

Mgr inż. Marek PAWLICKI, mgr inż. Tadeusz DRENGER
Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań
e-mail: marek.pawlicki@inop.eu

Analiza porównawcza wyników symulacji komputerowej procesów kształtowania wyrobów cienkościennych

Comparative analysis of the results of computer simulation of thin-walled product forming processes

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki analizy działania algorytmów obliczeniowych programów symulacyjnych. Przedstawiono wyniki symulacji procesów kształtowania obrotowego oraz tłoczenia wytłoczki prostokątnej wykonanej za pomocą programów Pam-Stamp 2G i Autoform i porównano z modelowaniem fizycznym wykonanych wytłoczek. Z wyników badań wynika celowość modelowania komputerowego z wykorzystaniem siatki MES na grubości wytłoczek. Wyniki symulacji pokazują, że program Pam-Stamp pozwala lepiej, niż program Autoform odwzorować proces technologiczny kształtowania wytłoczek prostokątnych. Wykazano dużą przydatność tego programu dla oceny przebiegu tłoczenia.

Abstract

The paper presents the results of the functioning of computational algorithms of simulation programs. The results of flow forming and deep drawing of a rectangular drawpiece made by means of Pam-Stamp 2G and Autoform programs have been described and compared to physical modeling of the manufactured drawpieces. The investigation results prove purposefulness of computer modeling with the utilization of FEM grid on the drawpiece thickness. The simulation results show that the Pam-Stamp program allows for better imaging of the technological process of forming rectangular drawpieces than the Autoform program. The program has been proved highly suitable for the assessment of the drawing process.

Słowa kluczowe: tłoczenie, zginiatanie obrotowe, symulacja, Pam-Stamp, Autoform, MES

Key words: deep drawing, flow forming, modeling, Pam-Stamp, Autoform, FEM

1. WSTĘP

Modelowanie procesów za pomocą programów do symulacji PamStamp i AutoForm, zastosowano celem:

- poprawienia jakości wytłoczek,
- badania możliwości zastosowania nowych materiałów w tym materiałów dotychczas nie stosowanych w procesach tłoczenia,
- badania procesu tłoczenia materiałów trudno odkształcalnych,
- obniżenia kosztów wykonania narzędzi,
- skrócenia czasu potrzebnego do projektowania i wdrażania opracowanej technologii w przemyśle,

1. INTRODUCTION

Process modeling by means of the Pam-Stamp and Autoform simulation programs has been applied in order to:

- *improve the quality of drawpieces,*
- *investigate the possibility of using new materials including ones which have not been used in drawing processes so far,*
- *investigate the process of drawing hard-to-deform materials,*
- *reduce tool manufacturing costs,*
- *shorten the time necessary to design and implement new technologies in industry,*

- ekonomiczniejszego wykorzystania materiału,
- obniżenia kosztów uruchomienia produkcji.

Ponadto wbudowane w powyższe programy symulacyjne bazy danych, ułatwiają dobór materiałów do poszczególnych operacji technologicznych, pomagają w wyborze, a często same proponują, układ kinematyczny wirtualnej maszyny, umożliwiają także modyfikację modelu 3D oprzyrządowania bez konieczności dokonywania zmian w zewnętrznych programach typu CAD-CAM-CAE.

Wśród programów symulacyjnych do obróbki blach najpopularniejszymi są: Pam-Stamp 2G, Autoform, ABAQUS-Explicit, ANSYS, Dynaform, LS-Dyna. Spośród wymienionych programy symulacyjne Pam-Stamp 2G i Autoform odznaczają się największym wyspecjalizowaniem w procesach tłoczenia.

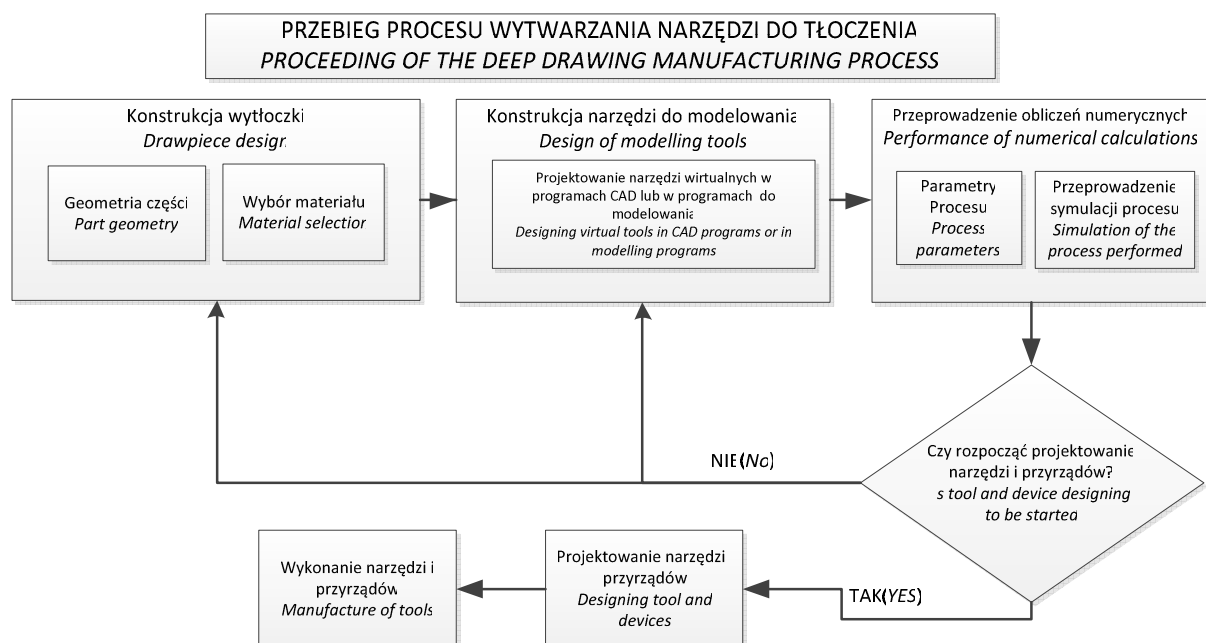
Przebieg procesu realizacji wytwarzania narzędzi do tłoczenia z wykorzystaniem programów komputerowych przedstawiono na rys. 1. Na podstawie danych z materiałów Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Fritz Klocke z Laboratory for Machine Tools and Production Engineering (WZL) of RWTH Aachen University opracowano schemat przebiegu procesu wytwarzania narzędzi do tłoczenia [1].

- utilize material in a more economical way,
- reduce the costs of production launching.

Moreover, data bases built into the above simulation programs facilitate the selection of materials for the individual technological operations, they assist in the selection or even suggest the kinematic arrangement of a virtual machine, enable a 3D model of tooling to be modified without the necessity of modification of external programs type CAD-CAM-CAE.

Among the sheet metal processing simulation programs, the most popular ones are: Pam-Stamp 2G, Autoform, ABAQUS-Explicit, ANSYS, Dynaform, LS-Dyna. The ones most specialized in the processes of deep drawing are Pam-Stamp 2G and Autoform.

Realisation of the tool manufacturing process with the use of computer programs has been presented in fig. 1. Basing on the data taken from papers of Prof. Fritz Klocke of the Laboratory for Machine Tools and Production Engineering (WZL) of RWTH Aachen University, a diagram of deep drawing tool manufacturing process has been elaborated [1].



Rys. 1. Przebieg procesu wytwarzania narzędzi do tłoczenia
Fig. 1. The process of deep drawing tool manufacturing

2. ZASTOSOWANIE PROGRAMÓW KOMPUTEROWYCH DO PROJEKTOWANIA PROCESÓW KSZTAŁTOWANIA WYROBÓW Z BLACH W INSTYTUCIE OBRÓBKII PLASTYCZNEJ W POZNANIU

Instytut Obróbki Plastycznej od 2008 r. realizuje projekt nr POIG.02.03.00-00-017/08 pt. „I-Centrum – komputerowe centrum zarządzania procesami badawczymi w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu” [2]. W jego ramach Instytut uzyskał szereg interesujących programów komputerowych, w tym między innymi programy: Pam-Stamp 2G (dalej zwany Pam-Stamp) i Autoform, będące w dyspozycji Zakładu Tłoczenia Instytutu. Prowadzone badania statutowe oraz inne prace [3, 12], obejmowały wstępne prace rozpoznawcze w zakresie możliwości odwzorowywania komputerowego rzeczywistych procesów technologicznych z zastosowaniem programów Pam-Stamp i Autoform. Prowadzone dalsze badania za pomocą tych programów, powiązane z badaniami statutowymi Zakładu Tłoczenia Instytutu, zostały opisane w niniejszym artykule. Badania podjęto, ponieważ analiza literatury w zakresie symulacji komputerowych [5-10] nie pozwalała w pełni ocenić przydatności tych programów do kształtowania określonych grup wytłoczek.

3. MODELOWANIE PROCESÓW TŁOCZENIA BLACH ZA POMOCĄ MES

3.1. Parametry i charakterystyczne wymagania programów komputerowych do modelowania procesów obróbki plastycznej blach

Wszystkie znane programy do symulacji procesów obróbki plastycznej korzystają z Metody Elementów Skończonych (MES). Główne założenie MES to podział modelu geometrycznego ciągłego (rys. 2) na elementy skończone, łączące się w tzw. węzłach, czego efektem jest utworzenie modelu geometrycznego dyskretnego.

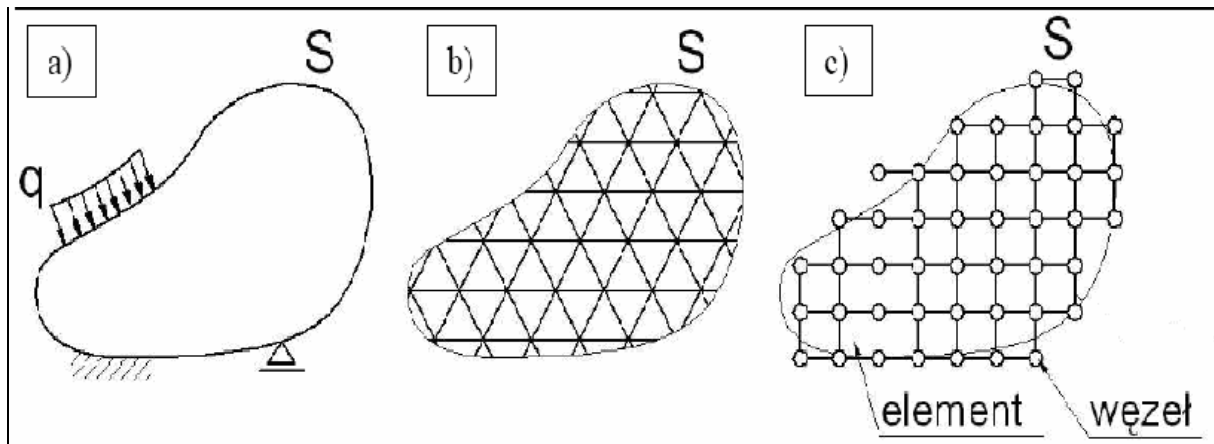
2. APPLICATION OF COMPUTER PROGRAMS FOR DESIGNING SHEET METAL PRODUCT FORMING PROCESSES IN THE METAL FORMING INSTITUTE IN POZNAŃ

Since 2008 the Metal Forming Institute has been realizing project5 POIG.02.03.00-00-017/08 entitled "I-Centrum – computer center of investigation process management in the Metal Forming Institute in Poznań" [2]. Within the project, the Institute has obtained a number of interesting computer programs including: Pam-Stamp 2G (hereinafter called Pam-Stamp) and Autoform, both at the disposal of the Drawing Department of the Institute. The statute investigations and other works performed [3, 12] have included initial recognition of the possibilities of computer imaging of actual technological processes with the use of the Pam-Stamp and Autoform programs. Further investigations performed by means of those programs, combined with the statute investigations of the Institute's Drawing Department, have been described in the present paper. The investigation has been undertaken because survey of the literature concerning computer simulations [5-10] has not allowed for a full assessment of the suitability of those programs for forming the determined groups of drawpieces.

3. FEM MODELING OF SHEET METAL FORMING PROCESSES

3.1. Parameters and characteristic requirements of computer programs for modeling sheet metal forming processes

All known metal forming simulation programs utilize the Finite Element Method (FEM). The essential assumption of FEM is the division of the continuous geometrical model (fig. 2) into finite elements joining in the so called nodes, an effect of which is creation of a discrete geometrical model.



Rys. 2. Dyskretyzacja modelu ciągłego – transformacja w zbiór (siatkę) elementów skończonych: a) model geometryczny ciągły, b) model dyskretny idealny, c) model dyskretny obliczeniowy [9], S – powierzchnia modelu, q – obciążenie ciągłe

Fig. 2. Discretization of the continuous model – transformation into a set (grid) of finite elements: a) continuous geometrical model, b) ideal discrete model, c) computational discrete model [9], S – surface of the model, q – continuous load

Efektym dyskretyzacji jest transformacja układu o nieskończonej liczbie stopni swobody (zdolności do zmiany wartości określonej współrzędnej) do postaci układu o skończonej liczbie stopni swobody [9]. Metoda MES jest metodą aproksymacji (poprzez dyskretyzację) równań różniczkowych cząstkowych [10].

Metoda MES jest narzędziem, dzięki któremu programy komputerowe mogą wspomóc odwzorowywanie geometrii narzędzi i materiału wyjściowego podczas całego procesu symulacji. Zarówno Pam-Stamp jak i Autoform stosują siatkę MES do numerycznego odwzorowywania procesów technologicznych. Używają jednak geometrycznie różnych elementów siatki (rys. 2). Pam-Stamp wykorzystuje elementy prostokątne, Autoform zaś trójkątne. Ma to duże znaczenie przy porównywaniu wyników symulacji obu programów. Poza pewnymi specyficznymi sytuacjami (import nieodkształconej siatki MES) transformacja jednej w drugą jest niezwykle trudna i pracochłonna.

Ważnym problemem jest metoda formowania elementów siatki stosowanych w obu programach.

W programie Autoform występują 2 metody formowania siatki:

1. Metoda powłoki elastyczno-plastycznej (*Elastic plastic shell*),
2. Metoda powłoki z efektami wzmocnienia na skutek gięcia (*Bending enhanced membrane*).

Discretization results in transformation of the system with infinite number of degrees of freedom (ability to change the value of a definite coordinate) into the form of a system with finite number of degrees of freedom [9]. FEM is a method of approximation (through digitization) of partial differential equations [10].

Thanks to FEM, computer programs can boost imaging of the geometry of tools and the initial material during the whole process of simulation. Both Pam-Stamp and Autoform use the FEM network for numerical imaging of the technological processes. However, they use geometrically different elements of the grid (fig. 2). Pam-Stamp utilizes rectangular elements while Autoform triangular ones. It is important when comparing the simulation results of both programs. With the exception of some specific circumstances (import of undeformed FEM grid), the transformation of one into the other is very difficult and labour consuming.

An important problem is the method of forming the network elements used in both programs.

In the Autoform program, there are 2 methods of forming the grid:

1. The method of elastic plastic shell,
2. The method of bending enhanced membrane.

Pierwsza metoda jest uniwersalna, druga stosowana jest do symulacji mających sprawdzić jedynie kinematykę oraz geometrię narzędzi. Nie nadaje się ona do wykonania końcowej symulacji procesu.

W programie Pam-Stamp odpowiednikami powyższych opcji są następujące *solvery* (silniki obliczeniowe):

1. Solver automatycznego tłoczenia (*PAM-Auto Stamp solver*),
2. Solver szybkiego tłoczenia plus (*PAM-QuickStamp Plus solver*).

Dobór solvera pozwala na przyjęcie odpowiedniej strategii dyskretyzacji narzędzi i materiału wyjściowego za pomocą odpowiedniego zagęszczenia siatki MES i doboru dodatkowych parametrów np. kontrolujących jakość siatki MES. Solver szybkiego tłoczenia plus wykorzystywany jest jednak rzadko ze względu na możliwość ręcznej kontroli parametrów siatki MES w solverze automatycznego tłoczenia. Zastosowanie tego drugiego solvera natomiast daje większe możliwości analizy wyników. Typ solvera z programu Pam-Stamp i metoda formowania elementów siatki z programu Autoform nie może być jednak bezpośrednio porównana (ponieważ inne są sposoby kontroli elementów siatki MES w programach Pam-Stamp i Autoform).

Następnym bardzo ważnym problemem w procesie symulacji jest stosowanie uproszczenia w programach, polegające na dostosowaniu algorytmów i solverów do dwuosowego stanu odkształcenia i naprężenia.

W obróbce blach, dla ułatwienia, zasadniczo uwzględnia się jedynie naprężenia i odkształcenia w kierunku walcowania oraz w kierunku prostopadłym do niego, występujące w płaszczyźnie blachy. Pomija się naprężenia i odkształcenia występujące w kierunku prostopadłym do płaszczyzny blachy ze względu na ich małe wartości. Stan taki nazywa się płaskim stanem naprężenia i odkształcenia.

O ile w tłocznictwie to uproszczenie jest zasadne ze względu na znaczącą różnicę w wymiarach arkusza, gdzie szerokość i długość arkusza są znacząco większe, aniżeli jego grubość, o tyle w procesie wyoblania, a szczególnie w zgniataniu obrotowym, prowadzi to do błędów obliczeniowych w symulacjach.

The first method is universal, the other is used for simulations aiming at the check of tool kinematics and geometry. It is not suitable for performing the final simulation of the process.

In the Pam-Stamp program, the equivalents of the above options are the following solvers (computing motors):

1. *PAM-Auto Stamp solver,*
2. *PAM-QuickStamp Plus solver.*

Selection of a solver allows for the adoption of the adequate strategy of digitization of the tools and initial material by adequate densification of the FEM grid and selection of additional parameters, e.g. ones monitoring the quality of the FEM grid. However, the PAM-QuickStampPlus solver is seldom used due to the possibility of manual control of the FEM grid parameters in the PAM-Auto Stamp solver. The use of the other solver, on the other hand, gives better possibility of result analysis. The solver type of the Pam-Stamp program and the method of forming grid elements of the Autoform program cannot be directly compared, however, (because the ways of controlling the FEM grid elements are different in the Pam-Stamp and Autoform programs).

Another important problem in the simulation process is simplification applied in the programs consisting in the adaptation of algorithms and solvers to biaxial state of stress and strain.

In sheet metal processing, for facilitation, only the stresses and strains in the direction of rolling and the ones perpendicular to it, occurring the plane of the sheet are considered. The stresses and strains in the direction perpendicular to the sheet plane are neglected due to their low values. This is referred to as the flat state of stress and strain.

While the simplification can be justified in sheet metal working due to the large difference in the dimensions of a sheet where the length and width of a sheet are much larger than its thickness, in the process of spinning, particularly in flow forming, it leads to computational errors in simulations.

Programy komputerowe do obróbki blach rzadko uwzględniają możliwość analizy innego, niż płaski stan naprężenia. Program Pam-Stamp ma wbudowane, ograniczone funkcje analizy odkształcenia siatki MES w materiale wyjściowym w kierunku grubości, za pomocą opcji *Volume Blank*. Program Autoform nie ma takich opcji w ogóle.

3.2. Kształtowanie wytłoczki prostokątnej ze stali głęboko tłocznej DC04 [3, 4, 12]

Wytłoczka prostokątna (rys. 3) jest używana do celów dydaktycznych w Zakładzie Obróbki Plastycznej Politechniki Poznańskiej. W przeprowadzonych badaniach symulacyjnych [3, 12] ustalono najkorzystniejszy kształt i wymiary materiału wyjściowego (rys. 4) do tłoczenia wytłoczki o ustalonej wysokości ścianki z minimalnym odpadem technologicznym ($30 \pm 0,5$ mm). Proces tłoczenia ustalono metodą kolejnych przybliżeń i porównania wyników modelowania do wyników badań rzeczywistych eksperymentalnych. Stanowisko do tłoczenia wraz z tłocznikiem przedstawiono na rys. 5.



Rys. 3. Wytłoczka prostokątna [3, 12]

Fig. 3. Rectangular drawpiece [3, 12]

Computer programs for sheet metal processing seldom incorporate the possibility to analyse other than flat state of stress and strain. The Pam-Stamp program has built-in limited functions of the analysis of FEM network deformation in the initial material by means of the Volume Blank option. The Autoform program does not offer such options at all.

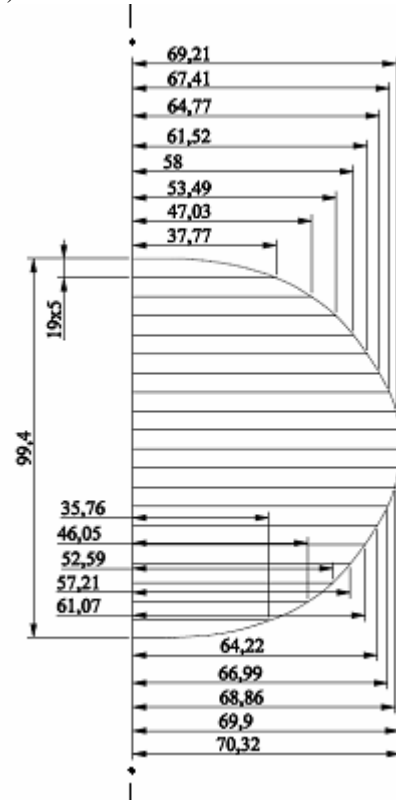
3.2. Forming a rectangular drawpiece of deep drawing steel DC04 [3, 4, 12]

The rectangular drawpiece (fig. 3) is used for didactic purposes in the Metal Forming Department of Poznan University of Technology. In the simulations performed [3, 12], the most advantageous shape and dimensions of the initial material (fig. 4) for drawing a drawpiece with predetermined wall height with minimum technological waste (30 ± 0.5 mm) have been determined. The process of drawing has been determined by the method of successive approximations and comparison of modelling results to those of actual experimental investigations. The drawing stand including the stamping die can be seen in fig. 5.

a)



b)

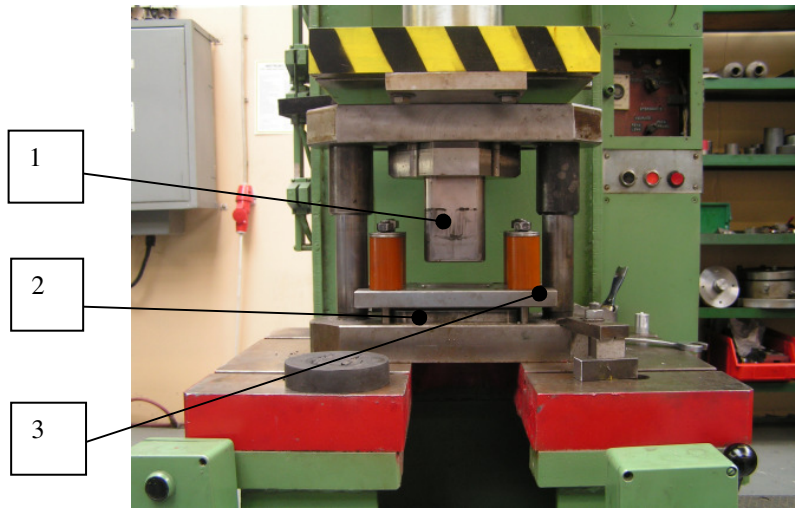


Rys. 4. Materiał wyjściowy do tłoczenia wytłoczki prostokątnej wg rys. 3 (a) i wymiary wytłoczki (b) [3, 12]
 Fig. 4. Initial material for the rectangular drawpiece acc. to fig. 3 (a) and dimensions of the drawpiece (b) [3, 12]

a)



b)



Rys. 5. Stanowisko doświadczalne do tłoczenia wytłoczki prostokątnej: a) prasa hydrauliczna PHF 63, b) tłocznik doświadczalny zamontowany na stole prasy; 1 – stempel, 2 – matryca, 3 – zespół dociskacza [3, 12]
 Fig. 5. Experimental stand for making the rectangular drawpiece: a) PHF 63 hydraulic press, b) experimental stamping die mounted on the press table; 1 – punch, 2 – die, 3 – blankholder unit [3, 12]

Dla ustalonego kształtu materiału wyjściowego (rys. 4) przeprowadzono próby symulacji tłoczenia zarówno w programie Pam-Stamp, jak i Autoform.

Do badań symulacyjnych przyjęto następujące parametry:

- materiał – stal głęboko tłoczna DC04,
- grubość – 2 mm,
- nacisk dociskacza – 20 kN,
- droga stempla – 55 mm,
- prędkość stempla – 15 mm/s.

Modele numeryczne w chwili startu pokazano na rys. 6. Przy ich opracowywaniu wykorzystano dane [3, 4]. Natomiast wytłoczki uzyskane po modelowaniu są przedstawione na rys. 7. W tabelicy 1 zebrano wyniki symulacji.

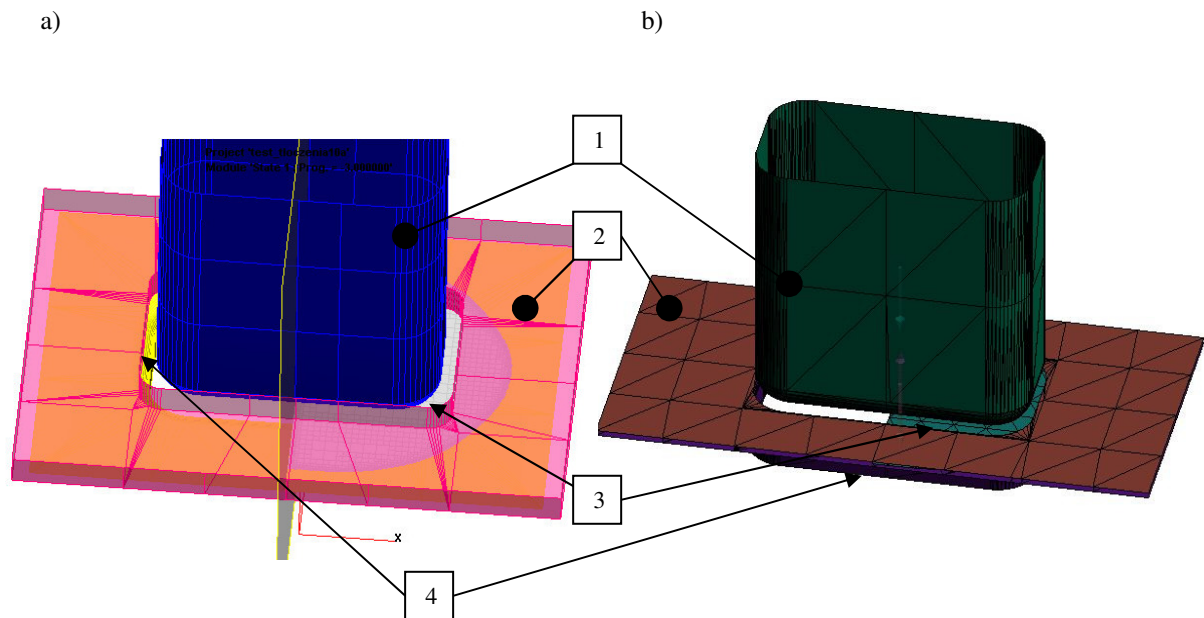
W programie Autoform wprowadzono do bazy materiałowej stal DC04, wraz z krzywą umocnienia (*Hardening Curve – HC*) i innymi parametrami materiałowymi, które są wymagane również w analizie numerycznej w programie Pam-Stamp (rys. 8).

For the determined shape of the initial material (fig. 4), trials of drawing simulation have been performed both in the Pam-Stamp and in the Autoform programs. For the simulation investigations, the following parameters have been adopted:

- *material – DC04 deep drawing steel,*
- *thickness – 2 mm,*
- *blankholder force – 20 kN,*
- *punch travel – 55 mm,*
- *punch speed – 15 mm/s.*

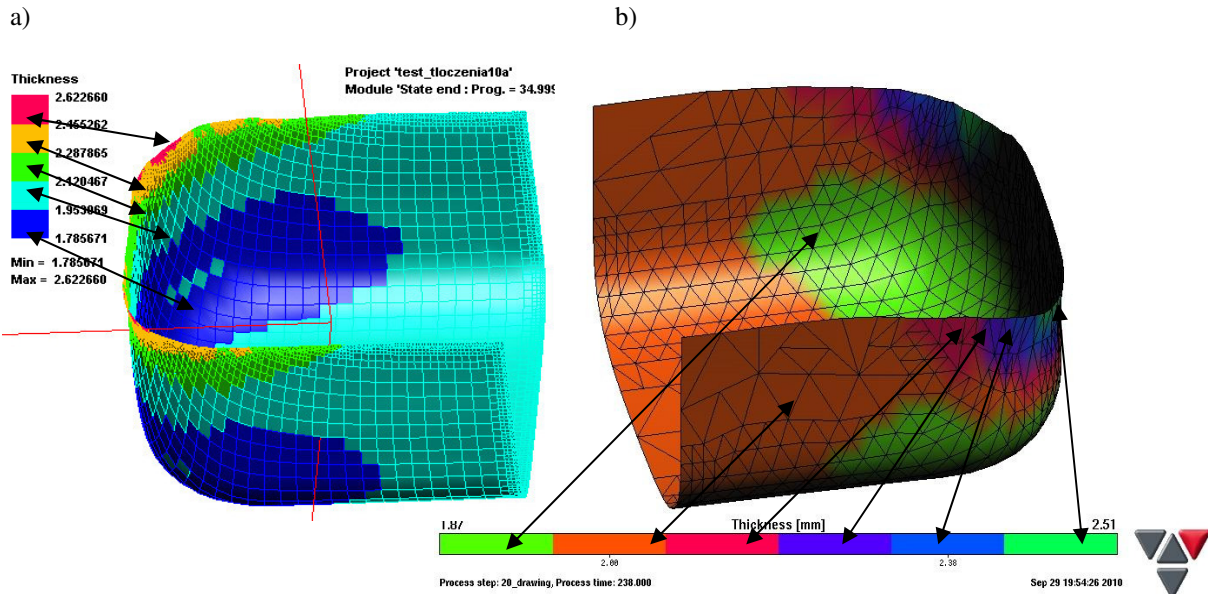
Numerical models at the moment of start are shown in fig. 6. The data of [3, 4] have been used for their elaboration. Drawpieces obtained after modelling have been shown in fig. 7. In table 1, the simulation results have been assembled.

In the Autoform program, DC04 steel has been put into the material base, as well as the hardening curve and other material parameters required, too, in the numerical analysis in the Pam-Stamp program (fig. 8).



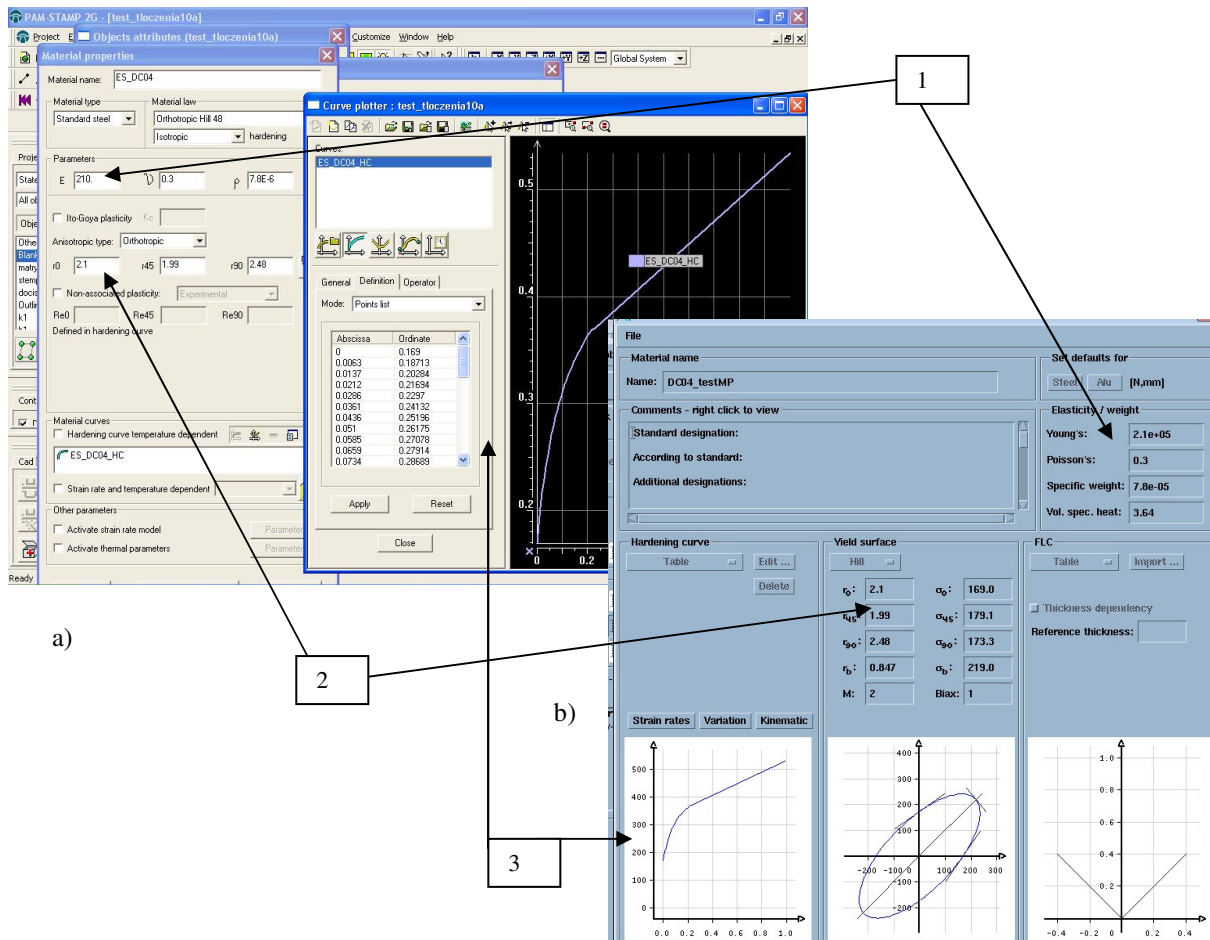
Rys. 6. Modele numeryczne tłoczników w chwili startu symulacji: a) program Pam-Stamp, b) program Autoform; 1 – stempel, 2 – dociskacz, 3 – wykrojka, 4 – matryca [3, 4, 12]

Fig. 6. Numerical models of stamping dies at the moment of simulation start: a) Pam-Stamp program, b) Autoform program; 1 – punch, 2 – blankholder, 3 – blank, 4 – die [3, 4, 12]



Rys. 7. Kształt wytłoczek i grubość ścianki uzyskane wg symulacji numerycznej: a) w programie Pam-Stamp, b) w programie Autoform [12]

Fig. 7. Drawpiece shape and wall thickness obtained according to numerical simulation: a) in the Pam-Stamp program, b) in the Autoform program [12]



Rys. 8. Parametry materiałowe wprowadzone do bazy materiałowej symulacji numerycznej. Stal DC04: a) w programie Pam-Stamp, b) w programie Autoform; 1 – stałe materiałowe (E – Moduł Younga, ν – Liczba Poissona, ρ – gęstość), 2 – współczynniki anizotropii Langford’a, 3 – krzywa umocnienia (HC) [12]

Fig. 8. Material parameters entered into the material base of the numerical simulation. DC04 steel: a) in the Pam-Stamp program, b) in the Autoform program; 1 – material constants (E – Young’s modulus, ν – Poisson ratio, ρ – density), 2 – plastic strain ratios, 3 – work-hardening curve (HC) [12]

Tablica 1. Porównanie wyników symulacji komputerowych i wyniki uzyskane w rzeczywistym procesie tłoczenia wytłoczki prostokątnej z DC04

Table 1. Comparison of computer simulation results and the results obtained in actual process of forming a rectangular drawpiece of DC04

Lp. Item	Nazwa parametru Parameter specification		Wytłoczka rzeczywista Actual drawpiece	Wytłoczka wg Pam-Stamp Drawpiece acc. to Pam-Stamp	Wytłoczka wg Autoform Drawpiece acc. to Autoform
1	Grubość ścianki Wall thickness [mm]	maksymalna maximum	2,23	2,62	2,51
		minimalna minimum	1,65	1,79	1,87
		różnica difference	0,58	0,83	0,64
2	Wysokość ścianki Wall height [mm]	maksymalna	31,76	30,46	29,84
		minimalna	29,82	29,98	25,70
		różnica	1,94	0,48	4,14
3	Odształcenie plastyczne Plastic strain	maksymalne	brak danych no data	0,859	0,659
		minimalne		0,003	0,002

Uwaga: Wartości pogrubione oznaczają wartości uzyskane w modelowaniu numerycznym najbardziej zbliżone do wartości rzeczywistych.

Note: The values in bold type are the ones obtained in numerical modelling and closest to the actual values.

Jak wynika z danych przedstawionych na rys. 7 i w tablicy 1 najlepsze odwzorowanie kształtu wytłoczki rzeczywistej oraz wysokości ścianki uzyskano w symulacji programu Pam-Stamp. Grubość ścianki oba programy podały zbliżoną w stopniu wystarczająco dokładnym do rzeczywistej.

Bliższa jednak próbom doświadczalnym, biorąc pod uwagę grubość ścianki, okazała się symulacja wykonana w programie Autoform.

Oba programy wygenerowały także różne wyniki odkształcenia plastycznego dla wytłoczki wirtualnej.

Mimo wprowadzenia tych samych parametrów i wprowadzenia tego samego materiału (z identycznymi parametrami materiałowymi – rys. 8), oba programy symulacyjne wygenerowały różne wyniki, co świadczy o różnicach w ich algorytmach obliczeniowych.

3.3. Kształtowanie wytłoczki cylindrycznej z nadstopu niklu Inconel 625 [12]

Nadstop niklu Inconel 625 jest materiałem trudno odkształcalnym, stosowanym w przemyśle lotniczym i kosmicznym. W ramach badań Instytutu Obróbki Plastycznej w Poznaniu [11] wykonano próby tłoczenia i zginięcia obrotowego wytłoczek cylindrycznych (rys. 9).

The data presented in fig. 7 and in table 1 show that the best imaging of the actual drawpiece shape and the wall thickness has been obtained in the Pam-Stamp simulation. The wall thickness has been stated sufficiently close to the actual one by both programs.

However, the simulation in the Autoform program has turned out to be closer to the experimental trials in respect of the wall thickness.

Both programs have also generated different results of plastic strain for the virtual drawpiece.

Although the same parameters and the same material (with identical material parameters – fig. 8) have been entered, the two simulation programs have generated different results, which proves that they differ in their computational algorithms.

3.3. Forming a cylindrical drawpiece Inconel 625 superalloy [12]

The nickel superalloy, Inconel 625, is a hard-to-deform material used in the aerospace and aircraft industry. The investigations performed by the Metal Forming Institute in Poznań included trials of stamping and flow forming of cylindrical drawpieces – fig. 9.

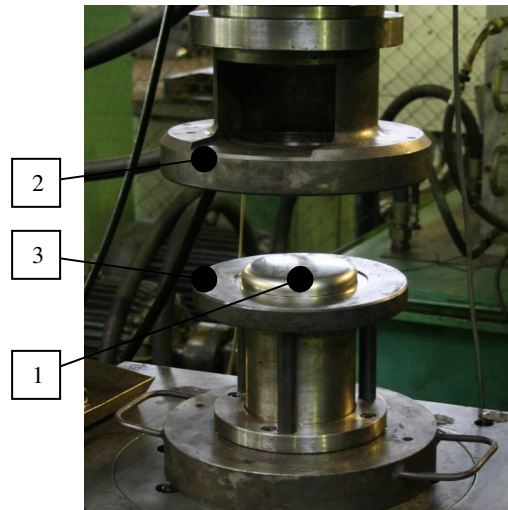


Rys. 9. Wytłoczka cylindryczna z nadstopu niklu Inconel 625 [11]
 Fig. 9. A cylindrical drawpiece of Inconel 625 nickel superalloy [11]

a)



b)



Rys. 10. Stanowisko doświadczalne do tłoczenia wytłoczek cylindrycznych [11]: a) prasa hydrauliczna PYE-250, b) tłocznik doświadczalny; 1 – stempel, 2 – matryca, 3 – dociskacz

Fig. 10. Experimental stand for stamping cylindrical drawpieces [11]: a) PYE-250 hydraulic press, b) experimental stamping die; 1 – punch, 2 – die, 3 – blankholder

Na rys. 10 pokazano stanowisko do tłoczenia oraz tłocznik doświadczalny do tłoczenia wytłoczki [11].

Celem porównania programów Pam-Stamp i Autoform ponownie wykonano w nich symulacje procesu tłoczenia przy zachowaniu parametrów prób doświadczalnych:

- materiał – nadstop niklu Inconel 625,
- grubość – 3,1 mm,
- nacisk dociskacza – 250 kN,
- posuw matrycy – 100 mm,
- prędkość posuwu tłoczenia – 25 mm/s,
- wymiary krążka wyjściowego (wykrojki) – \varnothing 200 mm.

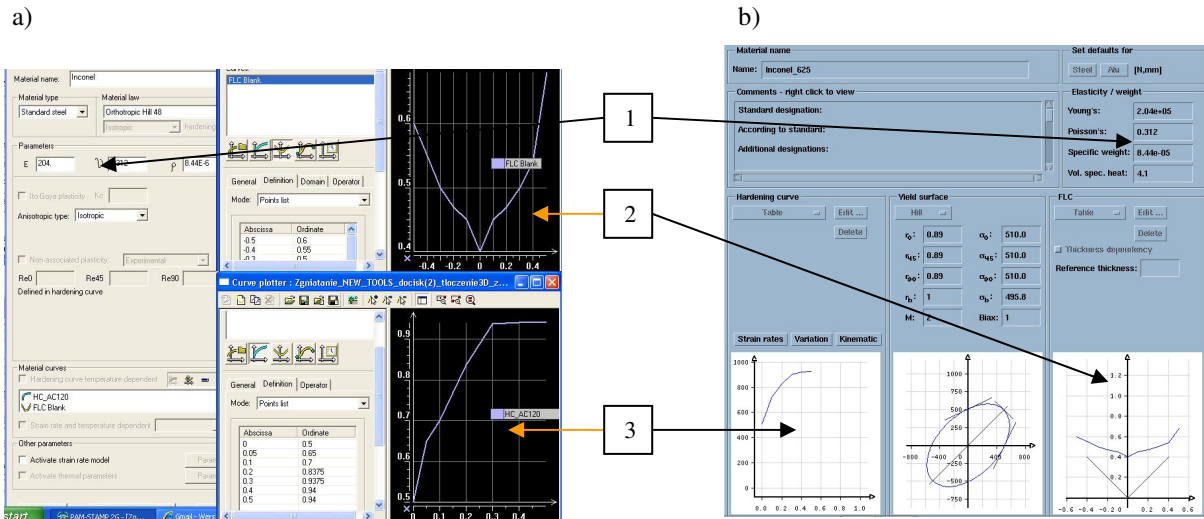
Fig. 10 shows the stamping stand and the experimental stamping die for stamping the drawpiece [11].

In order to compare the Pam-Stamp and the Autoform programs, simulations of the stamping process have been performed in them again maintaining the parameters of the experimental trials:

- material – nickel superalloy, Inconel 625,
- thickness – 3.1 mm,
- blankholder force – 250 kN,
- die travel – 100 mm,
- stamping travel speed – 25 mm/s,
- sheared blank size – \varnothing 200 mm.

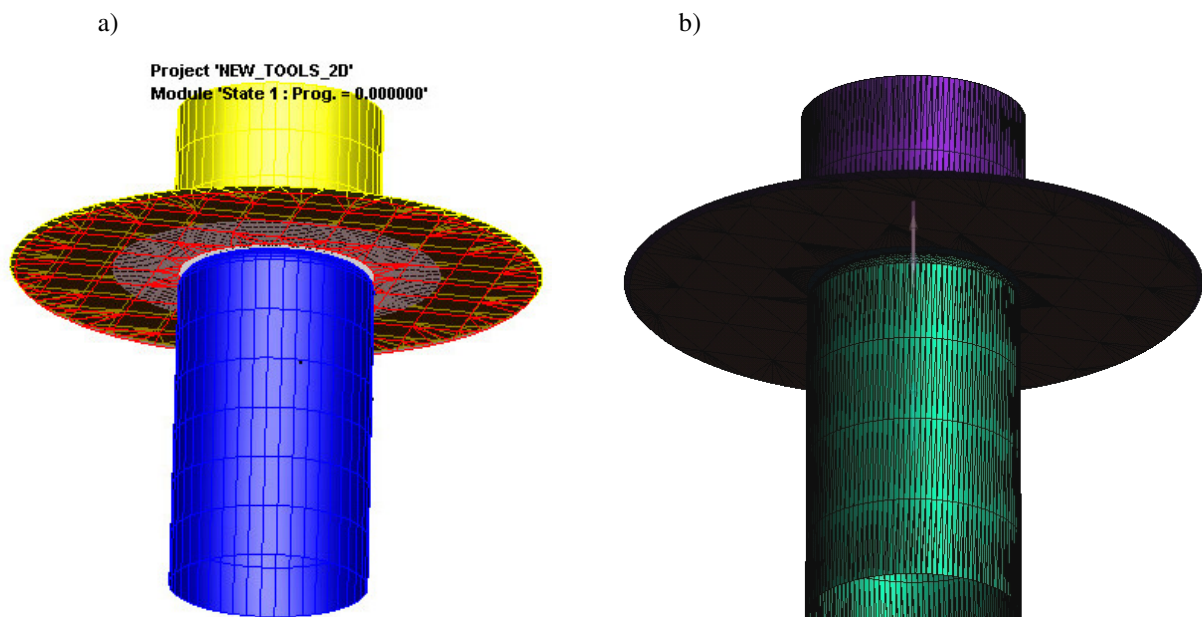
Wprowadzono parametry materiałowe stopu Inconel 625 do baz materiałowych programów (rys. 11), wykorzystując przy tym dotychczasowe wyniki przeprowadzonych badań. Modele numeryczne tłoczniaka w chwili startu zostały pokazane na rys. 12. Natomiast wytłoczki uzyskane po modelowaniu przedstawiono na rys. 13 [12]. W tabelicy 2 zestawiono wyniki symulacji [12].

The material parameters of Inconel 625 have been entered into the material bases of the Pam-Stamp and Autoform programs with the use of the results of investigations performed so far. The numerical models of the stamping die at the moment of start have been shown in fig. 12. Drawpieces obtained after modelling can be seen in fig. 13 [12]. Simulation results are assembled in table 2.



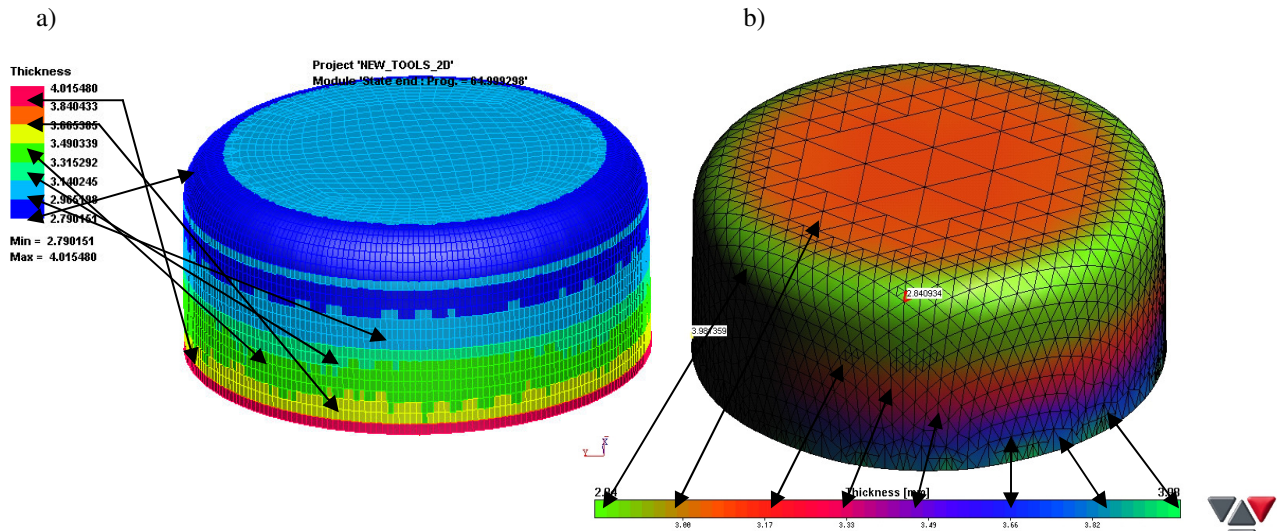
Rys. 11. Parametry materiałowe wprowadzone do bazy materiałowej symulacji numerycznej. Stopu niklu Inconel 625: a) w programie Pam-Stamp, b) w programie Autoform; 1 – stałe materiałowe (E , ν , ρ), 2 – graniczna krzywa formowania (dalej zwana FLC), 3 – krzywa umocnienia (HC) [12]

Fig. 11. Material parameters entered into the material base of the numerical simulation. Inconel 625 nickel alloy: a) in the Pam-Stamp program, b) in the Autoform program; 1 – material constants (E , ν , ρ) 2 – forming limit curve (hereinafter called FLC), 3 – work-hardening curve (HC) [12]



Rys. 12. Modele numeryczne tłoczniaków w chwili startu symulacji: a) program Pam-Stamp, b) program Autoform [12]; 1 – matryca, 2 – dociskacz, 3 – wykrojka, 4 – stempel

Fig. 12. Numerical models of the stamping dies at the simulation start: a) Pam-Stamp program, b) Autoform program [12]; 1 – die, 2 – blankholder, 3 – sheared blank, 4 – punch



Rys. 13. Kształt wytłoczek i grubość ścianki uzyskane wg symulacji numerycznej: a) w programie Pam-Stamp, b) w programie Autoform [12]

Fig.13. Drawpiece shape and wall thickness obtained according to the numerical simulation: a) in the Pam-Stamp program, b) in the Autoform program [12]

Tablica 2. Porównanie wyników symulacji komputerowych i wyników uzyskanych w rzeczywistym procesie tłoczenia wytłoczki cylindrycznej ze stopu Inconel 625 [12]

Table 2. Comparison of computer simulation results and the results obtained in the actual process of forming a cylindrical drawpiece of Inconel 625 alloy

Lp. Item	Nazwa parametru Parameter specification		Wytłoczka rzeczywista Actual drawpiece	Wytłoczka wg Pam-Stamp Drawpiece acc. to Pam-Stamp	Wytłoczka wg Autoform Drawpiece acc. to Autoform
1	Grubość ścianki Wall thickness [mm]	maksymalna maximum	4,32	4,02	3,98
		minimalna minimum	2,72	2,79	2,84
		różnica difference	1,60	1,23	1,14
2	Wysokość ścianki Wall height [mm]	maksymalna	57,61	55,82	55,61
		minimalna	53,18	54,16	55,04
		różnica	4,43	1,66	0,57
3	Odształcenie plastyczne Plastic strain	maksymalne	brak danych no data	0,570	0,495
		minimalne		0,028	0,001

Uwaga: Wartości pogrubione oznaczają wartości uzyskane w modelowaniu numerycznym najbardziej zbliżone do wartości rzeczywistych.

Note: The values in bold type are the ones obtained in numerical modelling and closest to the actual values.

Jak wynika z danych przedstawionych w tablicy 2 oraz na rys. 13 program Pam-Stamp znacznie lepiej od programu Autoform odwzorowuje zarówno grubość ścianki wytłoczki, jak również jej wysokość w stosunku do wartości uzyskanych w badaniach rzeczywistych.

Oba programy wygenerowały także różne wartości odkształcenia plastycznego dla wytłoczki wirtualnej.

3.4. Zgniatanie obrotowe wydłużające współbieżne wytłoczki cylindrycznej z nadstopu niklu Inconel 625 [11, 12]

Wytłoczka z nadstopu niklu Inconel 625 kształtowana w operacji tłoczenia (pkt. 3.3 artykułu) w ramach badań prowadzonych w Zakładzie Tłoczenia [11] była zgniatana obrotowo wydłużająco współbieżnie na stanowisku badawczym – rys. 14 [11, 12]. Celem porównania możliwości programów Pam-Stamp i Autoform, podjęto próby symulacji kształtowania obrotowego. Badania wykazują zupełnie różną przydatność programów Pam-Stamp i Autoform w zakresie obrotowego kształtowania blach. O ile w programie Pam-Stamp istnieje możliwość zasymulowania obrotu krążka blachy, bądź narzędzia, o tyle w programie Autoform poza pozycjonowaniem, jest to niemożliwe. Funkcja Rotational kinematic z programu Pam-Stamp, podczas badań własnych wykazała jednak pewne ograniczenia, tj. można zdefiniować symulację ruchu obrotowego krążka, ale z przyjętych algorytmów całkowania, z jakich korzysta Pam-Stamp, wynika brak możliwości otrzymania wyników wiarygodnych i porównywalnych z wynikami prób doświadczalnych. Główny problem to czas obliczeń i złe odwzorowanie styku punktowego rolka – wytłoczka. Problem ten jest na tyle poważny, że autorzy podjęli próby zmiany kinematyki w symulacji, tj. ruch obrotowy krążka zamieniono na ruch obwodowy rolki imitujący toczenie się rolki po nieobrcającym się materiale [11, 12]. Styk punktowy został zachowany i specyfika technologii zgniatania obrotowego wydłużającego współbieżnego również. Model numeryczny dla 2 rolek pokazano na rys. 15 – całe rolki zastąpiono jedynie krawędzią kształtującą, wg opisów autorów [6÷8].

The data presented in table 2 and in fig. 13 show that the Pam-Stamp program images both the drawpiece wall thickness and its height much better than the Autoform program as compared to the values obtained in actual experiments. The two programs have also generated different plastic strain values for the virtual drawpiece

3.4. Elongating forward flow forming of an Inconel 625 nickel superalloy cylindrical drawpiece [11, 12]

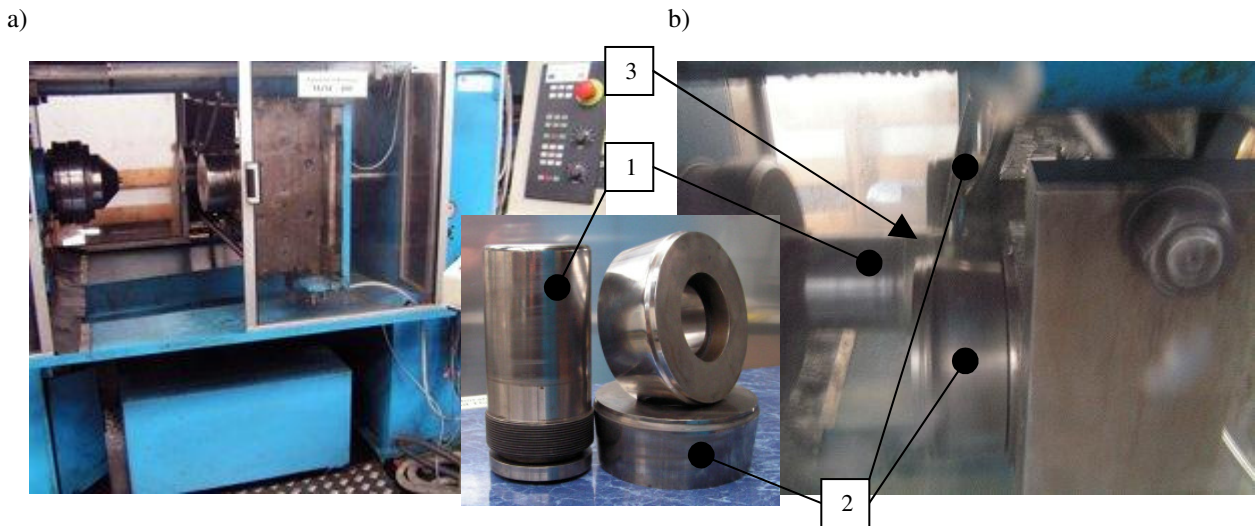
The Inconel 625 drawpiece formed in the operation of stamping (item 3.3 of the paper) within the investigations conducted by the Stamping Department [11] has been subjected to elongating forward flow forming in the investigation stand – fig. 14 [11, 12]. In order to compare the possibilities of the Pam-Stamp and Autoform programs, trials of flow forming simulations have been undertaken. The investigation shows completely different suitability of the Pam-Stamp and Autoform programs in respect of flow forming of sheet metal. While the Pam-Stamp has the possibility to simulate rotation of a sheet metal disk or a tool, it is not possible in the Autoform except in positioning. The Rotational kinematic function of the Pam-Stamp program has shown some limitations, i.e. disk rotation can be defined, but the integration algorithms used by the Pam-Stamp make it impossible to obtain reliable results comparable to those of experimental trials. The main problem is the time of computation and wrong imaging of the roller-drawpiece contact point. The problem is so serious that the authors have tried to change the kinematics in simulation, i.e. the rotation of the disk has been changed into circumferential motion of the roller imitating its rolling on the motionless material [11, 12]. The point contact has been maintained as so far as possible. The character of flow forming. A numerical model for 2 rolls can be seen in fig. 15 – whole rolls have been substituted with the forming edge according to the authors' description [6÷8].

Wyniki analiz numerycznych wg programu Pam-Stamp pokazano na rys. 16. Parametry procesu:

- obroty wzornika – 1000 obr./min,
- posuw rolek – 450 mm/min,
- nacisk dociskacza – 250 kN,
- odkształcenie – 20%.

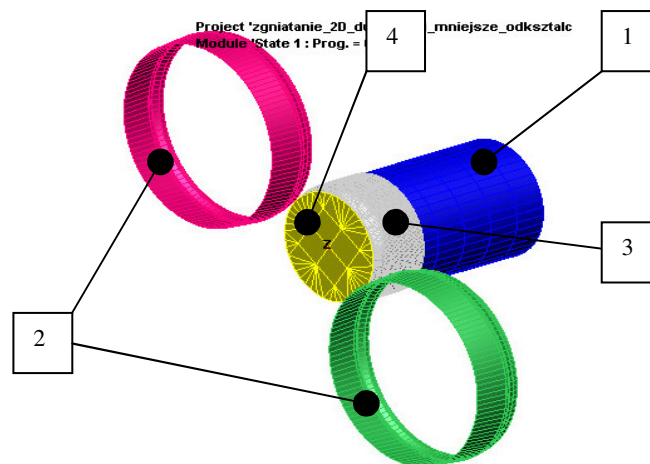
The results of numerical analyses according to the Pam-Stamp program are shown in fig. 16. The process parameters:

- mandrel rotation speed – 1000 rpm,
- roller travel – 450 mm/min,
- blankholder force – 250 kN,
- deformation – 20%.



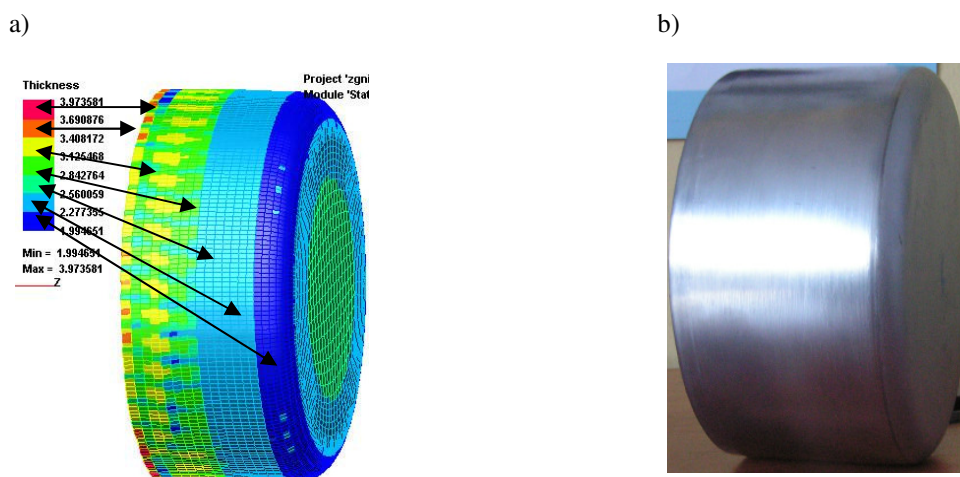
Rys. 14. Stanowisko badań doświadczalnych: a) zgniataarka obrotowa MZH-400 [11, 12], b) narzędzia do zgniataania obrotowego [11]; 1 – wzornik, 2 – rolki, 3 – wytłoczka

Fig. 14. Experimental stand: a) MZH-400 rotary extrusion machine [11, 12], b) flow forming tools [11]; 1 – mandrel, 2 – rollers, 3 – drawpiece



Rys. 15. Model numeryczny narzędzi do zgniataania obrotowego w chwili startu symulacji wg programu Pam-Stamp [11, 12]; 1 – wzornik, 2 – rolki, 3 – wytłoczka, 4 – dociskacz

Fig. 15. Numerical model of flow forming tools at the moment of Pam-Stamp simulation start [11, 12]; 1 – mandrel, 2 – rollers, 3 – drawpiece, 4 – blankholder



Rys. 16. Wytłoczka po zginiataniu obrotowym: a) wirtualna wraz z rozkładem grubości ścianki wg programu Pam-Stamp, b) rzeczywista [11, 12]

Fig. 16. Drawpiece after flow forming: a) virtual one with the wall thickness distribution acc. to the Pam-Stamp program, b) actual one [11, 12]

Tablica 3. Porównanie wyników symulacji komputerowej zginiatania obrotowego wytłoczki cylindrycznej z Inconel 625 wg programu Pam-Stamp i wg rzeczywistych badań doświadczalnych

Table 3. Comparison of the results of Inconel 625 cylindrical drawpiece flow forming simulation acc. to the Pam-Stamp program and according to actual experiments

Lp. Item	Nazwa parametru Parameter specification		Wytłoczka rzeczywista Actual drawpiece	Wytłoczka wg Pam-Stamp Drawpiece acc. to Pam-Stamp
1	Grubość ścianki Wall thickness [mm]	maksymalna maximum	3,83	3,97
		minimalna minimum	2,13	1,99
		różnica difference	1,70	1,98
2	Wysokość ścianki Wall height [mm]	maksymalna	59,48	57,75
		minimalna	55,12	56,19
		różnica	4,36	1,56

Jak wynika z rys. 16 i tablicy 3 program Pam-Stamp prawidłowo odwzorowuje grubość ścianki wytłoczki. Wysokość ścianki jest niestety źle szacowana.

Fig. 16 and table 3 indicate that the Pam-Stamp program correctly images the drawpiece wall thickness, however, the wall height is wrongly estimated.

4. WNIOSKI

1. Mimo różnic w metodach obliczeniowych i różnej budowie siatek MES udało się porównać wyniki symulacji w programach Pam-Stamp i Autoform w zakresie modelowania dwóch różnych procesów formowania blach – tłoczenia i zginiatania obrotowego.

4. CONCLUSIONS

1. Despite the differences in computation methods and different structures of the FEM grids, we have succeeded in the comparison of simulation results in the Pam-Stamp and Autoform programs in the scope of modelling two different sheet metal forming processes – deep drawing and flow forming.

2. Oba programy Pam-Stamp i Autoform wykazują dużą przydatność dla oceny przebiegu procesu tłoczenia i już po wstępnych symulacjach można opracować proces technologiczny.
 3. Program Pam-Stamp, na podstawie podjętych badań symulacyjnych, pozwala lepiej niż program Autoform odwzorować proces technologiczny kształtowania wytłoczek prostokątnych.
 4. Należy wykonać dalsze badania symulacyjne w programie Pam-Stamp z wprowadzeniem siatki MES na grubości wytłoczek (*Volume Blank*), celem sprawdzenia poprawności analiz numerycznych procesu zgniatania obrotowego wytłoczek cylindrycznych z nadstopu niklu Inconel 625, ze względu na brak możliwości porównania tej symulacji z odpowiadającą jej wykonaną w programie Autoform.
 5. Przewidziane są dalsze symulacje procesu zgniatania obrotowego z wykorzystaniem innych programów symulacyjnych np. Q-form.
2. *Both Pam-Stamp and Autoform reveal good suitability for the assessment of the stamping process and the technological process can be elaborated immediately after initial simulation.*
 3. *The Pam-Stamp program allows for better imaging of the technological process of forming rectangular drawpieces than the Autoform program.*
 4. *Further simulation investigations should be performed with the introduction of the FEM grid on the volume blank in order to check the correctness of numerical analyses of the process of flow forming cylindrical drawpieces Inconel 625 nickel superalloy due to the lack of possibility to compare the simulation to the corresponding one performed by means of the Autoform program.*
 5. *Further simulations of the flow forming process with the use of other programs, e.g. Q-form, are intended.*

Publikacja powstała w wyniku pracy statutowej BT 901.71.000 – Badania innowacyjnych technologii tłoczenia, wyoblania i zgniatania obrotowego, szczególnie wyrobów o złożonych kształtach z trudno odkształcalnych i szybko umacniających się materiałów z wykorzystaniem nowoczesnych technik komputerowych [12].

This publication has been made as a result of statute work BT 901.71.000 – Investigation of innovative technologies of stamping, spinning and flow forming, especially of complex shape products of hard-to-deform and quickly hardening materials, with the use of modern computer techniques [12].

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Klocke F.: Sheet Metal Forming II. Simulation Techniques in Manufacturing. Online: http://www.wzl.rwth-aachen.de/en/f786439a4c53fb78c125709f0055702f/v4_sheetmetalforming_ii.pdf, dostęp na dzień 11.10.2010.
- [2] Informacje o projekcie „I-Centrum”. Online: <http://www.inop.poznan.pl/o-nas/zarzadzanie-procesami-badawczymi>, dostęp na dzień 11.10.2010.
- [3] Pawlicki M.: Testowanie programu Pam-Stamp w zastosowaniu do minimalizacji odpadów technologicznych w tłoczeniu wytłoczek prostokątnych. Praca magisterska 2010 (materiały niepublikowane).
- [4] Woźniak H.: Tłoczenie głębokiej stalowej puszki prostokątnej z kołnierzem. *Obróbka Plastyczna Metali* 1999 nr 5 s. 21–26.
- [5] Żmudzki A., Śledzińska A., Pietrzyk M., Woźniak H., Plewiński A., Drenger T.: Kontrola jakości produktów głębokiego tłoczenia blach za pomocą symulacji komputerowych. *Obróbka Plastyczna Metali* 2005 nr 3 s. 50–62.
- [6] Sebastiani G., Brosius A., Ewers R., Kleiner M., Klimmek C.: Numerical investigation on dynamic effects during sheet metal spinning by explicit finite-element-analysis. *Journal of Materials Processing Technology* 2006 nr 177 s. 401–403.
- [7] Mohebbi M.S., Akbarzadeh A.: Experimental study and FEM analysis of redundant strains in flow forming of tubes. *Journal of Materials Processing Technology* 2010 nr 210 s. 389–395.
- [8] Mori K., Ishiguro M., Isomura Y.: Hot shear spinning of cast aluminium alloy parts. *Journal of Materials Processing Technology* 2009 nr 209 s. 3621–3627.

- [9] Budzyński A.: Krótki wstęp do zastosowania Metody Elementów Skończonych (MES) do numerycznych obliczeń inżynierskich. Biuletyn GM View 2006 nr 5 s. 3–4.
- [10] Banaś K.: Metoda Elementów Skończonych. Materiały dydaktyczne o MES. Instytut Modelowania Komputerowego Politechniki Krakowskiej. Online: <http://riad.usk.pk.edu.pl/~kbanas/mes.ppt>, dostęp na dzień 22.09.2010.
- [11] Sprawozdanie z projektu rozwojowego nr R15 027 03 - Technologia kształtowania plastycznego części silników lotniczych z nadstopu niklu z zastosowaniem zgniatania obrotowego i wyoblania. Praca niepublikowana.
- [12] Sprawozdanie z badań statutowych BT 901.71.000 - Badania innowacyjnych technologii tłoczenia, wyoblania i zgniatania obrotowego, szczególnie wyrobów o złożonych kształtach z trudno odkształcalnych i szybko umacniających się materiałów z wykorzystaniem nowoczesnych technik komputerowych. Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań. Praca niepublikowana.