

Dr inż. Marcin HOJNY  
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

# Uruchomienie produkcji nowego asortymentu wanien

## Część 1: Analiza projektu narzędzia do tłoczenia wanny 1200

### *Starting up of a new bathtubs' range production Part 1: Analysis of die design for the stamping of a bathtub 1200*

#### **Streszczenie**

W artykule zaprezentowano przykładowe wyniki symulacji komputerowych wspomagających uruchomienie produkcji nowego asortymentu wanien serii 1200. Projekt oraz weryfikację narzędzia do tłoczenia wanny 1200 przeprowadzono przy użyciu metody elementów skończonych. Trudności napotkane podczas symulacji procesu tłoczenia to występowanie zarówno zjawiska pofałdowania, jak też i pęknięcia wytłoczki. Wykonano serie testów w celu weryfikacji własności mechanicznych blachy użytej w czasie produkcji jak też i symulacji komputerowej. Rozkład odkształceń głównych na tle krzywej odkształceń granicznych posłużył do przewidywania początku inicjowania pęknięcia. Dodatkowo w ramach prac, zbadano wpływ siły docisku i tarcia na występowanie pęknięcia i pofałdowania wytłoczki. Efektem końcowym, było zastosowanie efektywnego proggu ciągowego w modelu MES, gdzie na podstawie symulacji komputerowych wyznaczono optymalne położenie progów ciągowych jak też ich kształt. Pozwoliło to na wyeliminowanie niepożądanych efektów pęknięcia i pofałdowania w końcowym wyrobie.

#### **Abstract**

*The paper presents example results of finite element analysis leading to starting up of a new bathtubs' range production (1200 series). The design and verification of die for the stamping of bathtub 1200 was performed using finite element method. The difficulty encountered in the stamping process is the occurrence of both fracture and wrinkling. A series of tests was conducted to verify the material properties of the steel used for the actual production and for the computer simulations. The major and minor strain distributions obtained from the finite element simulations were used in conjunction with the forming limit diagram to predict the onset of fracture. In addition, the effects of blank holder pressure and friction on the occurrence of fracture and wrinkling were investigated. At the end the equivalent drawbead model was applied into finite elements model. An optimum drawbead distribution was determined, according to the finite element analysis, to avoid the formation of both fracture and wrinkles.*

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

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

## 1. WSTĘP

W ostatnich latach w technologii tłoczenia metali zaszło wiele nowatorskich zmian, m.in. wprowadzono nowe techniki kształtowania elementów blaszanych (np. kształtowanie ciśnieniem cieczy) czy też rozwój zaawansowanych technik komputerowych przy projektowaniu procesów tłoczenia. Obecnie najpopularniejszą techniką komputerową jest komputerowe wspomaganie prac inżynierskich (tzw. systemy CAE). Komputerowe wspomaganie prac inżynierskich ma ścisły związek z analitycznymi narzędziami bazującymi na meto-

## 1. INTRODUCTION

*In the last years, in the technology of sheet metal forming has undergone a number of innovative changes such as new forming technique (e.g. hydroforming) and application of advanced computer technology. One of the computer technologies is the Computer Aided Engineering (CAE). Computer Aided Engineering refers to a system of computerized analytical tools that permit finite element analysis of effective stresses, equivalent plastic strains, deformation, thickness distribution, temperature distribution.*

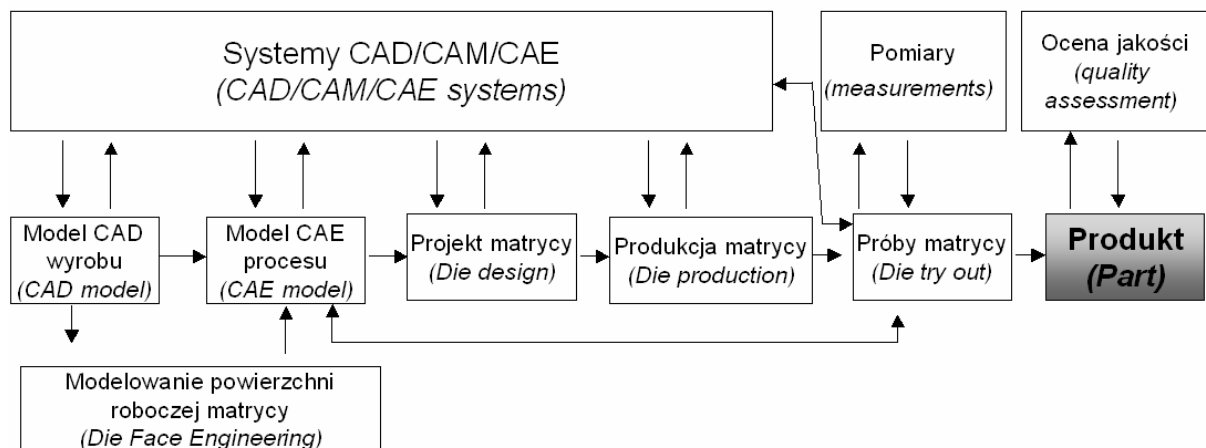
dzie elementów skończonych, pozwalających przewidywać np. rozkłady naprężeń, odkształceń, temperatur czy też rozkład grubości w analizowanym elemencie. Głównym celem systemów CAE jest ominięcie kosztownych prób eksperymentalnych oraz obniżenie ogólnych kosztów dzięki zastosowaniu szybkich i dokładnych symulacji komputerowych. Systemy CAE pozwalają inżynierom na symulacje i analizę właściwości produktu na etapie projektowania i rozwoju, jak też podczas produkcji. Otrzymane informacje są podstawą udoskonalania oraz optymalizacji procesu wytwarzania.

W niniejszym artykule zaprezentowano przykładowe wyniki wraz z omówieniem towarzyszących problemów przy uruchomieniu produkcji nowego asortymentu wanień z serii 1200. Analizowana wanna 1200 jest tłoczona z blachy DC05. Główny proces kształtowania jest realizowany w jednej operacji w celu uniknięcia ewentualnych wad mogących wystąpić podczas wielo-etapowego kształtowania. 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 było uniknięcie defektów (pofałdowanie, pęknięcie).

Poprawny kształt narzędzi zależy od dokładnego przewidzenia płynięcia metalu podczas samego procesu kształtowania, ale z drugiej strony zależy także od doświadczenia i umiejętności projektowania procesu tłoczenia przez inżynierów i technologów. W ramach pracach projektowych zastosowano podejście typowe dla inżynierii współbieżnej. Na rysunku 1 przedstawiono schemat podejścia inżynierii współbieżnej w projektowaniu wanny 1200.

*The main goal of CAE is to bypass the costly experimental testing, using fast, low cost and accurate computer simulation. CAE allows engineers to simulate and study characteristics of product during design and development cycle, as well as production. Information obtained from application of CAE helps to refine and optimize product design and manufacturing of products.*

*The paper presents example results together with accompanying problems leading to starting a new manufacturing process of bathtub from 1200 series. The stamped bathtub is made of DC05 grade steel 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. 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. In the design process the concurrent engineering has been applied. In the Figure 1 the scheme of concurrent engineering approach in designing of bath 1200 is presented.*

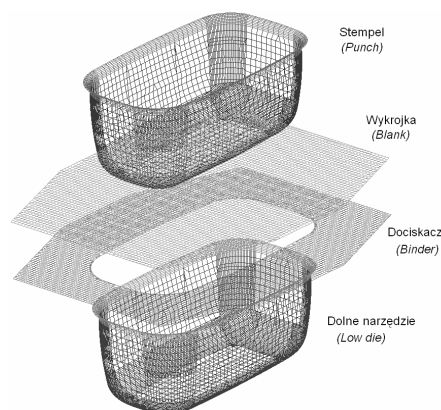


Rys. 1. Inżynieria współbieżna w projektowaniu wanny 1200

Fig. 1. The concurrent engineering approach in designing of bathtub 1200

Ustawienie narzędzi przy symulacji procesu tłoczenia wanny 1200 przedstawiono na rysunku 2. W symulacjach wykorzystano klasę solvera 3D z metodą jawnego całkowania (*explicit*). Metoda taka jest szczególnie stosowana w przypadku szybkozmennych zjawisk dynamicznych, dużych nieliniowościach oraz gdzie bardzo ważne są również zagadnienia kontaktu.

*In the present study, the tooling setup for the stamping of a bathtub 1200, as shown in Figure 2, was investigated using three dimensional dynamic/explicit finite element analysis.*



Rys. 2. Ustawienie narzędzi do tłoczenia wanny 1200

Fig. 2. Tooling setup for the stamping of a bathtub 1200

Celem wyeliminowania pofałdowania bez osiągnięcia efektu pęknięcia wytłoczki, przeanalizowano wpływ siły docisku, tarcia oraz rozmieszczenia progów ciagowych, 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. Wszystkie symulacje w prezentowanej pracy przeprowadzono przy użyciu dwuprocessorowej 64-bitowej stacji roboczej przy użyciu Pre/Postprocesora eta/Dynaform i solvera LS-DYNA [1]. 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*).

*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. All of the simulations performed in the present study were run on two processors 64 bit workstation with the use of the finite element system eta/Dynaform and LS-DYNA solver [1]. 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.*

## 2. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE MATERIAŁU WYJŚCIOWEGO

Wanna jest tłoczona z blachy w gatunku DC05 o grubości 1,2 mm. W ramach prac zbadano podstawowe parametry blachy w celu ich weryfikacji. Wstępne badania potwierdziły zgodność danych z atestem hutniczym. Aczkolwiek, jedna partia użyta podczas procesu przemysłowego, powodowała duży procent braków. Przeprowadzone próby z materiału z innej dostawy zakończyły się sukcesem. Właściwości mechaniczne materiału użytego w próbach 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.

## 3. GEOMETRYCZNY I EFEKTYWNY MODEL PRUGU CIĄGOWEGO

Podczas procesu tłoczenia blacha jest przeciągana przez próg ciągowy, dlatego też w symulacjach metodą elementów skończonych próg ciągowy musi być modelowany dużą ilością małych elementów (rys. 3) celem dokładnego odzwierciedlenia efektu odkształcenia wywołanego zginaniem blachy wokół prugu ciągowego. W efekcie prowadzi to do bardzo czasochłonnych obliczeń. Celem wyeliminowania tego problemu zastosowano model efektywnego prugu ciągowego, który został użyty w modelu MES w celu zamiany pełno-skalowego modelu fizycznego prugu ciągowego [2-5]. W przypadku użycia efektywnego prugu ciągowego, można zastosować większe elementy do symulacji przeciągania blachy przez próg, co rzutuje na znaczne skrócenie czasu obliczeń. W modelu tym próg ciągowy jest prezentowany przez linię leżącą na powierzchni narzędzi, z określoną wartością siły oporu prugu ciągowego (rys. 4). Siła ta z kolei jest rozkładana na węzły elementów skończonych, które przecinają linię prugu efektywnego.

Podczas ruchu stempla oraz gdy dociskacz przytrzymuje blachę z żadaną siłą, blacha przechodząca przez próg jest poddawana zginaniu, a następnie odginaniu dookoła wejściowego promienia bruzdy, a w dalszej kolejności ta sama sekwencja jest powtarzana na prugu i wyjściowym promieniu bruzdy (rys.4).

## 2. MECHANICAL PROPERTIES OF STARTING MATERIAL

*The bathtub is made of steel of 1.2 mm thickness. The tensile tests were conducted in order to check the properties of the steel used in production. The tests confirm the information including in the metallurgical certificate. However, one delivery used in production give some problems, many failure parts was made. Some further information about material are given below :*

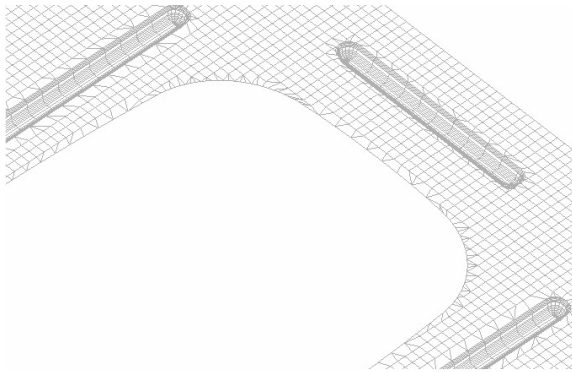
- *yield strength : 179 MPa,*
- *tensile strength : 301 MPa,*
- *hardening exp. n-value : 0.219,*
- *anisotropy r-value : 2.28.*

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

## 3. THE EQUIVALENT AND GEOMETRICAL DRAWBEAD MODEL

*In the finite element simulations, the sheet metal that is pulled through the drawbead during drawing must be modeled by very small elements to reflect the effect of the bending deformation of the sheet metal around the drawbead, resulting in a large amount of computation time (Figure 3). In order to eliminate this problem, an equivalent drawbead model, was adopted to replace the full scale physical modeling of the drawbead in the finite element simulations [2-5]. With the equivalent drawbead model used, large elements for the sheet metal passing through the drawbead can be assigned and in consequence, a huge saving of computation time can be achieved. In the equivalent drawbead model, the actual drawbead is replaced by its projection onto binder surface (Figure 4). The restraining force exerted by the actual drawbead is assigned distributely to the nodes in the regular mesh of the equivalent drawbead. The assigned restraining forces are then assumed to act on the sheet metal which moves through these nodes.*

*When the punch draws the sheet metal into the die cavity after the blank holder closure, the sheet metal passing through the drawbead is subjected to bending and subsequent unbending around the entry groove shoulder and a repeated sequence at the bead and the exit groove shoulder, as shown in Figure 4.*

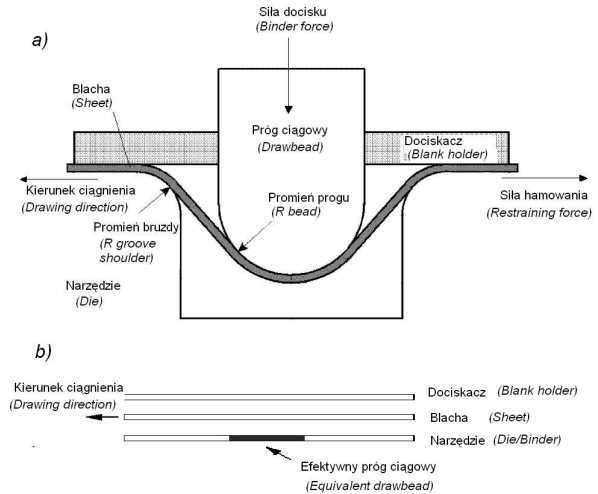


Rys. 3. Geometryczny model progów ciagowych  
Fig. 3. The geometrical FEM drawbead model

Siła odkształcenia występująca na drodze zginania i odginania wraz z siłą tarcia składa się na siłę hamowania. Odtąd, blacha przeciągana przez model progów efektywnego jest poddawana działaniu takiej samej siły hamowania, jak w przypadku progów rzeczywistego. Siła hamowania wytwarzana przez efektywny próg może być uzyskana przy użyciu symulacji metodą elementów skończonych. System MES może być więc użyty do oszacowania całkowitej siły hamowania wytwarzanej przez progi ciągowe o różnej długości [2-5].

#### 4. MODEL MES

Końcowa geometria wanny konieczna przy zaprojektowaniu wstępnego narzędzia została opracowana w systemie Pro-Engineer przez inżyniera CAD. 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. W prezentowanej pracy do wygenerowania siatek elementów skończonych (rys.1) użyto czterowęzłowych elementów powłokowych. W tabelicy 1 zestawiono liczbę użytych elementów i węzłów w modelu dla poszczególnych narzędzi.



Rys. 4. Modele progów ciagowych:  
(a) geometryczny, (b) efektywny  
Fig. 4. Drawbead models: (a) geometrical,  
(b) equivalent

These bending and unbending deformations together with the frictional force account for the drawbead restraining force. Hence, the sheet metal passing through the equivalent drawbead model is subjected to the same restraining force as that exerted by actual drawbead. The restraining force produced by equivalent drawbead can be obtained by the finite element simulations, so that the FEM system can be used to estimate the total force exerted by drawbeads having different lengths [2-5].

#### 4. FEM MODEL

The final part geometries generated by a Pro-Engineer system for the initial die design were provided by the CAD engineer. FEM model of die was 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. In the present work, the four node shell element was used to construct the meshes as shown in Figure 1. The numbers of elements and nodes used are listed in Table 1.

Tablica 1. Liczba elementów i węzłów modelu

Table 1. Number of elements and nodes

Siatka ( <i>Mesh</i> )	Elementy ( <i>Elements</i> )	Węzły ( <i>Nodes</i> )
Dolne narzędzie ( <i>Low Die</i> )	7296	7347
Stempel ( <i>Punch</i> )	5752	5610
Dociskacz ( <i>Binder</i> )	4874	5026
Wykrojka ( <i>Blank</i> )	4726	4829
<b>Suma (<i>Total</i>)</b>	<b>22648</b>	<b>22812</b>

## 5. WYNIKI SYMULACJI KOMPUTEROWYCH

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 prezentowanej wykrojce (rys.2) naroża arkusza blachy zostały obcięte w celu ułatwienia płynięcia metalu na krawędziach. Kształt wykroju matrycy jest zgodny z geometrią wanny i ewoluował wraz z projektem stempla ponieważ proces tłoczenia do pożądanego kształtu był realizowany w jednym etapie. W wyniku tego projektowanie narzędzia ukierunkowane było głównie na projektowanie samej powierzchni (geometrii) stempla. Celem analizy płynięcia metalu przy wstępnym projektowaniu narzędzia zastosowano płaski dociskacz bez progów ciągowych. Kolejne modyfikacje kształtu narzędzia zostały wykonane zgodnie z charakterem płynięcia metalu otrzymanego w wyniku symulacji komputerowych. W ramach prac prowadzonych nad kształtem narzędzia przeprowadzono także symulacje komputerowe, gdzie analizowano wpływ takich parametrów procesu jak tarcie oraz wpływ siły docisku na odkształcalność podczas procesu tłoczenia wanny. Wyniki symulacji oraz ich dyskusja zostały przedstawione poniżej.

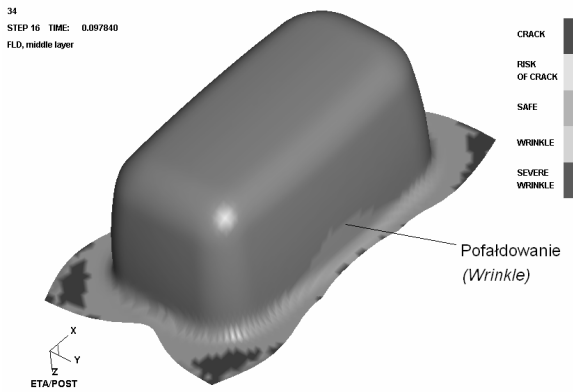
Do wstępnego projektu narzędzia przyjęto siłę wywieraną przez dociskacz równą 2,1 MN oraz współczynnik tarcia równy 0,125. Na rysunku 5 przedstawiono końcowy kształt dla żądanych parametrów. Jak można zaobserwować, znaczące płynięcie metalu występuje w części środkowej kołnierza, co doprowadziło do stosunkowo 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 6.

## 5. RESULTS OF COMPUTER SIMULATIONS

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. The four corners of this optimum sheet blank were cut off, as shown in Figure 2, to facilitate metal flow at the edges. The shape of die cavity conforming to the geometry of the bathtub was also maintained as the same for all of the die face designs since the bathtub was drawn to the desired shape in one operation. In consequence, the die design was focused only on the die face. In order to analyze the metal flow, a flat surface without a drawbead was used as the initial design for the die face. The analysis of the modified die design was performed according to the pattern of metal flow obtained from the finite element simulations. In addition to the die face design, computer simulations were also conducted to study the effect of the process parameters such as friction and blank holder pressure, on the formability of the bathtub stamping process. The simulation results are summarized and discusses as follows.

A clamping force of 2.1 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 6.



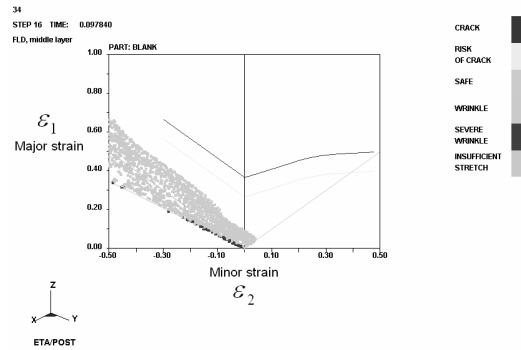
Rys. 5. Końcowy kształt wanny 1200 dla wstępnego projektu narzędzia

Fig. 5. Final shape of a bathtub 1200 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 zwężanie kołnierza oraz powstawanie efektu pofałdowania, wynika z znaczącego płynięcia metalu w tym obszarze. Jedną z najskuteczniejszych metod ograniczenia płynięcia jest dodanie progów ciągowych. Jednakże wyznaczenie optymalnej geometrii oraz położenia progów ciągowych wymaga kompleksowej analizy płynięcia metalu podczas operacji tłoczenia. Analiza siatki MES dla początkowych i pośrednich kroków (rys. 7) pokazuje, że metal jest ciągnięty do wykroju matrycy z punktu C do punktu D na krótkim kołnierzu, z punktu A do punktu B na długim kołnierzu, oraz obszar o mocniejszym pofałdowaniu (WA) wynikający z płynięcia metalu w kierunku  $u$ . Dlatego też próg ciągowy musi zostać dodany prostopadłe do linii A-B oraz C-D w celu powstrzymania i przede wszystkim lepszej kontroli płynięcia metalu.

Zgodnie z wynikami symulacji komputerowych efekt pofałdowania zanika, gdy siła jaką wywiera dociskacz wzrasta z 2,1 MN do 4,0 MN. Jednakże analiza odkształceń głównych wyznaczonych na tle krzywej odkształceń granicznych, przedstawionych na rysunku 8, wskazuje, że wytłoczka jest blisko pęknięcia ponieważ niektóre punkty są powyżej linii określającej prawdopodobieństwo pęknięcia.

Z kolei, zwiększanie wartości współczynnika tarcia na powierzchni narzędzie-wykrojka, daje w wyniku ten sam efekt jak zwiększanie siły wywieranej przez dociskacz.



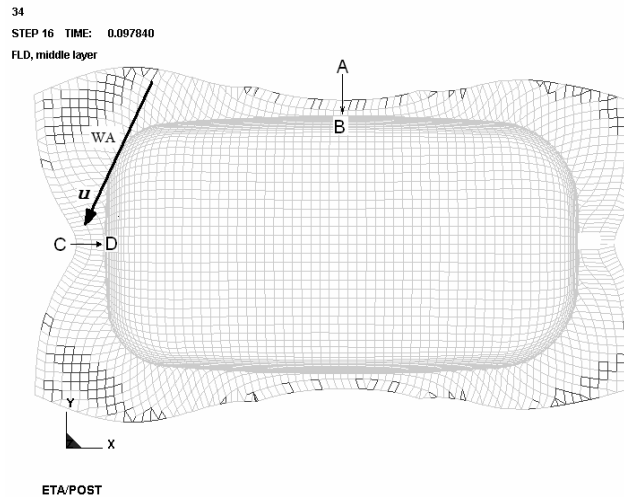
Rys. 6. Rozkład odkształceń głównych na tle Granicznej Krzywej Tłoczenia (GKT) dla wstępnego projektu narzędzia

Fig. 6. The minor and major strain and Forming Limit Diagram (FLD) for the initial die design

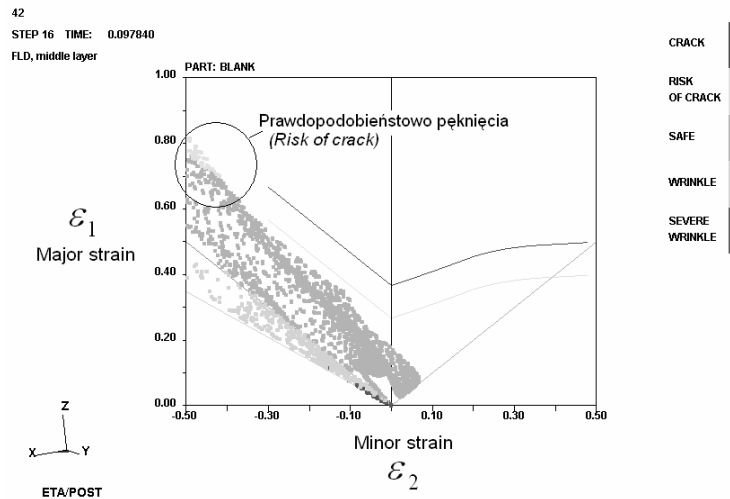
It is seen clearly that the final shape is free from fracture, but they small flange width and the presence of wrinkles are not allowed in the final product so that the die face must therefore be modified. Both the narrowness of the flange and the formation of wrinkles resulted from a significant metal 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. However, the determination of the geometry and location of the drawbead requires the analysis of metal flow during the drawing operation. Comparison of the initial and intermediate step mesh systems, as shown in Figure 7 shows that the metal is drawn into the die cavity directly from point C to point D at the short flange, from point A to point B at the long flange and that the strongest wrinkle area (WA) results from the metal flow in the  $u$  direction. Therefore, a drawbead must be added perpendicular to the line C-D to restrain the metal flow.

The wrinkles disappear when the blank holder pressure is increased from 2.1 MN to 4.0 MN, according to the simulation results. However, the major and minor strain distributions plotted on the forming limit diagram, as shown in Figure 8, indicate that the sheet metal is close to fracture since many of the points are above the risk of crack line.

An increase in friction at the blank-die interface results in the same effect as that of an increase in the blank holder pressure. The presence of wrinkles can be prevented when the coefficient of friction is increased from 0.125 to 0.3.



Rys. 7. Schemat płynięcia metalu podczas symulacji procesu tłoczenia  
 Fig. 7. Scheme of metal flow during stamping process simulation



Rys. 8. Rozkład odkształceń głównych na tle Granicznej Krzywej Tłoczenia (nacisk dociskacza 4,0 MN)  
 Fig. 8. The minor and major strain and Forming Limit Diagram (blank holder pressure 4.0 MN)

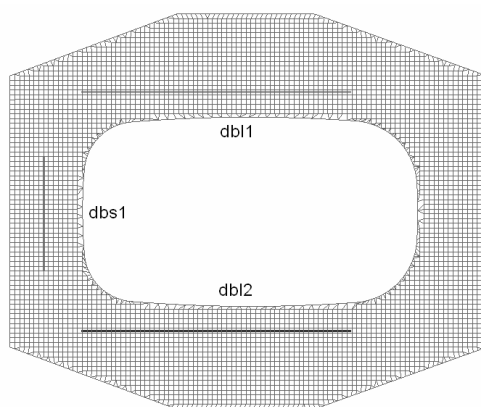
### 5.1. Projekt progów ciągowego

W celu 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 dbs1, db11 oraz db12 w położeniu przedstawionym na rysunku 9.

### 5.1. Drawbead design

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 9, denoted dbs1, db11 and db12.





Rys. 9. Rozmieszczenie progów ciągowych

*Fig. 9. Drawbeads distribution*

Jak wspomniano wcześniej, w symulacji metodą elementów skończonych przyjęto model efektywnego progów ciągowych, w którym w zależności od wariantu symulacji przyjęto siłę oporu stawianego przez próg, zamiast modelowania i brania pod uwagę na tym etapie projektowania geometrii rzeczywistego progów (rys. 4). Korzyścią z zastosowania modelu efektywnego progów ciągowych jest z jednej strony duże skrócenie czasu obliczeń, z drugiej strony nie ma potrzeby uwzględniania w modelu kształtu progów ciągowych do momentu wyznaczenia optymalnej siły hamowania.

Projekt kształtu progów ciągowych może być uzyskany na podstawie wartości optymalnej siły hamowania, która jest generowana przez efektywne prógów ciągowych.

Długości progów ciągowych oraz siły hamowania generowane przez nie, były modyfikowane wielokrotnie na podstawie analiz płynięcia metalu otrzymanych z symulacji metodą elementów skończonych, aż do momentu znalezienia odpowiedniej kombinacji. Ustalone długości i siły hamowania są następujące: 380 mm oraz 0,104 kN/mm dla progów oznaczonego jako dbs1, 900 mm oraz 0,182 kN/mm dla progów ciągowych oznaczonych odpowiednio dbl1 i dbl2.

Siła hamowania wytwarzana przez próg ciągowy jest funkcją m.in. własności materiału użytego do tłoczenia, kształtu samego progów oraz tarcia na powierzchni metal-próg [2-5].

Typowy próg ciągowy jest pokazany na rysunku 4, gdzie kształt jego może być scharakteryzowany promieniem progów (lub też promieniem brzozy). Ten typ progów został przyjęty w prezentowanej pracy.

*In the finite element simulation, the equivalent drawbead model was used and the restraining force produced by the actual drawbead was assumed, instead of considering the actual geometry of the drawbead (Figure 4). The advantage of using the equivalent drawbead model is: One is the large saving of computation time, and the other is that there is no need to deal with the actual drawbead shapes until the optimum restraining forces are determined.*

*The design shape of the drawbead can then be derived from the optimum restraining force that drawbead will produce.*

*The drawbead lengths and the restraining forces produced by the drawbeads were modified repeatedly according to the analysis of metal flow obtained from the finite element simulations until an optimum combination was achieved. The determined lengths and restraining forces are: 380 mm and 0.104 kN/mm for drawbead dbs1; 900 mm and 0.182 kN/mm for drawbeads dbl1 and dbl2.*

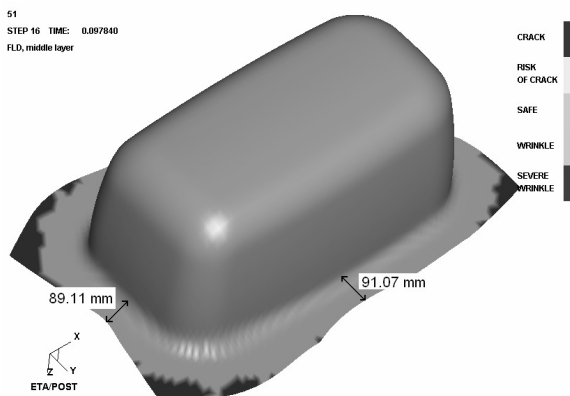
*The restraining force produced by the drawbead is a function of the material properties of the sheet metal, the shape of the drawbead and the friction at the interface between the bead and the sheet metal [2-5].*

*The typical drawbead, in which the drawbead shape can be characterized by the radius of the bead (or the groove shoulder) as shown in Figure 4, was adopted in the present investigation.*

Zależność pomiędzy promieniem progów a siłą hamowania została określona na podstawie symulacji metodą elementów skończonych. Oszacowana wartość promienia odpowiedniego progów i dla odpowiedniej wartości siły hamowania została zweryfikowana przy użyciu symulacji komputerowej. Promienie progów w zależności od wytwarzanej siły hamowania otrzymane z symulacji metodą elementów skończonych, przyjmują odpowiednio następujące wartości: 12 mm dla progów db1 oraz 6 mm dla progów db11 i db12.

## 5.2. Symulacje końcowe

Końcowy kształt wanny otrzymany z symulacji MES z uwzględnieniem optymalnych sił hamowania oraz położenia i długości progów ciągowych przedstawiono na rysunku 10. Na rysunku tym można zaobserwować, że zjawisko pofałdowania na dłuższym boku wanny zostało wyeliminowane, oraz obliczona szerokość kołnierza jest większa niż 70 mm. W przypadku pocienienia (pogrubienia) blachy (rys.11) otrzymane wartości mieściły się w założonym zakresie uznany za dopuszczalny, czyli  $\pm 40\%$  i wyniosły odpowiednio  $-19\%$  oraz  $+27\%$ .



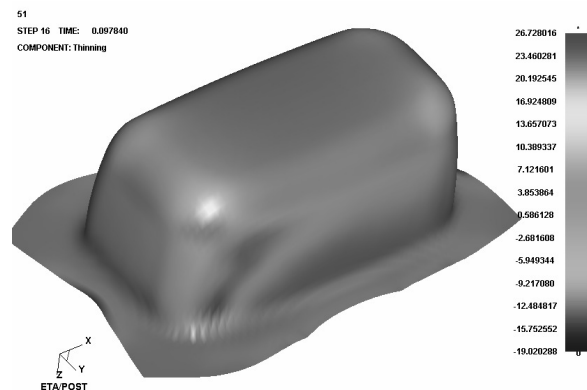
Rys. 10. Końcowy kształt wanny 1200 dla zmodyfikowanego projektu narzędzi  
*Fig. 10. Final shape of a bathtub 1200 for the modified die design*

Na rysunku 12 przedstawiono rozkład odkształceń głównych otrzymany w wyniku symulacji komputerowej, gdzie można zaobserwować, że wszystkie punkty leżą poniżej krzywej definiującej prawdopodobieństwo pęknięcia wyłoczki. 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.

The relationship between the radius of the drawbead and the corresponding restraining force was established by the finite element simulations. The approximate drawbead radius for the corresponding restraining force was confirmed by the computer simulation. The drawbead radii for the corresponding restraining forces of 0.104 and 0.182 kN/mm, obtained from finite element simulations, are 12 mm for drawbead db1, 6 mm for drawbeads db11 and db12, respectively.

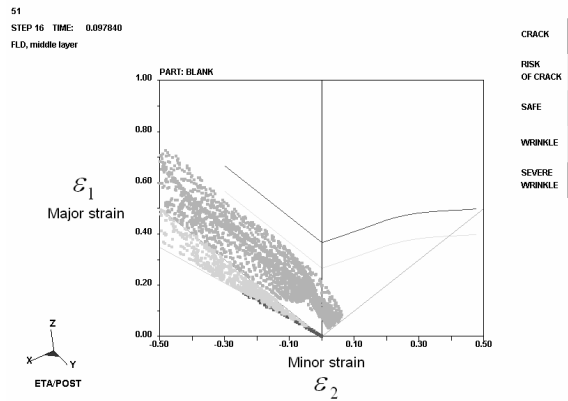
## 5.2. Final simulations

In the Figure 10 the final shape of a bathtub 1200 for the modified die design is presented. The one can observe that tendency of wrinkling was eliminated and the flange width is greater than 70 mm, required by the part design. Analysis of thinning distribution (Figure 11) indicates that the minimum and maximum thinning was  $-19\%$  and  $+27\%$ , respectively.



Rys. 11. Rozkład pocienienia dla końcowego wyrobu  
*Fig. 11. Thinning distribution for the final part*

As for the major and minor strains computed from the computer simulation, as shown in Figure 12, 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.



Rys. 12. Rozkład odkształceń głównych na tle Granicznej Krzywej Tłoczenia dla zmodyfikowanego projektu narzędzi  
 Fig. 12. The minor and major strain and Forming Limit Diagram for the modified die design

## 6. PRÓBY PRZEMYSŁOWE

Jak przewidziano przy użyciu metody elementów skończonych, otrzymany kształt wytłoczki jest wolny od wad. Na rysunku 13 przedstawiono wytłoczkę wanny 1200 przed operacją okrawania. Otrzymany kształt wytłoczki wanny zgadza się z kształtem otrzymanym na drodze symulacji komputerowej. Otrzymanie produktu końcowego wolnego od wad, potwierdza ogromne korzyści wynikające z użycia systemu MES do projektowania i weryfikacji narzędzi w tłocznictwie.

Aczkolwiek, pierwsze próby zakończyły się niepowodzeniem i końcowa wytłoczka pękała (rys.14). Głównym problemem było zapewnieniem stałej i optymalnej wartości siły wywieranej przez dociskacz (uzyskanej na drodze symulacji MES). Przeprowadzone symulacje potwierdziły, że głównym czynnikiem wpływającym na występowanie zjawiska pęknięcia była za duża wartości siły docisku. Na rysunku 15 przedstawiono rozkład odkształceń głównych na tle granicznej krzywej tłoczenia dla siły docisku równej 4,7 MN, gdzie można zaobserwować, że zdecydowanie w końcowym wyrobie wystąpi pęknięcie.



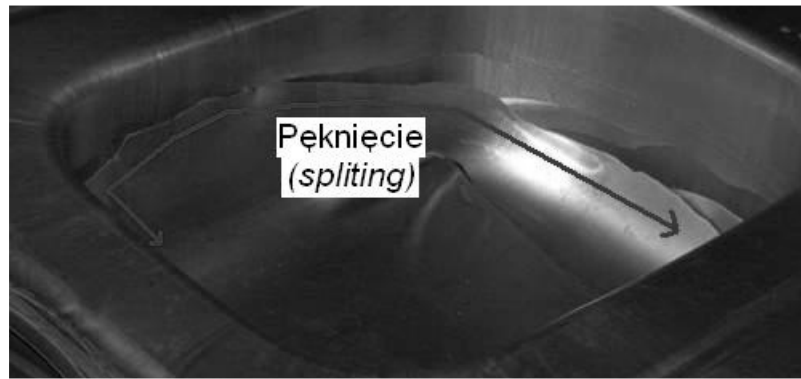
Rys. 13. Wytłoczka wanny 1200 przed operacją okrawania  
 Fig. 13. The example view of bathtub 1200 before trimming operation

## 6. INDUSTRIAL TESTS

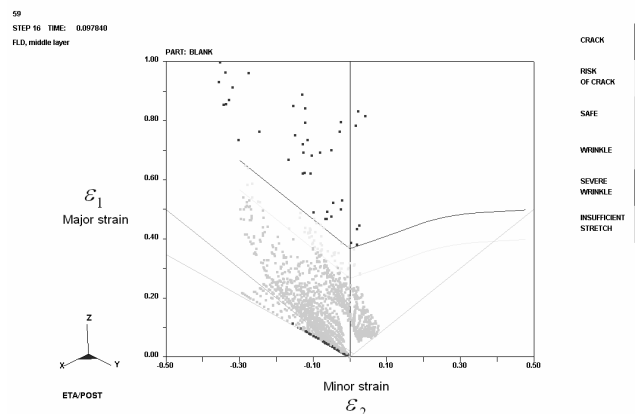
As predicted by the finite element analysis, the production part is free from defects, as shown in Figure 13. The actual part shape also agrees very well with that obtained by the finite element simulation. The defect free product confirms the advantage of using FEM system for stamping die design.

However, the first tests was doomed to failure and in the final shape of drawpiece the split effect has been observed (Figure 14). The main problem was assurance constant and optimal blank holder force (obtained from FEM simulations). In the first tests, blank holder force was to high, what was confirmed by finite element simulation.

The major and minor strains computed from the computer simulation and blank holder force equal 4.7 MN are shown in Figure 15, some corresponding points are above design line. This indicates that a blank holder force used during production was to high.



Rys. 14. Lokalizacja pęknięcia wanny 1200 po procesie tłoczenia  
 Fig. 14. The split localization after stamping process of bathtub 1200



Rys. 15. Rozkład odkształceń głównych na tle Granicznej Krzywej Tłoczenia (nacisk dociskacza 4,7 MN)  
 Fig. 15. The minor and major strain and Forming Limit Diagram (blank holder pressure 4.7 MN)

## 7. PODSUMOWANIE

W prezentowanej pracy projekt narzędzia został opracowany przy zastosowaniu systemu MES. W pracy zbadano powód występowania zjawiska pofałdowania, bazując na schemacie płynięcia metalu otrzymanego z symulacji komputerowych. Wykorzystano krzywą odkształceń granicznych w połączeniu z otrzymanymi wynikami do prognozowania występowania zjawiska pęknięcia. Dodatkowo w celu ograniczenia czasu obliczeń w modelu MES zastosowano model efektywnego progu ciągowego. Jedną z zalet modelu efektywnego progu, jest to, że w symulacjach nie trzeba brać pod uwagę rzeczywistego kształtu progu, aż do momentu kiedy osiągniemy optymalny kształt narzędzia, oraz odpowiednią siłę hamowania. W prezentowanej pracy został opracowany optymalny projekt konstrukcji narzędzi, których rozmiar, kształt i położenie rzeczywistych progów ciągowych ustalono na podstawie symulacji komputerowych. Ostatnim etapem pracy była weryfikacja przemysłowa procesu tłoczenia wanny serii 1200.

## 7. CONCLUSION

In the present work the die face design for stamping of a bathtub 1200 was investigated using FEM system. In the investigation, the cause of the formation of wrinkles was studied on the basis of the metal flow obtained from the simulation results. The forming limit diagram was also used in conjunction with the finite element results to predict the occurrence of fracture. In addition, an equivalent drawbead model was applied to the finite simulation to save computation time. With the use of equivalent drawbeads, the actual drawbead shapes are not considered until the optimum restraining force and die design is achieved, resulting in an efficient approach for drawbead application. In the present work, an optimum die design, including the size, shape and location of drawbeads, was performed on the basis of finite element analysis. At the end the industrial die verification has been done, where the defect free product has been obtained.

W czasie prób przemysłowych w produkcji końcowym nie stwierdzono wad.

W prezentowanej pracy, nie analizowano użytych procedur optymalizacyjnych jak też zastosowanego podejścia w ramach inżynierii współbieżnej. Zagadnienia ta zostaną omówione w drugiej części artykułu, z uwzględnieniem wyników uzyskanych podczas weryfikacji projektu narzędzi do tłoczenia wanny z serii 1700.

*In presented study, the optimization procedure and concurrent engineering approach has not been discussed, what will be the lead theme of second part of this paper and where some results of die design for the stamping of a bathtub 1700 will be presented, as well.*

## LITERATURA/REFERENCES

- [1] Engineering Technology Associates.: eta/DYNAFORM 5.6 User's Manual (2007).
- [2] Chen Fuh-Kuo, Tszeng Pao-Ching.: An analysis of drawbead restraining force in the stamping process, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 38(7), 1998,827-842.
- [3] Shuhui Li, Zhongqin Lin, Weili Xu, Youxia Bao.: An improved equivalent drawbead model and its application, Journal of Materials Processing Technology,121(2-3), 2002, 308-312.
- [4] Samuel M.: Influence of drawbead geometry on sheet metal forming, Journal of Materials Processing Technology. 122(1), 2002,94-103.
- [5] Naceur H., Guo Y.Q., Batoz J.L., Knopf-Lenoir C.: Optimization of drawbead restraining forces and drawbead design in sheet metal forming process, International Journal of Mechanical Sciences, 43(10),2001,2407-2434.