

prof. dr hab. inż. Jerzy Gronostajski

Politechnika Wroclawska, Wroclaw

INTELIGENTNY SYSTEM DO DOKŁADNEGO KSZTAŁTOWANIA WYROBÓW Z BLACH

Streszczenie

W ostatnich latach procesy kształtowania plastycznego blach uległy znacznemu rozwojowi. Niemniej jednak kształtowanie blach jako proces przemysłowy jest mocno uzależnione od wielu wzajemnie zależnych parametrów takich jak: zachowanie materiału, smarowanie, urządzenia kształtujące, prędkość odkształcania itp. Prawidłowy wybór tych parametrów jest jednym z głównych celów nowoczesnego projektowania. W przypadku kształtowania blach typowe odchylenia od założonej geometrii wyrobów są także uzależnione od kształtu i rozmiarów wytłoczek.

Głównym celem artykułu jest przedstawienie ulepszonych i rozwiniętego systemu projektowania procesów kształtowania wyrobów z różnych blach. Rozwiązanie tego problemu bazuje na obliczeniach naprężeń własnych, wywołanych nimi odkształceń sprężystych i korekcy narzędzi przy użyciu MES. Nowy opracowany system projektowania eliminuje niedokładność procesów i wyrobów z dużą precyzją i jednocześnie pozwala zaoszczędzić pieniądze w wyniku wyeliminowania techniki prób i błędów.

Słowa kluczowe: blacha, formowanie, dokładność, inteligentny system

1. Wstęp

Tłoczność blach jest złożonym, inżynierskim problemem, którego nie można zdefiniować za pomocą pojedynczej zależności. Natomiast musi ona być opisana niezależnymi zmiennymi takimi jak: właściwości materiału, narzędzia, prasy, warunki procesu i zależnymi parametrami takimi jak: płynięcie metalu, odkształcenie, prędkość odkształcania, naprężenia wewnętrzne i odkształcenia powrotne. Jest bardzo trudno uwzględnić w procesach kształtowania takie czynniki jak: kształt końcowy, tolerancje, możliwe wady, utratę stateczności wywołaną siłami rozciągającymi, fałdowanie, właściwości mechaniczne, odporność na korozję i zużycie narzędzi.

Tłoczności blach jest zwykle określana w oparciu o koncepcję wykresów odkształceń granicznych (WOG). Koncepcja WOG została opracowana przez Keelera [1] i Goodwina [2]. Pozwala ona dla określonego materiału, sposobu i warunków odkształcania określić odkształcenia graniczne, szczególnie w operacjach głębokiego tłoczenia. Dokładna budowa WOG dla

określonych materiałów bazuje na eksperymencie. Metody analityczne opracowane przez Marciniaka i Kuczyńskiego [3] i Jalniera [4], Barata-da Rocha [5], Gronostajskiego [6] i innych są stosowane do wyznaczenia teoretycznych WOG, które są jednak nieco mniej dokładne aniżeli wyznaczone w doświadczeniu.

WOG trudno jest jednak zastosować do projektowania procesów tłoczenia blach, ponieważ zależą one istotnie od drogi odkształcania, tj. od historii odkształcania blachy, dlatego w przypadku wytwarzania przemysłowych wyrobów w kilku operacjach krzywe odkształceń granicznych, określone dla prostoliniowej drogi odkształcania nie mogą być użyte do zapewnienia sukcesu w takich operacjach. Rozważając ten fakt Arrieux i inni [7] zaproponowali inną metodę określania WOG poprzez użycie składowych naprężeń głównych występujących w płaszczyźnie blachy (WNG). Składowe te w momencie utraty stateczności są niezależne od drogi odkształcania. Metoda ta została rozwinięta przez Gronostajskiego [8] na blachy o właściwościach anizotropowych. Wykres naprężeń gra-

nicznych (WNG) może być przedstawiony jako pojedyncza linia dla różnych dróg odkształcenia w płaszczyźnie $\sigma_1 - \sigma_2$. WNG może być użyty do obliczenia WOG dla różnych dróg odkształcenia. W obliczeniach numerycznych procesów głębokiego tłoczenia za pomocą MES wykres naprężeń granicznych może być użyty jako końcowy wskaźnik procesu tłoczenia.

W ramach INCO-COPERNICUS pt „System do projektowania procesów tłoczenia blach”, koordynowanego przez Gronostajskiego [9] WNG został dalej udoskonalony i wprowadzony do profesjonalnego programu MES [10, 11]. Zastosowanie WNG w symulacji metodą elementów skończonych stwarza możliwość dokładnego określenia początku i propagacji lokalnej utraty stateczności i rozwoju pasm poślizgu. Prowadzi to do drastycznej redukcji czasu i kosztów początkowego zaadaptowania narzędzi i pozwala łatwiej określić parametry procesu.

Symulacja procesów tłoczenia blach jest także uzależniona od równań konstytutywnych (RK) opisujących płynięcie materiału blachy w różnych warunkach odkształcenia. Dopiero ostatnio zostało opracowanych kilka modeli [12, 13], które mogą być zastosowane do obliczania naprężenia uplastyczniającego nowych generacji blach.

W procesach tłoczenia typowe odchylenia od żądanej geometrii są uzależnione od kształtu, rozmiarów i rodzaju wytłoczek. Odchylenia jak również osiągane tolerancje są bardzo mocno zależne również od parametrów procesu i rodzaju blachy. Największy postęp może być osiągnięty przez ulepszenie i rozwój procesów projektowania kształtowania wyrobów z blach zarówno o stałej jak i zmiennej grubości np. tzw. tailored blanks (blach łączonych laserem). Inteligentny system dokładnego kształtowania wyrobów z blach, opracowany w ramach V programu ramowego, bazuje na wirtualnej symulacji i modelowaniu. System uwzględnia powrotne odkształcenia sprężyste spowodowane kształtowaniem i dodatkowymi operacjami, które mają decydujący wpływ na końcowy kształt i rozmiary wyrobów. Praktyczne zastosowanie metody kompensacji narzędzi pozwala uzyskiwać wyroby z małymi odchyleniami rozmiarów. Zapropozowana metoda obej-

muje kompensację narzędzi poprzez przestrzenną symulację MES procesów kształtowania. Na podstawie wyników symulacji MES kreowane są narzędzia wirtualne.

Większość prac przedstawionych w literaturze dotyczy odkształceń sprężystych dla przypadku prostego gięcia. Stąd poważnym problemem jest określenie naprężeń własnych i odkształceń sprężystych kształtowanych wyrobów o złożonej geometrii. Problemy te są bardzo ważne dla producentów z punktu widzenia wyeliminowania trudności w procesie montażu wyrobów np. karoserii samochodu.

Porównanie wyników uzyskanych za pomocą profesjonalnych programów opartych o MES zarówno uwzględniających jawne jak i ukryte schematy całkowania po czasie, wykazują że trudno jest obliczyć dokładnie odkształcenia wywołane sprężystymi odkształceniami powrotnymi. Przyczyna może być związana z niedokładnymi obliczeniami geometrii, użyciem niewłaściwych praw tarcia, złym modelem materiału i niewłaściwym modelem MES.

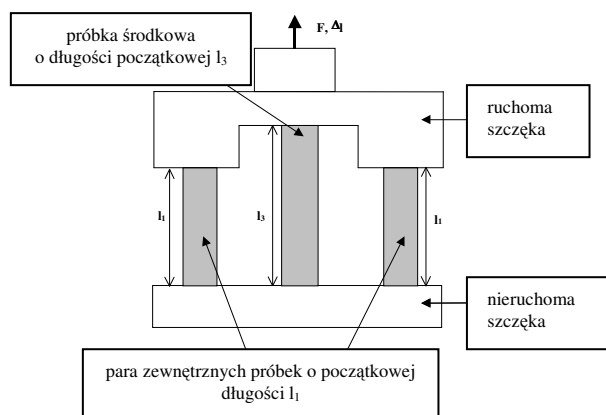
Weryfikacja opracowanej metody kompensacji narzędzi została przeprowadzona w skali laboratoryjnej dla typowych wytłoczek takich jak: osiowo-symetryczne, prostokątne, o złożonym kształcie, jak również w skali przemysłowej dla aktualnie produkowanych wyrobów. Badania dotyczyły takich materiałów jak: blachy głębokotłocze, blachy ze stopów aluminium i blachy spawane laserem. Podsumowując przedstawione rozważania można stwierdzić, że modelowanie matematyczne procesów tłoczenia blach nie jest już ograniczane pojemnością pamięci komputerów oraz możliwością przetwarzania danych i może być śmiało udoskonalone w wyniku wzięcia pod uwagę ww. czynników.

Głównym celem artykułu jest pokazanie udoskonalonych i rozwiniętych metod projektowania procesów kształtowania wyrobów z różnych blach. Rozwiązanie problemu bazuje na bieżących obliczeniach naprężeń własnych i wywołanego nimi sprężystego odkształcenia powrotnego oraz korekcji narzędzi za pomocą metody MES. Nowy system projektowania eliminuje niedokładności procesu i wyrobów z bardzo dużą powtarzalnością, jak również pozwala zaoszczędzić czas i pieniądze związane z metodą prób i błędów.

Opracowany inteligentny system dokładnego kształtowania wyrobów z blach może być zastosowany do projektowania procesów tłoczenia, które są stosowane w zakładach przemysłowych uczestniczących w realizacji projektu oraz w innych zakładach na podstawie odpowiednich porozumień.

2. Metoda obliczania naprężeń własnych w złożonych wytłoczkach

Przedstawiona metoda obliczeń naprężeń własnych w czasie i po zakończonych operacjach głębokiego tłoczenia blach jest głównie oparta o procedury elementów skończonych [14, 15]. Naprężenia własne są generowane podczas próby rozciągania w urządzeniu przedstawionym na rys. 1. Urządzenie zawiera dwie szczęki, w których zamocowane są trzy próbki o różnej długości. Szczęki mocowane są w maszynie wytrzymałościowej do rozciągania. Ruchoma szczeka wywołuje przemieszczenia próbek.



Rys. 1. Urządzenie do jednoczesnego rozciągania próbek

W celu ograniczenia nierównomiernego obciążenia szczęk para zewnętrznych próbek ma jednakową początkową długość l_1 , podczas gdy początkowa długość próbki środkowej $l_3 > l_1$. Szczęki powinny być tak sztywne, jak to jest tylko możliwe dla zapewnienia jednakowych przemieszczeń wszystkich trzech próbek. Ponieważ długość próbek jest różna również różne są ich odkształcenia. Zakłada się, że naprężenia i odkształcenia w każdej próbce są jednorodne. Ponieważ materiał próbek jest taki sam zmiana lokalnych naprężeń

względem lokalnych odkształceń jest określona taką samą krzywą. Dla pewnego wybranego czasu punkty bieżące określające naprężenie i odkształcenie w każdej próbce są różne.

Mechaniczny system rozważany tutaj jest oparty o przemieszczenie jednej szczęki. Gdy następuje odciążenie szczęki siła przenoszona przez maszynę wytrzymałościową spada do zera. W próbkach pozostają siły wzajemnego ich oddziaływania, przy czym ich suma $\Sigma F = 0$. Ponieważ odkształcenia sprężyste mają różne wartości stan równowagi jest osiągnięty wtedy, gdy siły wewnętrzne i przemieszczenia w próbkach nie znikają.

Naprężenia wewnętrzne σ'_1 i σ'_3 i w próbkach po odciążeniu szczęk spełniają poniższe równanie

$$2\sigma'_1 S'_1 + \sigma'_3 S'_3 = 0 \quad (1)$$

gdzie:

σ'_j jest naprężeniem wewnętrznym w próbkach zewnętrznych po obciążeniu szczęk, S'_1 jest przekrojem zewnętrznych próbek po odciążeniu szczęk, σ'_3 jest naprężeniem wewnętrznym próbki środkowej po odciążeniu szczęk, S'_3 jest przekrojem próbki środkowej po odciążeniu szczęk.

Stan naprężeń stabilnych jest osiągnięty, gdy próbka środkowa jest ściskana, natomiast próbki zewnętrzne są rozciągane.

Wartości naprężeń własnych zależą od wielu czynników, lecz mogą być łatwo wyznaczone z danych doświadczalnych. Przedstawiony eksperyment prosto ilustruje w jaki sposób naprężenia własne są generowane wewnątrz materiału podczas operacji tłoczenia. Występuje to wtedy, gdy sąsiednie strefy odkształcane są wzdłuż różnych dróg odkształcenia. Dla przykładu ma to miejsce, gdy blacha jest przeciągana przez progi ciąagowe. Fałdowanie i prostowanie zachodzące w tym przypadku prowadzą do utworzenia przeciwnego stanu naprężeń rozciągających w górnej strefie blachy i przeciwnych w dolnej strefie. Ma to również miejsce, gdy odkształcane blachy są niejednorodne. Cząstki przemieszczające się wewnątrz materiału wzdłuż różnych dróg odkształcania generują naprężenia własne, także po zakończonej operacji

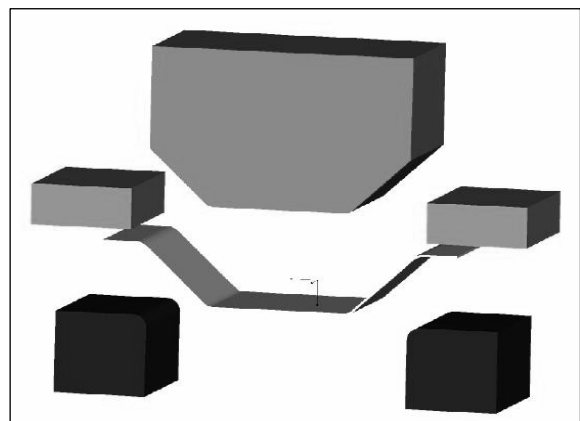
i usunięciu narzędzi kształtujących. Konkluzje dotyczące naprężeń własnych są następujące:

- naprężenia własne odpowiadają szczególnym warunkom brzegowym,
- gdy warunki brzegowe ulegają zmianie naprężenia zmieniają się zgodnie z podstawowym prawem równowagi, co wywołuje wystąpienie sprężystych odkształceń powrotnych,
- naprężenia własne są niejednorodne, nawet wzdłuż długości kształtowanej blachy lub w kołnierzu,
- zależą one od historii odkształcania materiału blachy.

3. Metoda kompensacji błędów wywołanych sprężystymi odkształceniami powrotnymi

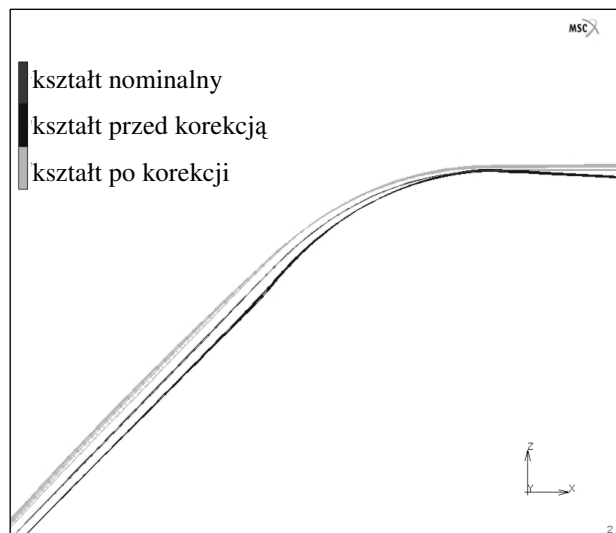
Zostały opracowane dwie metody kompensacji powrotnych odkształceń sprężystych, jedna przez University w Savoie (US), druga przez Politechnikę Wrocławską (PW). Metoda US kompensacji odkształceń powrotnych, zwana projektowaniem eksperymentów (PE) polega na zracjonalizowaniu praktyki przemysłowej przez zastąpienie rzeczywistych prób próbami numerycznymi poprzez odpowiednią symulację. Liczba symulacji zależy od liczby czynników uwzględnionych w badaniu i liczny poziomów przyjętych dla każdego z tych czynników. Takie badania pozwalają określić matematyczne zależności pomiędzy geometrią części, parametrami procesu tłoczenia i geometrią narzędzi, zwykle za pomocą wielomianów. Metoda PW kompensacji odkształceń powrotnych opiera się na zastosowaniu wirtualnych sił reakcji lub przemieszczeń sprężystych po odciążeniu wyłoczek do wykreowania skorygowanych narzędzi. Zgodnie z Wagonerem [17] taka metoda zapewnia osiągnięcie zamierzonego celu. Lecz okazało się, że metoda sił może być jedynie użyta do symulacji prostych kształtów wyłoczek, zwykle osiowo-symetrycznych, natomiast metoda przemieszczeń sprężystych może być użyta do bardziej złożonych wyłoczek, ponieważ nie jest wymagana znajomość dodatkowych warunków brzegowych.

Metoda sił wirtualnych została zastosowana z dobrymi wynikami do kompensacji sprężystych odkształceń powrotnych w przypadku następujących procesów: kształtowania osiowosymetrycznej wyłoczki [18, 19], tłoczenia półkolistej wyłoczki [20], tłoczenia półkolistej stożkowej wyłoczki [21] i do tłoczenia złożonej prostokątnej wyłoczki [22]. Metoda ta jest szczególnie bardzo trudna w przypadku kształtowania wyłoczek ze szczelinami mniejszymi lub nawet równymi grubości blachy oraz w przypadku bardzo dużych sił stosowanych w końcowym etapie operacji. Duże siły stosowane w takich procesach nie są przydatne do kompensacji błędów wynikających z odkształceń powrotnych. Przykładami mogą być wyłoczki w kształcie długiej belki o przekroju w kształcie litery U lub wyłoczki w kształcie litery L. Było to przyczyną, że mimo znacznego nakładu pracy dla skompensowania błędów wynikających z odkształceń sprężystych takich wyłoczek przy użyciu metody wirtualnych sił nie osiągnięto założonych celów. Natomiast metoda przemieszczeń sprężystych pozwoliła uzyskać pozytywne wyniki. Obie metody opracowane przez US i PW zostały eksperymentalnie zweryfikowane w procesie gięcia blachy ze stopu aluminium Al6061T4 dla otrzymania części przedstawionej na rys. 2.



Rys. 2. Wyłoczka i narzędzia zastosowane do sprawdzenia metod korekcji narzędzi

Wyniki uzyskane po korekcji narzędzi metodami US i PW dla procesu gięcia są porównywalne (rys. 3). Zastosowanie metod korekcji narzędzi pozwala określić nowy kształt narzędzi. Ten nowy kształt został wygenerowany dla założonych parametrów kształtowania, tj. materiału blachy, warunków tarcia, siły dociskacza i skoku stempla.



Rys. 3. Porównanie kształtu wyłoczek po odkształceniu sprężystym i korekcji narzędzi z kształtem nominalnym

Można wykazać, że po modyfikacji narzędzi, dokonanej zgodnie z wymienionymi powyżej dwiema metodami, odkształcenia sprężyste są znacznie mniejsze od tych, które założono w projekcie i spełniają one warunki konieczne do prawidłowego wytwarzania wyłoczek. Jeśli wyłoczki po korekcji narzędzi nie spełniają założonych tolerancji cała procedura musi być powtórzona od początku aż uzyska się kształt wyłoczek założonej tolerancji.

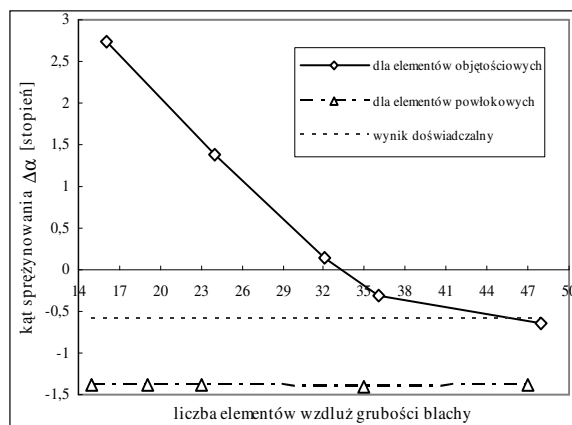
W przypadku zastosowania programu MARC metoda kompensacji odkształceń sprężystych została zaadaptowana do obliczeń przy pomocy równoległych wieloprocessorowych stacji roboczych. Poprzez zastosowanie opcji restartu w końcowym stadium obciążania jest możliwe powtarzanie obliczeń dla stanu odciążenia przy uwzględnieniu różnych parametrów.

Poniżej, dla lepszego zrozumienia problemów modelowania i wykazania możliwości uzyskiwania dużej dokładności modelowania, podano przykłady symulacji MES i wyniki eksperymentu dla wybranych procesów kształtowania.

• Modelowanie odkształceń sprężystych przy gięciu wyłoczek w kształcie litery V z dogniataniem

Proces gięcia na literę V z dogniataniem był analizowany ze względu na duży gradient odkształcenia wzdłuż grubości blachy. Wymaga to użycia bardziej dokładnych parametrów modelowania. Modele 2D i 3D zostały użyte do symulacji wpływu rodzaju użytych elementów i ich liczby wzdłuż grubości blachy na dokładność rozkładu naprężeń wewnętrznych i na określenie odkształceń powrotnych. Symulacja została przeprowadzona dla stopu aluminium 6061T4 w różnych kierunkach względem kierunku walcowania. Przyjęto, że materiał jest elastoplastyczny z izotropowym umocnieniem, a krzywe umocnienia wprowadzono w postaci numerycznej. Statyczna niejawną procedurą integracji została użyta do modelowania kształtowania i sprężystych odkształceń powrotnych. Proces tłoczenia realizowano zagłębiając stempel na różne głębokości.

Na rys. 4 przedstawiono zależność pomiędzy kątem sprężynowania i liczbą elementów wzdłuż grubości blachy. Dla elementów powłokowych kąt sprężynowania jest niemal stały niezależny od liczby elementów. w przypadku stosowania elementów objętościowych można osiągnąć lepszą zgodną z wynikami eksperymentu lecz jedynie dla dużej liczby elementów rozmieszczonych wzdłuż grubości blachy.



Rys. 4. Kąt sprężynowania zależny od liczby elementów objętościowych i płaskich użytych w procesie symulacji

- **Modelowanie powrotnych odkształceń sprężystych wytłoczek stożkowych**

Próbka z blachy w kształcie koła o średnicy 280 mm ze stopu aluminium 6061T4 została poddana procesowi tłoczenia na głębokość 30 mm przy użyciu okrągłej matrycy o średnicy 193 mm i cylindrycznego stempla o średnicy 142 mm. Nacisk dociskacza wynosił 2 MPa. Stempel i matryca przyjęto, że są to ciała sztywne, podczas gdy odkształcany materiał został niejednorodnie podzielony na czworokątne powłokowe 3D o czterech wężłach. Natomiast dociskacz przyjęto jako ciało odkształcalne opisane objętościowymi elementami o ośmiu wężłach.

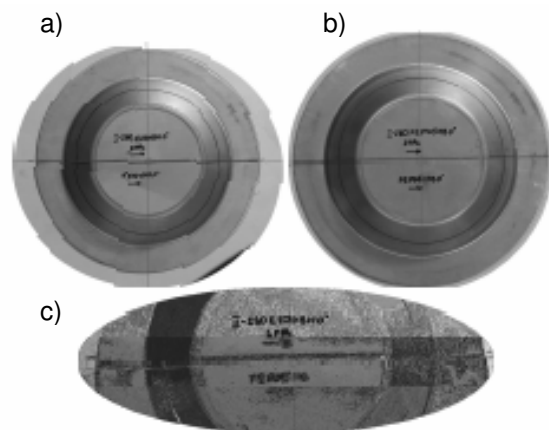
Modelowanie procesu obciążania jest względnie proste i poprawne rozwiązania mogą zwykle być osiągnięte jeśli zastosuje się właściwe numeryczne i procesowe parametry. Podczas gdy odciążanie (powrotne sprężynowanie) często wywołuje problemy w dokładnym obliczaniu powrotnych odkształceń sprężystych. Błędy, jakie powstają podczas modelowania procesu obciążania mają istotny wpływ na kształt wytłoczki po sprężynowaniu. Dlatego w procesie symulacji zbadano wpływ wielkości elementów skończonych, rozdrobienia siatki, liczby elementów wzdłuż grubości blachy i współczynnika tarcia na dokładność uzyskiwanych powrotnych odkształceń sprężystych. Stwierdzono, że dla drobnej siatki uzyskuje się lepszą zgodność kształtu uzyskanego z symulacji z kształtem rzeczywistego wyrobu. Rozdrobienie siatki w obszarze promienia narzędzi poprawia w dużym stopniu kształt wyrobów po sprężynowaniu.

Do symulacji zastosowano dwa współczynniki tarcia wynoszące 0,1 i 0,15. W przypadku większego współczynnika tarcia zmiany kształtu ścian bocznych i całkowitego kształtu wytłoczki są bardziej zbliżone do rzeczywistego kształtu wytłoczki.

- **Modelowanie sprężystych odkształceń powrotnych wyrobów z blach łączonych laserem (WB)**

W przypadku blach łączonych laserem muszą być uwzględnione różne ich właściwości ta w różnych punktach. Kształtowa-

nie takich blach jest trudne ponieważ właściwości materiału zmieniają się w strefie wpływu ciepła i w samej spoinie. Blachy łączone laserem zostały wykonane z blach E220/E220, FEPO5/FEPO5 i FE220/FEPO5. Materiał mocniejszy E220 miał grubość 0,7 mm, natomiast materiał słabszy FEPO5 0,76 mm. Wykrój wstępny o średnicy 280 mm wykonany z takich łączonych materiałów został poddany procesowi tłoczenia w celu otrzymania wytłoczki stożkowej jak to pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Wytłoczki wykonane z blach łączonych laserem: a) E220/E220, b) FEPO5/FEPO5 z centralnie usytuowaną linią spawania i naciskiem dociskacza 2 MPa, c) FE220/FEPO5 z przesuniętą linią spawania i naciskiem dociskacza 6 MPa

Podczas tłoczenia wytłoczek wykonanych z jednorodnych blach wyrób ma kształt stożkowy, nie wykazuje fałdowania bocznej stożkowej powierzchni (rys.5a i 5b). W przypadku blach spawanych wykonanych z różnych blach fałdowanie pojawia się w pobliżu linii spawania (rys. 5c). Wzrost siły docisku może wyeliminować powstawanie fałdowania.

Różnice właściwości materiałów pomiędzy blachami E220 i FEPO5 powodują niejednorodne płynięcie materiału do przestrzeni matrycy, wynikiem czego jest przemieszczenie linii spawania (rys.5c). Słabszy materiał ulega większemu odkształceniu niż mocniejszy i podobnie cieńszy materiał odkształca się bardziej niż grubszy. W przypadku blach spawanych laserem o różnej grubości pojawia się problem z rozkładem nacisków na dociskaczu. Typowy dociskacz nie jest w pełni sztywny i dociska

wytłoczkę nierównomiernie. Bez specjalnie zaprojektowania tłoczniaka jest bardzo trudno kontrolować rozkład nacisków dociskacza na kontaktowej powierzchni wytłoczki.

4. Wykreowanie modelu matematycznego opisującego zachowanie się blach w procesach tłoczenia jak również po dodatkowych operacjach dzielenia

Korekcja narzędzi dla wytłoczek kształtowanych z zastosowaniem dodatkowych operacji wymaga rozwiązania problemów wirtualnego podziału materiałów. Każde usunięcie części materiału zmienia warunki równowagi i kształt wyrobów. Operacje dzielenia wytłoczek mogą być wyodrębnione w zależności od ilości usuwanego materiału, miejsca dzielenia i jego sposobu [23].

Pierwsza grupa, to dzielenie zamkniętych wytłoczek. W tym przypadku wyeliminowanie ograniczeń przemieszczeń powoduje znaczną deformację kształtu i rozmiaru wytłoczek. Nie jest to trudny problem jeśli linia podziału jest linią symetrii. W takim przypadku można modelować tylko jedną symetryczną część wytłoczki z przyjęciem właściwych warunków brzegowych. Po zamodelowaniu obciążania i odciążania warunki brzegowe powinny być usunięte i w kolejnym kroku analiza odkształceń końcowego kształtu wytłoczki zostaje przeprowadzona. Siły zewnętrzne po usunięciu warunków brzegowych są użyte do analizy korekcji narzędzi.

Bardziej złożony problem istnieje wtedy, gdy linia podziału nie pokrywa się z linią symetrii. W takim przypadku nie ma możliwości określenia a priori, przed odkształceniem przebiegu końcowej linii podziału i zastosowania go do kreowania siatki. Jednym z rozwiązań, które jest stosowane do modelowania to: przeprowadzenie zasadniczego modelowania bez odciążania, wygenerowania linii podziału, remeshingu modelu ze względu na linie podziału, zastąpienie wewnętrznych ograniczeń wzdłuż linii podziału poprzez warunki brzegowe, przeprowadzenie następnej analizy z usuniętymi warunkami brzegowymi i korekcji narzędzi na podstawie uzyskanego rozwiązania.

Druga grupa operacji dzielenia zawiera okrawanie, dziurkowanie lub odcinanie,

w których to ilość usuwanego materiału jest stosunkowo mała i główne ograniczenia nie są eliminowane. Po takich rodzajach operacji wytłoczka odkształca się w małym stopniu.

Jako przykład wybrano dzielenie wzdłuż średnicy osiowoosymetrycznej stożkowej wytłoczki wykonanej ze stopu aluminium 6061T4. Model elementów skończonych kształtowanej wytłoczki zawiera bardzo drobną siatkę i współczynnik tarcia 0,15. Doświadczalna wytłoczka została przecięta metodą elektrolityczną. Przed i po cięciu profil wytłoczki został zmierzony bardzo dokładnie w celu określenia jego zachowania w procesie cięcia. Wytłoczka została przecięta wzdłuż kierunku walcowania natomiast jej kształty zostały określone w kierunkach 0, 45 i 90 do kierunku walcowania. Profil wytłoczki w obszarze promieni narzędzi określony doświadczalnie przedstawiono na rys. 6, podczas gdy porównanie rzeczywistego profilu z wynikami modelowania wzdłuż kierunku 45° przedstawiono na rys. 7.

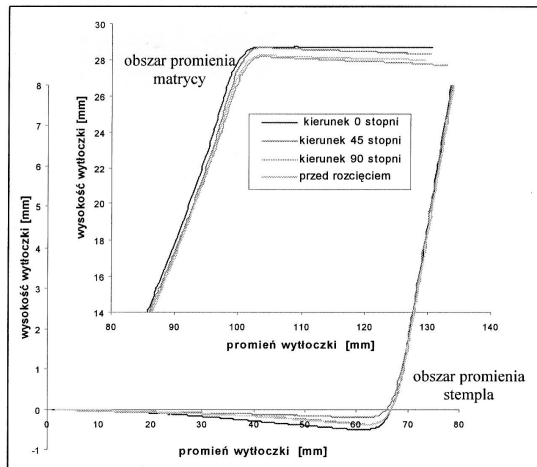
Z obu tych rysunków wynika, że użytko bardzo dobrą zgodność wirtualnego i eksperymentalnego kształtu.

Prostokątną wytłoczkę podzielono wzdłuż krótszej osi symetrii. Badania modelowe i doświadczalne zostały przeprowadzone dla stopu aluminium 6061T4 i stali SPE220BH. W procesie symulacji przyjęto, że stempel i matryca są sztywne, natomiast dociskacz jest elastyczny. Wykrojka została poddana dyskretyzacji przez wprowadzenie czterowęzłowych powłokowych elementów z trzynastoma elementami wzdłuż jej grubości i drobną siatką.

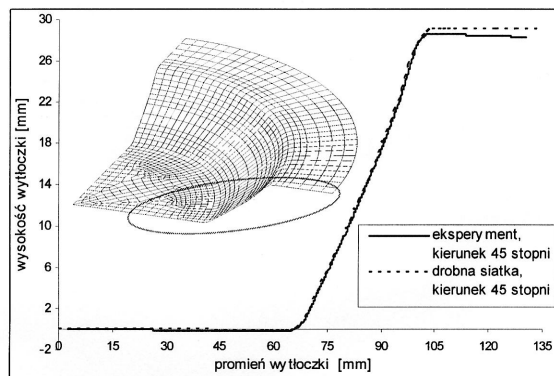
Profile wirtualnej i rzeczywistej wytłoczki były mierzone przed i po cięciu w trzech kierunkach: w kierunku krótkiej osi symetrii, długiej osi symetrii i w kierunku przekątnej. Profile dna wytłoczki w ww. kierunkach wynikające z symulacji i rzeczywistego przebiegu zgadzają się bardzo dobrze. Podobnie profile ścian bocznych są niemal identyczne. Po cięciu największe odchylenia kołnierza i dna wytłoczki pojawiają się w kierunku krótkiej osi symetrii, podczas gdy kształt w kierunku długiej osi symetrii jest niemal identyczny w obu przypadkach.

Operacje cięcia takie jak wykrawanie i dziurkowanie wywołują jedynie małe zmia-

ny kształtu. Dlatego takie operacje nie zostały omówione w tym artykule.



Rys. 6. Kształt wytłoczki uzyskany w badaniach doświadczalnych wzdłuż średnicy przed i po cięciu



Rys. 7. Porównanie kształtu wytłoczek uzyskanych z eksperymentu i modelowania przy użyciu drobnej siatki i współczynnika tarcia 0,15 wzdłuż kierunku 45° po cięciu

5. System dokładnego tłoczenia pozwalający wytwarzać wirtualne narzędzia o skorygowanym kształcie i wymiarach w celu kompensacji powrotnych odkształceń sprężystych wytłoczek i osiągnięcia założonej ich dokładności po tłoczeniu i po dodatkowych operacjach

Głównym celem projektu było zaprojektowanie narzędzi dla uzyskania wysokiej dokładności wytłoczek. Metody korekcji narzędzi i optymalizacji parametrów procesu ze względu na uzyskiwaną dokładność wytłoczek zostały rozwinięte przez US i PW. Ważnymi częściami systemu są moduły określające odkształcenia graniczne

i warunki fałdowania, które muszą być najpierw spełnione, aby dana operacja mogła być zrealizowana. Efektywny system, oparty o symulację MES, potrzebuje jasnych prawideł i przewodnika dla prawidłowego wyboru właściwości materiału, modelu materiału, parametrów procesu itp.

Dwie różne metody bazujące na różnych założeniach zostały włączone do systemu jako jedna komplementarna metoda, można użyć tą jedną metodę bądź metody elementarne, wybór metody zależy od użytkownika systemu.

Pierwsza metoda wykorzystuje jedynie wyniki symulacji MES bez modyfikacji programu MES, dzięki temu metoda ta może być łatwo powiązana z różnymi programami MES. Metoda bazuje na technice optymalizacji pozwalającej wygenerować obiektywne funkcje i w ten sposób określić zakres modyfikacji narzędzi, a także koszt takiej modyfikacji. W przestrzeni wirtualnej wszystkie wybrane czynniki mogą być łatwo przebadane i zmodyfikowane.

Druga metoda bazuje na teoretycznych zależnościach, co generuje pewne ograniczenia. Metoda stosuje program MES w sposób w ściśle określony, zbiera dane i kreuje nowe warunki brzegowe i nowe zadania. Dlatego jest ona związana z jednym ściśle określonym programem MES. Zastosowanie innego systemu MES jest możliwe poprzez wykreowanie nowych wewnętrznych procedur dla takiego systemu MES. Metoda bazująca na siłach reakcji pozwala uzyskać właściwą korekcję narzędzi jedynie dla tych obszarów wytłoczki, które mają bezpośredni kontakt z narzędziami. W przypadku metody bazującej na przemieszczeniach sprężystych nie ma takich ograniczeń. Najważniejszym czynnikiem jest dokładność modelowania podczas odciążania. Takie żądanie prowadzi do zwiększenia stopnia swobody i do znacznego wydłużenia czasu obliczeń. Zastosowanie metody do dużych złożonych wytłoczek wymaga zastosowania komputerów o dużej mocy obliczeń oraz do poszukiwania sposobu ograniczenia czasu obliczeń.

System został zaprojektowany i przebadany przy zastosowaniu dwóch programów MES, tj. MARCA i ABACUSA. Jest to otwarty uniwersalny system, który może być zmodyfikowany przez użytkownika

w bardzo dużym stopniu. Jawna i niejawna metoda jest preferowana w przypadku zastosowania programu ABACUS i niejawna dla programu MARC.

Główną częścią systemu jest powiązanie z kompensacją powrotnych odkształceń sprężystych i korekcją narzędzi.

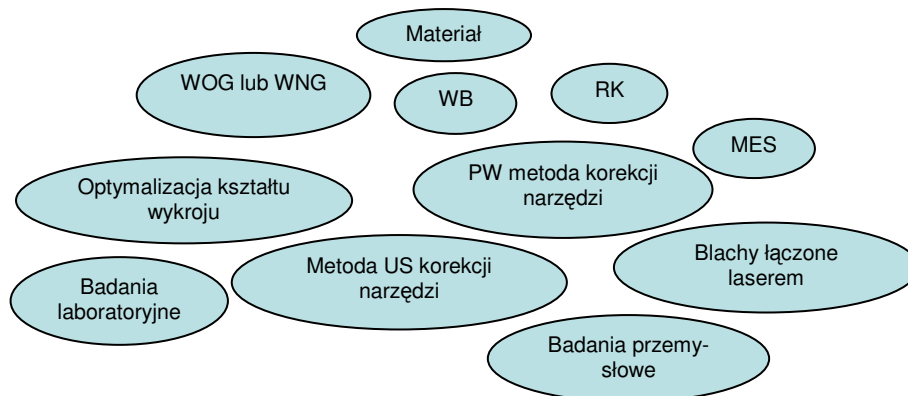
Następną częścią systemu jest modelowanie przy użyciu MES odkształceń sprężystych, tutaj mogą powstawać największe niedokładności kształtu i wymiarów wytłoczki. Warunki brzegowe, równania konstytutywne, parametry materiałowe, parametry modelowania stanowią podstawowy zbiór czynników określających dokładność modelowania i czas obliczeń.

Trzecią częścią jest problem powiązania wielu elementów z możliwością przewidywania pęknięcia, niestabilności i fałdowania.

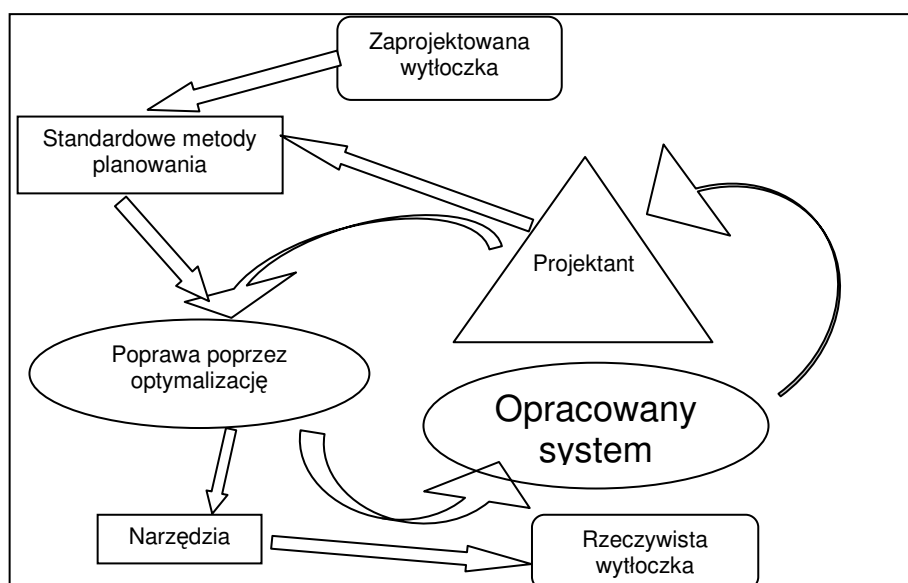
Wymienione powyżej elementy systemu dokładnego tłoczenia przedstawiono na rys. 8, umieszczenie systemu w łańcuchu czynności związanych z projektowaniem przedstawiono na rys. 9 [16]. Jako wstęp do systemu należy użyć wstępnego mniej lub bardziej dokładnie zaprojektowanego procesu kształtowania [7].

Jako wynik zastosowania systemu projektant uzyskuje informacje dotyczące całości wytłoczki (utrata stateczności, powstawanie uszu, fałdowanie itp.), określonego kształtu i dokładności lub prawidłowości parametrów procesu oraz kształtu narzędzi ze względu na uzyskiwaną dokładność wytłoczki.

Jak to wynika z rys. 9 system dokładnego tłoczenia stanowi pewną zwartą dużą część umieszczoną w dużym całkowitym systemie projektowania wytłoczek.



Rys. 8. Elementy włączone do systemu dokładnego tłoczenia



Rys. 9. Położenie dokładnego systemu tłoczenia w całkowitym systemie projektowania wytłoczek

Literatura

1. S. P. Keeler, The effect of strain path on the plastic instability. Proc. of Int. Symp. on Plastic Instability, Sheet Met. Ind., 1965, Vol. 42, pp. 683-687.
2. G.M. Goodwin, Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop, Metall. Ital., 1968, Vol. 8, pp. 767-771.
3. Z. Marciniak and K. Kuczyński, Limit strain in the process of stretch forming sheet, Int. J. of Mech. Sci., 1967, Vol. 9, pp. 609-615.
4. A. Barata da Rocha, F. Barlat and J. M. Jalinier, Prediction of the forming limit diagrams of anisotropic sheet in linear and nonlinear loading, Mater. Sci. and Eng., 1984, Vol. 68, pp. 151-158.
5. J. Ferreira Duarte, A. Dias dos Santos and A. Barata da Rocha, Proc. of 18th IDDRG Biennial Congress, Lisboa, 1994, pp. 29-35.
6. J. Gronostajski and Z. Zimniak, Analytical calculation of forming limit curve, Proc. of Int. Conf. on Advances in Mat. and Proc. Technol., Dublin, 1993, pp. 1497-1503.
7. R. Arrieux, C. Bedrin and M. Boivin. Proc. of 12th IDDRG Biennial Congress, St. Margharita Ligure, 1982, pp. 61-68.
8. J. Gronostajski, The effect of strain path on the plastic instability, Proc. of Int. Symp. on Plastic Instability, Considere Memorial, Paris, 1985, pp. 4954.
9. J. Gronostajski and others, The final report of Inco-Copernicus Project entitled „System for sheet metal forming design”, Report ITMiA PWr., serii SPR, nr 6/2001, 2001, 1-28.
10. R. Arrieux and others, The system for sheet metal forming design, Report ITMiA PWr nr 26/99, Wrocław, 1998, pp. 1-250.
11. M. Apostol and others, The system for sheet metal forming design, Report ITMiA PWr nr 20/2000, Wrocław, 1999 pp. 1-285.
12. Z. Gronostajski, Constitutive equations applied in sheet metal forming processes, Proc. of Int. Conf. on Advances in Materials and Processing Technologies, Guimarães, Portugal, 1997, 919-925.
13. Z. Gronostajski, Modele konstytutywne opisujące zachowanie się wybranych stopów miedzi w zakresie dużych odkształceń plastycznych, Scientific Works of Mechanical Engineering and Automation Institute, Monography No 23, 2000, 1-237.
14. R. Arrieux and others, Report on method of residual stresses calculation in complex drawpieces, Laboratory of University of Savoie, Lmeça and SEP, 2003, pp.1-67.
15. R. Arrieux and others, Mid-Term Report on the Intelligent System for NET Shape Forming of Sheet Metal Product, Laboratory of University of Savoie, Lmeça and SEP, 2004, pp.1-88.
16. J. Gronostajski, Report of realisation of project “The Intelligent System for NET Shape Forming of Sheet Metal Products” from the MID-TERM Meeting at Wrocław University of Technology, 2003, pp.1-89.
17. R. H. Wagoner and others, Design of sheet forming dies for springback compensation, Proc. of 6 Int. ESAFORM Conf. on Mat. Forming, Salerno, 2003, 7-14.
18. Z. Zimniak, Spring back error minimization for deep drawing processes, Proc. of the 10th Int. Conf., Ulster 2003, pp. 567-572.
19. Z. Zimniak, Tooling design for sheet metal forming processes compensating springback error, Proceedings of the 6th ESAFORM Conference on Material Forming, Palermo, 2003, pp. 195-198.
20. Z. Zimniak, System zdalnego monitoringu procesów tłoczenia blach z zastosowaniem badań magnetycznych, Materiały XI Konf. Informatyka w Technologii Metali, Kraków, 2004, pp. 277-282.
21. Z. Zimniak, Minimalizacja błędów sprzężowania powrotnego w procesach tłoczenia blach, Materiały X Konf. Informatyka w Technologii Metali, Wisła-Jawornik, 2003, pp. 147-154.
22. Z. Zimniak, Korekcja błędów wywołanych sprzężowaniem powrotnym dla procesów tłoczenia blach, Prace Naukowe - Politechnika Warszawska, Fizyczne i matematyczne modelowanie procesów obróbki plastycznej, Warszawa, 2003, pp. 169

23. J. Gronostajski, A. Niechajowicz and S. Polak, Springback deformation of drawpieces after trimming and parting,

11 Sächsische Fachtagung, Umformtechnik, Freiberg, 2004, 457-476.

THE INTELLIGENT SYSTEM FOR NET SHAPE FORMING OF SHEET METAL PRODUCTS

Abstract

In the last years forming processes of sheet metals have undergone important developments, however, sheet metal forming is an industrial process strongly dependent on numerous interactive variables: material behaviour, lubrication, forming equipment, strain rate etc. The correct choice of these parameters is one of the main aims in modern industry. For sheet metal forming, typical deviations from the desired geometry are dependent on the form and dimension of drawpieces.

The main aim of the paper is to show the methods of improvement and development of products manufacturing made from different sheets. The solution of the problem bases on the current calculation of the residual stresses, subsequent springback and the FEM of tool correction. The new design system eliminates inaccuracy of processes and products with very good reliability, as well as time and money consuming trial and error techniques.

Key words: sheet metals, forming, precise, system, intelligent