





Badania kształtowania wyrobów symetrycznych metodą wyoblania wsparte symulacjami MES

Tests of forming symmetrical products using the spinning method supported by FEM simulations

(1) Tomasz Gądek*  (2) Marcin Majewski  (3) Łukasz Nowacki  (4) Tadeusz Drenger 
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 2.07.2019
Recenzja: 9.09.2019
Akceptacja: 20.12.2019

Wkład autorów

- (1) Koncepcja, metodyka, analiza danych
- (2) Badania numeryczne
- (3) Badania laboratoryjne na numerycznej wyoblance MWS-200
- (4) Założenia, koncepcja, analiza danych

ORCID iD

- (1) <https://orcid.org/0000-0002-7195-7219>
- (2) <https://orcid.org/0000-0002-0212-642X>
- (3) <https://orcid.org/0000-0002-5285-218X>
- (4) <https://orcid.org/0000-0002-8948-2928>

Article info

Received: 2.07.2019
Reviewed: 9.09.2019
Accepted: 20.12.2019

Authors' contribution

- (1) Concept, methodology, analysis of data
- (2) Numerical simulations
- (3) Lab tests on numerically controlled MWS-200 spinning machine
- (4) Assumptions, concept, analysis of data

Streszczenie

Do metod kształtowania obrotowego wyrobów z blach zaliczamy m.in.: wywijanie rolkami krawędzi blachy, cięcie na nożycach krążkowych, żłobienie, zgniatanie obrotowe czy wyoblanie. Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Obróbki Plastycznej od wielu lat zajmuje się badaniami wyoblania. W ostatnich latach w ramach prac statutowych Instytut zaprojektował i wybudował unikalną, sterowaną numerycznie wyoblarkę MWS-200 do kształtowania wyrobów o skomplikowanym kształcie. Maszyna MWS-200 umożliwia kształtowanie wyrobów o przekroju eliptycznym, kwadratowym, trójkątnym, a także wyrobów osiowosymetrycznych. W artykule zaprezentowano wyniki badań analizy odwrotnej kształtowania wyrobu typu stożek z zastosowaniem technologii wyoblania. Badania laboratoryjne prowadzono na maszynie MWS-200. Do badań numerycznych zastosowano program Simufact Forming. Sposób projektowania procesu technologicznego wytłoczek wyoblanych opracowywany jest na podstawie doświadczenia oraz badań empirycznych, co w przypadku wyrobów o skomplikowanym kształcie sprawia dużo problemów i jest czasochłonne. W artykule zamieszczono wyniki badań wyoblania, w którym kształtowano krążek blachy w jednym oraz trzech ruchach rolki wyoblającej. Przedstawiono wyniki badań obrazujące różnice kształtu wykonanego wyrobu stożkowego pomiędzy badaniami laboratoryjnymi a symulacjami numerycznymi. Przedstawiono proces obliczeniowy, który pozwolił na uzyskanie zbieżności wyników. Zaplanowane badania z zastosowaniem metody analizy odwrotnej mają na celu skrócenie czasu opracowania procesu technologicznego wytłoczek osiowosymetrycznych na podstawie badań numerycznych.

Słowa kluczowe: wyoblanie, inżynieria odwrotna, MES, obróbka plastyczna, Simufact Forming, porównanie badań MES z badaniami rzeczywistymi, DC04, wyoblanie DC04, DIN 1.0338

Abstract

Methods of rotary forming of products from sheets include: burring of a sheet edge with rolls, cutting on rotary cutters, grooving, roll forming and spinning. The Łukasiewicz Research Network – Metal Forming Institute has been engaged in studies on spinning for many years. In recent years, as part of its statutory work, the Institute designed and built the unique, numerically controlled MWS-200 spinning machine for forming products with complicated shapes. The MWS-200 machine makes it possible to form products with elliptical, square and triangular cross-sections but also axially symmetrical products. This article presents the results of research concerning reverse engineering of forming of a cone-type product with the application of spinning technology. Laboratory tests were conducted on the MWS-200 machine. Simufact Forming software was applied for numerical simulations. The method of designing the technological process for spun drawpieces is being developed based on experience and empirical tests, which poses large

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 61 657 05 55; e-mail: tomasz.gadek@inop.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 61 657 05 55; e-mail: tomasz.gadek@inop.poznan.pl

ORCID iDs

- (1) <https://orcid.org/0000-0002-7195-7219>
(2) <https://orcid.org/0000-0002-0212-642X>
(3) <https://orcid.org/0000-0002-5285-218X>
(4) <https://orcid.org/0000-0002-8948-2928>

problems and is time-consuming in the case of products with a complicated shape. This article contains the results of spinning tests in which a sheet disk was formed in one and three movements of the spinning roll. Test results illustrating differences between laboratory tests and numerical simulations in the shape of the produced conical product are presented. The numerical process that made it possible to obtain convergence of results is presented. Planned studies applying the reverse engineering method are intended to reduce the time of development of the technological process for axially symmetrical drawpieces based on numerical simulations.

Keywords: metal spinning, reverse engineering, FEM, metal forming, Simufact Forming, comparison of FEM studies with laboratory tests, DC04, metal spinning DC04, DIN 1.0338

1. WSTĘP

Wyroby wykonane technologią wyoblania są powszechnie stosowane w różnych gałęziach przemysłu, takich jak: motoryzacyjny, lotniczy, zbrojeniowy itp. Najczęściej metoda wyoblania stosowana w praktyce przemysłowej wykorzystuje sterowanie numerycznie. Programy stosowane w procesie wyoblania nie uwzględniają zmian właściwości materiału podczas procesu kształtowania, co powoduje nie do końca przewidywalny efekt finalny procesu wyoblania. Wspomaganie procesu technologicznego za pomocą programów MES znacznie powinno poprawić opracowanie prawidłowego przebiegu procesu wyoblania.

Konfigurację symulacji numerycznej procesu wyoblania opracowano na podstawie artykułu [1], w którym określono zakres analizy MES dla ruchów narzędzi formujących. Przeprowadzone zostały również badania eksperymentalne, których wyniki porównano z wynikami numerycznymi w celu opracowania wytycznych do projektowania procesu symulacji. Informację na temat sposobu doboru odpowiedniej siatki Mesh zamieszczono w pracy [2]. Za dobór współczynnika tarcia, w kontakcie narzędzie – kształtowany materiał, opisano w pracy [1–3]. W artykule [2, 4] autorzy, skracając wymagany czas obliczeniowy, zamodelowali narzędzia jako ciała nieodkształcalne, natomiast wyoblany wyrób jako odkształcalny arkusz, który opisano, wykorzystując sześciocienną liniową siatkę elementów skończonych. Wyniki badań doświadczalnych przedstawione w pracy [5, 6] pozwalają przewidzieć występujące niestabilności procesu, znacznie poprawiając jego wydajność. Wyniki badań numerycznych porównano z referencyjnym przedmiotem po każdym prze-

1. INTRODUCTION

Products made using spinning technology are widely used in various branches of industry, such as: automotive, aeronautic, defense, etc. The spinning method most commonly applied in industrial practice employs numerical control. The programs used in the spinning process do not account for changes in the material's properties occurring over the course of forming, which results in a not quite predictable final effect of the spinning process. Supporting the technological process with FEM software should substantially improve development of the proper course of the spinning process.

The configuration of the numerical simulation of the spinning process was determined based on article [1], in which the scope of FEM analysis for forming tool movements was defined. Experimental tests were also carried out, and their results were compared to numerical results for the purpose of establishing guidelines for designing of the simulation process. Information concerning the method of selecting the appropriate mesh is given in article [2]. Selection of the friction coefficient for the tool – formed material pair is described in articles [1–3]. In articles [2, 4], to reduce the required computational time, the authors modeled tools as undeformable bodies, while the spun product was modeled as a deformable sheet described using a linear hexahedral mesh of finite elements. The results of experimental tests presented in papers [5, 6] allow for prediction of instabilities occurring in the process, improving its performance significantly. The results of numerical simulations were compared to a reference object after every pass of the forming tool. Determination of the influence of

ściu narzędzia formującego. Określenie wpływu parametrów procesu wyoblania oraz optymalizacji procesu na wyrób finalny można znaleźć w artykułach [7–8].

Opierając się na analizie literatury, opracowano model numeryczny narzędzi do wyoblania oraz opracowano wstępny plan badań.

2. CEL BADAŃ

Celem badań technologii kształtowania w płaskim stanie naprężenia i odkształcenia wytlóczek było zwiększenie wiedzy przydatnej przy projektowaniu procesów technologicznych, w tym doboru parametrów technologicznych procesu wyoblania wytlóczek osiowych. Badania dotyczyły sposobu projektowania technologii kształtowania obrotowego w oparciu o badania symulacji komputerowych.

W ramach badań zaplanowano dobór odpowiednich parametrów technologicznych procesu wyoblania, które obejmowały opracowanie trajektorii ruchu narzędzia, szczeliny pomiędzy rolką a wzornikiem, prędkości posuwu rolki wyoblającej oraz prędkości obrotowej wrzeciona. Wykonane w badaniach laboratoryjnych wyroby poddano analizie odwrotnej, mającej na celu dobór parametrów procesu w taki sposób, aby uzyskać wyrób jak najbardziej zbliżony do uzyskanego w badaniach laboratoryjnych. W przyszłości opracowywanie trajektorii ruchu narzędzia kształtującego w oparciu o analizę symulacji komputerowych pozwoli przyspieszyć proces wykonania wytlóczek, jak również zaoszczędzić koszty związane z opracowaniem odpowiedniej trajektorii poprzez liczne próby technologiczne (jak ma to miejsce dotychczas).

3. METODYKA BADAWCZA I ZAKRES PRAC

Badania wytlóczek stożkowych o kącie rozwarcia 36° wykonywano na maszynie MWS-200 (rys. 1). Dla wyrobu stożkowego z materiału DC04 o grubości 1 mm wykonano wzornik pokazany na rys. 2. Wyoblanie prowadzono przy następujących parametrach procesu: prędkość wyoblania (posuw/obrót): 0,15; 0,2; 0,75

spinning process parameters and process optimization on the final product is described in articles [7–8].

Based on analysis of the literature, a numerical model of spinning tools was developed, and a preliminary research plan was prepared.

2. GOAL OF RESEARCH

The goal of research on forming technology in a flat stress state and on deformation of drawpieces was to expand knowledge useful in designing of technological processes, including selection of the technological parameters of the process of spinning axially symmetrical drawpieces. Research concerned the method of designing roll forming technologies based on computer simulations.

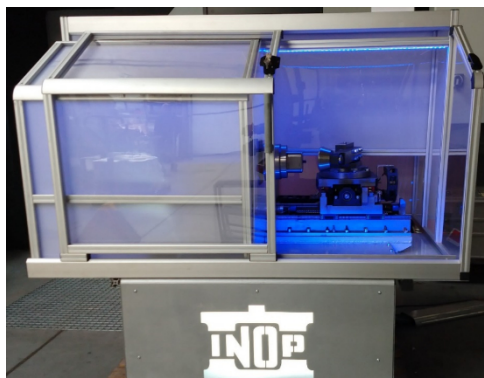
As part of research, selection of the appropriate technological parameters of the spinning process was planned, which covered determination of the tool's motion trajectory, gaps between the roll and templet, advance rate of the spinning roll and rotary speed of the spindle. The products made in laboratory tests were subjected to reverse engineering analysis with the aim of selecting process parameters in such a way as to obtain a product as similar as possible to the one obtained in laboratory tests. In the future, development of the forming tool's motion trajectory based on analysis of computer simulations will make it possible to accelerate the process of making drawpieces and save on costs related to development of the proper trajectory through numerous technological tests, as has been the practice until now.

3. RESEARCH METHODOLOGY AND SCOPE OF WORK

Tests of conical drawpieces with a taper angle of 36° were performed on the MWS-200 machine (Fig. 1). The templet, shown in Fig. 2, was made for the conical product out of DC04 material with a thickness of 1 mm. Spinning was performed with the following process parameters: spinning speed (advance/revolution): 0.15; 0.2; 0.75

[mm/obr.]; szczelina pomiędzy wzornikiem a rolką wyoblającą: 1 i 0,7 mm oraz przy dwóch różnych trajektoriach składających się odpowiednio z jednego i trzech ruchów wyoblających.

[mm/rev.]; gap between templet and spinning roll: 1 and 0.7 mm, and in two different trajectories consisting of, accordingly, one and three spinning movements.



Rys. 1. Stanowisko badawcze – wyoblarka MWS-200

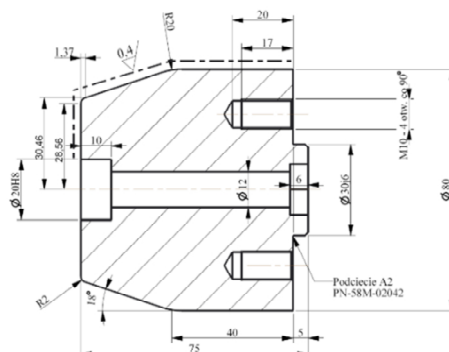
Fig. 1. Test stand – MWS-200 spinning machine

W przypadku wyrobu uzyskanego zarówno w jednym, jak i w trzech ruchach wyoblających określono parametry, przy których uzyskano zadowalający wynik. Następnie dla tych samych parametrów procesu wyoblania przeprowadzono badania numeryczne.

Przy ocenie zgodności wyników porównywano kształt wytłoczki oraz rozkład grubości ścianki tworzącej stożka. W przypadku znacznych różnic w badaniach numerycznych zaplanowano wprowadzenie korekty szczeliny. W efekcie badania numeryczne zmierzały do uzyskania zbliżonego wyniku badań empirycznych. W końcowym etapie badań uzyskane próbki poddano analizie wymiarowej oraz, w sposób procentowy, zweryfikowano obie metody kształtowania.

The parameters for which a satisfactory result was obtained were determined for products obtained in one and in three spinning movements. Next, numerical simulations were carried out with the same spinning process parameters.

During evaluation of conformity of results, the shape of the drawpiece and the distribution of wall thickness on the cone's generatrix were compared. In the case of significant differences in numerical simulations, it was planned to introduce a correction to the gap. In effect, numerical simulations tended to obtain a similar result to the result of empirical tests. In the final stage of research, obtained samples were subjected to dimensional analysis, and both forming methods were verified on a percentage basis.



Rys. 2. Wzornik stożkowy o kącie rozwarcia 36°

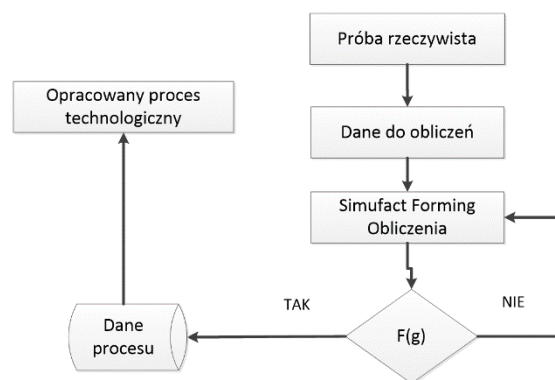
Fig. 2. Conical templet with taper angle 36°

Do badań wyoblania przygotowano 30 krążków z blachy stalowej gatunku DC04 o średnicy $\varnothing 100$ i grubości 1 mm. Krążki posiadały otwór centrujący $\varnothing 20$ mm do zamocowania ich na wzorniku maszyny MWS-200.

30 disks made of DC04 grade steel sheet with a diameter of $\varnothing 100$ and thickness of 1 mm were prepared for spinning tests. The disks had a $\varnothing 20$ mm centering hole for fastening on the templet of the MWS-200 machine.

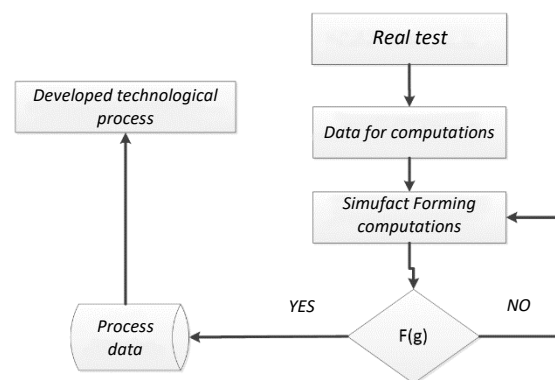
4. WYNIKI I PRZEBIEG BADAŃ

Na rys. 3 przedstawiono sposób prowadzenia analizy odwrotnej dla wytłoczek wyoblanych.



4. RESULTS AND COURSE OF TESTS

Fig. 3 presents the method of reverse engineering analysis for spun drawpieces.



Rys. 3. Schemat przebiegu procesu badań metodą analizy odwrotnej

Fig. 3. Diagram of the course of the testing process using the reverse engineering method

4.1. Badania wyoblania w jednym ruchu rolki

Próby rozpoczęto od wyoblania wytłoczki stożkowej w jednym ruchu rolki wyoblającej, przemieszczającej się równoległe do tworzącej wzornika. W celu pełniejszego zobrazowania procesu wyoblania oraz możliwości porównania go z wynikami badań numerycznych, zatrzymywano proces w taki sposób, aby różnica wysokości wytłoczki zmieniała się co 4 mm.

Zastosowano następujące parametry procesu kształtowania na maszynie MWS-200:

- liczba ruchów rolki: 1,
- szczelina: 1 mm,
- prędkość wyoblania (posuw/obrót): 0,15; 0,2; 0,75 [mm/obr.].

Próbkę stożkową wyoblano przy trzech różnych prędkościach wyoblania. Dla prędkości 0,15 oraz 0,2 mm/obr. otrzymano detale charakteryzujące się znacznym pofałdowaniem na ściankach. W przypadku prędkości wyoblania 0,75 mm/obr. otrzymano zadowalające wyniki, a wytłoczkę wraz z poszczególnymi etapami kształtowania

4.1. Spinning tests with one roll movement

Tests were started by spinning the conical drawpiece in one movement of the spinning roll, which moved parallel to the templet's generatrix. To more fully illustrate the spinning process and the possibilities of comparing it with the results of numerical simulations, the process was stopped in such a manner that the drawpiece's height difference changed every 4 mm.

The following parameters of the forming process were applied on the MWS-200 machine:

- number of roll movements: 1,
- gap: 1 mm,
- spinning rate (advance/revolution): 0.15; 0.2; 0.75 [mm/rev.].

The conical sample was spun at three different spinning rates. For rates 0.15 and 0.2 mm/rev, pieces characterized by significant waviness on the walls were obtained. In the case of spinning rate 0.75 mm/rev., a satisfactory result was obtained, and the drawpiece along with individual forming stages are shown in Fig. 4. The

pokazano na rys. 4. Wyniki pomiaru grubości ścianki wytłoczki stożkowej zamieszczono w tab. 1.

results of wall thickness measurement of the conical drawpiece are given in Tab. 1.



Rys. 4. Poszczególne etapy wyoblania wytłoczki w jednym ruchu rolki

Fig. 4. Individual drawpiece spinning stages in one roll movement

Tab. 1. Rozkład grubości ścianki na poboczniczy

Tab. 1. Wall thickness distribution on the side surface

Lp. Item	Wysokość od czoła próbki [mm] Height from face of sample [mm]	Grubość ścianki wytłoczki [mm] Drawpiece wall thickness [mm]	Średnia grubość ścianki [mm] Mean wall thickness [mm]
1	4	0,75–0,81	0,78
2	8	0,52–0,54	0,53
3	12	0,45–0,55	0,50
4	16	0,62–0,66	0,64
5	20	0,81–0,87	0,84
6	24	0,83–0,91	0,87
7	29	0,94–0,95	0,95

W trakcie procesu wyoblania zaobserwowano występowanie fałdowania, które przyczyniło się do otrzymania wyrobu z niewielkimi, ale widocznymi zawalcowaniami materiału na obwodzie. Uzyskano zmianę grubości materiału nawet do 50%. Następnie przystąpiono do symulacji wyoblania za pomocą programu Simufact Forming 14.0.

W badaniach symulacyjnych zastosowano stal oznaczoną w bazie materiałowej jako DC04_ck (tab. 2), o znormalizowanym numerze DIN 1.0338.

Waviness was observed during the spinning process, and it contributed to the creation of a product with small yet visible laps of material on the circumference. A change of material thickness up to 50% was obtained. Next, spinning simulations were carried out in Simufact Forming 14.0 software.

Steel designated DC04_ck (Tab. 2) in the materials database, standard number DIN 1.0338, was applied in simulations.

Tab. 2. Właściwości materiału zastosowanego do badań

Tab. 2. Properties of material applied in simulations

Gatunek stali / Steel grade	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
DC04	140–210	270–350	38

4.1.1. Warunki brzegowe zaaplikowane w modelu

Zdefiniowany model składa się z trzech narzędzi: wzornika, rolki wyoblającej i dociskacza. W wielu publikacjach naukowych na temat wyoblania przyjmowano wysokie współczynniki tarcia w parach wytłoczka – wzornik i wytłoczka – dociskacz. Bardzo niski współczynnik tarcia jest

4.1.1. Boundary conditions applied in the model

The defined model consists of three tools: templet, spinning roll and pressure pad. High friction coefficients in the pairs drawpiece – templet and drawpiece – pressure pad have been adopted in many scientific publications on the subject of spinning. A very low friction coefficient

przyjmowany między parą narzędzi wytłoczka – rolka wyoblająca. Przyczyną tak niskiego współczynnika tarcia jest obracanie się rolki w chwili kontaktu z wytłoczką.

Właściwy współczynnik tarcia występujący między parą narzędzi rolka wyoblająca – półfabrykat wynika z przyjęcia kompromisu. Z jednej strony tocząca się rolka wyoblająca po półfabrykacie nadaje charakter tarcia tocznego, co uzasadnia przyjmowanie bardzo niskich współczynników tarcia (w literaturze jest on przyjmowany na poziomie 0,02–0,08 [1, 5, 6]); z drugiej strony zastosowano uproszczenie polegające na pominięciu tarcia towarzyszącego rolce podczas posuwu w kierunku promieniowym.

Ponieważ nie jest możliwe przeprowadzenie własnych badań sił tarcia w trakcie wyoblania, a przeanalizowane artykuły na temat wyoblania nie zawierają metodologii dobierania współczynnika tarcia, zdecydowano się na określenie, czy przeprowadzane symulacje MES wyoblania są wrażliwe na zmiany współczynnika tarcia. Eksperyment polegał na przeprowadzeniu dwóch symulacji MES z takimi samymi warunkami brzegowymi z wyłączeniem współczynnika tarcia. Pierwszą symulację przeprowadzono z współczynnikiem tarcia $\mu=0,02$, a drugą z współczynnikiem $\mu=0,15$ i porównano uzyskane wyniki. Jest to praktyka często stosowana i zalecana przez producenta oprogramowania Simufact Forming [3]. Uzyskane dane (zgodność rzędu 99%) wskazują, że dobrany współczynnik tarcia nie ma zasadniczego wpływu na wyniki obliczeń.

W celach badawczych do symulacji użyto dwóch generatorów siatki Ringmesh i Sheetmesh. W pierwszej fazie wykorzystano generator siatki typu Ringmesh, ponieważ był w stanie nałożyć na symulowany kształt wytłoczki regularną siatkę złożoną z sześciątów o wysokim poziomie regularności. Na podstawie analizy literaturowej [2] można było poddać badaniu tezę zakładającą, że zastosowanie regularnej siatki złożonej z mniejszej liczby elementów pozwoli na przyspieszenie prowadzenia symulacji, nie pogarszając wyników badań MES. Ponieważ wytłoczka poddana badaniom MES ulegała zbyt dużym odkształceniom i program do badań MES nie był w stanie wykonać ponownego wygenerowania siatki, zdecydowano się na konty-

is adopted between the drawpiece – spinning roll pair. The reason for such a low friction coefficient is the roll's rotation at the time of contact with the drawpiece.

The appropriate friction coefficient occurring between the tool pair: spinning roll – semi-finished product is the result of a compromise. On one hand, the spinning roll rolling over the semi-finished product generates rolling friction, which justifies the adoption of very low friction coefficients (in the literature, it is accepted to be within the range 0.02–0.08 [1, 5, 6]), and on the other hand, a simplification was introduced, involving omission of the friction accompanying the roll during its advance in the radial direction.

Since it is not possible for the authors to conduct their own tests of friction forces during spinning, and the literature on the subject of spinning does not describe any methodology for selecting the friction coefficient, it was decided to determine whether conducted FEM simulations of spinning are sensitive to changes of friction coefficient. The experiment involved two FEM simulations with the same boundary conditions save for the friction coefficient. The first simulation was carried out with a friction coefficient of $\mu=0.02$ and the second with coefficient $\mu=0.15$, and the results of both were compared. This practice is frequently applied and is recommended by the software developer, Simufact Forming [3]. The data obtained (consistency on the order of 99%) indicate that the selected friction coefficient does not have a fundamental influence on simulation results.

For research purposes, two mesh generators, Ringmesh and Sheetmesh, were applied in simulations. The Ringmesh generator was used in the first phase, since it was able to apply onto the simulated shape of the drawpiece a regular mesh consisting of hexagons with a high level of regularity. Based on analysis of the literature [2], it was possible to test the hypothesis that applying a regular mesh consisting of a lower number of elements will make it possible to accelerate simulations without deteriorating FEM results. Since the drawpiece subjected to FEM simulations was under excessive strains and the FEM software was not able to once again generate the mesh, it was decided to continue simulations using Sheetmesh. An experimentally derived Hexa-

nuowanie obliczeń na siatce typu Sheetmesh. Na drodze doświadczalnej zastosowano siatkę typu Hexahedral, składającą się z około 2 tys. elementów.

4.1.2. Wyniki badań i ich porównanie

Początkowo prowadzono badania numeryczne dla tych samych parametrów, przy których prowadzono badania na maszynie MWS-200; zastosowano posuwy: 0,15; 0,2; 0,75 mm/obr. Mimo że w badaniach rzeczywistych udało się przeprowadzić proces do końca (w efekcie czego dla posuwów 0,15 i 0,2 mm/obr. powstała wytłoczka stożkowa z wadami w postaci pofałdowań oraz zawalcowań na ścianie), to w przypadku symulacji MES dla parametrów 0,15 i 0,2 mm/obr. nastąpiło zerwanie materiału odpowiednio na jednej trzeciej oraz dwóch trzecich całkowitej wysokości wytłoczki. Jedynie dla posuwu 0,75 mm/obr. otrzymano próbkę, którą poddano dalszej analizie. Na tej podstawie określono prędkość procesu wyoblania, przy której prowadzono dalsze badania, zarówno numeryczne, jak i w warunkach rzeczywistych.

Dla numerycznych badań kształtowania wytłoczki przyjęto następujące parametry technologiczne:

- szczelina 1 mm,
- prędkość wyoblania (posuw/obrót): 0,75 mm/obr.,
- rodzaj siatki: Sheetmesh,
- współczynnik tarcia:
 - rolka wyoblająca – materiał 0,02,
 - dociskacz – materiał 0,5.

Układ narzędzi w poszczególnych etapach kształtowania pokazano na rys. 5, wynik symulacji numerycznej pocienienia ścianki wytłoczki dla szczeliny 1 mm przedstawiono na rys. 6.

hedral mesh, consisting of approx. 2 thousand elements, was applied.

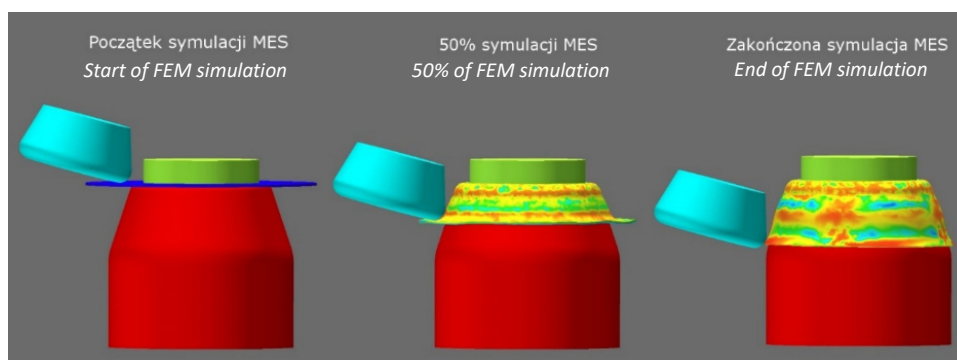
4.1.2. Test results and their comparison

Initially, numerical simulations were conducted with the same parameters with which tests were performed on the MWS-200 machine; the following feeds were applied: 0.15; 0.2; 0.75 mm/rev. Despite the fact that the process could be brought to its conclusion in real tests (as a result of which, for feeds 0.15 and 0.2 mm/rev., a conical drawpiece with defects in the form of waviness and laps on the wall was created), in the case of FEM simulations, for parameters 0.15 and 0.2 mm/rev., the material ruptured, accordingly, at one third and two thirds of the drawpiece's total height. Only the feed 0.75 mm/rev. yielded the sample that was subjected to further analysis. On this basis, the speed of the spinning process was determined for further tests, both simulated and in real-life conditions.

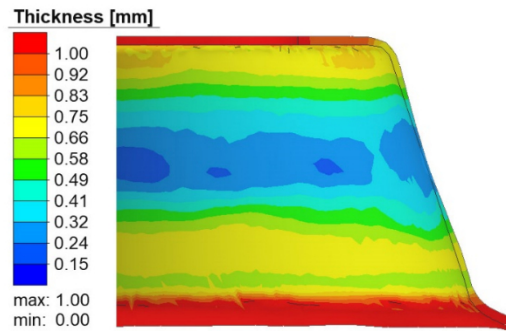
The following technological parameters were adopted for numerical simulations of drawpiece forming:

- gap 1 mm,
- spinning rate (advance/revolution): 0.75 mm/rev.,
- mesh type: Sheetmesh,
- friction coefficient:
 - spinning roll – material 0.02,
 - pressure pad – material 0.5.

The relative positions of tools in individual forming stages are shown in Fig. 5, and the result of numerical simulation of drawpiece wall thinning for a 1 mm gap is presented in Fig. 6.



Rys. 5. Etapy kształtowania detalu w procesie wyoblania
Fig. 5. Forming stages of the piece in the spinning process



Rys. 6. Widok pocienienia ścianki wytłoczki dla szczeliny 1 mm

Fig. 6. View of drawpiece wall thinning for 1 mm gap

Na skutek znacznego pocienienia materiału (poniżej 0,2 mm), uzyskane wyniki nie były zadowalające, zdecydowano więc się na stopniową zmianę szczeliny pomiędzy rolką a wzornikiem. Nieznacznie większą dokładność wyników uzyskano dla szczeliny 1,7 mm. Należy jednak zwrócić uwagę na mniejsze zróżnicowanie grubości ścianki wytłoczki (0,43 mm). W tab. 3 przedstawiono wyniki badań z pomiaru rozkładu grubości ścianki wytłoczki wyoblanej i zestawiono je z wynikami badań MES dla szczeliny 1 mm i 1,7 mm.

As a result of significant thinning of the material (to under 0.2 mm), obtained results were not satisfactory, so it was decided to gradually change the gap between the roll and templet. Slightly greater accuracy of results was obtained for a 1.7 mm gap. However, the lesser variation in drawpiece wall thickness (0.43 mm) should be noted. Table 3 presents results of wall thickness distribution measurement of the spun drawpiece, compared to FEM simulation results for gaps of 1 mm and 1.7 mm.

Tab. 3. Rozkład grubości ścianki wytłoczki

Tab. 3. Wall thickness distribution in drawpiece

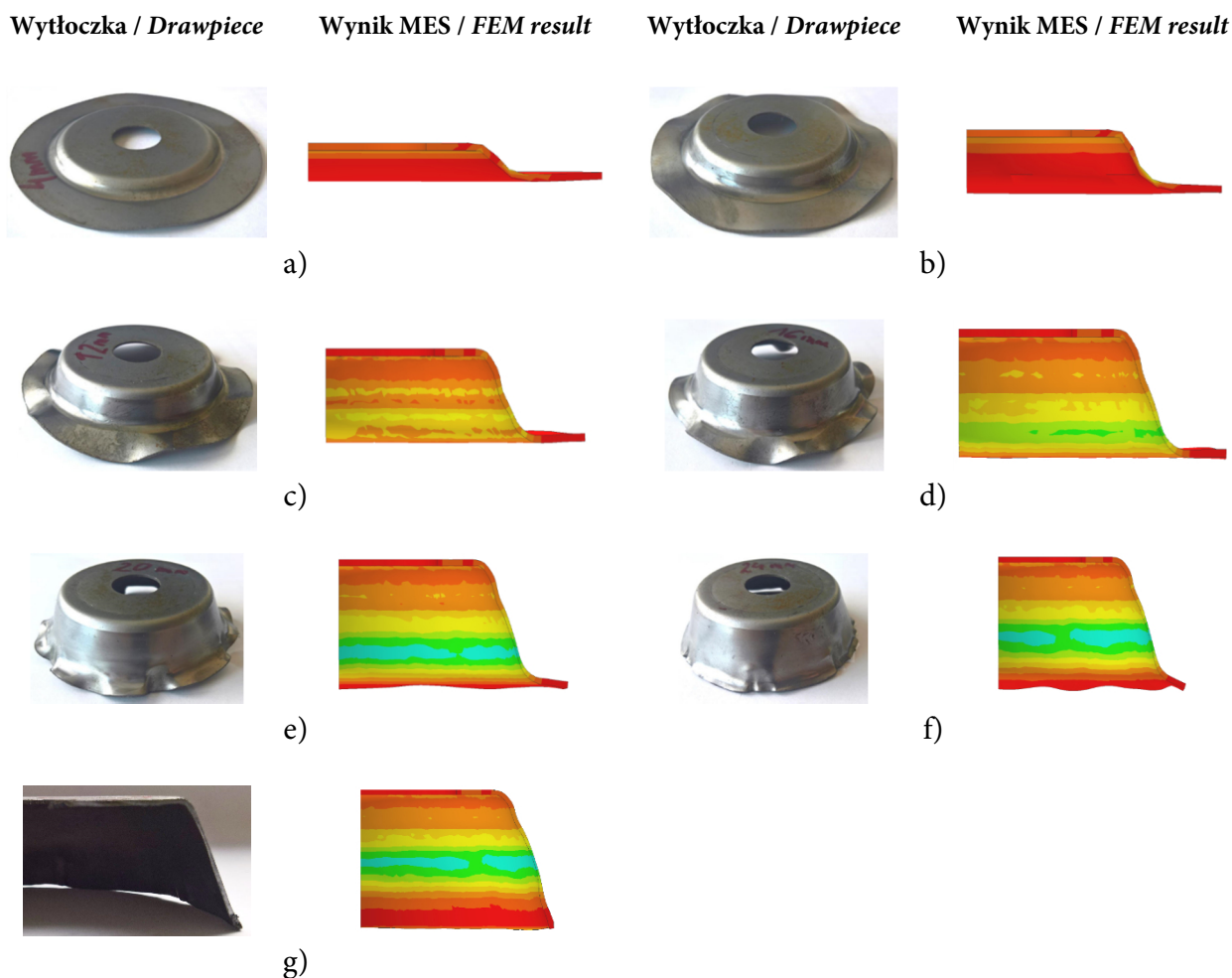
Grubość ścianki / Wall thickness					
Odległość od czoła Distance from face [mm]	Wynik rzeczywisty Real result	MES / FEM	Zgodność wyników Consistency of results [%]	MES / FEM	Zgodność wyników Consistency of results [%]
	Szczelina / Gap 1 mm	Szczelina / Gap 1 mm		Szczelina / Gap 1,7 mm	
4	0,78	0,79	99	0,86	90
8	0,53	0,69	77	0,76	57
12	0,50	0,50	92	0,63	74
16	0,64	0,16	25	0,52	81
20	0,84	0,52	62	0,43	51
24	0,87	0,78	89	0,80	92
28	0,95	0,82	86	0,97	98
Średnia: / Mean:			75,7		77,5

Na rys. 7a–7g pokazano kolejno rzeczywiste rezultaty próby wyoblania w zestawieniu z badaniami numerycznymi dla szczeliny 1,7 mm. Widoczna jest różnica w grubości ścianki detalu jaka wystąpiła dla szczeliny 1,7 mm ustawionej pomiędzy wzornikiem a rolką, co pokazano na rys. 7g. Zgodność wyników obliczano, bazując na

Fig. 7a–7g show, in sequence, real spinning test results in comparison to numerical simulations for the 1.7 mm gap. The difference in the piece's wall thickness for the 1.7 mm gap between the templet and roll is visible, as shown in Fig. 7g. Consistency of results was calculated based on the wall thickness obtained in real tests, which was

na wymiarze grubości ścianki uzyskany w badaniach rzeczywistych, a następnie porównano go z wynikami grubości ścianki uzyskanymi w badaniach numerycznych.

then compared to wall thickness results obtained in numerical simulations.



Rys. 7. Porównanie wyników badań numerycznych oraz rzeczywistych dla szczeliny 1,7 mm

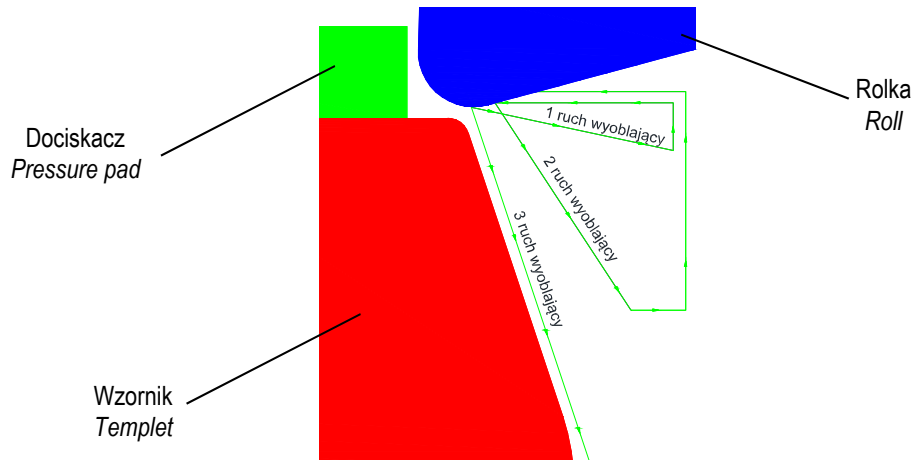
Fig. 7. Comparison of results of numerical simulations and real tests for the 1.7 mm gap

Porównanie wyników symulacji z próbami rzeczywistymi wskazuje, że przy przyjętych parametrach wyoblania materiał nie został odwzorowany na wzorniku. Dodatkowo można zaobserwować znacznie mniejsze powstawanie fałd w przypadku symulacji numerycznych. Stwierdzono znaczne różnice grubości ścianki, których zgodność w przypadku skrajnym sięgała jedynie 51%. Ze względu na niezadowalający wynik uzyskanego detalu kształtowanego w jednym przejściu (średnia zgodność na poziomie 77,5%), zdecydowano się na prowadzenie dalszych badań wyoblania w trzech ruchach wyoblających.

The comparison of results of simulations and real tests indicates that, for the adopted spinning parameters, the material was not represented on the templet. In addition, much lesser waviness can be observed in the case of numerical simulations. Significant differences in wall thickness were determined, the consistency of which reached only 51% in the extreme case. Due to the unsatisfactory result of the obtained piece formed in one pass (mean consistency at the level of 77.5%), it was decided to conduct further spinning tests with three spinning movements.

4.2. Badania wyoblania w 3 ruchach rolki

Opracowano trajektorię rolki wyoblającej, którą przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Graficzny obraz trajektorii procesu wyoblania w trzech ruchach wyoblających

Fig. 8. Graphical image of the trajectory of the spinning process with three spinning movements

Wynikiem procesu wyoblania za pomocą trzech ruchów wyoblających jest stożkowa wytłoczka przedstawiona na rys. 9. Próbkę ta charakteryzuje się najlepszą powierzchnią oraz najmniejszym pocienieniem ścianki, jaki uzyskano w badaniach. Otrzymaną próbkę ukształtowano na maszynie MWS-200, stosując następujące parametry:

- ilość ruchów rolki: 3,
- szczelina: 0,7 mm,
- prędkość wyoblania (posuw/obrót): 0,75 mm/obr.

Na rys. 10 pokazano kolejne etapy ruchów wyoblających zaplanowanych do wykonania próbki w postaci elementu stożkowego. Proces specjalnie przerywano na różnym poziomie wykonania, aby zaobserwować zjawiska, jakie występują w różnych fazach wyoblania i wykorzystać je do sprawdzenia przebiegu modelowania w programie Simufact Forming.



Rys. 9. Wytłoczka uzyskana w badaniach rzeczywistych procesu wyoblania w trzech ruchach

Fig. 9. Drawpiece obtained in real tests of the spinning process with three movements

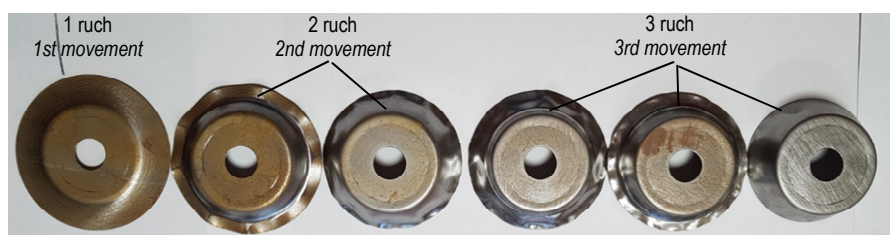
4.2. Spinning tests with three roll movements

The trajectory of the spinning roll was determined, as shown in Fig. 8.

The results of the spinning process with three spinning movements is the conical drawpiece shown in Fig. 9. This sample is characterized by the best surface and lowest wall thinning obtained in tests. The obtained specimen was formed on the MWS-200 machine using the following parameters:

- number of roll movements: 3,
- gap: 0.7 mm,
- spinning rate (advance/revolution): 0.75 mm/rev.

Fig. 10 shows successive stages of spinning movements planned for production of the sample in the form of a conical part. The process was purposely interrupted at different stages of execution in order to observe the phenomena occurring during different spinning phases and utilize them for verification of the course of modeling in Simufact Forming software.

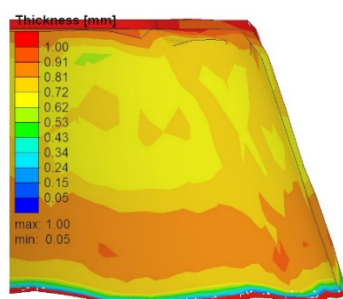


Rys. 10. Etapy wyoblania w trzech ruchach

Fig. 10. Spinning stages in three movements

W kolejnym etapie, dla tych samych parametrów wyoblania oraz tej samej trajektorii ruchów narzędzia, przeprowadzono badania symulacyjne. Wyniki grubości ścianki wytłoczki przedstawiono na rys. 11.

In the next stage, simulations were carried out for the same spinning parameters and the same tool motion trajectories. The results of drawpiece wall thickness measurements are presented in Fig. 11.



Rys. 11. Widok pocienienia ścianki wytłoczki dla szczeliny 0,7 mm

Fig. 11. View of drawpiece wall thinning for 0.7 mm gap

W tab. 4 przedstawione zostały wymiary grubości ścianki dla wybranych wytłoczek wykonywanych wyoblaniem w trzech ruchach wyoblających, natomiast wyniki w formie graficznej przedstawiono na rys. 12. Pomiarów rzeczywiste prowadzone były w dwóch miejscach na obwodzie detalu na ściance wytłoczki z zachowaniem stałego odstępów wzdłuż tworzącej. Następnie wyznaczona została średnia grubość ścianki. Wyniki porównano z wynikami otrzymanymi w programie Simufact Forming.

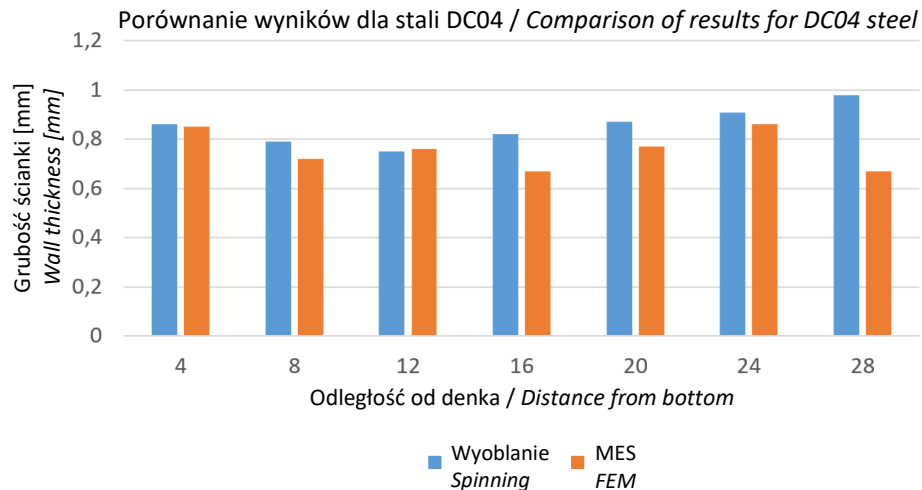
Tab. 4 presents wall thicknesses for selected drawpieces made by spinning with three spinning movements, and the results are shown in graphical form in Fig. 12. Real measurements were taken at two points on the circumference of the piece, on the wall of the drawpiece, with preservation of a constant interval along the generatrix. Next, mean wall thickness was determined. The results were compared with the results obtained in Simufact Forming software.

Tab. 4. Porównanie wybranej grubości ścianki wytłoczki rzeczywistej i wirtualnej

Tab. 4. Comparison of selected wall thickness of a real and simulated drawpiece

Odległość od dna wytłoczki Distance from bottom of drawpiece	Badanie fizyczne, szcz.0,7mm Physical test, 0.7 mm gap		Symulacja MES szcz.0,7 mm FEM simulation, 0.7 mm gap		Zgodność wyników Consistency of results [%]
	Grubość ścianki Wall thickness g [mm]	Średnia grubość Mean thickness [mm]	Grubość ścianki Wall thickness g [mm]	Średnia grubość Mean thickness [mm]	
4	0,86–0,86	0,86	0,80–0,91	0,85	98,7
8	0,79–0,79	0,79	0,62–0,81	0,72	90,3
12	0,76–0,74	0,75	0,72–0,81	0,76	98,7
16	0,79–0,85	0,82	0,62–0,72	0,67	77,6

Odległość od dna wylęczi <i>Distance from bottom of drawpiece</i>	Badanie fizyczne, szcz.0,7mm <i>Physical test, 0.7 mm gap</i>		Symulacja MES szcz.0,7 mm <i>FEM simulation, 0.7 mm gap</i>		Zgodność wyników <i>Consistency of results</i> [%]
	Grubość ścianki <i>Wall thickness</i> g [mm]	Średnia grubość <i>Mean thickness</i> [mm]	Grubość ścianki <i>Wall thickness</i> g [mm]	Średnia grubość <i>Mean thickness</i> [mm]	
20	0,93–0,81	0,87	0,72–0,81	0,77	88,0
24	0,95–0,87	0,91	0,81–0,91	0,86	94,2
30	1,01–0,95	0,98	0,53–0,81	0,67	53,7
Średnia:					85,9



Rys. 12. Rozkładu grubości ścianki wyznaczonej (MES) i w próbie rzeczywistej dla szczeliny 0,7 mm

Fig. 12. Wall thickness distribution in simulation (FEM) and real test for 0.7 mm gap

W kolejnym etapie badań prowadzono obliczenia numeryczne, w których dążono do uzyskania wyniku zbliżonego do wyników prób rzeczywistych. Skupiono się na odpowiednim doborze szczeliny pomiędzy narzędziami. Najdokładniejsze odwzorowanie wyników uzyskano dla szczeliny 1 mm. W tab. 5 przedstawiono rozkład grubości ścianki dla szczeliny wylęczi wyoblanej w badaniach numerycznych równej 1 mm, w której to porównano ją z wynikami prób rzeczywistych dla szczeliny 0,7 mm.

In the next stage of research, numerical simulations were conducted with the aim of obtaining a result similar to the results of real tests. Focus was placed on proper selection of the gap between tools. The most accurate representation of results was obtained for the 1 mm gap. Tab. 5 shows the wall distribution thickness of a simulated spun drawpiece for the 1 mm gap compared to the results of real tests for the 0.7 mm gap.

Tab. 5. Rozkład grubości ścianki dla wylęczi kształtowanej w 3 ruchach

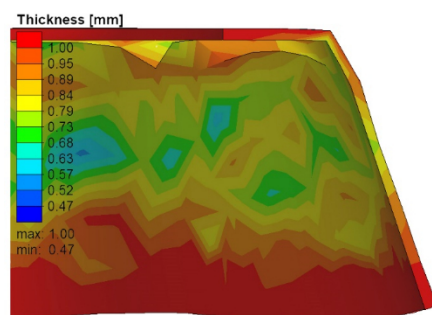
Tab. 5. Wall thickness distribution for drawpiece formed in 3 movements

Odległość od dna wylęczi <i>Distance from bottom of drawpiece</i>	Badanie fizyczne, szcz.0,7mm <i>Physical test, 0.7 mm gap</i>		Symulacja MES, szcz.1,0mm <i>FEM simulation, 1.0 mm gap</i>		Zgodność wyników <i>Consistency of results</i> [%]
	Grubość ścianki <i>Wall thickness</i> g [mm]	Średnia grubość <i>Mean thickness</i> g_{sr} [mm]	Grubość ścianki <i>Wall thickness</i> g [mm]	Średnia grubość <i>Mean thickness</i> g_{sr} [mm]	
4	0,90–0,92	0,91	0,89–0,98	0,94	99,2
8	0,84–0,82	0,83	0,84–0,89	0,86	97,4
12	0,81–0,78	0,79	0,68–0,79	0,73	92,0

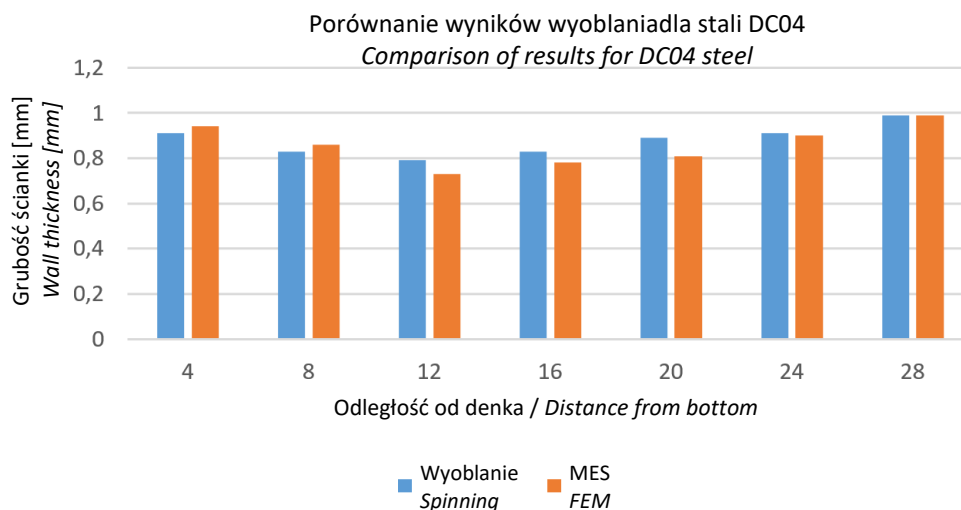
Odległość od dna wytłoczki <i>Distance from bottom of drawpiece</i>	Badanie fizyczne, szcz.0,7mm <i>Physical test, 0.7 mm gap</i>		Symulacja MES, szcz.1,0mm <i>FEM simulation, 1.0 mm gap</i>		Zgodność wyników <i>Consistency of results</i> [%]
	Grubość ścianki <i>Wall thickness</i> g [mm]	Średnia grubość <i>Mean thickness</i> g _{sr} [mm]	Grubość ścianki <i>Wall thickness</i> g [mm]	Średnia grubość <i>Mean thickness</i> g _{sr} [mm]	
16	0,86–0,81	0,83	0,73–0,84	0,78	89,0
20	0,86–0,91	0,89	0,79–0,84	0,81	89,7
24	0,94–0,88	0,91	0,84–0,95	0,90	97,3
28	1,00–0,99	0,99	0,95–1,00	0,99	99,5
Średnia:					94,8

Wyniki grubości ścianki wytłoczki przedstawiono na rys. 13 oraz w formie graficznej na rys. 14.

Drawpiece wall thickness results are presented in Fig. 13 and in graphical form in Fig. 14.



Rys. 13. Widok pocienienia ścianki wytłoczki dla szczeliny 1 mm, przy sposobie kształtowania 3 ruchami
Fig. 13. View of drawpiece wall thinning for 1 mm gap, for forming method with 3 movements



Rys. 14. Rozkład grubości ścianki dla szczeliny 1 mm (MES) i próby rzeczywistej 0,7 mm
Fig. 14. Wall thickness distribution for 1 mm gap in simulation (FEM) and for 0.7 mm gap in real test

Wyniki pokazane na wykresach wskazują na dużą, rzędu 94,8%, zgodność pomiędzy badaniami fizycznymi a symulacjami, a największa rozbieżność wyniosła 11%.

The results shown in charts indicate high consistency between physical tests and simulations, on the order of 94.8%, and the greatest divergence was 11%.

Następnie analizie poddano wyniki pomiaru wysokości oraz średnicy zewnętrznej finalnego detalu. Analogicznie jak w przypadku rozkładu grubości ścianki wyznaczono zgodność wymiarową w odniesieniu do wyników prób rzeczywistych. Wyniki przedstawiono w tab. 6.

Next, the results of height and exterior diameter measurements of the final piece were analyzed. Analogously as in the case of wall thickness distribution, dimensional consistency was determined in reference to the results of real tests. Results are given in Tab. 6.

Tab. 6. Porównanie wymiarów gabarytowych detalu gotowego
Tab. 6. Comparison of overall dimensions of ready piece

Opis Description	Średnica zew. Exterior diameter	Wysokość Height	Zgodność wymiarowa Dimensional consistency	
			Średnica zew. Exterior diameter	Wysokość Height
Próby rzeczywiste Real tests	79,74	27,94		
MES – szczelina 1 mm FEM – 1 mm gap	78,70	26,15	98,7	93,2
MES – szczelina 0,7 mm FEM – 0.7 mm gap	79,90	29,23	99,8	95,6

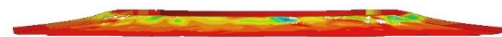
Na rys. 15 przedstawiono poszczególne etapy kształtowania wytłoczki i zestawiono je z wynikami badań numerycznych.

Fig. 15 presents individual forming stages of the drawpiece as well as a comparison with the results of numerical simulations.

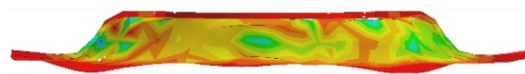
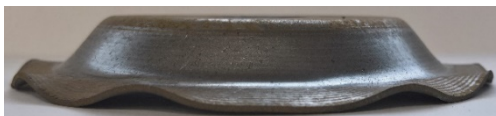
Poszczególne etapy procesu wyoblania
Individual spinning stages

Poszczególne etapy symulacji numerycznych
Individual numerical simulations stages

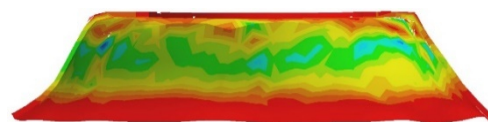
100% pierwszy ruch / 100% first movement



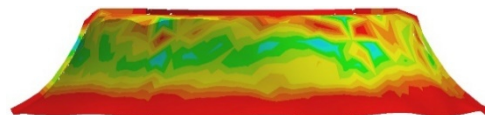
50% drugi ruch / 50% second movement

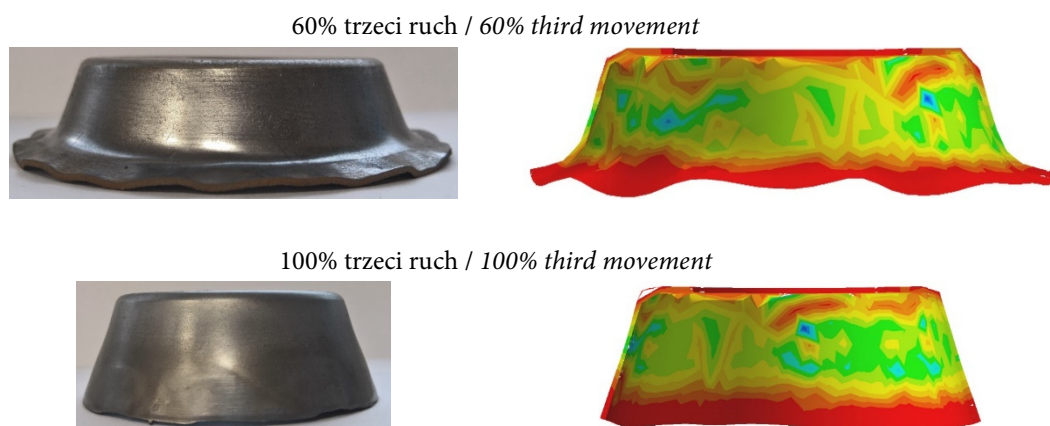


100% drugi ruch / 100% second movement



30% trzeci ruch / 30% third movement





Rys. 15. Zestawienie wyników badań rzeczywistych etapów wyoblania z wynikami badań numerycznych

Fig. 15. Comparison of results for spinning stages in real tests and simulations

Analizując kształty wyoblanego krążka w poszczególnych etapach kształtowania i porównując je z wynikami badań numerycznych, można zauważyć dobre odwzorowanie kształtu. Badania pozwoliły wyznaczyć różnicę w wielkości szczeliny pomiędzy badaniami rzeczywistymi a symulacyjnymi. Dla materiału DC0,4 o grubości 1 mm szczelina w badaniach numerycznych jest większa w porównaniu do badań laboratoryjnych o 0,3 mm.

W dalszych badaniach w oparciu o uzyskane wyniki planuje się wykonanie badań numerycznych na detalu o kącie rozwarcia 163° , a następnie na podstawie otrzymanych parametrów procesu przeprowadzenie badań laboratoryjnych oraz weryfikację otrzymanych wyników.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania umożliwiły otrzymanie pozytywnego wyniku analizy odwrotnej. Zaobserwowano znaczną rozbieżność wyników w przypadku kształtowania wyrobu w jednym ruchu wyoblającym, dlatego zdecydowano się na kontynuację badań ze zmianą trajektorii ruchu narzędzia kształtującego. Zarówno w przypadku badań laboratoryjnych, jak i numerycznych, zmiana trajektorii pozytywnie wpłynęła na jakość uzyskanego wyrobu, a niewielka korekta badań numerycznych umożliwiła uzyskanie dokładności wymiarowej na poziomie ok. 95%.

W dalszej części badań planuje się opracowanie parametrów za pomocą badań numerycznych procesu wyoblania na nowym narzędziu

Analyzing the shapes of the spun disk in individual forming stages and comparing them to the results of numerical simulations, good shape representation can be observed. Tests made it possible to determine the difference in gap size between real tests and simulations. For DC04 material with a thickness of 1 mm, the gap is 0.3 mm larger in numerical simulations compared to laboratory tests.

In further research based on the results obtained, it is planned to conduct numerical simulations on a piece with a taper angle of 163° , and then, based on obtained process parameters, to conduct laboratory tests and verify obtained results.

5. CONCLUSIONS

The research that was carried out made it possible to obtain a positive result of reverse engineering analysis. Significant divergence of results was observed in the case of forming of the product in one spinning movement, which is why it was decided to continue tests with a change in the motion trajectory of the forming tool. Both in the case of laboratory tests and numerical simulations, the change of trajectory had a positive influence on the quality of the obtained product, and a slight correction of numerical simulations made it possible to reach dimensional accuracy at a level of approx. 95%.

In further research, it is planned to determine parameters by means of numerical simula-

o kącie rozwarcia 163° i średnicy $\varnothing 200$ i zaaplikowanie otrzymanych parametrów do badań laboratoryjnych.

PODZIĘKOWANIA

Badania finansowane z pracy statutowej BT.901.0080.01.02 pt.: „Badania innowacyjnych technologii obróbki plastycznej blach za pomocą analizy odwrotnej, mające na celu określenie dokładności odwzorowania wyników symulacji procesu do warunków rzeczywistych”.

LITERATURA

- [1] Sebastiani G., A. Brosius, R. Ewers, M. Kleiner, C. Klimmek. 2006. “Numerical investigation on dynamic effects during sheet metal spinning by explicit finite-element-analysis”. *Journal of Materials Processing Technology* 177: 401–403.
- [2] Awiszus B., S. Härtel. 2011. “Numerical simulation of non-circular spinning: a rotationally non-symmetric spinning process”. *Production Engineering* 5: 605–612.
- [3] Instrukcja Simufact Forming, Fricton modeling in Simufact Forming.
- [4] Marghmaleki Iman Soleimani, Y. Tadi Beni, Amin Reza Noghrehabadi, Asieh Sadat Kazemi, Mohamadreza Abadyan. 2011. “Finite Element Simulation of Thermomechanical Spinning Process”. *Science Direct, Procedia Engineering* 10: 3769–3774.
- [5] Kleiner M., R. Gobel, H. Kantz, Ch. Klimmek, W. Homberg. 2002. “Combined Methods for the Prediction of Dynamic Instabilities in Sheet Metal Spinning”. *CIRP Annals* 51 (1): 209–214.
- [6] Rentsch Benedikt, Niko Manopulo, Pavel Hora. 2015. “Numerical modelling and validation of conventional sheet metal spinning processes in industrial application”. IDDRG 2015 Conference May 31st – June 3rd, 2015, Shanghai, China.
- [7] Hartel Sebastian, Robert Laue Technische. 2016. “An optimization approach in non-circular spinning”. *Journal of Materials Processing Technology* 229: 417–430.
- [8] Xia Qinxiang, Zhouyi Lai, Juxin Qu, Cheng Xiuquan. 2013. “Influence of processing parameters on forming quality of non-circular spinning”. W *Proceedings of the 11th International Conference on Manufacturing Research (ICMR2013), Cranfield University, UK, 19th – 20th September 2013*, 275–280.

tions of the spinning process on a new tool with a taper angle of 163° and diameter of $\varnothing 200$, and to apply the obtained parameters to laboratory tests.

ACKNOWLEDGEMENTS

Research financed under statutory work BT.901.0080.01.02 titled: “Research on innovative sheet forming technologies using reverse engineering analysis, with the aim of determining the accuracy of representation of real conditions in the results of process simulation”.

REFERENCES

- [1] Sebastiani G., A. Brosius, R. Ewers, M. Kleiner, C. Klimmek. 2006. “Numerical investigation on dynamic effects during sheet metal spinning by explicit finite-element-analysis”. *Journal of Materials Processing Technology* 177: 401–403.
- [2] Awiszus B., S. Härtel. 2011. “Numerical simulation of non-circular spinning: a rotationally non-symmetric spinning process”. *Production Engineering* 5: 605–612.
- [3] Instrukcja Simufact Forming, Fricton modeling in Simufact Forming.
- [4] Marghmaleki Iman Soleimani, Y. Tadi Beni, Amin Reza Noghrehabadi, Asieh Sadat Kazemi, Mohamadreza Abadyan. 2011. “Finite Element Simulation of Thermomechanical Spinning Process”. *Science Direct, Procedia Engineering* 10: 3769–3774.
- [5] Kleiner M., R. Gobel, H. Kantz, Ch. Klimmek, W. Homberg. 2002. “Combined Methods for the Prediction of Dynamic Instabilities in Sheet Metal Spinning”. *CIRP Annals* 51 (1): 209–214.
- [6] Rentsch Benedikt, Niko Manopulo, Pavel Hora. 2015. “Numerical modelling and validation of conventional sheet metal spinning processes in industrial application”. IDDRG 2015 Conference May 31st – June 3rd, 2015, Shanghai, China.
- [7] Hartel Sebastian, Robert Laue Technische. 2016. “An optimization approach in non-circular spinning”. *Journal of Materials Processing Technology* 229: 417–430.
- [8] Xia Qinxiang, Zhouyi Lai, Juxin Qu, Cheng Xiuquan. 2013. “Influence of processing parameters on forming quality of non-circular spinning”. In *Proceedings of the 11th International Conference on Manufacturing Research (ICMR2013), Cranfield University, UK, 19th – 20th September 2013*, 275–280.

