element simulation. The defect free product confirms the advantage of using FEM system for stamping die design.

3. CONCLUSIONS

The presents industry case was realized by applying a concurrent engineering approach to the development of die design and process of bathtub 1700.

FEM simulations were conducted to support die design, process model development and tool try out. Simulations can play an important role in the integration of design and manufacture during development cycle of a bathtub 1700. Application of an integrated CAD/CAM/CAE systems for stamping die design of a bathtub 1700 using concurrent engineering concept provide significant advantages both in the design and in the manufacturing stage. This integrated approach, can greatly reduce the development time and cost, improve the product quality, and push product into the market in relatively short time.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Thomas W., Altan T.: *Application of computer modelling in manufacturing of automotive stampings*, Steel Res. 69 (4/5), 1998, 181-187.
- [2] Liu Y., Peng X., Qin Y.: *Application of FE simulations to the development of automotive sheet-metal parts – industry case study*, Proc. Of 9th International Conference on Concurrent Engineering, Cranfield, 2002.
- [3] Engineering Technology Associates.: *eta/DYNAFORM 5.7 User's Manual (2009)*
- [4] Hojny M.: *Uruchomienie produkcji nowego asortymentu wanień. Cz. 1, Analiza projektu narzędzia do tłoczenia wanny 1200*, Obróbka Plastyczna Metali, 20 (1), 2009, 39-51.