

**mgr inż. Andrzej Żmudzki¹⁾, mgr inż. Agnieszka Śledzińska¹⁾,
prof. dr hab. inż. Maciej Pietrzyk¹⁾, dr inż. Henryk Woźniak²⁾,
dr inż. Andrzej Plewiński³⁾, mgr inż. Tadeusz Drenger³⁾**

¹⁾ Akademia Górniczo Hutnicza, Zakład Komputerowego Modelowania Procesów Metalurgicznych, Kraków
²⁾ Politechnika Poznańska, Poznań ³⁾ Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań

KONTROLA JAKOŚCI PRODUKTÓW GŁĘBOKIEGO TŁOCZENIA BLACH ZA POMOCĄ SYMULACJI KOMPUTEROWYCH

Streszczenie

Już w fazie projektowania procesów głębokiego tłoczenia blach dąży się do eliminacji lub przynajmniej minimalizacji przewidywanych niedokładności kształtu i wymiarów produktu, spowodowanych wieloma różnymi warunkami samego procesu jak i własnościami odkształcanego materiału. Wyróżnić można wiele czynników opisujących końcową jakość produktu (zjawisko nawrotu sprężystego, utrata spójności materiału, czy fałdowanie powierzchni). W artykule przedstawiono szereg wad wytłoczek, które mogą być opisane poprzez odpowiednie wskaźniki ilościowe i jakościowe. W przeciwieństwie do tradycyjnych metod laboratoryjnych wykorzystywanych do poprawy jakości wytłoczek popularnym narzędziem i mniej kosztownym narzędziem stają się symulacje numeryczne połączone z automatycznymi metodami optymalizacji. W pracy przedstawiono dwa pakiety oparte o Metodę Elementów Skończonych (MES): ABAQUS/Explicit i Eta/Dynaform 5.2, oraz dokonano porównania wyników symulacji przykładowego procesu tłoczenia prostokątnej puszki stalowej, uzyskanych z tych programów. Przedstawiono również analizę wyników symulacji numerycznych pod kątem oceny jakości wytłoczki poprzez zdefiniowanie odpowiednich wskaźników oraz możliwości zastosowania procedur automatycznej optymalizacji w celu jej poprawy. Dokonano oceny dokładności obliczeń w porównaniu z wynikami eksperymentalnymi. Ponadto przedstawiono wrażliwość zjawiska odsprężynowania powrotnego na zastosowanie dodatkowych sił oporowych działających na kołnierz wytłoczki podczas procesu, oraz zastosowanie metody odwrotnej do wyznaczenia wartości tych sił w celu zminimalizowania wielkości nawrotu sprężystego.

Słowa kluczowe: głębokie tłoczenie, wady wytłoczek, MES, optymalizacja

1. Wstęp

Wymogi jakościowe odnośnie produktów procesów głębokiego tłoczenia cienkich blach są bardzo wysokie. Wynika to głównie z technologii automatycznego montażu tłoczonych komponentów głównie w przemyśle samochodowym. Wymogi te dotyczą zarówno odpowiednich własności materiałowych jak i kształtu gotowych produktów. Powstawanie fałd, nadmierne pocienienie oraz efekt odsprężynowania są podstawowymi czynnikami decydującymi o jakości. Pełne wyeliminowanie tych niepożądanych zjawisk jest zadaniem trudnym, rozwiązywanym przy użyciu różnych metod zarówno we wczesnej fazie projektowania procesu jak i podczas produkcji przemysłowej. W tym celu, konieczne jest odpowiednie zaprojektowanie lub modyfi-

kacja kształtu narzędzi i warunków procesu, aby otrzymać wymagany kształt i własności gotowego produktu. Zadanie to w efektywny sposób można rozwiązać z użyciem metod komputerowych (symulacji MES oraz procedur optymalizacji). Jednakże, do poprawnego modelowania procesu konieczne jest odpowiednie zdefiniowanie parametrów takich jak warunki tarcia, stan naprężenia i odkształcenia w materiale, umocnienie i anizotropia. Opracowanie odpowiednich modeli numerycznych jest oparte na interpretacji testów plastometrycznych i analizy odwrotnej [1].

Symulacje komputerowe są szeroko stosowane we wszystkich badaniach dotyczących jakości tłoczonych produktów [2]. Pozwalają one na zastosowanie w analizie automatycznych algorytmów optymalizacji. Do symulacji komputerowych wykorzystuje

się dedykowane oprogramowanie MES, wyposażone w narzędzia ilościowo i jakościowo opisujące odpowiednio zdefiniowane kryteria jakościowe gotowego produktu.

1.1. Defekty w wytłoczkach

Głównymi wadami które mogą pojawić się w produktach głębokiego tłoczenia są: nadmierne pocienienie prowadzące do utraty spójności materiału, utrata stateczności kołnierza owocująca pojawieniem się pofałdowań i ich propagacji na ścianki wytłoczek, niedokładności kształtu spowodowane własnościami anizotropowymi blachy i efektem powrotnych odkształceń sprężystych. Typowe, wymienione wady przedstawiono na rysunku 1. Głównym zadaniem optymalizacji procesu jest eliminacja, bądź

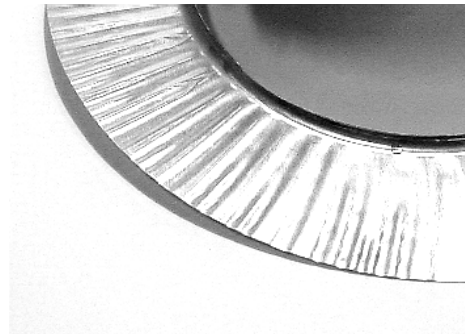
redukcja tych defektów poprzez odpowiednie dobranie narzędzi oraz warunków tłoczenia. Dodatkowym aspektem jest również redukcja kosztów wytwarzania.

Aby osiągnąć tak zdefiniowane cele możliwa jest optymalizacja całego szeregu parametrów wliczając w to: początkowy kształt wsadu [3] (odpowiednia parametryzacja początkowego kształtu), własności mechaniczne materiału blachy [4] (dobranie odpowiedniego wykładnika umocnienia lub współczynników określających anizotropię materiału), dodatkowe siły oporowe działające na kołnierz wytłoczki podczas procesu [5] (realizowane poprzez zastosowanie progów ciągowych odpowiednio usytuowanych i o odpowiednich wymiarach, lub przez odpowiednie zróżnicowanie sił dociskacza, oraz warunków tarcia), geometria narzędzi [6] (np. promienie przejścia w matrycy oraz w stemplu).

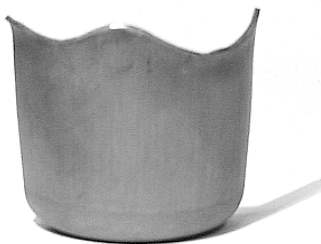
a)



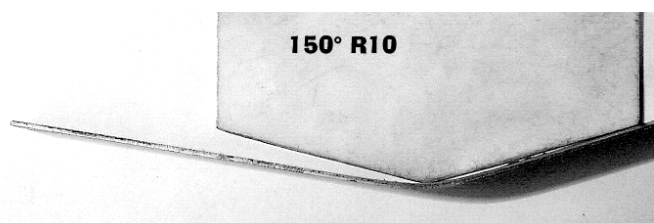
b)



c)



d)



Rys. 1. Fotografie typowych wad wytłoczek: a) zerwanie dna wytłoczki, b) fałdowanie kołnierza, c) uszy, d) odsprężynowanie

Zastosowanie MES służące do symulacji procesów głębokiego tłoczenia w celu poprawnego przewidzenia wad wyłoczek zostało szeroko opisane w literaturze [2-8]. Analiza jakości produktu odbywa się głównie poprzez interpretację stanu naprężenia w materiale, który ma istotny wpływ na umocnienie metalu i zjawisko odsprężynowania, a co za tym idzie na końcowy kształt wyłoczki, oraz interpretację stanu odkształcenia za pomocą granicznych krzywych tłoczenia FLD (Forming Limit Diagram), za pomocą których identyfikować można strefy pofałdowania czy nadmiernego pocienienia materiału

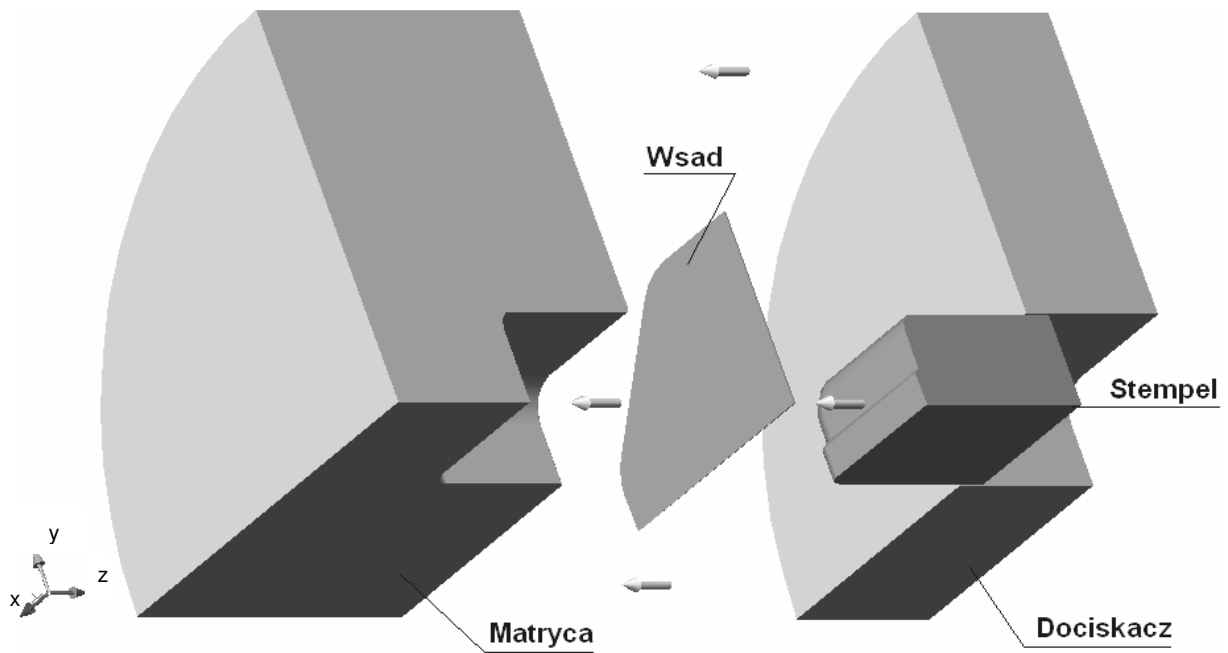
Dzięki odpowiedniemu sparametryzowaniu własności materiału, kształtu narzędzi czy warunków procesu, możliwe staje się zastosowanie numerycznych algorytmów optymalizacji wielowymiarowej. Zwykle do tego celu używa się standardowych algorytmów sekwencyjnego poszukiwania minimum, ale możliwe też jest użycie algorytmów genetycznych czy metod opartych o sztuczną inteligencję [9]. Ponadto, jednym z najlepszych narzędzi do dokładnego wyznaczenia parametrów reologicznych materiału jak i warunków procesów obróbki plastycznej za pomocą metod numerycznych jest metoda analizy odwrotnej (inverse) [1,9-11]. Może ona być zastosowana do rozwiązywania problemów termicznych, mechanicznych oraz związanych z warunkami brzegowymi w obróbce plastycznej metali. Do rozwiązania problemu bezpośredniego w analizie odwrotnej procesów głębokiego tłoczenia, posłużyć można się symulacjami MES przy użyciu dedykowanych komercyjnych pakietów obliczeniowych. W niniejszej pracy zastosowano podejście odwrotne do optymalizacji parametrów procesu głębokiego tłoczenia z wykorzystaniem programów ABAQUS/Explicit [12] oraz Eta/Dynaform 5.2 [13] do obliczenia problemu bezpośredniego.

1.2. Proces głębokiego tłoczenia

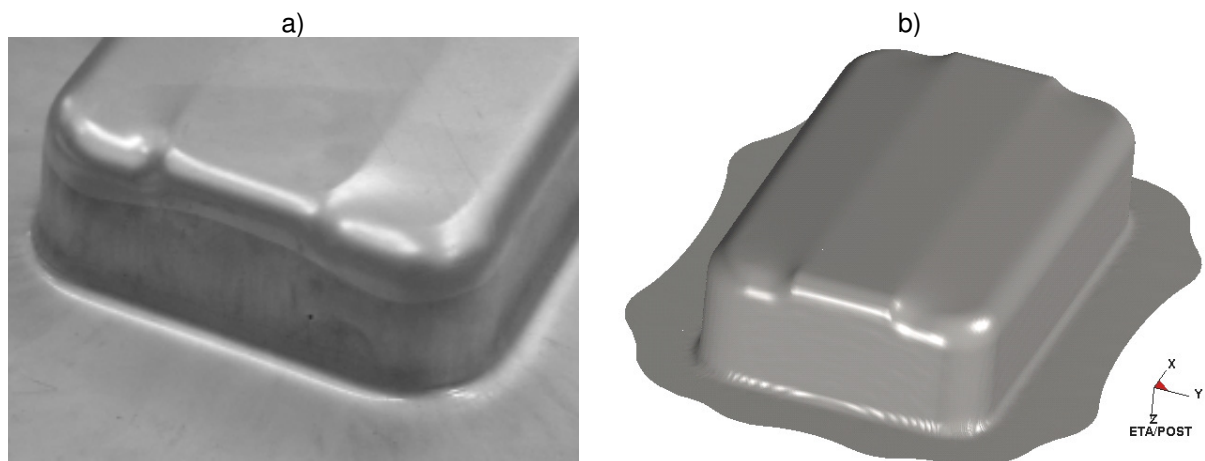
Odpowiednie zaprojektowanie procesu tłoczenia w celu minimalizacji defektów gotowego produktu jest szczególnie istotne i trudne dla wyłoczek o skomplikowanym

kształcie. W produkcji przemysłowej dominują wyłoczki, które charakteryzują się brakiem osiowej symetrii (przemysł samochodowy, lotniczy). Stan naprężenia i odkształcenia w materiale jest wówczas zróżnicowany w zależności od danej strefy elementu i konkretnych warunków. Parametry tłoczenia powinny być zatem niejednolite dla całego procesu i odpowiednio dobrane. W niniejszej pracy do analizy wybrano proces głębokiego tłoczenia prostokątnej puszki o skomplikowanym kształcie dna (rysunki 2 i 3) jako przykład procesu przemysłowego [3]. Charakterystyczny kształt wyłoczki przekłada się bezpośrednio na wysokie odkształcenia sprężysto-plastyczne co dodatkowo utrudnia spełnienie wszystkich wymogów dotyczących jakości produktu. Brak osiowej symetrii powoduje nierównomierne płynięcie metalu, szczególnie w narożach co prowadzi do lokalnego pogrubienia blachy i w jego wyniku, do pojawienia się fałd oraz do zwiększenia efektu odsprężynowania po zdjęciu obciążenia (również ze względu na niedostateczny naciąg materiału podczas tłoczenia). Charakterystyczne ukształtowanie dna wyłoczki (rysunek 3) zwiększa ryzyko pojawienia się nadmiernego pocienienia blachy i zerwania dna wyłoczki. Materiałem wyjściowym, użytym w próbach laboratoryjnych była blacha wykonana ze stali głębokotłocznej FEPO05MB. Parametry procesu tłoczenia były następujące: nacisk jednostkowy dociskacza 1.5 MPa, prędkość stempla 30 mm/s, posuw stempla 50 mm oraz współczynnik tarcia 0.15.

Takie same warunki procesu zostały zadane w programie ABAQUS/Explicit (ACK CYFRONET w Krakowie) i Eta/Dynaform 5.2 (Zakład KMPM, AGH, Kraków).



Rys. 2. Schemat analizowanego procesu tłoczenia



Rys. 3. Kształt dna wytłoczki: a) eksperymentalny, b) obliczony (Eta/Dynaform)

2. Modelowanie numeryczne

Własności analizowanego materiału zostały określone poprzez moduł Younga $E = 198 \text{ GPa}$ oraz współczynnik Poissona $\nu = 0.3$. Krzywe umocnienia użyte w obliczeniach numerycznych uzyskano poprzez aproksymację danych określających zależność naprężenia uplastyczniającego od odkształcenia wyznaczonych podczas prób rozciągania przeprowadzonych w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu. Szerzej aspekty modelowania numerycznego

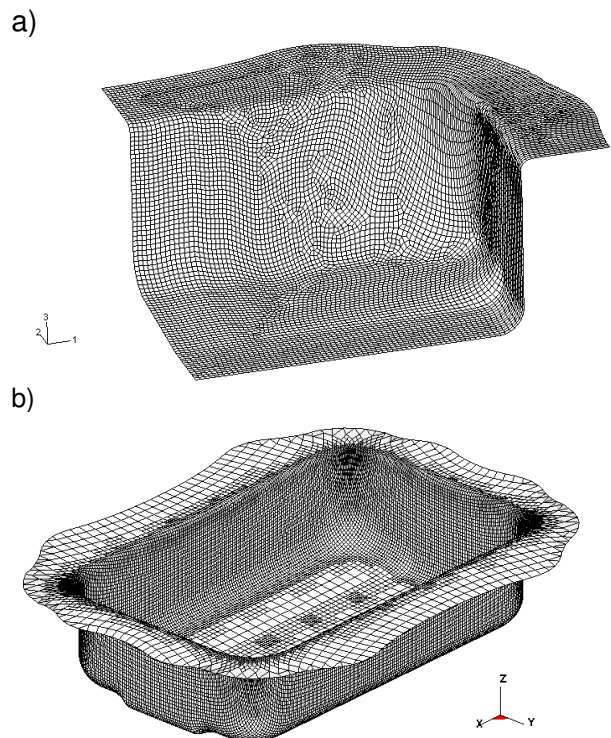
omawianego procesu za pomocą programów ABAQUS/Explicit i Eta/Dynaform zostały przedstawione we wcześniejszych pracach autorów [5,14]. Na uwagę zasługuje jednak sposób opisu materiału za pomocą siatek elementów skończonych. Symulacja komputerowa formowania elementów z blach cienkich wymaga odpowiedniej dyskretyzacji materiału, co związane jest z jego dużą powierzchnią i niską grubością. Do symulacji użyte zostały powłokowe elementy skończone posiadające kilka punktów całkowania na grubości materiału.

Zastosowanie tego typu siatek elementów skończonych powoduje utrzymanie poprawnej dokładności obliczeń przy jednoczesnej oszczędności w postaci skrócenia czasów obliczeń. Na rysunku 3b widać, że kształt produktu uzyskany z symulacji komputerowej z zastosowaniem opisywanego modelu jest zgodny z wynikiem eksperymentalnym. W obydwu analizowanych programach wykorzystano powłokowe elementy skończone z pięcioma punktami całkowania na grubości powłoki. Pomimo tego iż program ABAQUS/Explicit stosowany jest zwykle do symulacji procesów obróbki objętościowej, wyposażono go w generator siatek powłokowych z dodatkowymi punktami całkowania wzdłuż grubości modelowego materiału. Natomiast jego wadą jest brak procedury odbudowy znacznie zdeformowanej siatki elementów skończonych (remeshing). Może to powodować dodatkowe błędy numeryczne oraz niestabilność rozwiązania. Aby poprawnie zaprojektować początkową siatkę należy zatem wstępnie przewidzieć miejsca znacznych deformacji materiału i wprowadzić lokalne zagęszczenia bądź rozrzedzenia siatki. Siatka elementów skończonych wygenerowana za pomocą programów ABAQUS i Eta/Dynaform przedstawiono odpowiednio na rysunkach 4a i 4b. Program Eta/Dynaform wyposażony jest w mechanizm adaptacji siatki.

Na rysunku 4b widać, że początkowa siatka pozostała niezmieniona na powierzchni kołnierza wytłoczki, natomiast została lokalnie zagęszczona podczas rozwiązania na ściankach i dnie wytłoczki. Takie podejście powoduje, że rozwiązanie jest bardziej elastyczne i mniej wrażliwe na lokalne warunki. Program ABAQUS również posiada mechanizm adaptacji siatki, niemniej jednak polega on jedynie na lokalnym przemieszczeniu niektórych węzłów, zmianie wielkości i kształtu poszczególnych elementów, a nie na wprowadzeniu dodatkowych elementów skończonych.

2.1. Wyniki modelowania

Porównanie kształtów wytłoczki otrzymanych z obliczeń i z eksperymentu stanowiło pierwszy z możliwych do określenia

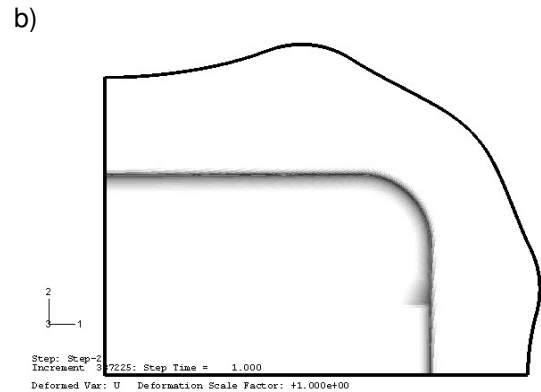


Rys. 4. Siatka elementów skończonych:
a) ABAQUS, b) Eta/Dynaform

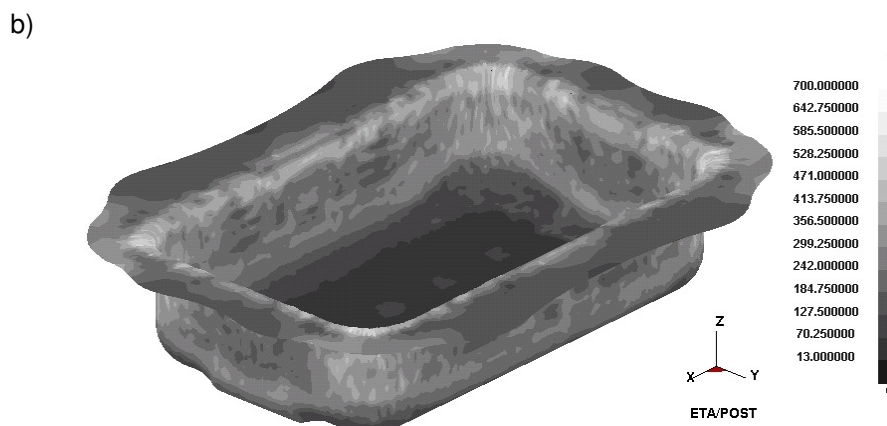
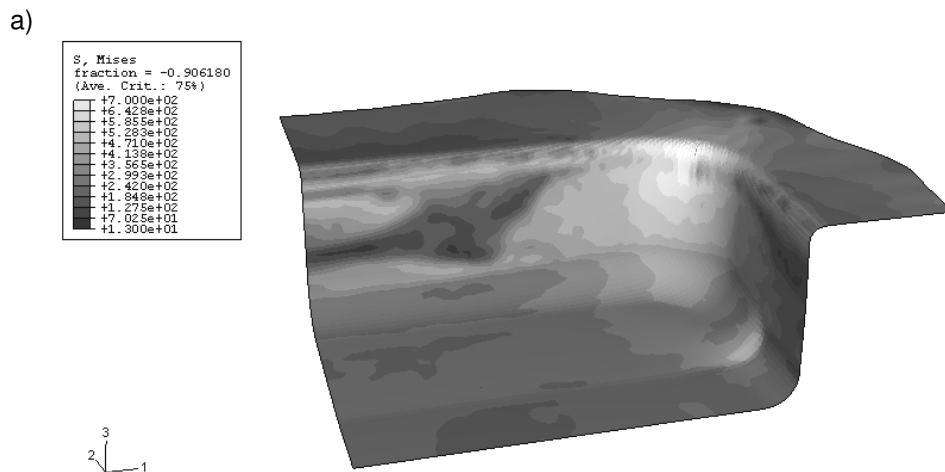
czynników determinujących możliwości kontroli jakości produktów głębokiego tłoczenia z wykorzystaniem symulacji numerycznych. Rysunek 5 pokazuje, że kształt kołnierza wytłoczki obliczony w programie ABAQUS/Explicit i Eta/Dynaform nieznacznie różni się od rzeczywistego. Największe różnice są widoczne w narożnej części kołnierza gdzie stan naprężenia materiału charakteryzuje się wysokimi naprężeniami ściskającymi w kierunku obwodowym i osiowym (co powoduje pogrubienie materiału) oraz naprężeniami rozciągającymi w kierunku promieniowym. Prowadzi to do to znacznego odkształcenia elementów w siatce, a co za tym idzie, generowany jest wysoki opór płynięcia materiału spowodowany dużym umocnieniem oraz wyższymi naciskami jednostkowymi na powierzchni kontaktu metalu z narzędziem. Wniosek ten został potwierdzony przez analizę stanu naprężenia. Rysunek 6 ukazuje rozkłady naprężenia zastępczego uzyskane w programie ABAQUS/Explicit (a) oraz Eta/Dynaform 5.2 (b). Wyniki pod względem jakościowym jak i ilościowym są bardzo zbliżone: zaobserwowano bardzo wysokie naprężenia w narożach wytłoczki,

a niższe na jej ściankach. Na rysunku 7 pokazano rozkłady odkształcenia plastycznego w wytłoczce, otrzymane z symulacji

numerycznej. Wyniki te charakteryzują się one również bardzo dobrą zgodnością.

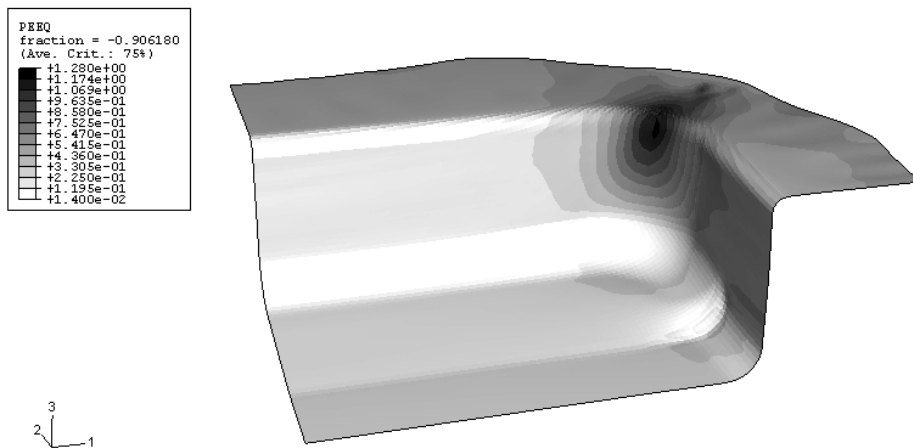


Rys. 5. Kształt kołnierza wytłoczki:
a) eksperymentalny,
b) obliczony (ABAQUS),
c) obliczony (Eta/Dynaform)

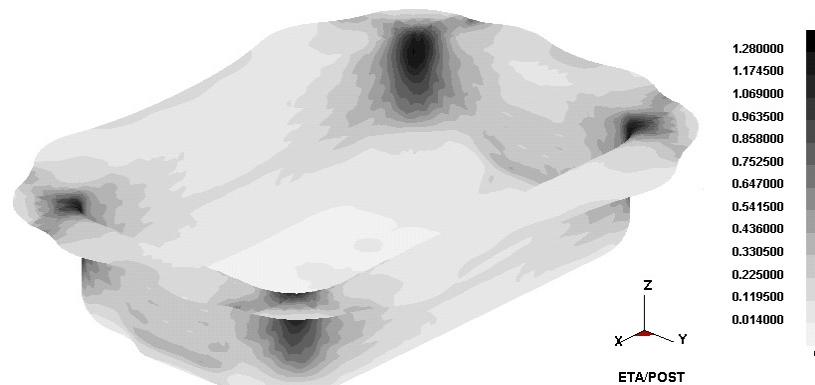


Rys. 6. Rozkłady naprężenia zastępczego obliczone w: a) ABAQUS, b) Eta/Dynaform

a)



b)



Rys. 7. Rozkłady odkształcenia plastycznego obliczone w: a) ABAQUS, b) Eta/Dynaform

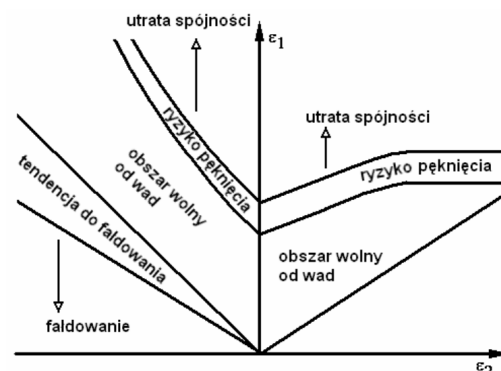
3. Kontrola jakości wytłoczek

Analiza pól naprężenia i odkształcenia w wytłoczce pozwala na określenie wskaźników jakościowych produktu. Możliwe jest wyznaczenie wielu wskaźników lecz wśród najważniejszych wymienić można fałdowanie, pocienienie i utratę spójności, oraz efekt odsprężynowania. Aby przewidzieć obszar występowania defektu, powszechnie stosuje się graniczne krzywe tłoczenia FLD (Forming Limit Diagram). Schemat konstrukcji tych krzywych oraz sposób identyfikacji za ich pomocą defektów w wytłoczce, przedstawiono na rysunku 8. Dzięki analizie granicznych krzywych tłoczenia wykonać można optymalizację procesu poprzez minimalizację następującej funkcji celu:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n P_i^{def}(\mathbf{x}) \quad (1)$$

gdzie:

- P_i^{def} – punkt materiału zawierający defekt zdefiniowany położeniem w odpowiednim obszarze wykresu FLD,
- \mathbf{x} – wektor zmiennych optymalizacji (parametrów procesu, własności materiału, parametrów kształtu narzędzi).

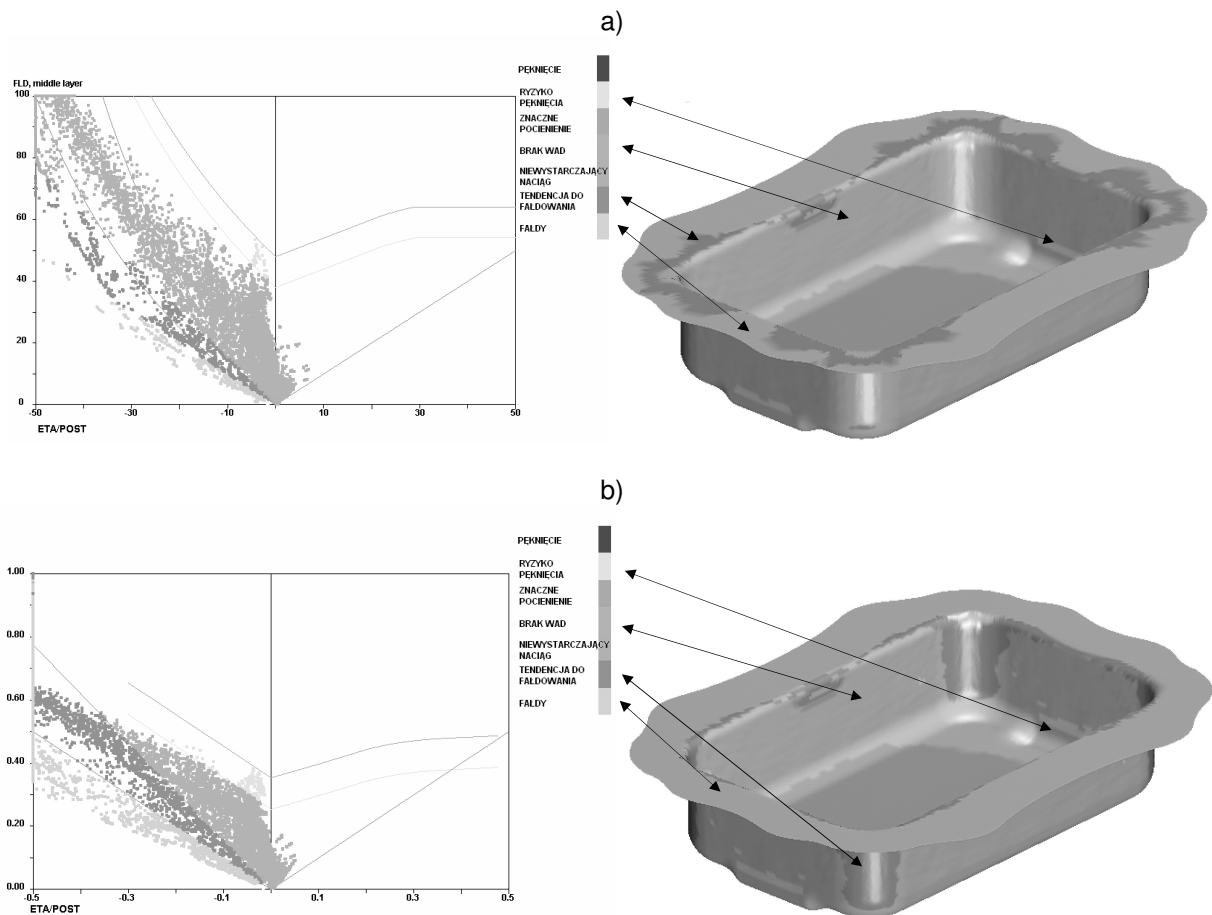


Rys. 8. Schemat konstrukcji granicznych krzywych tłoczenia (FLD)

Funkcja ta określa ilość punktów materiału (która powinna być jak najmniejsza), znajdujących się w obszarze wyznaczonym przez graniczne krzywe tłoczenia, charakteryzującym się występowaniem danego defektu.

Postprocesor, zastosowany w programie Eta/Dynaform zezwala na automatyczne konstruowanie wykresów FLD. Możliwa jest też wizualizacja rozkładu poszczególnych kryteriów określających jakość produkty na jego powierzchni. Na rysunku 9 przedstawiono graniczne krzywe tłoczenia uzyskane dla analizowanego procesu oraz identyfikację obszarów ich występowania na powierzchni wytłoczki. Wykres FLD uzyskany za pomocą metody opartej o odkształcenia inżynierskie przedstawiono na rysunku 9a. Podobny wykres

bazujący na odkształceniach rzeczywistych przedstawiony został na rysunku 9b. Na rysunkach tych widoczne jest, że prawie cały kołnierz wytłoczki pokryty jest fałdami lub obszarami o silnej tendencji do tworzenia pofałdowań (rysunek 7a), co jest zjawiskiem bardzo niepożądanym. Pomimo tego, niemal cała powierzchnia boczna i dno wytłoczki jest wolna od defektów, z małym jednak wyjątkiem. Ze względu na nadmierne pocienienie na mniejszej ze ścianek, spowodowane charakterystycznym kształtem wytłoczki, możliwe jest zerwanie jej dna w późniejszym stadium procesu. Zjawisko to związane jest z występowaniem w tym miejscu dużych naprężeń rozciągających prowadzących do przewężenia (tzw. szyjki).



Rys. 9. Wykres FLD (Eta/Dynaform): a) na podstawie odkształceń inżynierskich, b) na podstawie odkształceń rzeczywistych

3.1. Fałdowanie

Podczas analizy wyników eksperymentu zaobserwowano fałdowanie kołnierza wytłoczki na całej jego powierzchni. Obserwacja ta znalazła potwierdzenie w analizie FLD jak również w ocenie jakościowej wyników symulacji (rysunek 10). Zjawisko powstawania fałd może być zatem minimalizowane z wykorzystaniem funkcji celu (1), gdzie optymalizowanymi składnikami wektora \mathbf{x} , czyli parametrami decydującymi o końcowym efekcie są odpowiednio dobrane siły docisku kołnierza. Jeśli chodzi o ocenę jakościową można zastosować inną funkcję celu określającą średnie odchylenie współrzędnych kołnierza od współrzędnych kołnierza idealnie płaskiego:

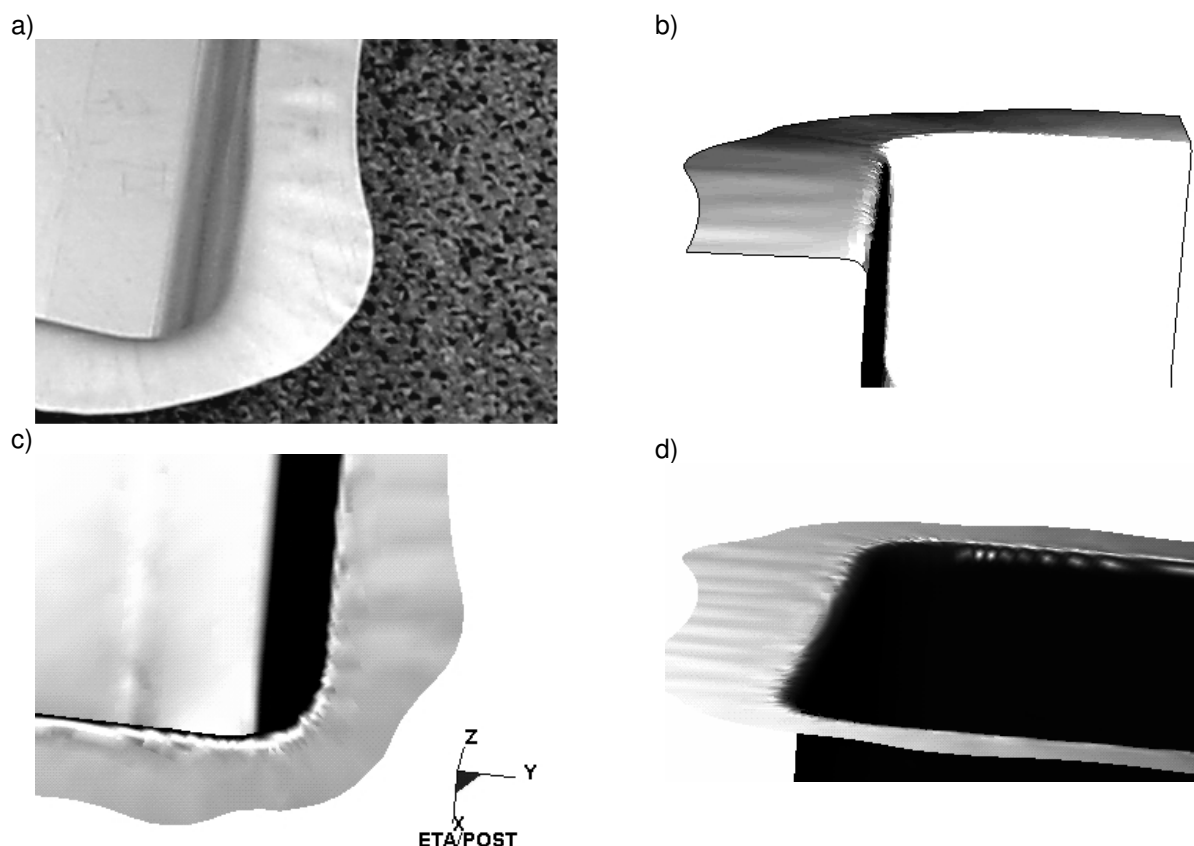
$$\Phi = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Z_i^r(\mathbf{x}) - Z_i^0)^2} \quad (2)$$

gdzie:

Z_i^r – rzeczywiste współrzędne i -tego punktu na pofałdowanej części kołnierza wytłoczki w kierunku osi z,

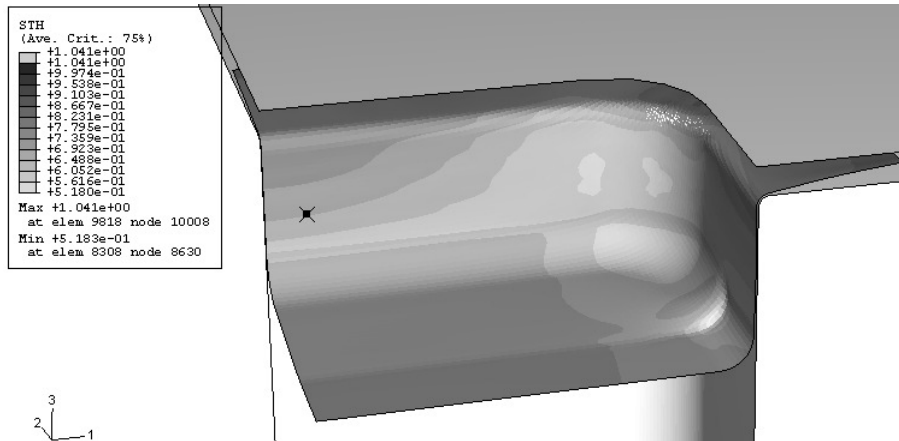
Z_i^0 – współrzędne węzłów kołnierza nie-pofałdowanego.

Porównanie wyników eksperymentalnych z wynikami uzyskanymi z obliczeń przedstawiono na rysunku 10. Zarówno program ABAQUS/Explicit jak i Eta/Dynaform przewidziały pojawienie się defektu z wystarczająco dobrą dokładnością (rysunek 10b-d). Pomimo sytuacji niewielkiej utraty stateczności kołnierza, ścianki wytłoczki wolne są od fałd (co pokazane jest również na rysunku 9). Jednakże ciśnienie na dociskaczu powinno być zwiększone aby uniknąć propagacji defektu dla większych głębokości tłoczenia, co w przypadku małych ciśnień jest powszechnie spotykanym problemem.

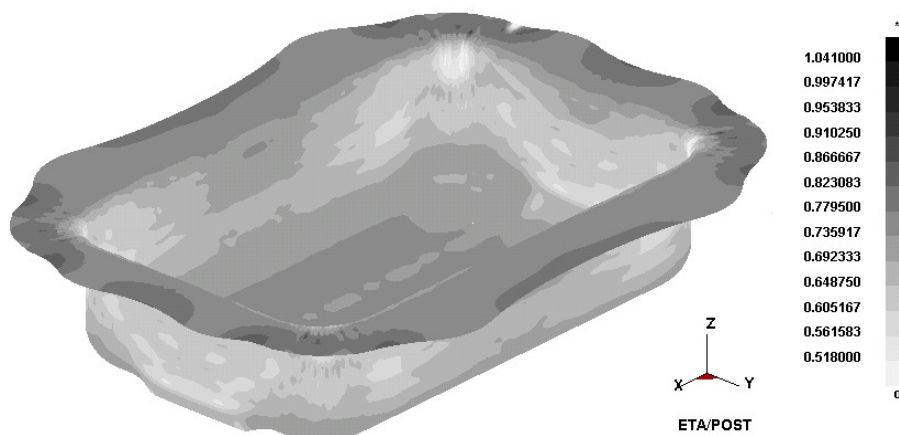


Rys. 10. Fałdowanie kołnierza: a) eksperyment, b) obliczenia (ABAQUS) c i d) obliczenia (Eta/Dynaform)

a)



b)



Rys. 11. Obliczone rozkłady grubości: a) ABAQUS, b) Eta/Dynaform

3.2. Pocienie, zerwanie dna

Obszary nadmiernego pocienia materiału, które może doprowadzić do utraty jego stabilności w konsekwencji do zerwania dna wylęczi, możliwe są również do zidentyfikowania za pomocą analizy FLD. Podczas eksperymentu nie zaobserwowano pęknięć na ściankach wylęczi, jednakże analiza numeryczna wskazała obszary narażone na pojawienie się defektu (rysunek 9). Wyniki symulacji w postaci rozkładów grubości w wylęczi potwierdziły pojawienie się pocienia w miejscu przejścia charakterystycznego kształtu dna w ściankę boczną. Rysunek 11 przedstawia porównanie rozkładów grubości otrzymanych w programie ABAQUS (a) i Eta/Dynaform (b). W obu przypadkach obserwowana jest znaczna redukcja grubości (do 0.5mm) w narożu i na mniejszej ściance elementu. W produkcji przemysłowej

specyficzne wymagania jakościowe określają wartość maksymalnej akceptowalnej redukcji grubości. W analizowanym przypadku redukcja rzędu 30% może być uznana za możliwą do przyjęcia.

Optymalizację procesu tłoczenia, biorąc pod uwagę opisywane kryterium można przeprowadzić przy użyciu analizy FLD. Jednakże równie skuteczna może być ocena jakościowa z wykorzystaniem funkcji celu określającej średnie odchylenie grubości ścianek wylęczi od grubości początkowej wsadu:

$$\Phi = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i^r(\mathbf{x}) - T^0)^2} \quad (3)$$

gdzie:

T_i^r – rzeczywista grubość w i -tym punkcie wylęczi,

T^0 – początkowa grubość wsadu.

Wektor optymalizowanych parametrów \mathbf{x} może zawierać w tym przypadku cały szereg czynników począwszy od parametrów kształtu narzędzi i wsadu, przez parametry technologiczne procesu, aż po własności odkształcanego materiału.

3.3. Odsprężynowanie

Powrotne odkształcenia sprężyste są jednym z najważniejszych czynników określających jakość kształtu produktów głębokiego tłoczenia. W analizowanym przypadku największy efekt odsprężynowania obserwowany jest na kołnierzu, co jest charakterystyczne dla wytłoczek prostokątnych. Na rysunku 12 widoczne jest, że odsprężynowanie kołnierza może osiągnąć wartość nawet 1 mm, co wiąże się z dyskwalifikowaniem produktu do późniejszego wykorzystania.

Do minimalizacji błędów kształtu i wymiarów wytłoczki, które są wynikiem zjawiska nawrotu sprężystego, można wykorzystać funkcję celu określoną równaniem (1). Parametrami optymalizowanymi, oprócz kształtu narzędzi, mogą być warunki siłowe procesu. Wpływ dodatkowych sił oporowych działających na krawędź kołnierza wytłoczki został szeroko przeanalizowany we wcześniejszych pracach autorów [3,5,14] i zostanie omówiony jedynie pokrótce. Do rozwiązania problemu optymalizacji (minimalizacji błędów kształtu wytłoczki po odsprężynowaniu w stosunku do wartości zadanych dodatkowych sił oporowych) wykorzystano analizę odwrotną.

4. Optymalizacja

Optymalizacja parametrów procesu tłoczenia polegająca na redukcji liczby punktów wytłoczki zawierających defekty określonych w analizie FLD, jest zadaniem stosunkowo łatwym. Minimalizację funkcji celu (1) można przeprowadzić z użyciem standardowych algorytmów sekwencyjnego poszukiwania minimum (np. metody Simplex). Biorąc pod uwagę funkcje celu (2) i (3), bazujące na określeniu średniego odchylenia mierzonych parametrów uzyskanych z obliczeń od parametrów oczekiwanych, doskonale zastosowanie znajduje metoda odwrotna.

4.1. Metoda odwrotna

Metoda odwrotna [1,5,9-11] polega na zastosowaniu algorytmów optymalizacji do minimalizacji funkcji celu określającej zwykle błąd średniokwadratowy pomiędzy mierzonymi i obliczonymi wyjściowymi parametrami procesu:

$$\Phi(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \beta_i [\mathbf{d}_i^c(\mathbf{x}, \mathbf{p}_i) - \mathbf{d}_i^m]^2 \quad (4)$$

gdzie:

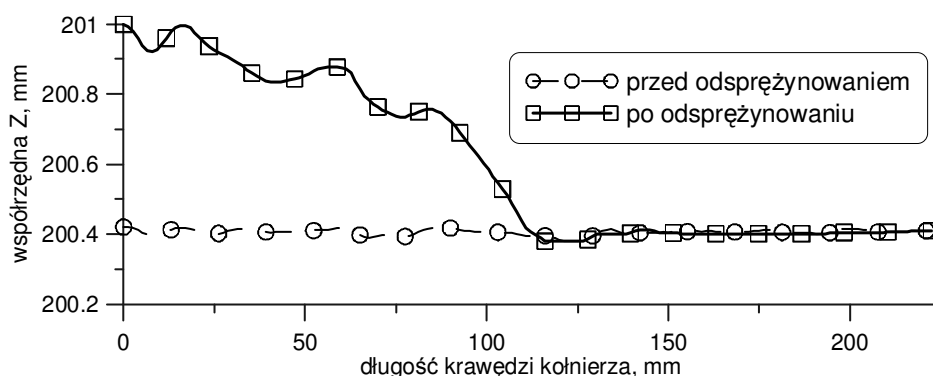
$\mathbf{d}^m = \{\mathbf{d}_1^m, \mathbf{d}_2^m, \dots, \mathbf{d}_n^m\}$ – wektor mierzonych parametrów wyjściowych (siły, kształt, etc.),

$\mathbf{d}^c = \{\mathbf{d}_1^c, \mathbf{d}_2^c, \dots, \mathbf{d}_n^c\}$ – wektor danych obliczonych,

\mathbf{x} – wektor parametrów modelu,

\mathbf{p} – wektor zmiennych procesu,

β_i – wagi ($i = 1 \dots n$).



Rys. 12. Porównanie kształtu kołnierza (współrzędne w kierunku osi Z) przed i po odsprężynowaniu

Zwykle metodę odwrotną stosuje się do identyfikacji parametrów modeli materiałowych i tarcia [1,9-11], jednakże może być z powodzeniem stosowana do identyfikacji optymalnych parametrów procesu technologicznego [5,14].

4.2. Zastosowanie i wyniki

Przykładowe zastosowanie metody odwrotnej, polegało na wyznaczeniu optymalnych sił oporowych działających na kołnierz wytłoczki podczas procesu w celu minimalizacji efektu powrotnych odkształceń sprężystych. Podejście to zostało szeroko opisane w [5].

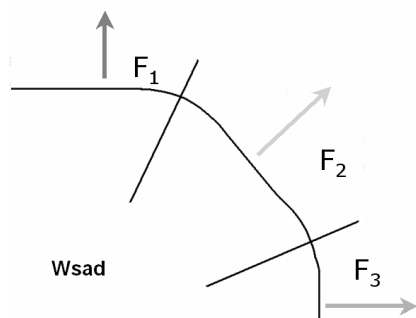
Funkcję celu dla analizowanego problemu zdefiniowano jako błąd średniokwadratowy pomiędzy wartościami współrzędnych krawędzi kołnierza wytłoczki w kierunku osi z obliczonymi przed i po zdjęciu obciążenia:

$$\Phi = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Z_i^c - Z_i^m}{Z_i^m - Z} \right)^2} \quad (5)$$

gdzie:

- Z_i^c i Z_i^m – wartość współrzędnych z punktów na krawędzi kołnierza odpowiednio przed i po odsprężynowaniu,
- Z – początkowa wartość współrzędnych z przed odkształceniem, wprowadzona w celu zwiększenia wrażliwości funkcji celu na zmianę optymalizowanych parametrów.

Ze względu na kształt wsadu (rysunek 2) kołnierz wytłoczki podzielono na trzy strefy oddziaływania dodatkowych sił, tak jak to zostało pokazane na rysunku 13.



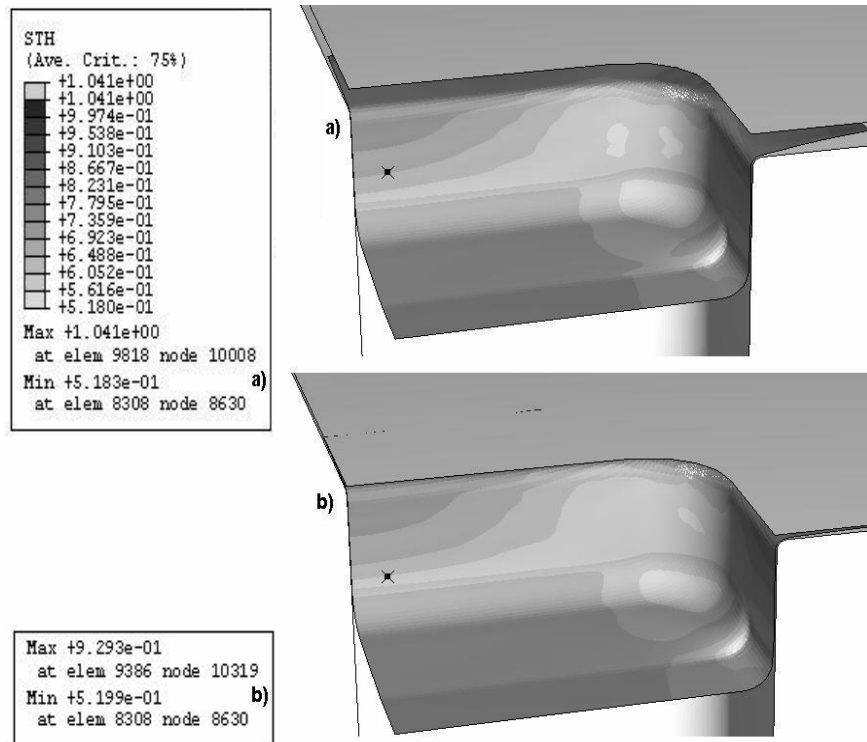
Rys. 13. Schemat podziału kołnierza wytłoczki na trzy strefy oddziaływania dodatkowych sił oporowych

W analizie odwrotnej optymalizowany wektor \mathbf{x} zawierał wartości dodatkowych sił w danej strefie, natomiast wektor zmiennych procesu \mathbf{p} zawierał prędkość stempla, ciśnienie dociskacza, własności reologiczne materiału i parametry określające warunki tarcia. Do minimalizacji funkcji celu (5) użyto metody Simplex. Dla optymalnych wartości dodatkowych sił oporowych uzyskano znaczną redukcję efektu odsprężynowania co widoczne jest na rysunku 14.

5. Wnioski

Komputerowe modelowanie przemysłowych procesów głębokiego tłoczenia jest powszechnie wykorzystywane na etapie projektowania i analizy procesów przemysłowych. Wśród celów użycia symulacji wyróżnić można uzyskanie wyrobu spełniającego wymagania odbiorcy w dziedzinie jakości. Stan jakościowy końcowego produktu określają czynniki takie jak: fałdowanie, pocienienie materiału i odsprężynowanie. W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki symulacji przeprowadzonych w celu określenia tych czynników i możliwości ich minimalizacji z wykorzystaniem komercyjnych pakietów ABAQUS i Eta/Dynaform. Uzyskane wyniki pozostają w zgodności z wynikami przeprowadzonych doświadczeń. W oparciu o nie, przeprowadzono dyskusję dotyczącą pojawienia się defektów w produkcie końcowym. Duży nacisk został położony na analizę z wykorzystaniem metody odwrotnej efektu odsprężynowania i możliwości jego zmniejszenia w trakcie rzeczywistego procesu tłoczenia.

Uwaga Końcowa: Praca wykonana w ramach projektu UE: INETFORSMEP.



Rys. 14. Porównanie efektu odsprężynowania: a) bez zastosowania dodatkowych sił oporowych, b) z zastosowaniem optymalnych sił

Literatura

1. Szeliga D., Pietrzyk M., Identification of Rheological and Tribological Parameters, Metal Forming Science and Practice, A State-of-the-art Volume in Honour of Professor J.A. Schey's 80th Birthday, ed., Lenard J.G., Elsevier, Amsterdam, 2002, 227-258.
2. Knopf-Lenoir C., Batoz J.L., Delamézière A., Naceur H., Ben Ayed L., Ben Elechi S., Optimization of process parameters in sheet metal forming, Proc. I-st. Invited COST526 Conf. APOMAT, Morschach, 2005, 110-119.
3. Woźniak H., Tłoczenie głębokiej stalowej puszkii prostokątnej z kołnierzem, Obróbka Plastyczna Metali, nr 5, 1999, 21-26.
4. Delamézière A., Naceur H., Batoz J.L., Guo Y.Q., Knopf-Lenoir C., On the optimum material properties of thin sheets obtained by deep drawing, Proc 4th ESAFORM Conf. on Material Forming, Liège, 2001, 317-320
5. Żmudzki A., Pidvysotskyy V., Pietrzyk M., Woźniak H., Plewiński A., Zastosowanie analizy odwrotnej do wyznaczenia parametrów procesu tłoczenia dających najmniejsze sprężynowanie powrotne, Rudy i Metale Nieżelazne, 49, 2004, 2-6.
6. Zimniak Z., Minimalizacja błędów sprężynowania powrotnego w procesach tłoczenia blach, Proc. 10th Conf. Kom-PlasTech 2003, Wisła-Jawornik, 2003, 147-153.
7. Schmitt W., Krasowsky A., Riedel H., Benevolensky O., Spring-back Simulation Based on Characterization of Sheet Metals under Reverse Plastic Strains, XXII Verformungskundliches Kolloquium – Tagungsband, Leoben, 2003, 200-205.
8. Lenoir H., Boudeau N., An optimization procedure for springback compensation, Proc 6th ESAFORM Conf. on Material Forming, ed., Brucato V., Salerno, 2003, 143-146
9. Żmudzki A., Kusiak J., Neural Networks based optimization in Inverse analysis, Proc. I-st. Invited COST526 Conf. APOMAT, Morschach, 2005, 236-241.

10. Szyndler D., Pietrzyk M., Hodgson P.D., Identification of Parameters in the Internal Variable Constitutive Model and Friction Model for Hot Forming of Steels, Proc. NUMIFORM 2001, ed., Mori, K., Publ. A. Balkema, Toyohashi, 2001, 297-302.
11. Szyndler D., Pietrzyk M., Kuziak R., Estimation of Rheological and Friction Parameters in Hot Forming Processes as an Inverse Problem, in Proc. 4th ESAFORM Conf. on Materials Forming, ed. Habraken A.M. Liege, 2001, 191-194.
12. ABAQUS/Explicit User's Manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., 1998.
13. LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1998.
14. Żmudzki A., Śledzińska A., Pietrzyk M., Woźniak H., Plewiński A., Drenger T., Numerical simulations of deep drawing for control of product quality, Conf. Net-Shape Sheet Metal Forming, Poznań-Wąsowo, 2005, 55-68.

NUMERICAL SIMULATIONS OF DEEP DRAWING FOR CONTROL OF PRODUCT QUALITY

Abstract

There are many important factors (springback, thinning/thickening, wrinkling) which determine the quality of deep drawing processes products. Inaccuracies of shape and dimensions of products, which are caused by various process conditions, should be minimized or even eliminated. However, it is a difficult task, which can be solved by different methods. The proper drawing dies design, which is the most important part of the process design, is preceded by series of physical or numerical tests. Thus, accurate numerical models for such parameters as friction, stress and strain state in the material, strain hardening, etc. are needed. Development of models is based on plastometric tests and the inverse analysis for their interpretation. Dedicated finite element software equipped with quality factors evaluation and control is used for simulations of drawing processes. In this work, two FEM based programs, ABAQUS/Explicit and the Eta/Dynaform 5.2, are presented and compared using deep drawing of the 3D part as an example. The analysis of results of numerical simulation is presented in the paper. The accuracy of calculations and specific quality factors are evaluated. Beyond this, the sensitivity of springback to changes of forces causing flow resistance of the sheet, as well as application of the inverse method to evaluate these forces for minimal values of springback deformation, is presented.

Key words: deep drawing, quality control, FEM modeling, optimization