

MODELOWANIE FIZYCZNE

Wrocław, 2011

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest:

- Poznanie zasad modelowania fizycznego.
- Dobór materiałów modelowych.
- Przeprowadzenie modelowania procesu wyciskania współbieżnego aluminium w płaskim stanie odkształcenia.
- Przeprowadzenie modelowania procesu wyciskania współbieżnego aluminium przy użyciu materiału modelowego w płaskim stanie odkształcenia.
- Porównanie modelu rzeczywistego z modelem fizycznym.

2. Wprowadzenie

Coraz większa konkurencyjność przedsiębiorstw powoduje, że poszukuje się metod, które ułatwiłyby z jednej strony projektowanie procesu przeróbki plastycznej, natomiast z drugiej strony wyeliminowałyby eksperyment na materiale rzeczywistym jako narzędzie weryfikujące. Poszukiwania te prowadzone są w dwóch kierunkach. Pierwszy kierunek oparty na aparacie matematycznym oraz technikach obliczeniowych, które gwałtownie rozwinęły się w ostatnim dwudziestoleciu, pozwala budować matematyczne modele różnych procesów kształtowania plastycznego oraz zjawisk zachodzących w odkształcanym materiale. Należy tu głównie wspomnieć o metodzie elementów skończonych. Popularność tej metody wynika z jednej strony z coraz większej dostępności komputerów o dużych mocach obliczeniowych, z drugiej zaś z coraz prostszej obsługi programów wykorzystujących tą metodę. Pomimo bezdyskusyjnej przydatności i nieuniknionego wdrażania modelowania matematycznego do analizy i projektowania procesów, należy pamiętać zarówno o potencjalnych możliwościach jak też i o ograniczeniach tej metody. Podstawowym ograniczeniem w bezpośrednim wykorzystaniu matematycznego modelowania w procesie projektowania jest brak pewności czy uzyskane wyniki są wystarczająco poprawne [1]. Niepewność ta może być spowodowana przyjęciem błędnych założeń. Dlatego konieczne jest porównanie modelowania matematycznego z rzeczywistym procesem, którego alternatywą może być metoda fizycznego modelowania jako dużo tańsza i szybsza.

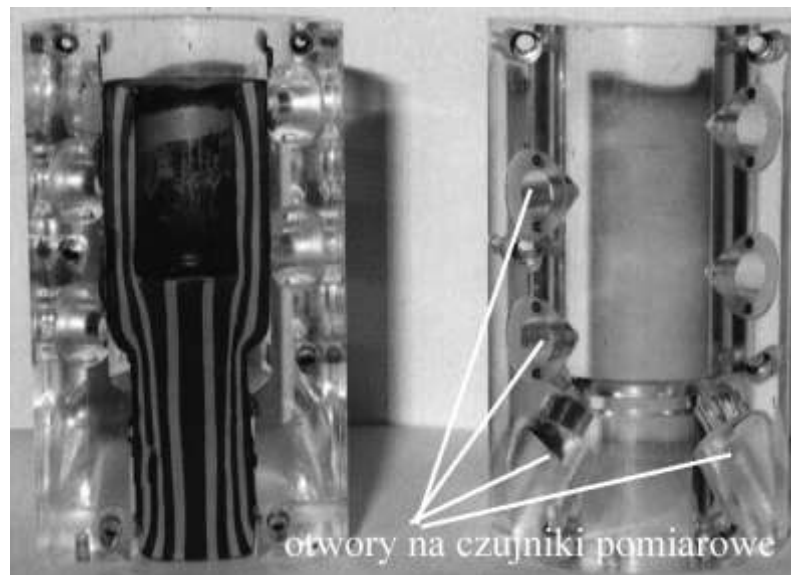
Metoda ta może stanowić samodzielne narzędzie w projektowaniu procesów przeróbki plastycznej z uwzględnieniem zarówno kształtu jak i właściwości gotowego wyrobu lub też współdziałać z modelowaniem matematycznym, dostarczając mu niezbędnych informacji dotyczących zachowania się odkształcanego materiału, warunków brzegowych oraz może pełnić rolę narzędzia weryfikującego [2].

Podstawową ideą modelowania fizycznego jest zastąpienie rzeczywistych materiałów danym procesie przeróbki plastycznej materiałem modelowym o granicy plastyczności 100-1000 razy mniejszej od materiału rzeczywistego. Stwarza to możliwość użycia tańszych narzędzi oraz pras o dużo mniejszych naciskach niż w procesach rzeczywistych [3].

Poprawność fizycznego modelowania oraz możliwość transformacji wyników na rzeczywisty proces przeróbki plastycznej jest ściśle uzależniona od zachowania warunków podobieństwa między modelem fizycznym a procesem rzeczywistym. **Podobieństwo to powinno obejmować: opis właściwości materiału, geometrię, warunki brzegowe (tarcia), oraz warunki termiczne, kinematyczne i dynamiczne.** O ile oddzielne spełnienie większości poszczególnych warunków podobieństwa nie stwarza większych problemów, o

tylko jednoczesne spełnienie wszystkich warunków jest praktycznie niemożliwe [4]. Jednym z najistotniejszych warunków jest warunek podobieństwa materiału w zakresie plastycznym.

Jednym z podstawowych warunków prawidłowego zaprojektowania eksperymentów modelowania fizycznego jest dobór odpowiedniego materiału modelowego, symulującego zachowanie się rzeczywistego materiału metalicznego. Taki materiał modelowy winien charakteryzować się niskimi właściwościami wytrzymałościowymi, umożliwiającymi realizację eksperymentów modelowych przy użyciu narzędzi wykonanych najczęściej z drewna, gumy, żywic i innych tworzyw sztucznych oraz z materiałów przezroczystych pozwalających na obserwację przebiegu procesu (np.: płynięcia materiału). Równocześnie powinien on umożliwiać wykonanie eksperymentów modelowania w temperaturach pokojowych zarówno w skali powiększonej, jak i w skali zmniejszonej w stosunku do rzeczywistości. W zależności od celu eksperymentu modelowania fizycznego (badania własności i zachowania się samego materiału modelowego, analiza przebiegu fragmentu procesu, badanie interesującego zjawiska występującego w eksperymencie np.: strefa martwa) próbki posiadają zróżnicowaną budowę od prostej bryły np.: walca, prostopadłościanu aż po skomplikowane konstrukcje np.: próbki wg techniki jam – roll (rys. 1).



Rys. 1 Przykładowe próbki jam – roll stosowanej w modelowaniu fizycznym procesu wyciskania wraz z narzędziami

Obecnie stosowane materiały modelowe zasadniczo mogą być podzielone na dwie grupy: **metaliczne i niemetaliczne**. Do grupy **metalicznych** należą między innymi: ołów, aluminium, sód, miedź i ich miękkie stopy. Do grupy **niemetalicznych** zalicza się: gumę, materiały termoplastyczne, różne rodzaje wosków oraz ich mieszaniny, a także plasteliny z różnymi dodatkami (kaolin, lanolina, silikon, kreda). Niemetaliczne materiały modelowe są szczególnie wykorzystywane do badania płynięcia, bowiem materiały metaliczne nie dają takich możliwości, zwłaszcza w przypadku procesów, w których występują znaczne odkształcenia, lub w operacjach, gdzie zachodzi obrót odkształcanego materiału.

Materiały z grupy niemetalicznych posiadają również wady: wykazują dużą wrażliwość na prędkość odkształcania oraz temperaturę, co powoduje, że poprawna realizacja eksperymentów modelowych powinna te zachowania szczególnie uwzględnić. Laboratorium

modelowania fizycznego w zakładzie Z3 wykorzystuje do eksperymentów materiały modelowe z grupy niemetalicznych. Dotychczasowe badania prowadzone nad uzyskaniem właściwych niemetalicznych materiałów modelowych, symulujących zachowanie się rzeczywistych materiałów metalicznych (również kompozytów metalowych) doprowadziły do wyodrębnienia dwóch grup takich materiałów:

1. Materiały modelowe bazujące na **naturalnych lub syntetycznych woskach** z różnego rodzaju dodatkami (woski miękkie i twarde). Materiały modelowe na bazie wosków charakteryzują się małym stopniem niejednorodności struktury, z tego też powodu są one wykorzystywane w badaniach parametrów siłowych analizowanych procesów.

2. Materiały modelowe oparte na różnego rodzaju **czystych plastelinach lub plastelinach zawierających zarówno dodatki** zmiękczające (olej, wazelina), jak i utwardzające (kreda, glina kaolinowa). Materiały te wykazują większą niejednorodność strukturalną niż materiały z grupy pierwszej. Ponieważ zachowanie tych materiałów zależy od rodzaju i ilości barwnika, stopnia wymieszania, warunków wytwarzania i przechowywania, stosowane są one głównie do oceny jakościowej badanych procesów, szczególnie obrazów płynięcia materiału.

3. Ocena doboru materiałów modelowych

Najistotniejszym warunkiem w modelowaniu fizycznym jest podobieństwo materiałów w **zakresie plastycznym**. Można założyć że warunek ten jest spełniony, gdy materiał modelowy zachowuje się tak samo jak materiał rzeczywisty podczas odkształcania. Ponieważ o zachowaniu się materiału podczas odkształcania decyduje głównie krzywa umocnienia, warunek ten można sprowadzić do dobrania odpowiedniej krzywej umocnienia materiału modelowego. Przyjmując funkcję opisującą naprężenie uplastyczniające w postaci $\sigma = C \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m$, można przyjąć, że warunek podobieństwa materiałów jest spełniony, gdy wartości współczynników m i n są takie same dla materiału rzeczywistego i modelowego. Dobranie współczynnika n nie stwarza większych trudności, w przeciwieństwie do doboru współczynnika m , który określa czułość materiału na prędkość odkształcania. Na ogół materiały stosowane do fizycznego modelowania są bardziej czułe na prędkość odkształcania niż materiały rzeczywiste.

Do dokładniejszej oceny stopnia podobieństwa krzywych umocnienia materiału modelowego i rzeczywistego najwygodniej jest posługiwać się współczynnikiem podobieństwa określonym poniższym wzorem [5]

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i^{rz}}{\sigma_i^m} \quad (1)$$

gdzie: σ_i^{rz} – naprężenie uplastyczniające materiału rzeczywistego w punkcie i ,

σ_i^m – naprężenie uplastyczniające materiału modelowego w punkcie i ,

n – liczba punktów na krzywych umocnienia materiału modelowego i rzeczywistego w których wyznaczono średni współczynnik podobieństwa określony wzorem.

$$C_{sr} = \frac{\sigma_i^{rz}}{\sigma_i^m} \quad (2)$$

Spełnienie pozostałych warunków sprowadza się głównie do dobrania odpowiedniej temperatury oraz rodzaju smaru i sposobu smarowania [4, 6]. Wynika to z faktu, że woski są bardzo czułe na temperaturę, a tarcie w modelowaniu fizycznym istotnie zmienia przebieg procesu. Wzrost temperatury już tylko o 3-4°C może powodować obniżenie naprężenia uplastyczniającego o 20%. Niektóre materiały zawierające lanolinę charakteryzują się nawet jeszcze większą czułością na prędkość odkształcania. Dlatego bardzo ważne jest utrzymanie i kontrolowanie temperatury podczas modelowania fizycznego.

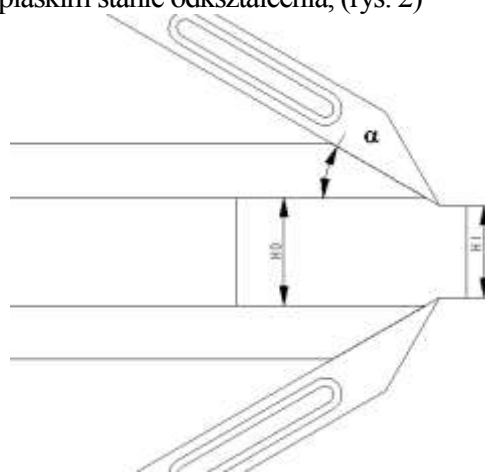
Aby modelowanie fizyczne było poprawne trzeba zwrócić szczególną uwagę na inne jeszcze czynniki, które mogą powodować otrzymywanie błędnych wyników. Wykonane próbki nie mogą posiadać niejednorodnej struktury wynikającej z niedokładnego wymieszania składników lub z faktu, że dane składniki są trudnomieszalne. Mały moduł sprężystości i duże odkształcenie sprężyste, jakim charakteryzują się materiały stosowane do fizycznego modelowania w porównaniu do metali, może zniekształcić cały proces modelowania i być przyczyną rozbieżności pomiędzy modelem a procesem rzeczywistym, zwłaszcza wtedy, gdy w procesie kształtowania plastycznego istotną rolę odgrywają odkształcenia sprężyste.

Podczas modelowania fizycznego bardzo istotne jest określenie celu modelowania, gdyż od tego zależy sposób przygotowania próbek, realizacja modelowania i ostatecznie sposób analizy otrzymanych wyników. Np. gdy interesuje nas sposób wypełnienia matrycy oraz błędy powstające w prostych stanach odkształcenia jak: płaski lub osiowo symetryczny stan wystarczy zastosować próbkę jednokolorową z naniesioną na powierzchni siatką, analiza przebiegu takiego procesu może polegać jedynie na obserwacji deformacji siatki na powierzchni próbki. Natomiast do analizy złożonych stanów odkształcenia, gdy materiał płynie w różnych kierunkach trzeba stosować wielokolorowe próbki składane warstwowo. Wówczas analizę procesu przeprowadza się na podstawie obserwacji kolejnych przekrojów próbki. Dodatkowo, gdy chcemy wyznaczyć wartości sił i odkształceń w procesie należy zastosować specjalne urządzenia do ich pomiaru na modelu i następnie transformować je na proces rzeczywisty.

4. Przebieg ćwiczenia

4.1. Opis stanowiska

Ćwiczenie laboratoryjne dotyczy przeprowadzenia modelowania fizycznego procesu wyciskania współbieżnego aluminium w płaskim stanie odkształcenia, (rys. 2)



Rys. 2. Schemat wyciskania współbieżnego w płaskim stanie odkształcenia początkowa szerokość próbki wynosi H_0 , kąt matrycy α oraz szerokość matrycy H_1 . Zmieniając wartości początkowej i końcowej szerokości próbki uzyskuje się różne stopnie

redukcji przekroju odkształcanej próbki. Zmiana kąta matrycy powoduje zmianę przebiegu płynięcia materiału poprzez matrycę, wpływając jednocześnie na rozległość strefy martwej, w które materiał nie ulega odkształceniu.

Na rys. 3 przedstawiono widok stanowiska do wyciskania materiałów modelowych w płaskim stanie odkształcenia.



Rys. 3. Widok stanowiska do modelowania fizycznego procesu wyciskania współbieżnego w płaskim stanie odkształcenia

Stanowisko do odkształcania zbudowane jest z: głównej płyty stołowej (1), na której zamontowana jest matryca (2) oraz ruchomy stempel (3) wraz z prowadnicami (5), do którego jest następnie zamontowany czujnik siły (4). Na zdjęciu przedstawiono również odkształcaną próbkę (6) oraz szycę (7), przez którą rejestrowany był proces wyciskania za pomocą aparatu cyfrowego. Po prawej stronie umieszczono układ napędowy: silnik o mocy 1kW wraz z motoreduktorem firmy LENZE oraz mechanizm śruba - nakrętka zamieniający ruch obrotowy silnika na ruch posuwisty stempla. Maksymalna siła kształtowania na przedstawionym stanowisku wynosi 4 kN.

W celu zapewnienia możliwości pomiaru odkształceń na powierzchni próbki naniesiona została kwadratowa siatka o długości boku 2,5 mm przy pomocy sitodruku. Podczas procesu wyciskania poprzez szycę rejestrowane jest odkształcenie tej siatki za pomocą aparatu cyfrowego. Zarówno w procesie rzeczywistym jak i modelu fizycznym rejestrowana jest siła wyciskania w funkcji drogi stempla.

W procesie rzeczywistym jako smar zwykle stosuje się stearynian cynku, dla którego współczynnik tarcia μ wynosił 0.04. W modelu fizycznym natomiast stosuje się zwykle wazelinę, umieszczoną w specjalnie wykonanych rowkach na powierzchni próbek, dla takich warunków uzyskuje się zbliżony współczynnik tarcia μ , który wynosi około 0.05.

W celu dobrania odpowiednich materiałów modelowych, które zachowywałyby się podobnie jak materiał rzeczywisty podczas odkształcania należy dobrać odpowiednie mieszaniny wosków z dodatkami.

W rzeczywistym procesie wyciskania przeciwbieżnego w płaskim stanie odkształcenia zastosowane będą próbki złożone z dwóch prostopadłościanów 10x40x70 mm. Na powierzchni styku obu prostopadłościanów nanosi się siatkę koordynacyjną o boku 2,5 mm, która służyła do wyznaczania rozkładu odkształceń. Wygląd próbek przed wyciskaniem przedstawiono na rys. 4. W procesie mogą być stosowane matryce o różnym kącie rozwarcia, o różnym promieniu i stopniu redukcji.



Rys. 4. Próbką z siatką koordynacyjną do wyciskania współbieżnego w płaskim stanie odkształcenia

Narzędzia do wyciskania materiału rzeczywistego przedstawione są na rys. 5a, natomiast przyrząd do wyciskania na rys. 5b.

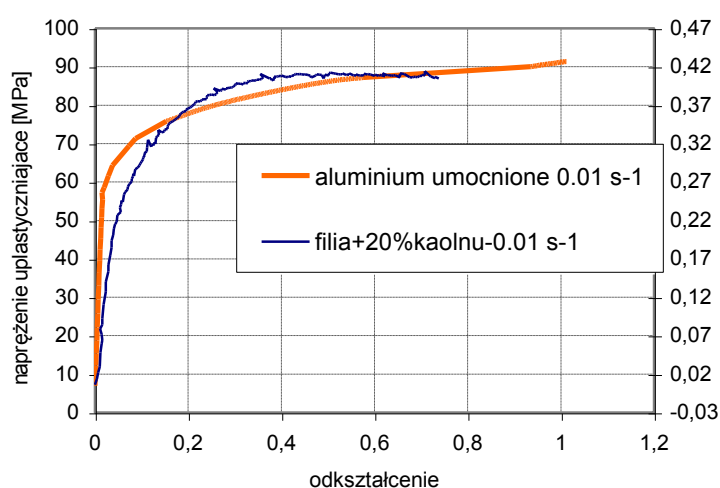
a)





Rys. 5. a) narzędzia do procesu wyciskania w płaskim stanie odkształcenia, b) stanowisko badawcze

Krzywa umocnienia wybranej mieszanki wosku filia z dodatkami 20% kaolinu, której charakter jest zbliżony do krzywej umocnienia aluminium przedstawiono na rys. 6. Mieszanka ta zostanie zastosowana do modelowania fizycznego procesu wyciskania aluminium.



Rys. 6. Krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie wyznaczone w próbie spęczania dla mieszanki filii z 20 % kaolinu oraz dla aluminium umocnionego przy prędkości odkształcania $0,01 \text{ s}^{-1}$ (lewa skala dotyczy aluminium, prawa materiałów modelowych)

4.2. Program ćwiczenia

Ćwiczenie wymaga realizacji następujących zadań:

- Dobór i określenie właściwości materiału rzeczywistego.
- Dobór i przygotowanie materiału modelowego o charakterystyce odpowiadającej materiałowi rzeczywistemu.
- Badania doświadczalne i analiza procesu wyciskania przy użyciu materiału modelowego.
- Badania doświadczalne i analiza procesu wyciskania materiału rzeczywistego.
- Określenie warunków podobieństwa materiału modelowego i rzeczywistego ze wzoru (1).
- Wyznaczenie wpływu warunków podobieństwa materiałów rzeczywistego i modelowego na dokładność odwzorowania procesów rzeczywistych modelem opracowanym dla materiału modelowego poprzez porównanie siły wyciskania obu rodzajów materiałów. Siły wyciskania materiału modelowego zostały przeliczone na siły występujące w procesie rzeczywistym przy użyciu wzoru (1).
- Opracowanie zasad, warunków i zakresu zastosowania modelowania przy użyciu materiałów modelowych do projektowania rzeczywistych procesów kształtowania plastycznego.

5. Wytyczne do opracowania wyników pomiarów i sprawozdania

Przy opracowywaniu sprawozdania należy podać współczynnik podobieństwa materiału modelowego i rzeczywistego. Omówić sposób wyciskania materiału modelowego i rzeczywistego. Uzasadnić różnice pomiędzy wynikami otrzymanymi z modelowania fizycznego w stosunku do procesu rzeczywistego.

Tabl.1. Wyniki pomiarów i obliczeń

Materiał	Prędkość odkształcania	Temperatura	Współczynnik podobieństwa	Siły wyciskania	Uwagi
	$\dot{\epsilon}$ s ⁻¹	T K	C	ΔP	
modelowy					
rzeczywisty					

W sprawozdaniu należy ponadto zamieścić:

- warunki prowadzenia prób (materiał rzeczywisty, materiał modelowy, krzywe umocnienia materiału rzeczywistego i modelowego, stopień redukcji przekroju, prędkość i temperatura odkształcania, przebiegi siły wyciskania w funkcji drogi stempla
- wnioski i spostrzeżenia.

Literatura

1. Wanheim T.: *Physical modelling of metalprocessing*. Procestechincs Institut, Laboratories for Mekaniske Materialeprocesser, Danmarks Teknisk Hojkole, Danmark 1988.
2. Arentoft M., Gronostajski Z., Niechajowicz A. i Wanheim T.: *Physical and*

- mathematical modelling of extrusion processes*, J. of Mat. Proc. Techn., 106, 2000, 2-7.
3. Arentoft M., Henningsen P., Baya N., Wanheim T.: *Simulation of defects in metal forming. An example*, Proc. of 5th Int. Conf. On Metal Forming, Birmingham, 1994, 527-532.
 4. Finer S., Kivivuori S., Kleemola H.: *Mechanical and thermal properties of model materials. Part 1*, Model wax (Filia), Mekaniska och Termiska Egenskaberav Modellmaterial, Del.1: Modellvaxet Fila Report Metall Lab. Metallmansgraeden 4 022150 Espoo 15, Finland v. 16 No. 4, 39, 1982.
 5. Gronostajski Z., Hawryluk M.: Wpływ warunków podobieństwa w zakresie plastycznym na modelowanie osiowo symetrycznego wyciskania przeciwbieżnego, FiMM, 2003, Warszawa, 2003, 25-31.
 6. Finčr, S.; Kivivuori, S.; Kleemola, H.: Stress-Strain Relationships of Wax-based Model Materials, Journal of Mechanical Working Technology, V.. 12, No. 2, 269-277.

